



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη έξυπνου IoT συστήματος αισθητήρων για
απομακρυσμένη επιτήρηση διάταξης υδροπονίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Α. Στάμου

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη έξυπνου IoT συστήματος αισθητήρων για
απομακρυσμένη επιτήρηση διάταξης υδροπονίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Στάμου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2022.

.....

Ευάγγελος
Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννης
Γκόνος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παναγιώτης
Τσαραμπάρης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022

.....

Γεωργία Α. Στάμου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεωργία Στάμου, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η συνεχόμενη αύξηση του ανθρωπίνου πληθυσμού εγείρει το πρόβλημα της διαθεσιμότητας των τροφίμων σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ), ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να φτάσει τα 9,1 δισεκατομμύρια έως το 2050, οδηγώντας σε αντίστοιχη αύξηση της παραγωγή τροφίμων κατά 25% έως 70%. Υπό αυτό το πρίσμα, αναζητούνται όλο και περισσότερο εναλλακτικές τεχνολογίες καλλιέργειας τροφίμων υψηλής απόδοσης και λιγότερου απαιτούμενου χρόνου παραγωγής. Μία τέτοια τεχνολογία με δυναμική πλέον παρουσία στην παγκόσμια αγορά αποτελεί η υδροπονία, η οποία εξασφαλίζει καλλιέργεια τροφίμων σε ελεγχόμενο περιβάλλον, λιγότερες απαιτήσεις σε νερό και υψηλότερες αποδόσεις.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής και με γνώμονα όλα τα παραπάνω, αναπτύχθηκε ένα «έξυπνο» ενσωματωμένο σύστημα απομακρυσμένης επιτήρησης μιας διάταξης υδροπονίας Τεχνικής Λεπτού Στρώματος Θρεπτικού Διαλύματος (Nutrient Film Technique - NFT) με τη χρήση της τεχνολογίας IoT. Συγκεκριμένα, το εν λόγω σύστημα περιλαμβάνει ένα σύνολο αισθητήρων, συνδεδεμένων σε έναν μικροελεγκτή, ο οποίος παρέχει σε πραγματικό χρόνο στο χρήστη τα λαμβανόμενα δεδομένα σχετικά με το περιβάλλον ανάπτυξης των φυτών μέσω μιας διαδικτυακής πλατφόρμας. Με αυτό τον τρόπο, εξασφαλίζεται η αυτοματοποίηση της παραγωγής της μεθόδου της υδροπονίας, παρέχοντας παράλληλα τον πλήρη έλεγχο της ανάπτυξης στο χρήστη σε οποιοδήποτε σημείο της γης.

Λέξεις-κλειδιά: Υδροπονία, IoT, Ενσωματωμένο Σύστημα, ESP32, Αισθητήρες

Abstract

The continuous growth of the human population raises the problem of food availability at a global level. According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (UN), the world population is expected to reach 9.1 billion by 2050, leading to a corresponding increase in food production of 25% to 70%. In this respect, alternative technologies for growing food with high yield and less production time are increasingly being sought. One such technology with a dynamic presence in the global market is hydroponics, which ensures food cultivation in a controlled environment, less water requirements and higher yields.

In the context of this diploma thesis and with all the above in mind, an "intelligent" integrated remote monitoring system of a Nutrient Film Technique (NFT) hydroponic setup was developed using IoT technology. In particular, this system includes a set of sensors, connected to a microcontroller, which provides the received data about the plant growth environment in real time to the user through an online platform. In this way, the automation of the production of the hydroponic method is ensured, while providing full control of the plants' growth to the user everywhere in the world.

Keywords: Hydroponics, IoT, Embedded System, ESP32, Sensors

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ευκαιρία που μου έδωσε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για την καθοδήγησή του. Ευχαριστώ επίσης τους καθηγητές κ. Ι. Γκόνο και κ. Π. Τσαραμπάρη για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τις συμβουλές τους. Οφείλω επιπλέον να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον μεταδιδακτορικό ερευνητή Σπύρο Αγγελόπουλο για τη διαρκή καθοδήγηση και τη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς και για την ενθάρρυνση και τον χρόνο που αφιέρωσε σε αυτή. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω βαθύτατα όλους τους φίλους μου, που με το δικό του τρόπο ο καθένας, με ενθάρρυναν, με στήριζαν και ήταν δίπλα μου στις ευχάριστες και στις δύσκολες στιγμές. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τους γονείς μου Αντώνη και Βασιλική, καθώς και τα αδέρφια μου Αναστασία και Βασίλη για την πολύτιμη βοήθειά τους και τη διαρκή στήριξή τους σε κάθε μου προσπάθεια όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Abstract	v
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	ix
Ευρετήριο Σχημάτων.....	xiii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Η μέθοδος της Υδροπονίας.....	1
1.1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	1
1.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	3
1.2 Αναγκαιότητα Αυτοματοποίησης.....	4
1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας	5
1.4 Διάρθρωση Εργασίας	6
Κεφάλαιο 2 Περί Υδροπονίας.....	7
2.1 Μέσο ανάπτυξης του φυτού.....	7
2.2 Είδη Υδροπονίας.....	7
2.2.1 Τεχνική Λεπτού Στρώματος Θρεπτικού Διαλύματος	8
2.2.2 Καλλιέργεια Βαθέος Ύδατος	9
2.2.3 Μέθοδος του φυτλιού.....	10
2.2.4 Σύστημα Πλημμύρας και Αποστράγγισης	11
2.2.5 Σύστημα Στάγδην Άρδευσης	12
2.2.6 Συστήματα Αεροπονίας.....	13
2.2.7 Μέθοδος Εναιωρήματος Νερού	14
Κεφάλαιο 3 Ενσωματωμένα Συστήματα και IoT	15

3.1	Ενσωματωμένα Συστήματα (Embedded Systems).....	15
3.2	Μικροεπεξεργαστές - Μικροελεγκτές.....	18
3.3	Μικροελεγκτής ESP32.....	19
3.4	Internet of Things.....	21
3.4.1	Αρχιτεκτονική του IoT.....	23
3.5	Πρωτόκολλα Επικοινωνίας.....	24
3.5.1	Wi-Fi.....	26
3.5.2	Bluetooth.....	26
3.5.3	LoRa.....	27
3.6	Blynk.....	27
Κεφάλαιο 4 Αισθητήρες.....		29
4.1	Αισθητήρες Θερμοκρασίας.....	29
4.1.1	Αισθητήρες τύπου αντίστασης ή RTD.....	30
4.1.2	Θερμίστορ.....	32
4.1.3	Θερμοζεύγη.....	34
4.1.4	Ολοκληρωμένα κυκλώματα IC μέτρησης θερμοκρασίας.....	35
4.1.5	Αισθητήρες υπερύθρων.....	36
4.2	Αισθητήρες Θερμοκρασίας - Υγρασίας.....	36
4.3	Αισθητήρες Μέτρησης pH.....	38
4.4	Αισθητήρες Μέτρησης Total Dissolved Solids (TDS).....	40
4.5	Αισθητήρας Φωτός.....	41
4.5.1	Φωτοαντίσταση.....	42
4.5.2	Φωτοдиодος.....	43
4.5.3	Φωτοτρανζίστορ.....	44
Κεφάλαιο 5 Στοιχεία Πειραματικής Διάταξης.....		45
5.1	Επιλογή Υλικών Στοιχείων της Διάταξης.....	45
5.1.1	Επιλογή Μικροελεγκτή.....	45
5.1.2	Επιλογή Αισθητήρων Ελέγχου του Περιβάλλοντος.....	48
5.1.2.1	Επιλογή Αισθητήρα Θερμοκρασίας - Υγρασίας.....	48
5.1.2.2	Επιλογή Αισθητήρα Μέτρησης Φωτεινότητας.....	49

5.1.3	Επιλογή Αισθητήρων Μέτρησης Ποιότητας του Διαλύματος.....	50
5.1.3.1	Επιλογή Αισθητήρα Θερμοκρασίας Διαλύματος	50
5.1.3.2	Επιλογή Αισθητήρα Μέτρησης pH Διαλύματος.....	51
5.1.3.3	Επιλογή Αισθητήρα μέτρησης EC	52
5.1.4	Επιλογή Φωτισμού LED	52
5.1.5	Επιλογή Αντλιών	53
5.1.6	Επιλογή Μέσου Τροφοδοσίας	55
5.1.7	Συνολική Οργάνωση Συστήματος Hardware.....	56
5.1.8	Προστασία Συστήματος Hardware	60
5.2	Επιλογή Λογισμικού της Διάταξης.....	60
5.2.1	Χρήση Βιβλιοθηκών	62
5.3	Διάταξη υδροπονίας NFT	70
Κεφάλαιο 6 Πειραματική Διαδικασία		75
6.1	Ανάπτυξη του Συστήματος και Βαθμονόμηση Αισθητήρων	75
6.2	Τοποθέτηση Φυτών	80
6.3	Μετρήσεις - Αποτελέσματα	80
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα		85
7.1	Αξιολόγηση του Συστήματος.....	85
7.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	88
Βιβλιογραφία		91

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Υδροπονική καλλιέργεια [3].....	1
Σχήμα 2: Η υδροπονία στην αγορά ανά καρπό στο διάστημα 2018-2028 [5]..	2
Σχήμα 3: Εφαρμογή IoT στη Γεωργία (θερμοκήπια) [12].	5
Σχήμα 4: Σύστημα Υδροπονίας [14].	8
Σχήμα 5: Διάταξη NFT [16].....	8
Σχήμα 6: Σύστημα Deep Water Culture [19].	9
Σχήμα 7: Σύστημα Wick [20].	10
Σχήμα 8: Σύστημα Ebb and Flow [21].....	11
Σχήμα 9: Σύστημα Στάγδην Άρδευσης Υδροπονίας [22].....	12
Σχήμα 10: Σύστημα Aerponics [23].....	13
Σχήμα 11: Σύστημα Fogponics [24].	14
Σχήμα 12: Εφαρμογές Ενσωματωμένων Συστημάτων [27].	15
Σχήμα 13: Αρχιτεκτονική ενός ενσωματωμένου συστήματος.	16
Σχήμα 14: Ενσωματωμένο Σύστημα (α) και τα χαρακτηριστικά του (β) [29].	17
Σχήμα 15: Σύγκριση επεξεργαστικών πλατφορμών [30].....	17
Σχήμα 16: Δομή ενός Μικροελεγκτή [32].....	18
Σχήμα 17: Αλληλεπίδραση CPU με τις υπόλοιπες δομές [32].	19
Σχήμα 18: Πλακέτα ESP32 και τα χαρακτηριστικά της [33].	19
Σχήμα 19: Block Diagram (α) και Pinout Diagram (β) [31]	21
Σχήμα 20: Internet of Things [12].....	22
Σχήμα 21: Ταχύτατη αύξηση του αριθμού των διασυνδεδεμένων συσκευών [39].	23
Σχήμα 22: Αρχιτεκτονική του IoT.	23
Σχήμα 23: Μία ακόμη αρχιτεκτονική του IoT.	24
Σχήμα 24: Πρωτόκολλα Επικοινωνίας IoT [42].	25
Σχήμα 25: Πρωτόκολλα επικοινωνίας IoT [43].	26
Σχήμα 26: Λογότυπο Wi-Fi [12].....	26
Σχήμα 27: Λογότυπο Bluetooth [12].....	27
Σχήμα 28: Λογότυπο LoRa [12].....	27
Σχήμα 29: Blynk Interface [44].	28

Σχήμα 30: Αισθητήριο στοιχείο και κέλυφος [45].	29
Σχήμα 31: Διάγραμμα μεταβολής του ρ/ρ_0 μετάλλων συγκριτικά με τη θερμοκρασία [46].	31
Σχήμα 32: Αισθητήρας RTD [48].	32
Σχήμα 33: Μεταβολή Αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας για διατάξεις RTD, NTC, PTC [45].	33
Σχήμα 34: Λειτουργία θερμοζεύγους [49].	34
Σχήμα 35: Ολοκληρωμένο LM75 με ενσωματωμένο κύκλωμα γραμμικοποίησης και μονάδα A/D [45].	36
Σχήμα 36: Η εσωτερική δομή του αισθητήρα υγρασίας [51].	37
Σχήμα 37: Αισθητήρα μέτρησης υγρασίας - θερμοκρασίας εσωτερικά [52].	38
Σχήμα 38: Ηλεκτρόδιο pH [45].	39
Σχήμα 39: Τιμές TDS για διαφορετικά δείγματα νερού [53].	40
Σχήμα 40: Λειτουργία αισθητήρα TDS [53].	41
Σχήμα 41: Αισθητήρας TDS [54].	41
Σχήμα 42: Ενεργειακά πεδία μετάβασης φορέων κατά την πρόσπτωση [55].	42
Σχήμα 43: Δομή φωτοαντίστασης [45].	43
Σχήμα 44: Δομή στοιχείο φωτοδιόδου και ηλεκτρονικό σύμβολο [45].	43
Σχήμα 45: Φωτοτρανζίστορ και τρόπος συνδεσμολογίας [34].	44
Σχήμα 46: Διάγραμμα των pins του ESP32 WeMos LOLIN32 [56].	46
Σχήμα 47: Σχηματικό Διάγραμμα WeMos LOLIN32 [57].	47
Σχήμα 48: Αισθητήρας Θερμοκρασίας - Υγρασίας και οι διαστάσεις του [48].	48
Σχήμα 49: Αισθητήρας Φωτεινότητας και οι διαστάσεις του [60].	49
Σχήμα 50: Αισθητήρας Φωτεινότητας [61].	49
Σχήμα 51: Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20 [63].	50
Σχήμα 52: Αισθητήρας Μέτρησης pH [64].	51
Σχήμα 53: Αισθητήρας TDS DFRobot [54].	52
Σχήμα 54: LED Ring RGB [67].	53
Σχήμα 55: Αντλία Διοχέτευσης Διαλύματος (α) και αντλία προσθήκης υγρού στο θρεπτικό διάλυμα (β) [67].	53
Σχήμα 56: Σχηματικό κυκλώματος διακόπτη αντλιών με MOSFET.	54
Σχήμα 57: Τροφοδοτικό Συστήματος (α) και υποβαθμιστές τάσης (β) [65].	55
Σχήμα 58: Hardware συστήματος υδροπονίας τοποθετημένο σε πλακέτα.	57

Σχήμα 59: Πλακέτα - τροφοδοτικό - αντλίες.....	58
Σχήμα 60: Συνδεσμολογία πλακέτας.....	58
Σχήμα 61: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του συστήματος.....	59
Σχήμα 62: Η συσκευασία της πλακέτας.	60
Σχήμα 63: Blynk Web Dashboard.	61
Σχήμα 64: Δομή κώδικα Συστήματος.	63
Σχήμα 65: Σύστημα Σωλήνων για την Υδροπονία.	70
Σχήμα 66: Τοποθέτηση net pots (α) και μέσου αποστράγγισης (β).....	71
Σχήμα 67: Λεκάνη Διαλύματος (α) συνδεδεμένη με τα διαλύματα μέσω αντλιών (β).	72
Σχήμα 68: Σωληνάκια Ø6 mm συνδεδεμένα στο σωλήνα Ø20 mm για παροχή διαλύματος στα κανάλια (α) και παροχή σε κάθε κανάλι (β).	72
Σχήμα 69: Όξινο Διάλυμα (α), Βασικό Διάλυμα (β), Υγρό Λίπασμα (γ) [69], [68].	73
Σχήμα 70: Συνδέσεις πλακέτας.	76
Σχήμα 71: Σωλήνες του συστήματος υδροπονίας.	76
Σχήμα 72: Συνολικό Αυτόματο Σύστημα Υδροπονίας.....	77
Σχήμα 73: Αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου IoT συστήματος αυτόματης υδροπονίας.	79
Σχήμα 74: Μαρούλι τοποθετημένο σε net pot.	80
Σχήμα 75: Πρώτη ημέρα ανάπτυξης μαρουλιών.	81
Σχήμα 76: Γραφική Παράσταση μεταβολής pH συναρτήσει του χρόνου.	82
Σχήμα 77: Γραφική Παράσταση μεταβολής θερμοκρασίας διαλύματος συναρτήσει του χρόνου.....	82
Σχήμα 78: Γραφική Παράσταση μεταβολής TDS συναρτήσει του χρόνου. ...	82
Σχήμα 79: Τελευταία ημέρα Ανάπτυξης Μαρουλιών.....	83
Σχήμα 80: Σύγκριση Ανάπτυξης από την πρώτη ως την τελευταία μέρα.	83
Σχήμα 81: Καλλιέργεια των μαρουλιών στο χώμα (α) και στη διάταξη υδροπονίας (β).....	88

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η μέθοδος της Υδροπονίας

Η υδροπονία αποτελεί μία καινοτόμο μέθοδο ανάπτυξης ενός φυτού μέσα σε υδάτινο περιβάλλον, πλούσιο σε απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, δίχως τη χρήση χώματος [1]. Ο όρος προκύπτει από τις ελληνικές λέξεις ύδωρ και πόνημα και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον William F. Gericke σε δημοσίευσή του το 1937 [2], ωστόσο είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στην εποχή αυτή δεδομένης της αποτελεσματικότητάς και της αποδοτικότητάς της.

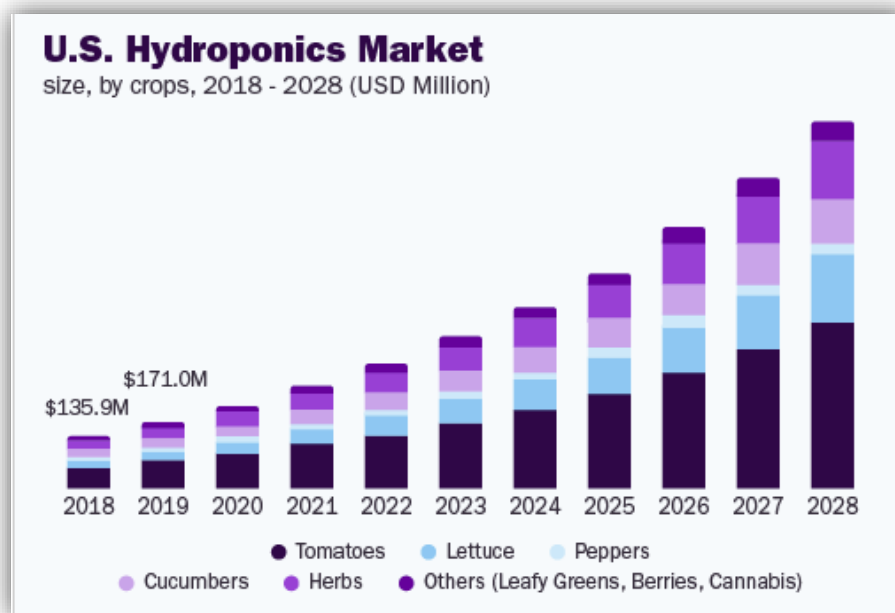


Σχήμα 1: Υδροπονική καλλιέργεια [3].

1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η τεχνική ανάπτυξης φυτών χρησιμοποιώντας ως βάση το νερό και όχι το χώμα χρονολογείται αιώνες πίσω με πολλούς ιστορικούς να διατείνονται πως οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας διέπονταν από τις αρχές της υδροπονίας. Ωστόσο, η πρώτη καταγεγραμμένη επιστημονική προσπάθεια τοποθετείται το 1699 από τον John Woodward, ενώ τον 19^ο αιώνα αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές καλλιέργειας χωρίς

την ύπαρξη χώματος, δίνοντας αργότερα τη σκυτάλη στον Gericke, να προωθήσει και να τεκμηριώσει μέσα από μια σειρά δημοσιεύσεων την ιδέα της χρήσης υδάτινων διαλυμάτων αντί για χώμα στην αγροτική παραγωγή [1], [4]. Αργότερα, και κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε από τον Αμερικανικό Στρατό σε άγονες εκτάσεις του Ειρηνικού Ωκεανού, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο εφοδιασμός των στρατευμάτων της περιοχής με τους καρπούς των καλλιεργειών αυτών [1]. Επιπλέον, τις τελευταίες δεκαετίες η NASA επιδίδεται σε μια σειρά υδροπονικών ερευνών στα πλαίσια του Συστήματος Ελεγχόμενης Οικολογικής Υποστήριξης Ζωής (Controlled Ecological Life Support System - CELSS), ώστε εκμεταλλευόμενη τις χαμηλές απαιτήσεις αυτής της τεχνολογίας σε χώρο και σε απαιτούμενους πόρους, καθώς και την αποτελεσματικότητά της, να δημιουργήσει ένα σύστημα υποστήριξης ζωής στο διάστημα, παράγοντας τροφή βιώσιμη στις συνθήκες χαμηλής βαρύτητας. Στη σύγχρονη εποχή, η υδροπονία αποτελεί μία ευρέως διαδεδομένη και ιδιαίτερος επικερδή μέθοδο αγροτικής παραγωγής με συνεχώς αναπτυσσόμενη πορεία και ισχυρή παρουσία στην παγκόσμια αγορά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2 ακολούθως. Στη χρονική περίοδο 2021-2028 ο σύνθετος ρυθμός ετήσιας ανάπτυξης για την αγορά της υδροπονίας προσδοκάται στο 20.7% [5].



Σχήμα 2: Η υδροπονία στην αγορά ανά καρπό στο διάστημα 2018-2028 [5].

1.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Είναι πλέον αποδεκτό πως τα υδροπονικά συστήματα αποτελούν έναν ιδιαίτερα ανταγωνιστικό αντίπαλο στον τομέα της αγροτικής παραγωγής, προσφέροντας πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι της παραδοσιακής μεθόδου ανάπτυξης φυτών στο χώμα. Αρχικά, χάρη σε αυτά δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης καρπών σε περιβάλλοντα με άγονο έδαφος όπου η μέθοδος του χώματος θα αποτύγγανε, ενώ επίσης καθιστούν εφικτή την καλλιέργεια και σε περιοχές όπου παρατηρείται ανεπάρκεια υδάτινων πόρων, αλλά ακόμη και σε περιόδους ξηρασίας [6]. Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται πως εκτός από τα ήδη υπάρχοντα προβλήματα περιορισμένων πόρων ύδρευσης σε ορισμένες περιοχές, προβλέπεται από τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα επιδείνωση του φαινομένου μελλοντικά, εγείροντας προβλήματα λειψυδρίας σε αρκετές περιοχές ανά τον κόσμο [7]. Παράλληλα με αυτό, και δεδομένων των προβλέψεων για αυξημένες ανάγκες παραγωγής τροφίμων, καθίσταται απαραίτητη η εύρεση βιώσιμων λύσεων, όπου οι υψηλοί δείκτες παραγωγή δεν θα συνοδεύονται από ανάλογη αυξημένη χρήση νερού [8]. Στο πλαίσιο αυτό, λοιπόν δίδεται ιδιαίτερη έμφαση σε μεθόδους καλλιεργειών, όπου επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού. Η σημαντικότερη από αυτές είναι η υδροπονία. Οι απαιτήσεις εκεί των φυτών σε νερό είναι αρκετά λιγότερες δεδομένου ότι διατηρούνται υψηλότερα επίπεδα υγρασίας στον περιβάλλοντα αέρα των φυτών, ελαττώνοντας τη διαδικασία της διαπνοής στην επιφάνεια των φύλλων [6]. Ένα επιπρόσθετο στοιχείο, το οποίο δίνει προβάδισμα στην υδροπονία αποτελεί η απουσία φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων κατά την καλλιέργεια σε σχέση με το χώμα, επιτρέποντας την ανάπτυξη διατροφικά πιο ασφαλών καρπών, που δεν θα βλάπτουν την υγεία των καταναλωτών [9]. Με αυτό τον τρόπο τροχοπεδείται και κάθε είδους μόλυνση του εδάφους που θα μπορούσε να επισυμβεί με την αντίστοιχη χρήση χημικών σκευασμάτων στα φυτά. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα, ωστόσο, της υδροπονίας είναι πως όλα τα φυτά αναπτύσσονται σε ένα πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον, όπου η διαδικασία της ανάπτυξης υλοποιείται υπό αυστηρή επιτήρηση των συνθηκών της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του pH, των διαλυμένων σωματιδίων του θρεπτικού διαλύματος κ.α. [1]. Μάλιστα, τις περισσότερες φορές τα συστήματα υδροπονίας τοποθετούνται μέσα σε κλειστά περιβάλλοντα, τα θερμοκήπια, όπου η καλλιέργεια είναι ισχυρά ελεγχόμενη μεγιστοποιώντας την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων [9]. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το κόστος αρχικής εγκατάστασης ενός συστήματος

υδροπονίας αποδεικνύεται σχετικά υψηλό, ενώ απαιτείται συστηματικότερος έλεγχος των συνθηκών του νερού που παρέχεται στα φυτά (όταν αυτό γίνεται χειροκίνητα), καθώς η αντίδραση των φυτών σε οποιαδήποτε μεταβολή του είναι ταχύτατη. Στην περίπτωση δε, όπου ο έλεγχος του παρεχόμενου νερού γίνει μέσω κάποιου αυτόματου συστήματος επιτήρησης απαιτείται υψηλή ακρίβεια και προσοχή, ώστε να λαμβάνονται οι σωστές μετρήσεις και να τελείται ο κατάλληλος έλεγχος [1].

1.2 Αναγκαιότητα Αυτοματοποίησης

Το περιβάλλον ανάπτυξης ενός φυτού υδροπονίας πρέπει να χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας, pH, από συγκεκριμένες ποσότητες μίγματος θρεπτικών συστατικών. Η διατάραξη όλων των παραπάνω μπορεί να προκαλέσει ακόμη και την καταστροφή του φυτού σε πολύ γρήγορο χρονικό διάστημα. Ως εκ τούτου, η διαρκής επιτήρηση και ο έλεγχος των συνθηκών του θερμοκηπίου όπου συνήθως γίνεται η ανάπτυξη, αλλά και της κατάστασης και σύστασης του νερού που διοχετεύεται στα φυτά, κρίνεται ζωτικής σημασίας. Προκειμένου αυτή η επιτήρηση να είναι σταθερή, ακριβής, διαρκής και αξιόπιστη κρίνεται αναγκαίο να αναπτυχθούν συστήματα αυτοματισμού που θα αναλαμβάνουν να ελέγχουν όλα τα παραπάνω διαδραματίζοντας σημαντικότατο ρόλο για τη διατήρηση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων [10]. Σαφέστατα, λοιπόν δημιουργείται μία σχέση αλληλεξάρτησης μεταξύ της αγροτικής ανάπτυξης και της χρήσης της τεχνολογίας στο χώρο αυτό. Εγείρεται, λοιπόν, η ανάγκη δημιουργίας συστημάτων αισθητήρων, οι οποίοι επιτηρούν το σύστημα υδροπονίας παρέχοντας στον ιδιοκτήτη όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατάσταση υγείας των φυτών, αλλά και αναδρώντας όπου απαιτείται, μεγιστοποιώντας έτσι την ποιότητα και το κέρδος. Επιπλέον, κάνοντας χρήση ασυρμάτων δικτύων, παρέχεται η ευελιξία στο χρήστη να έχει εποπτεία της παραγωγής του απομακρυσμένα και ανά πάσα στιγμή, χωρίς να απαιτείται η διαρκής παρουσία του στο χώρο ανάπτυξης των φυτών [11]. Η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) στον τομέα της γεωργίας και συγκεκριμένα στη μέθοδο της υδροπονίας αποτελεί μία καινοτόμα επιλογή, μετατρέποντας τα θερμοκήπια σε έξυπνα περιβάλλοντα τα οποία μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα, αλλά κυρίως να ελέγχονται με βέλτιστο τρόπο οι συνθήκες λειτουργίας τους, μεγιστοποιώντας την παραγωγή με κάθε τρόπο (Σχήμα 3) [9].



Σχήμα 3: Εφαρμογή IoT στη Γεωργία (θερμοκήπια) [12].

1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ενσωματωμένου συστήματος ελέγχου σε πραγματικό χρόνο ενός θερμοκηπίου υδροπονίας, αξιοποιώντας την τεχνολογία του IoT. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναπτύχθηκε ένα έξυπνο σύστημα πολύ-αισθητήρων, το οποίο επιτηρεί τις συνθήκες του θερμοκηπίου, όπως είναι η υγρασία, η θερμοκρασία, το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού κ.α. Επιπροσθέτως, είναι διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί τις συνθήκες αυτές στις επιτρεπόμενες τιμές για την αποδοτικότερη λειτουργία, προσθέτοντας στο νερό τα απαραίτητα διαλύματα με αυτοματοποιημένο τρόπο καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Επί παραδείγματι, έπειτα από τον έλεγχο των διαφόρων συνθηκών που αναφέρθηκαν παραπάνω όπως ο έλεγχος της τιμής του pH, ακολουθούν οι αναγκαίες ενέργειες διατήρησής του σε ένα εύρος τιμών αποδεκτό για το αντίστοιχο φυτό που καλλιεργείται, προσθέτοντας όπου χρειάζεται είτε όξινο, είτε βασικό διάλυμα, έπειτα από τον κατάλληλο προγραμματισμό του ενσωματωμένου συστήματος. Επιπρόσθετα, οι διάφορες τιμές των αισθητήρων είναι προσβάσιμες από τον χρήστη απομακρυσμένα μέσω δικτύου, χωρίς να απαιτείται κάποιου είδους επικοινωνίας ανθρώπου με άνθρωπο είτε ανθρώπου-μηχανής. Επιπλέον, μέσω του δικτύου ο χρήστης μπορεί, όχι μονάχα να επιβλέπει, αλλά και να ενεργοποιεί είτε να απενεργοποιεί συσκευές που χρησιμοποιούνται στην υδροπονία σε περιπτώσεις που αυτό κρίνεται σκόπιμο (π.χ. αντλίες). Πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύστημα IoT,

όπου η υδροπονική παραγωγή εξελίσσεται απρόσκοπτα και με αυτόματο τρόπο, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να επιτηρεί και να καθορίζει το σύστημα αυτό, από οπουδήποτε στον κόσμο μεταβιβάζοντας τα απαραίτητα δεδομένα μέσω πρωτοκόλλου του Διαδικτύου (Internet Protocol - IP).

1.4 Διάρθρωση Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε 7 Κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1, πραγματοποιείται μία εισαγωγή στο θέμα, παρουσιάζοντας τη μέθοδο της υδροπονίας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, ενώ παράλληλα επισημαίνεται η αναγκαιότητα αυτοματοποίησης τέτοιων συστημάτων θέτοντας τους στόχους της εργασίας αυτής, ενώ τέλος καταγράφεται η δομή της Εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται οι διάφορες υπάρχουσες μέθοδοι ανάπτυξης του φυτού με τη μέθοδο της υδροπονίας. Στο Κεφάλαιο 3, επεξηγούνται βασικές θεωρητικές έννοιες σχετικά με τα ενσωματωμένα συστήματα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) και τα διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας, ως θεωρητικό υπόβαθρο για την προσέγγιση και ανάπτυξη του προς μελέτη συστήματος. Το Κεφάλαιο 4, παρέχει μία επισκόπηση στους αισθητήρες και τα είδη τους, που θα διερευνηθούν για τη χρησιμοποίησή τους στο σύστημα που θα αναπτυχθεί. Στο Κεφάλαιο 5 αναλύονται οι επιλογές που έγιναν σε επίπεδο Υλικού (Hardware) και Λογισμικού (Software) κατά την υλοποίηση του συστήματος, καθώς και οι επιλογές όλων των στοιχείων ανάπτυξης της υδροπονικής διάταξης. Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε σε πρακτικό επίπεδο για την σχεδίαση, υλοποίηση, και την αξιολόγηση του τελικού συστήματος, ενώ παρουσιάζονται και οι μετρήσεις που λήφθηκαν και τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7, συνοψίζεται και αξιολογείται η παρούσα εργασία θέτοντας ορισμένες κατευθύνσεις και μελλοντικές επεκτάσεις για την εξέλιξη του συγκεκριμένου συστήματος.

Κεφάλαιο 2

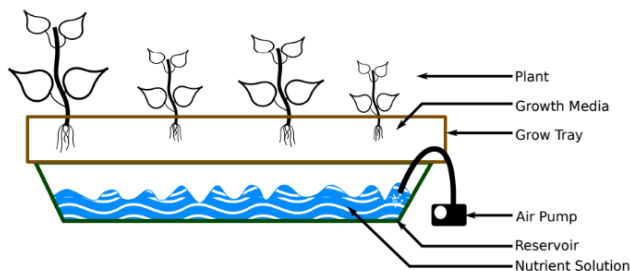
Περί Υδροπονίας

2.1 Μέσο ανάπτυξης του φυτού

Παρά το γεγονός πως τα φυτά υδροπονίας δεν αναπτύσσονται στο χώμα, χρειάζονται κάποιο μέσο στήριξης, με το οποίο θα εξασφαλίζεται παράλληλα η διοχέτευση της «τροφής» τους από το υδατικό θρεπτικό διάλυμα, αλλά και οξυγόνου στις ρίζες τους. Το μέσο ανάπτυξης αυτό μπορεί να έχει τη μορφή κόκκων, όπως είναι η διογκωμένη άργιλος και ο περλίτης, είτε να έχει τη μορφή αφρώδους πλέγματος, όπως ο πετροβάμβακας, είτε ακόμη να έχει τη μορφή ινώδους οργανικής ύλης, όπως ο κοκοφοίνικας και ο φλοιός πεύκου. Ανάλογα με τον τύπο του συστήματος υδροπονίας και το είδος του φυτού που θα επιλεγεί λαμβάνεται και η απόφαση για την επιλογή του κατάλληλου υποστρώματος. Σε όλες τις περιπτώσεις όμως δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα το υπόστρωμα να διατηρεί την απαιτούμενη υγρασία γύρω από τις ρίζες του φυτού χωρίς να εμποδίζει τη διέλευση οξυγόνου σε αυτό. Κύριο πλεονέκτημα αυτών των υποστρωμάτων έναντι του χώματος αποτελεί το γεγονός πως το φυτό μέσω των ριζών του διαθέτει άμεση πρόσβαση στα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά χωρίς να «δαπανά ενέργεια» προκειμένου να τα βρει όπως γίνεται στο χώμα, ενώ μάλιστα το φυτό διατηρείται πιο υγιές, μειώνοντας τον κίνδυνο καταστροφής του από διάφορα παράσιτα [13].

2.2 Είδη Υδροπονίας

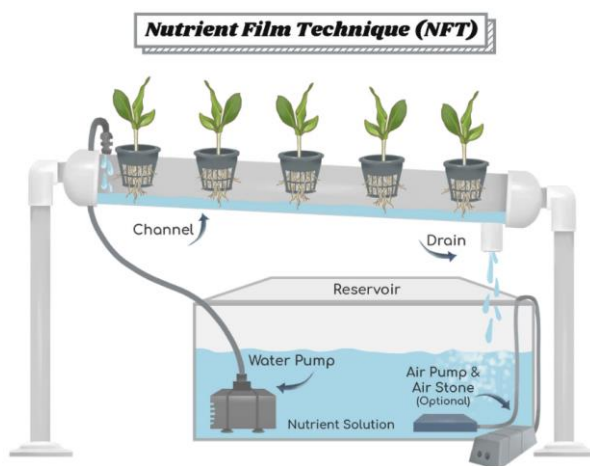
Γενικότερα, υπάρχουν πάρα πολλά είδη υδροπονίας, με τη γενική αρχή λειτουργίας τους να απεικονίζεται στο Σχήμα 4. Ωστόσο όλα αυτά με πολύ μικρές διαφοροποιήσεις κατατάσσονται στις ακόλουθες 7 κατηγορίες.



Σχήμα 4: Σύστημα Υδροπονίας [14].

2.2.1 Τεχνική Λεπτού Στρώματος Θρεπτικού Διαλύματος

Η Τεχνική Λεπτού Στρώματος Θρεπτικού Διαλύματος (Nutrient Film Technique-NFT) αφορά πρακτικά ένα ανακυκλούμενο σύστημα υδροπονίας, όπου το απαραίτητο θρεπτικό διάλυμα για το εκάστοτε φυτό ξεκινά από ένα δοχείο και μέσω μιας αντλίας διαρρέει το κάτω μέρος των ριζών του και ακολούθως επιστρέφει στη δεξαμενή από την οποία ξεκίνησε. Τα φυτά, λοιπόν, προσλαμβάνουν το θρεπτικό διάλυμα μόνο μέσω του κάτω τμήματος των ριζών επιτρέποντας παράλληλα την πρόσβαση του οξυγόνου σε αυτό. Τα φυτά συγκρατούνται σε ειδικά κανάλια - σωλήνες τα οποία έχουν μία μικρή κλίση κατά μήκος τους, προκειμένου το νερό να διαρρέει όλο το μήκος του καναλιού προτού αποστραγγιστεί στη δεξαμενή [15], [14]. Στο σύστημα αυτό απαιτείται μία αντλία, η οποία λαμβάνει το νερό με τα απαραίτητα συστατικά από τη δεξαμενή και το διοχετεύει σε κάθε κανάλι, στο τέλος του οποίου γίνεται αποστράγγιση και επιστρέφει το υγρό πάλι στη δεξαμενή. Εποπτικά μία διάταξη NFT παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



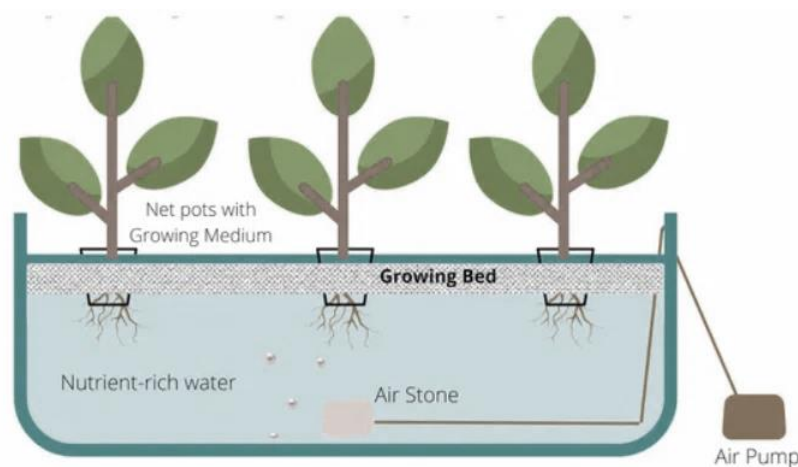
Σχήμα 5: Διάταξη NFT [16].

Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής αποτελεί η εξοικονόμηση του νερού, δεδομένου πως το νερό ανακυκλώνεται από τη δεξαμενή μέσω της αντλίας και των καναλιών. Επιπλέον, δεδομένου πως το νερό ρέει διαρκώς στο εσωτερικό κάθε καναλιού καθίσταται δυσκολότερο να αναπτυχθούν άλατα στις ρίζες των φυτών [15]. Μάλιστα, ένα τέτοιο σύστημα είναι ιδανικό για εγκαταστάσεις μεγάλου μεγέθους και εύκολα επεκτάσιμο σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Ωστόσο, ενέχει ο κίνδυνος με μία δυσλειτουργία στην αντλία να καταστραφεί ταχύτατα ο καρπός. Παράλληλα πρέπει να τίθεται πολύ μεγάλη προσοχή στο επίπεδο της στάθμης του νερού, που θα ρέει σε κάθε κανάλι, ώστε από τη μία να είναι επαρκές για τα φυτά και να προσλαμβάνουν τα θρεπτικά συστατικά από τις ρίζες που θα έρχονται σε επαφή με αυτό, αλλά και να μην είναι υπερβολική η στάθμη του εμποδίζοντας το φυτό να αναπνέει ομαλά [17].

2.2.2 Καλλιέργεια Βαθούς Ύδατος

Στην Καλλιέργεια Βαθούς Ύδατος (Deep Water Culture - DWC) τα φυτά βρίσκονται στην επιφάνεια μιας δεξαμενής με διάλυμα νερού πλούσιο σε οξυγόνο και θρεπτικά συστατικά. Τα φυτά είναι τοποθετημένα πάνω σε μία επιφάνεια, η οποία επιπλέει και οι ρίζες τους είναι βυθισμένες στο υγρό, έχοντας άμεση πρόσβαση στο θρεπτικό διάλυμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6. Η επιβίωση όμως των φυτών στην περίπτωση όπου το σύστημα των ριζών είναι διαρκώς βυθισμένο στο νερό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη του οξυγόνου [15]. Το τελευταίο παρέχεται στα φυτά μέσω μίας αντλίας η οποία είναι βυθισμένη στη δεξαμενή [18].

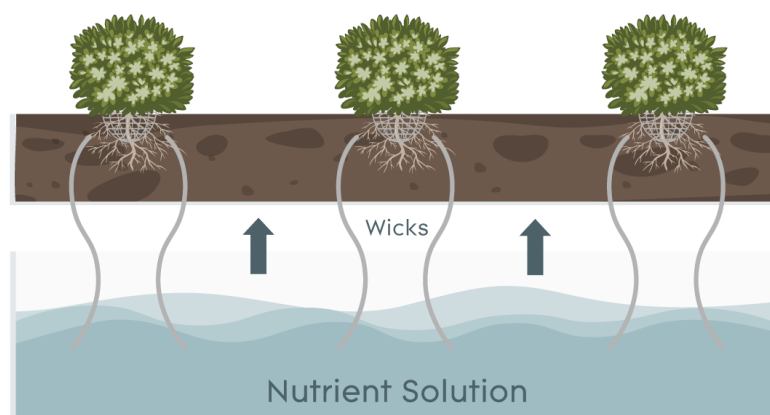


Σχήμα 6: Σύστημα Deep Water Culture [19].

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί μία από τις απλούστερες μεθόδους υδροπονίας, η οποία δεν απαιτεί ιδιαίτερο κόστος για την κατασκευή της και επιπλέον δεν κινδυνεύει όπως το NFT σύστημα από οποιαδήποτε δυσλειτουργία κάποιας αντλίας. Ωστόσο, το συγκεκριμένο σύστημα είναι κατάλληλο μόνο για φυτά, τα οποία αναπτύσσονται σε γρήγορο χρονικό διάστημα, ενώ δεν είναι εφαρμόσιμο για καλλιέργειες μεγάλης κλίμακας.

2.2.3 Μέθοδος του φυτιλιού

Η μέθοδος του φυτιλιού (Wick System) αποτελεί ένα παθητικό σύστημα όπου δεν απαιτούνται οποιαδήποτε μηχανικά μέρη για τη λειτουργία του. Στο σύστημα αυτό, τα φυτά τοποθετούνται σε ένα μέσο ανάπτυξης, το οποίο βρίσκεται πάνω από μία δεξαμενή που περιέχει νερό με θρεπτικά συστατικά και η επικοινωνία των δύο γίνεται μέσω σχοινιών, που ξεκινούν από τα φυτά και καταλήγουν στη δεξαμενή. Μέσω αυτών, τα φυτά προσλαμβάνουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την ανάπτυξη τους. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο τριχοειδές φαινόμενο, όπου η άκρη του σχοινιού που είναι βυθισμένη στη δεξαμενή με το νερό υφίσταται διαβροχή, το σχοινί λειτουργεί σαν τριχοειδής σωλήνας και παρατηρείται ανύψωση του υγρού ώσπου να καταλήξει στο άλλο άκρο του σχοινιού, όπου βρίσκεται το μέσο ανάπτυξης με τα φυτά. Είναι σημαντικό το υλικό ανάπτυξης των φυτών να είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει τη μεταφορά του νερού για αυτό χρησιμοποιούνται υλικά όπως ο κοκοφοίνικας, ο περλίτης και ο βερμικουλίτης [15]. Ένα Wick System απεικονίζεται στο Σχήμα 7.



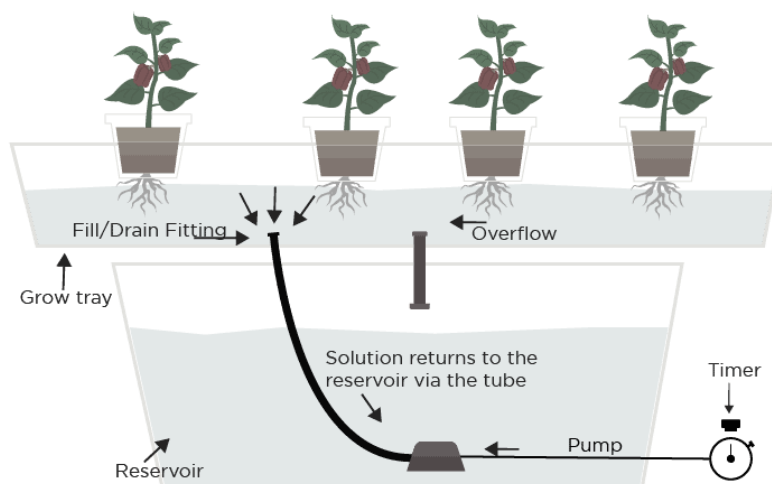
Σχήμα 7: Σύστημα Wick [20].

Το παραπάνω σύστημα έχει το πλεονέκτημα της ευκολίας κατασκευής, χωρίς να χρειάζεται διαρκής επίβλεψη και έλεγχος για περίπτωση ξηρασίας αφού θα τροφοδοτεί διαρκώς τα φυτά με νερό.

Ωστόσο, δεν ενδείκνυται για φυτά όπως η ντομάτα που έχουν μεγάλες ανάγκες σε νερό, που δεν μπορούν να καλυφθούν από το σχοινί, αλλά και για φυτά που δεν ενδείκνυται για διαρκή παρουσία σε υγρό περιβάλλον.

2.2.4 Σύστημα Πλημμύρας και Αποστράγγισης

Σε ένα Σύστημα Πλημμύρας και Αποστράγγισης (ebb and flow) τα φυτά τοποθετούνται σε κάποιο υπόστρωμα, το οποίο βρίσκεται πάνω από μία δεξαμενή με νερό εμπλουτισμένο με θρεπτικά στοιχεία. Στη δεξαμενή είναι τοποθετημένη μία αντλία νερού η οποία ενεργοποιείται μέσω ενός χρονοδιακόπτη και παρέχει κατά χρονικά διαστήματα μεγάλη ποσότητα νερού στα φυτά με το υπόστρωμα. Συγκεκριμένα, η αντλία ενεργοποιείται για κάποιο χρονικό διάστημα και παρέχει άφθονο νερό στα φυτά, έπειτα απενεργοποιείται για κάποιο χρονικό διάστημα και το νερό των φυτών αρχίζει να αποστραγγίζεται και να επιστρέφει στη δεξαμενή και ακολουθεί πάλι η ίδια διαδικασία [18]. Στη διάρκεια αυτού του κύκλου πλημμύρας - αποστράγγισης το φυτό είναι σε θέση να προσλάβει και τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά μέσω του νερού στο διάστημα της «πλημμύρας», αλλά και να λάβει το απαραίτητο οξυγόνο στο διάστημα της «ξηρασίας» [14]. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται ένα σύστημα υδροπονίας Ebb and Flow.



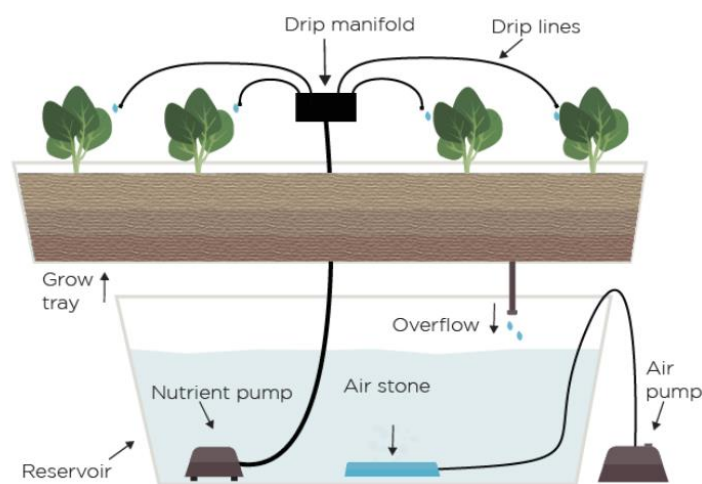
Σχήμα 8: Σύστημα Ebb and Flow [21].

Τα θετικά χαρακτηριστικά του συστήματος αυτού είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής, αλλά και λειτουργίας του, καθώς και η εξοικονόμηση νερού που επιτυγχάνεται μέσω της ανακύκλωσής του.

Ωστόσο, δεν είναι αρκετά αποδοτικό σε φυτά μεγαλύτερου μεγέθους είτε σε φυτά που απαιτούν μεγαλύτερη διάρκεια ανάπτυξης, ενώ οποιαδήποτε αστοχία στο χρονισμό της αντλίας θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο το φυτό.

2.2.5 Σύστημα Στάγδην Άρδευσης

Στο Σύστημα Στάγδην Άρδευσης (Drip System) τα φυτά βρίσκονται και πάλι σε κάποιο υπόστρωμα και το νερό εμπλουτισμένο με οξυγόνο και όλα τα υπόλοιπα απαραίτητα στοιχεία βρίσκεται σε μία δεξαμενή. Το νερό διοχετεύεται μέσα από σωληνάκια σε καθένα φυτό διατηρώντας υγρό τον περιβάλλοντα χώρο της ρίζας κάθε φυτού. Σχετικά με την ποσότητα του νερού που περισσεύει κατά το πότισμα αυτό, υπάρχουν δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση τελείται ανακύκλωση του νερού επιστρέφοντας και πάλι στη δεξαμενή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το νερό που περισσεύει απομακρύνεται. Εδώ επισημαίνεται, πως η τελευταία τεχνολογία χρησιμοποιείται αρκετά σε παραγωγές μεγάλης κλίμακος, έχοντας μεγάλη ακρίβεια ώστε να μη σπαταλιέται μεγάλη ποσότητα νερού. Ένα Drip System παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Σύστημα Στάγδην Άρδευσης Υδροπονίας [22].

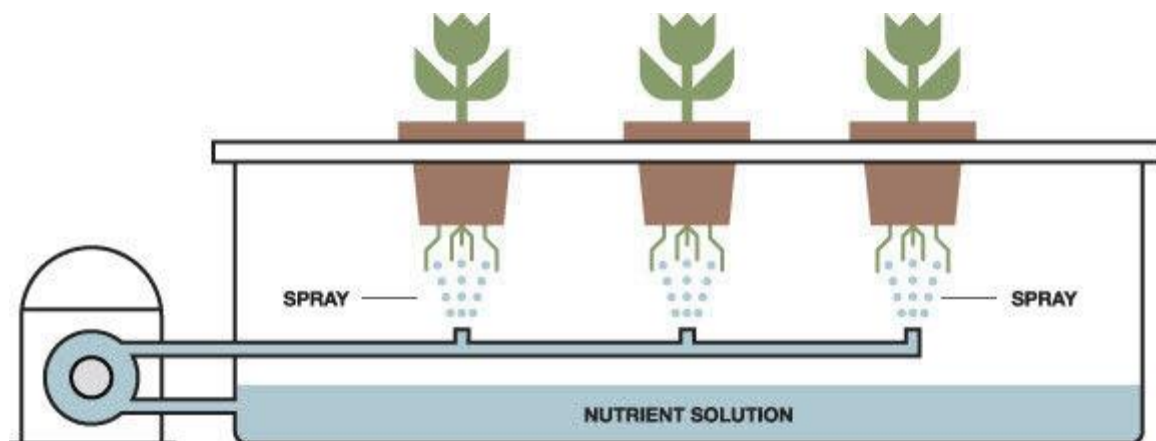
Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα αποδοτική ακόμη και για μεγάλα φυτά σε μέγεθος, που δεν μπορούν να αναπτυχθούν με τις προηγούμενες μεθόδους

υδροπονίας, αλλά και είναι εύκολα επεκτάσιμη και ευρέως διαδεδομένη στην παραγωγή μεγάλης κλίμακος.

Ωστόσο, αποτελεί έναν περίπλοκο τρόπο ανάπτυξης φυτών με κάποια δυσκολία στη συντήρηση, συνιστώντας δύσκολη τη χρήση του σε οικιακό επίπεδο, αλλά μία πολύ καλή λύση για επαγγελματική χρήση.

2.2.6 Συστήματα Αεροπονίας

Στα Συστήματα Αεροπονίας (Aeroponics) επιτυγχάνεται άμεση μεταφορά θρεπτικού διαλύματος μεταξύ της δεξαμενής νερού και του ριζικού συστήματος των φυτών. Αναλυτικότερα, τα φυτά βρίσκονται τοποθετημένα σε μία δομή πάνω από τη δεξαμενή και μέσω μιας αντλίας το νερό διαχέεται σε μορφή νέφους - ψεκασμού στις ρίζες τους. Ο ψεκασμός αυτός μπορεί να είναι διαρκής είτε να εκτελείται περιοδικά σε επαναλαμβανόμενους κύκλους [14]. Ένα σύστημα Aeroponics φαίνεται ακολούθως στο Σχήμα 10.



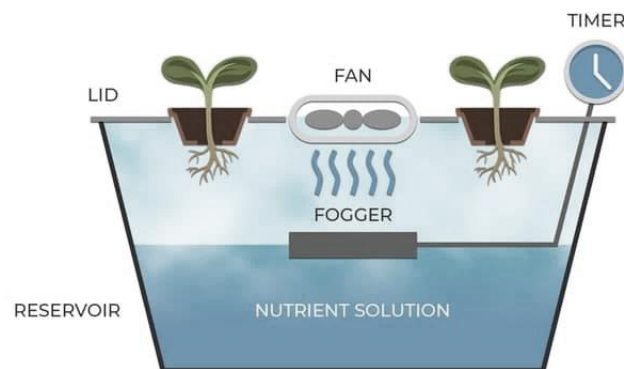
Σχήμα 10: Σύστημα Aeroponics [23].

Πεδίο δόξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποτελεί η εξοικονόμηση νερού που επιτυγχάνεται για την παροχή της απαραίτητης ποσότητας νερού και θρεπτικών στοιχείων έως και 95% συγκριτικά με άλλες μεθόδους άρδευσης εδάφους [15]. Επιπροσθέτως, ο τρόπος με τον οποίο είναι κατασκευασμένη αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την βέλτιστη πρόσληψη οξυγόνου από τις ρίζες, συμβάλλοντας στην ταχύτερη ανάπτυξη του φυτού συγκρινόμενη με άλλους τύπους υδροπονίας.

Παρόλα αυτά αποτελεί μία ιδιαίτερος ακριβή τεχνολογία, ενώ οποιαδήποτε δυσλειτουργία στο σύστημα είτε στις αντλίες ψεκάσματος μπορεί να αποβεί σε ταχύτερο χρόνο επιζήμια για την παραγωγή.

2.2.7 Μέθοδος Εναιωρήματος Νερού

Η Μέθοδος Εναιωρήματος Νερού (Fogponics) αποτελεί τεχνολογία αιχμής για τον τομέα της υδροπονίας (Σχήμα 11). Συμπίπτει με τη μέθοδο Aeroponics ως προς το υπόστρωμα ανάπτυξης του φυτού που είναι ο αέρας, περιλαμβάνοντας ωστόσο μία καινοτομία περαιτέρω. Διαθέτει, λοιπόν, ένα σύστημα δημιουργίας εναιωρήματος, το οποίο διοχετεύει σταγονίδια θρεπτικού διαλύματος μικρότερου μεγέθους (5- 30 μm), συμβάλλοντας στην πιο αποτελεσματική απορρόφησή του από το σύστημα των ριζών. Μέσω κατάλληλων μηχανημάτων το θρεπτικό διάλυμα μετατρέπεται σε υγρασία - ομίχλη πλούσια στα απαραίτητα συστατικά για το φυτό, το οποίο περιβάλλει. Μάλιστα, με τόσο μικρό μέγεθος, τα σταγονίδια μπορούν να καλύψουν ευκολότερα μεγαλύτερο μέρος των ριζών, οδηγώντας στην αποδοτικότερη «θρέψη» των φυτών.



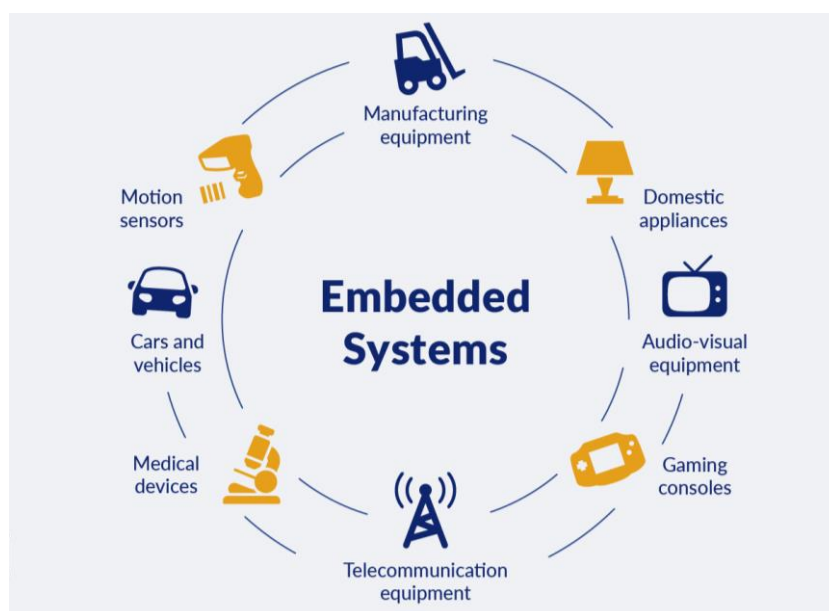
Σχήμα 11: Σύστημα Fogponics [24].

Κεφάλαιο 3

Ενσωματωμένα Συστήματα και ΙοΤ

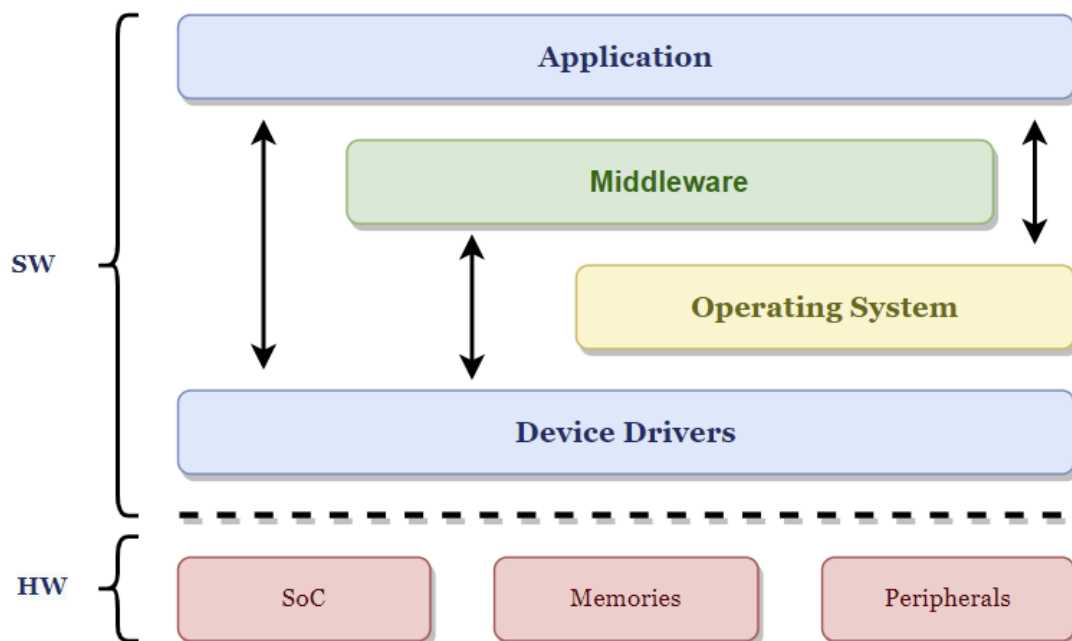
3.1 Ενσωματωμένα Συστήματα (Embedded Systems)

Σύμφωνα με τον ορισμό της IEEE ενσωματωμένα συστήματα αποκαλούνται τα υπολογιστικά συστήματα, τα οποία αποτελούν μέρος μεγαλύτερων συστημάτων και εκτελούν ορισμένες από τις διεργασίες των συστημάτων αυτών [25]. Καλύπτουν ένα μεγάλο σύνολο μικρών αλλά και αρκετά μεγάλων και πολύπλοκων υπολογιστικών συστημάτων, καλύπτοντας το 99% αυτών (2020). Αδιαμφισβήτητα, καλύπτουν κάθε πτυχή της καθημερινότητας του ανθρώπου, αλλά και μιας πληθώρας επιστημονικών κλάδων έχοντας εφαρμογές σε προγράμματα έξυπνων πόλεων, έξυπνων σπιτιών, στην ιατρική περίθαλψη, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική, σε στρατιωτικά προγράμματα και γενικότερα σε ολόκληρη τη βιομηχανία (Σχήμα 12) [26].



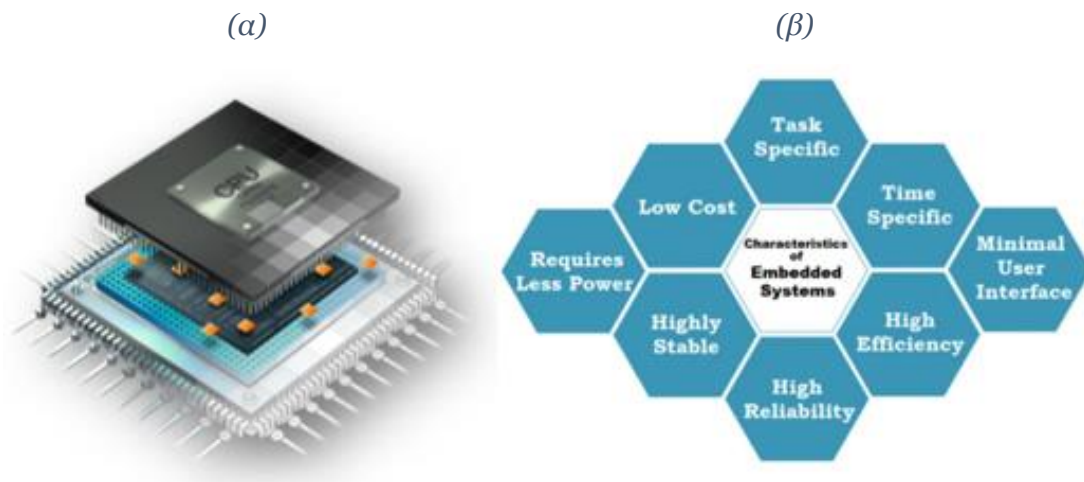
Σχήμα 12: Εφαρμογές Ενσωματωμένων Συστημάτων [27].

Πρόκειται για συστήματα ειδικού σκοπού, τα οποία συνδυάζουν αρμονικά ένα σύνολο εντολών (που απαρτίζουν το software), με κάθε μονάδα του hardware του εκάστοτε υπολογιστικού συστήματος. Η δομή του hardware οικοδομείται πάνω σε έναν μικροελεγκτή είτε μικροεπεξεργαστή περιλαμβάνοντας επιπλέον μονάδες μνήμης, διαύλους μεταφοράς δεδομένων, εισόδους - εξόδους, digital to analog converters κτλ. Το λογισμικό αυτών των συστημάτων απαρτίζεται συνήθως από κάποιο λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου (RTOS), από εφαρμογές και διαφόρους drivers. Η αρχιτεκτονική ενός ενσωματωμένου συστήματος παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 13. Στον πυρήνα αυτών βρίσκεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα - Integrated circuit (IC), το οποίο αναλαμβάνει να εκτελεί τις λειτουργίες για τις οποίες θα προγραμματιστεί το σύστημα.



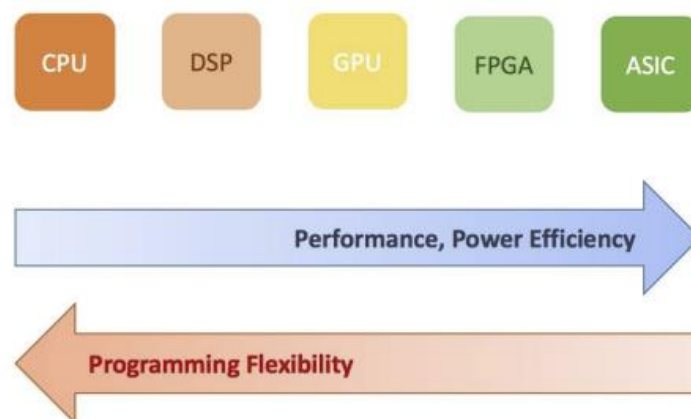
Σχήμα 13: Αρχιτεκτονική ενός ενσωματωμένου συστήματος.

Τα ενσωματωμένα συστήματα χαρακτηρίζονται στο σύνολό τους από χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση ισχύος και σχετικά μικρές διαστάσεις καθιστώντας τα ιδιαίτερος δημοφιλή και εδραιώνοντας τη θέση τους σε πολλαπλά Projects ειδικού σκοπού (Σχήμα 14) [28]. Επιπλέον, το ενσωματωμένο ανταποκρίνεται στα σήματα εισόδου των αισθητήρων και τελείται η ανταλλαγή σημάτων μεταξύ της μονάδας επεξεργασίας και των υπόλοιπων δομών που απαρτίζουν το σύστημα. Αυτό επιτελείται εντός χρονικών περιορισμών που καθορίζονται από το λογισμικό του ενσωματωμένου, κάτι το οποίο αποτελεί ένα ακόμη χαρακτηριστικό των ενσωματωμένων.



Σχήμα 14: Ενσωματωμένο Σύστημα (α) και τα χαρακτηριστικά του (β) [29].

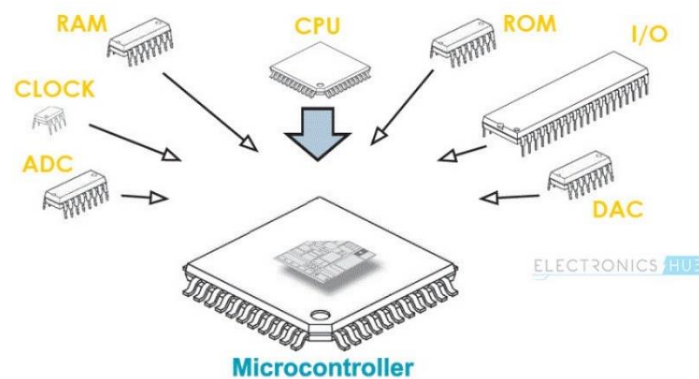
Σύμφωνα με το νόμο του Moore, κάθε δύο χρόνια ο αριθμός των transistors θα διπλασιάζεται, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται διαρκώς με το πέρασμα των χρόνων. Αυτή η αύξηση των transistors οδηγεί στην ενίσχυση της απόδοσης των μικροεπεξεργαστών, ωστόσο απαιτείται και μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην κατανάλωση ισχύος αυτών. Υπό αυτό το πρίσμα, δίνεται πλέον ιδιαίτερη προσοχή και σε άλλες επεξεργαστικές πλατφόρμες, όπως είναι τα FPGAs, οι DSPs, τα ASICs κτλ. Η διαφορά μεταξύ αυτών των επεξεργαστικών μονάδων φαίνεται ξεκάθαρα στο Σχήμα 15 [30]. Με αυτό τον τρόπο, για την εκάστοτε εφαρμογή είναι εφικτό να επιλεγεί ο καταλληλότερος και αποδοτικότερος κάθε φορά επεξεργαστής. Ωστόσο, δεδομένου του μεγάλου αριθμού τους, η επιλογή αυτή αποτελεί μία αρκετά περίπλοκη διαδικασία [31].



Σχήμα 15: Σύγκριση επεξεργαστικών πλατφορμών [30].

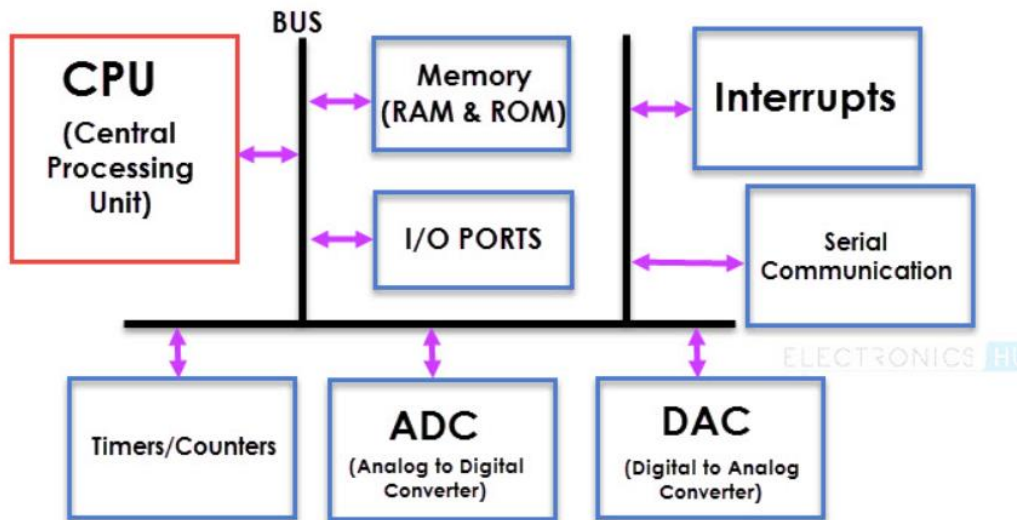
3.2 Μικροεπεξεργαστές - Μικροελεγκτές

Όπως ήδη αναφέρθηκε και παραπάνω ένα ενσωματωμένο σύστημα αποτελείται από έναν μικροελεγκτή είτε μικροεπεξεργαστή, ο οποίος αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει όλες τις λειτουργίες για τις οποίες είναι σχεδιασμένο το σύστημα. Η διαφορά μεταξύ ενός μικροελεγκτή κι ενός μικροεπεξεργαστή έγκειται στο γεγονός πως ο μικροεπεξεργαστής συνίσταται μονάχα από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας - central processing unit (CPU), ενώ ο μικροελεγκτής αποτελεί ένα αυτοτελές σύστημα, το οποίο εκτός της κεντρικής μονάδας περιλαμβάνει κι άλλες δομές όπως μνήμες και διάφορα περιφερειακά ενσωματωμένα στο ίδιο chip (Σχήμα 16).



Σχήμα 16: Δομή ενός Μικροελεγκτή [32].

Αναλυτικότερα, τα κύρια δομικά στοιχεία ενός μικροελεγκτή αποτελούν η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), η μνήμη του προγράμματος (μνήμη ROM), η μνήμη δεδομένων (μνήμη RAM), οι διάφοροι timers, θύρες εισόδου-εξόδου, ένα serial communication interface, σύστημα χρονισμού (oscillator circuit) και μηχανισμός υποστήριξης διακοπών (interrupts). Καθώς όμως η τεχνολογία εξελίσσεται, προστίθενται κι άλλα περιφερειακά τα οποία είτε επιτελούν κάποια λειτουργία (Analog to Digital Converter - ADC, Digital to Analog Converter - DAC), είτε εξυπηρετούν στη μεταφορά δεδομένων και σημάτων του μικροεπεξεργαστή με εξωτερικές συσκευές είτε άλλα περιφερειακά (Serial Peripheral Interface - SPI, Inter integrated Circuit - I2C, Controlled Area Network - CAN, Universal Serial Bus - USB). Η επικοινωνία του «εγκεφάλου» με τη μνήμη, τα υπόλοιπα περιφερειακά κτλ. υλοποιείται μέσω κάποιου διαύλου (Bus), ο οποίος ουσιαστικά αποτελεί το σύνολο των συνδέσεων μεταξύ της CPU και όλων αυτών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17: Αλληλεπίδραση CPU με τις υπόλοιπες δομές [32].

3.3 Μικροελεγκτής ESP32

Ο ESP32 αποτελεί έναν αρκετά διαδεδομένο μικροελεγκτή, ο οποίος διαθέτει επικοινωνία Wi-Fi και Bluetooth μέσω των διεπαφών SPI / SDIO είτε I2C / UART, καθώς και χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος, υπερέχοντας έτσι έναντι άλλων μικροϋπολογιστών, όπως η πλακέτα Arduino. Είναι σχεδιασμένο ώστε να προσφέρει αξιοπιστία και ευελιξία στις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται. Πρόκειται για μία πλακέτα, η οποία ανταποκρίνεται στα χαρακτηριστικά των σύγχρονων chips χαμηλής κατανάλωσης, διαθέτοντας πολλαπλές καταστάσεις ενέργειας έτσι ώστε να εξοικονομείται η μέγιστη δυνατή στις χρονικές στιγμές, όπου η πλακέτα βρίσκεται σε αδράνεια αναμένοντας κάποια εκτέλεση μέσω του κώδικα (Σχήμα 18).

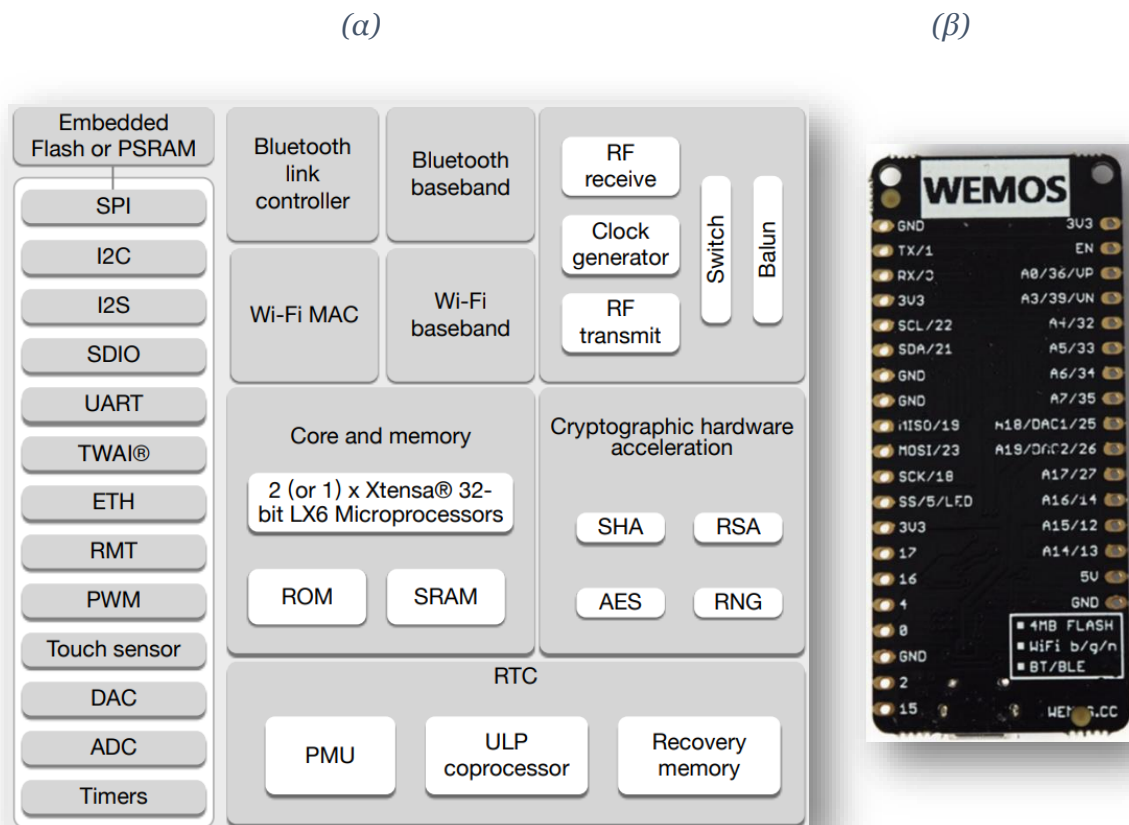


Σχήμα 18: Πλακέτα ESP32 και τα χαρακτηριστικά της [33].

Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [34]:

- **Επεξεργαστής:** Xtensa® 32-bit LX6 ενός ή δύο πυρήνων με συχνότητα λειτουργίας 160 είτε 240 MHz
- **Μνήμη:** 520 KiB RAM, 448 KB ROM
- **Συνδεσιμότητα:**
 - Wi-Fi → 802.11 n (2.4 GHz), έως και 150 Mbps
 - Bluetooth → v4.2 BR/EDR και BLE
- Χρονιστής RTC
- **Περιφερειακά:**
 - 34 προγραμματιζόμενες θύρες εισόδου - εξόδου
 - 12-bit SAR ADC έως 18 κανάλια
 - 2 × 8-bit DAC
 - 10 αισθητήρες επαφής
 - 4 διεπαφές Serial Peripheral Interface (SPI)
 - 2 διεπαφές Inter-IC Sound (I2S)
 - 2 διεπαφές Inter-IC Circuit (I2C)
 - 3 διεπαφές Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)
 - SD/eMMC/SDIO κεντρικός ελεγκτής
 - SDIO/SPI βοηθητικός ελεγκτής
 - CAN 2.0
 - RMT (TX/RX)
 - Motor Pulse Width Modulation (PWM)
 - LED PWM έως 16 κανάλια
 - Αισθητήρας Hall

Η αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή ESP32 φαίνεται ξεκάθαρα στο Σχήμα 19, όπου παρουσιάζονται όλα τα blocks που αναφέρθηκαν παραπάνω και απαρτίζουν την πλακέτα. Επιπλέον, στο ίδιο Σχήμα παρουσιάζεται και το διάγραμμα Pinout της εν λόγω πλακέτας.

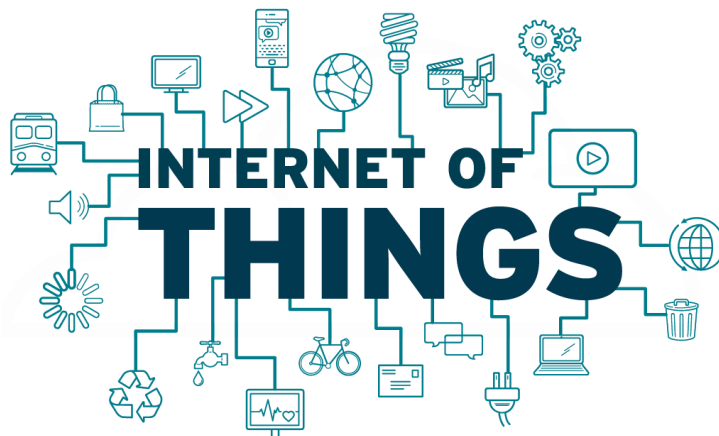


Σχήμα 19: Block Diagram (α) και Pinout Diagram (β) [31].

3.4 Internet of Things

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων - Internet of Things (IoT) αποτελεί τη διασύνδεση φυσικών είτε εικονικών αντικειμένων μέσω του Διαδικτύου για την ανταλλαγή δεδομένων, αξιοποιώντας τις υπάρχουσες αλλά συνεχώς εξελισσόμενες τεχνολογίες της πληροφορίας [35]. Η IEEE περιγράφει τον όρο “Internet of Things”, ως ένα δίκτυο πραγμάτων, καθένα από τα οποία διαθέτει ενσωματωμένους αισθητήρες και είναι συνδεδεμένο με το Διαδίκτυο [36]. Η φιλοσοφία του IoT αποτελεί ένα βαρυσήμαντο επίτευγμα που απασχολεί και θα απασχολεί σε μεγάλο βαθμό τόσο την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και τη βιομηχανία, έχοντας αρχίσει ήδη να θέτει τα θεμέλια για έναν διαφορετικό τρόπο αντίληψης και επαφής με τον κόσμο. Ένα αντικείμενο στο Διαδίκτυο των πραγμάτων αποτελεί οτιδήποτε μπορεί να περιλαμβάνει κάποιον αισθητήρα για την αλληλεπίδραση με τον φυσικό κόσμο και τη συλλογή πληροφοριών από αυτόν, καθώς και κάποιο πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet Protocol - IP),

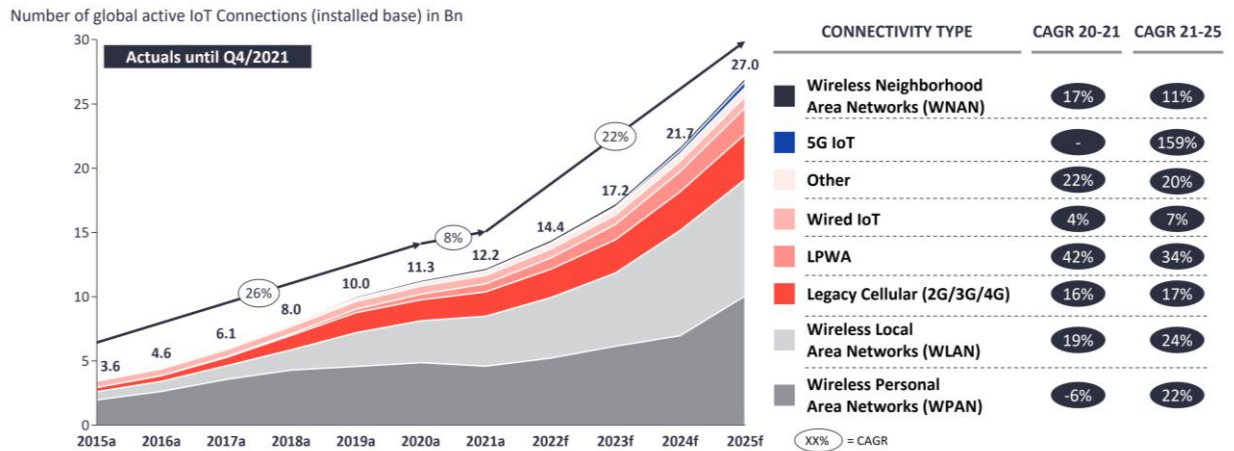
προκειμένου να μεταφέρει αυτά τα δεδομένα σε κάποιο δίκτυο. Συνήθως, πρόκειται για μικροελεγκτές οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με διαφόρους αισθητήρες και παράλληλα διαθέτουν πρόσβαση σε κάποιο δίκτυο. Αυτές οι συσκευές IoT, λοιπόν, αφού συλλέξουν τα απαραίτητα δεδομένα, τα αποστέλουν σε κάποιο IoT gateway είτε σε κάποια άλλη συσκευή όπου αναλύονται και τίθενται σε επεξεργασία είτε σε κάποιο cloud είτε τοπικά. Γίνεται πλέον λόγος για μία μετάβαση σε ένα Διαδίκτυο διασυνδεδεμένων αντικειμένων που όχι μόνο θα συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον, αλλά θα μπορούν και να ενεργούν αυτόνομα με το φυσικό περιβάλλον προσφέροντας διάφορες υπηρεσίες χωρίς την μεσολάβηση του ανθρώπου [37]. Η εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων λήψης αποφάσεων, οι οποίοι θα δίνουν «εντολές» στις συσκευές με βάση τις πληροφορίες που συλλέγουν και το ιστορικό αυτών, προκειμένου να προβούν σε συγκεκριμένες ενέργειες, αποτελεί εφιαλτήριο για τη δημιουργία πλήρως αυτοδύναμων συστημάτων με τη δύναμη του IoT.



Σχήμα 20: Internet of Things [12].

Αυτή η καινοτομία αποτελεί μία μέθεξη του πραγματικού με το φυσικό κόσμο με τη δύναμη της έξυπνης τεχνολογίας. Τα πεδία εφαρμογής του Διαδικτύου των πραγμάτων είναι πολυάριθμα, ενώ ακόμη περισσότερες είναι οι διασυνδεδεμένες συσκευές σε αυτό ξεπερνώντας μάλιστα τον παγκόσμιο ανθρώπινο πληθυσμό (Σχήμα 21). Αρχικά θα αναφερθεί πως η συμβολή του IoT είναι τεράστια σε πολλές πτυχές της καθημερινότητας του ατόμου αλλά και της λειτουργίας των κοινωνιών, διαθέτοντας εφαρμογές στη δημιουργία έξυπνων πόλεων, έξυπνων σπιτιών, στις τεχνολογίες υγείας, την αγροτική παραγωγή κτλ. Παράλληλα, η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται και σε πολυάριθμες περιπτώσεις προστασίας και ελέγχου του περιβάλλοντος, αλλά και σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας, της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και άλλων πολλών τομέων [38].

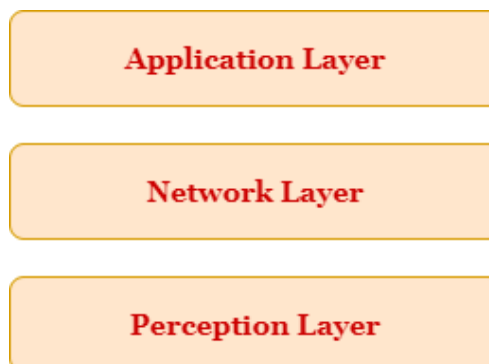
Global IoT Market Forecast [in billion connected IoT devices]



Σχήμα 21: Ταχύτετη αύξηση του αριθμού των διασυνδεδεμένων συσκευών [39].

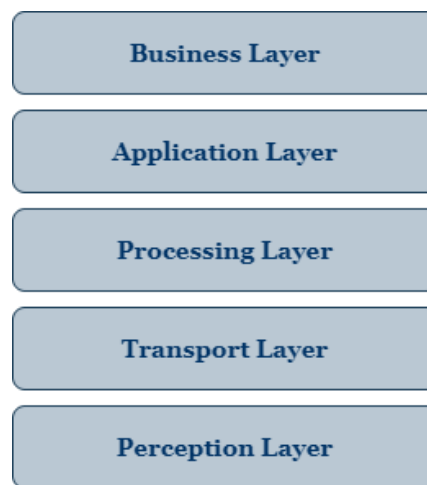
3.4.1 Αρχιτεκτονική του IoT

Αναφορικά με την αρχιτεκτονική των συστημάτων IoT είναι γεγονός πως δεν υπάρχει μία μοναδική δομή, έχοντας γίνει διαφορετικές προτάσεις από διαφορετικούς ερευνητές. Μία από αυτές τις αρχιτεκτονικές αποτελείται από το επίπεδο αντίληψης (perception layer), από το επίπεδο δικτύου (network layer) και από το επίπεδο εφαρμογής (application layer) [40], όπως φαίνεται στο Σχήμα 22. Το επίπεδο αντίληψης αποτελεί το φυσικό επίπεδο, περιλαμβάνοντας όλους εκείνους τους αισθητήρες, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον. Το επίπεδο δικτύου με τη σειρά του είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση των συσκευών του προηγούμενου επιπέδου με κάποιο server είτε με άλλες συσκευές δικτύου, προκειμένου να γίνει η μεταβίβαση των συλλεγμένων πληροφοριών.



Σχήμα 22: Αρχιτεκτονική του IoT.

Τέλος, το επίπεδο εφαρμογής αποτελεί τη διεπαφή για το χρήστη παρέχοντάς του όλες τις απαραίτητες υπηρεσίες που είναι χρήσιμες για την εκάστοτε εφαρμογή. Πολλές φορές ανάμεσα από το network και το application layer προστίθεται ένα ακόμη, το data processing layer, το οποίο είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία όλων των δεδομένων που φτάνουν σε κάποιο cloud μέσω των προηγούμενων επιπέδων. Πολλές φορές όμως στη βιβλιογραφία η αρχιτεκτονική ενός τέτοιου συστήματος διαρθρώνεται σε 5 επίπεδα [41] περιλαμβάνοντας το επίπεδο αντίληψης, το επίπεδο μεταφοράς (transport layer), το επίπεδο επεξεργασίας (processing layer), το επίπεδο εφαρμογής (application layer) και το επιχειρηματικό επίπεδο (business layer) (Σχήμα 23).



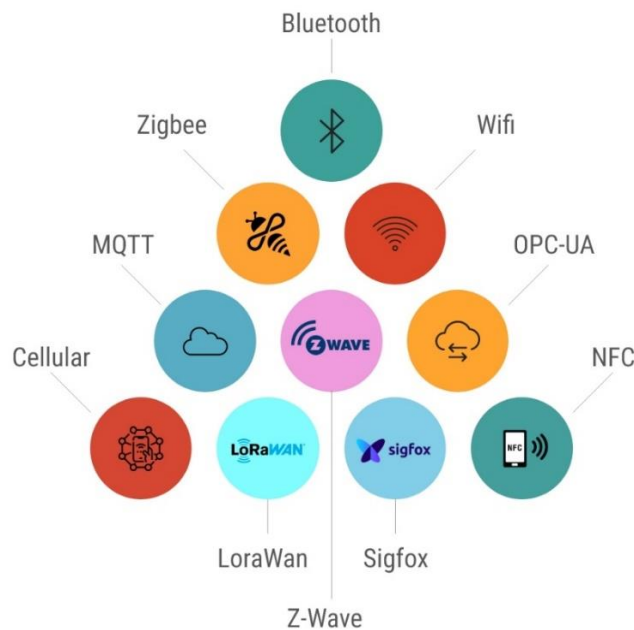
Σχήμα 23: Μία ακόμη αρχιτεκτονική του IoT.

Σε αυτή την περίπτωση, το επίπεδο μεταφοράς είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των δεδομένων του αισθητήρα από το επίπεδο αντίληψης στο επίπεδο επεξεργασίας των δεδομένων μέσω ασυρμάτων δικτύων (3G, LAN, Bluetooth, RFID, and NFC). Το επίπεδο επεξεργασίας αναλαμβάνει την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τα προηγούμενα επίπεδα κάνοντας χρήση βάσεων δεδομένων και cloud computing. Τέλος, το επιχειρηματικό επίπεδο διαχειρίζεται το συνολικό σύστημα IoT περιλαμβάνοντας τις εφαρμογές, τα επιχειρηματικά μοντέλα κτλ.

3.5 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω, δεν μπορεί μια συσκευή IoT να λειτουργήσει ορθά εάν η πληροφορία που κάθε φορά θέλει να κοινοποιήσει δεν μεταβιβαστεί από το επίπεδο δικτύου. Η επικοινωνία αυτή με το δίκτυο υλοποιείται με ασφάλεια και










αξιοπιστία μέσα από πρωτόκολλα επικοινωνίας δικτύου. Υπάρχουν αρκετά διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, καθένα από τα οποία διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά αναφορικά με το εύρος κάλυψης, το κόστος, την κατανάλωση ισχύος, τη διαθεσιμότητα κτλ. Ανάλογα με τη φύση της εφαρμογής που πρόκειται να αναπτυχθεί γίνεται και η επιλογή του καταλληλότερου. Μερικά από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας φαίνονται στο Σχήμα 24.



Σχήμα 24: Πρωτόκολλα Επικοινωνίας IoT [42].

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως ανάλογα με το εύρος μετάδοσής τους τα πρωτόκολλα χωρίζονται σε κατηγορίες. Η πρώτη αφορά στα πρωτόκολλα Wireless Personal and Local Area Network technologies (WPAN/LAN), τα οποία διαθέτουν σχετικά μικρό εύρος της τάξης των μερικών μέτρων, όπως είναι το Bluetooth, ZigBee, 6LowPAN, RFID και Wi-Fi. Η δεύτερη αναφέρεται στα Wireless Wide Area Network technologies (WWAN), τα οποία δύνανται να μεταδώσουν την πληροφορία σε εύρος αρκετών μέτρων έως και χιλιομέτρων. Τέτοια πρωτόκολλα αποτελούν το Cellular, το LoRa, το Sigfox κ.α.

Για την επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου ανάλογα με την εφαρμογή όπου θα χρησιμοποιηθεί, είναι ορθό να λαμβάνεται υπόψιν το εύρος κάλυψης, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και η κατανάλωση ισχύος. Συνοπτικά στο Σχήμα 25 παρουσιάζονται κάποια από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές IoT και τα χαρακτηριστικά τους.

								
Standard	ZigBee (WPAN)	Low Power Wi-Fi (WLAN)	6LoWPAN (LPWAN)	LoRaWAN (LPWAN)	NB-IoT (LPWAN - cellular)	LTE-M (LPWAN - cellular)	5G (cellular)	Wi-Sun (WNAN)
Nominal range	10 - 100 m	70 m - 225 m	25 - 50 m	2 - 15 Km	1 - 15 Km	1 - 11 Km	up to 100 km	5 - 10 km
Max Data Rate (Kbit/s)	250 Kbps	15 Mbps	250 Kbps	50 Kbps	250 Kbps	1 Mbps	599 Mbps	300 Kbps
Power consumption	 Medium	 Low to medium	 Low	 Low to medium	 Low	 Low	 Low to medium	 Medium to high

Σχήμα 25: Πρωτόκολλα επικοινωνίας IoT [43].

Ακολουθώς θα γίνει μία σύντομη αναφορά σε κάποια από αυτά τα πρωτόκολλα.

3.5.1 Wi-Fi

Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο ασύρματου δικτύου, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11 και χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σε τοπικά δίκτυα δίνοντας τη δυνατότητα σε συσκευές με μικρή μεταξύ τους απόσταση να ανταλλάσσουν δεδομένα. Καλύπτει συχνότητες των 2.4 και 5 GHz, ωστόσο η μετάδοση δεδομένων περιορίζεται σε μικρό εύρος (50 - 100 μέτρα) δεδομένου πως ανήκει στην κατηγορία των WPAN. Αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα για IoT εφαρμογές, καθώς προσφέρει ικανοποιητικές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων (20 - 600 Mbps), ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις αποδεικνύεται κοστοβόρο υπό το πρίσμα της ενεργειακής κατανάλωσης.



Σχήμα 26: Λογότυπο Wi-Fi [12].

3.5.2 Bluetooth

Το Bluetooth αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων σε συχνότητα 2.4 GHz. Ενδεικνύεται για ασύρματη επικοινωνία μικρού εύρους, χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλού κόστους. Όπως και το Wi-Fi, έτσι και το Bluetooth ανήκει στην κατηγορία WPAN και ως εκ τούτου έχει μικρό εύρος διάδοσης της τάξης των 50 - 150 μέτρων. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μετράται γύρω στο 1 Mbps. Είναι ευρέως διαδεδομένο σε εφαρμογές IoT, όπου δεν απαιτείται η αποστολή μεγάλου μεγέθους δεδομένων και σε μεγάλη απόσταση. Σημαντικό πλεονέκτημα

αυτού του πρωτοκόλλου αποτελεί η σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που το χαρακτηρίζει.



Σχήμα 27: Λογότυπο Bluetooth [12].

3.5.3 LoRa

Το LoRa αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας της κατηγορίας WWAN, το οποίο είναι κατάλληλο για τη μετάδοση δεδομένων σε αρκετά μεγάλη απόσταση καλύπτοντας ένα εύρος μετάδοσης από 2.5 χιλιόμετρα σε αστικές περιοχές έως και 15 χιλιόμετρα σε προάστειες περιοχές. Στα θετικά του χαρακτηριστικά μάλιστα προστίθεται και η πολύ χαμηλή του κατανάλωση ενέργειας. Τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά το καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές έξυπνων πόλεων, έξυπνης Γεωργίας, αλλά και στη βιομηχανία. Μάλιστα, είναι ικανό να υποστηρίζει ένα τεράστιο δίκτυο συσκευών.



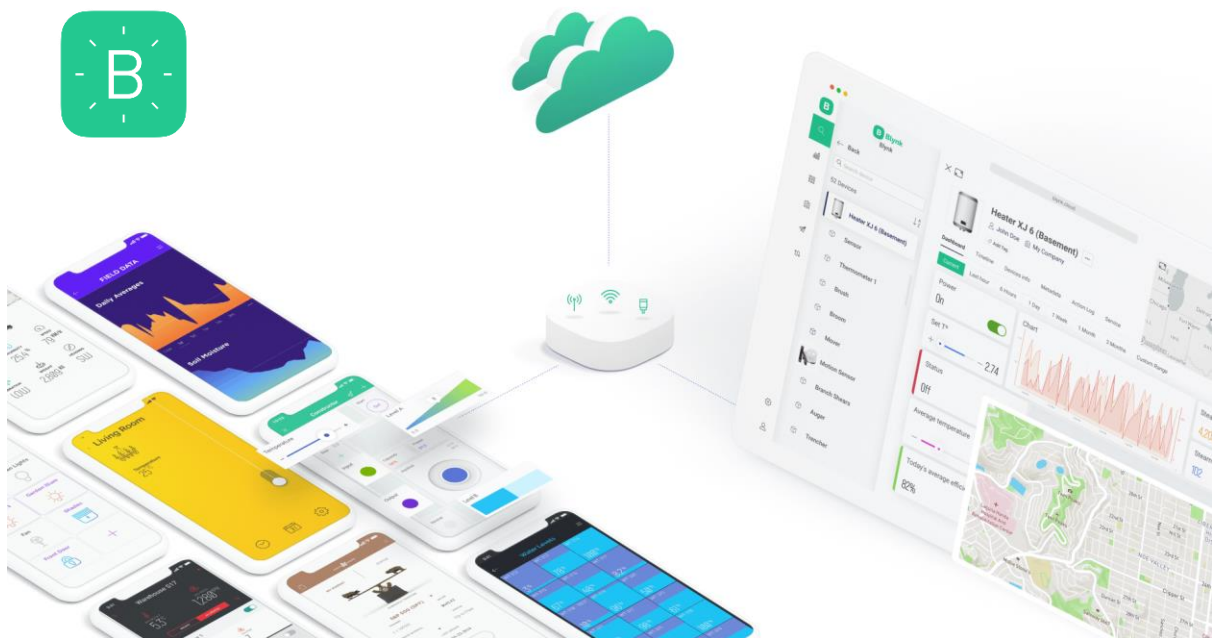
Σχήμα 28: Λογότυπο LoRa [12].

3.6 Blynk

Το Blynk πρόκειται για μία νέα πλατφόρμα, στην οποία μπορεί ο χρήστης να δημιουργήσει διεπαφές προκειμένου να οπτικοποιεί τα δεδομένα που μπορεί να λαμβάνει από κάποιο σύστημα hardware. Εντάσσεται στο επίπεδο της εφαρμογής (application layer) της αρχιτεκτονικής διάταξης μιας IoT εφαρμογής, όπου παρέχει τον ασφαλή χώρο (cloud) ώστε ο χρήστης όχι μόνο να μπορεί να ελέγχει τιμές που μπορεί να στέλνει κάποιος μικροελεγκτής αλλά και με κατάλληλα widgets, όπως switches, buttons κτλ. να μπορεί να επεμβαίνει απομακρυσμένα σε αυτό. Μάλιστα το Blynk παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας όχι μόνο μίας web app αλλά και εφαρμογών για κινητά τηλέφωνα χωρίς να χρειάζεται να γραφτεί κώδικας για τη μορφοποίηση του περιβάλλοντος που θα λαμβάνει ο χρήστης. Μπορεί να υποστηρίξει εφαρμογές

που υλοποιούνται σε μία πληθώρα συσκευών όπως πλακέτες Arduino, ESP32, Raspberry Pi κ.α.

Η εφαρμογή Blynk καθίσταται ιδανική για εφαρμογές IoT, όπου κάποιος μικροελεγκτής, ο οποίος αποτελεί μία end device και απαρτίζεται από αισθητήρες που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον συλλέγει πληροφορίες (επίπεδο αντίληψης), τις οποίες αποστέλλει μέσω του δικτύου Wi-Fi (επίπεδο δικτύου) στον server που διαθέτει η πλατφόρμα Blynk (cloud), όπου γίνεται και η επεξεργασία των δεδομένων, τα οποία τελικώς παρουσιάζονται στο user interface (UI) της εφαρμογής του Blynk (επίπεδο εφαρμογής) (Σχήμα 29).



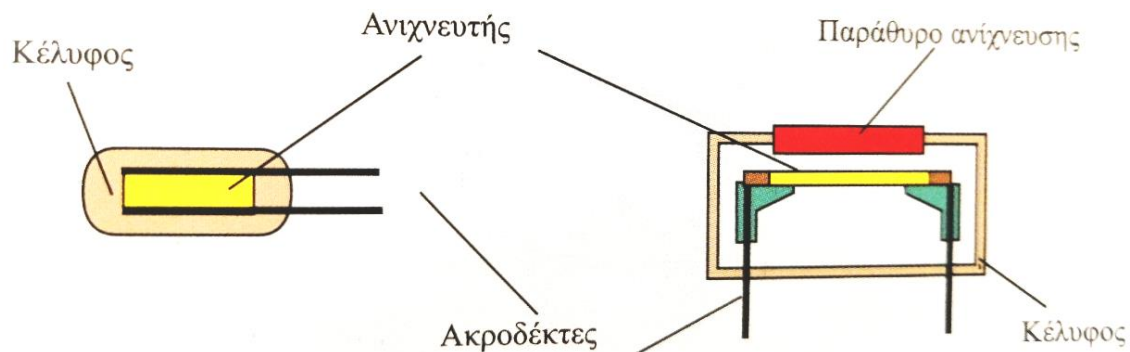
Σχήμα 29: Blynk Interface [44].

Κεφάλαιο 4

Αισθητήρες

4.1 Αισθητήρες Θερμοκρασίας

Η μέτρηση της θερμοκρασίας, δηλαδή του μετρήσιμου μεγέθους που αναπαριστά τη θερμική ενέργεια ενός σώματος, μπορεί να επιτευχθεί με αισθητήρες και διατάξεις, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο, ώστε να μένει ανεπηρέαστη η μέτρηση. Ένας αισθητήρας στη γενικότερη περίπτωση αποτελείται από κάποιο ακροδέκτη ο οποίος έρχεται σε επαφή με το μετρούμενο μέγεθος, από το αισθητήριο στοιχείο, που αντιλαμβάνεται άμεσα είτε έμμεσα την τιμή της θερμοκρασίας και το κέλυφος, το οποίο συνήθως προστατεύει το αισθητήριο στοιχείο από περιβαλλοντικούς παράγοντες (Σχήμα 30).



Σχήμα 30: Αισθητήριο στοιχείο και κέλυφος [45].

Η μέθοδος μέτρησης της θερμοκρασίας τις περισσότερες φορές αξιοποιεί τις ιδιότητες των υλικών, οι οποίες μεταβάλλονται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Αυτές οι μεταβολές μπορεί να είναι μεταβολές των διαστάσεων, της ωμικής αντίστασης, των χαρακτηριστικών των ημιαγωγών, της ακτινοβολούμενης ενέργειας, αλλά και η παραγωγή διαφοράς δυναμικού σε κάποια μέταλλα λόγω διαφοράς της θερμοκρασίας [45]. Ακολούθως θα παρουσιαστούν κάποιοι ηλεκτρονικοί αισθητήρες

μέτρησης της θερμοκρασίας και θα αναλυθεί η αρχή λειτουργίας τους. Αυτοί οι αισθητήρες λαμβάνουν κάποια είσοδο από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα είτε σε διαφορά δυναμικού, η οποία έπειτα από κάποια επεξεργασία πληροφορεί το χρήστη σχετικά με την τιμή της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστούν οι αισθητήρες τύπου αντίστασης ή RTD, τα θερμίστορ, τα θερμοζεύγη, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα μέτρησης θερμοκρασίας (τύπου IC) και οι αισθητήρες υπερύθρων.

4.1.1 Αισθητήρες τύπου αντίστασης ή RTD

Όπως είναι ήδη γνωστό η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης των μετάλλων μεταβάλλεται έπειτα από κάποια μεταβολή στη θερμοκρασία τους. Συγκεκριμένα, η αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας ενός μετάλλου επιφέρει και αύξηση της τιμής της αντίστασής του και αντιστρόφως. Η εξάρτηση αυτή είναι εμφανής στους τύπους (4.1) και (4.2) που ακολουθούν.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4.1)$$

όπου R : η ηλεκτρική (ωμική) αντίσταση, ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού, l : το μήκος του υλικού, A : η επιφάνεια του.

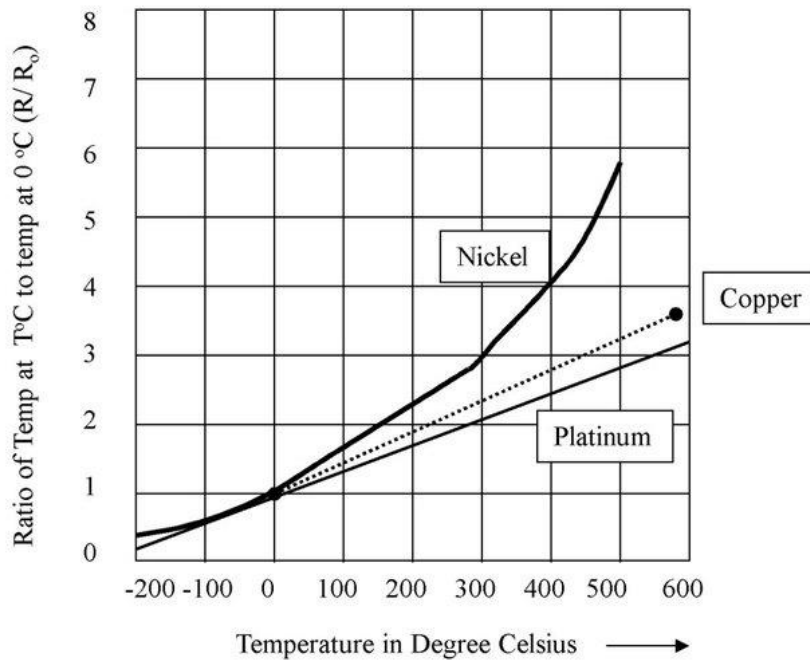
$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4.2)$$

όπου ρ : η ειδική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία T , ρ_0 : η ειδική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία T_0 (0 ή 20°C), α : ο θερμικός συντελεστής του υλικού της ηλεκτρικής αντίστασης [45].

Επισημαίνεται πως η ευαισθησία του μετάλλου σε μεταβολές θερμοκρασίας δίνεται από το λόγο μεταβολής (ρ/ρ_0) της ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και είναι διαφορετική για κάθε υλικό. Ο λόγος αυτός μεταβολής διαφόρων μετάλλων σε σχέση με τη θερμοκρασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 31.

Οι αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης των μετάλλων αποτελούν τους ανιχνευτές θερμοκρασίας με αντίσταση - Resistance Temperature Detectors (RTD) και η ακρίβεια στις μετρήσεις αυτών είναι της τάξης του $\pm 15\%$. Συνήθως το αισθητήριο στοιχείο ενός ανιχνευτή θερμοκρασίας με αντίσταση αποτελείται από κάποιο μέταλλο, το οποίο επιλέγεται και με βάση τις τιμές θερμοκρασίας που πρόκειται να

ανιχνευθούν δεδομένου πως διαφορετικά μέταλλα διαθέτουν και διαφορετικά πεδία τιμών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.



Σχήμα 31: Διάγραμμα μεταβολής του ρ/ρ_0 μετάλλων συγκριτικά με τη θερμοκρασία [46].

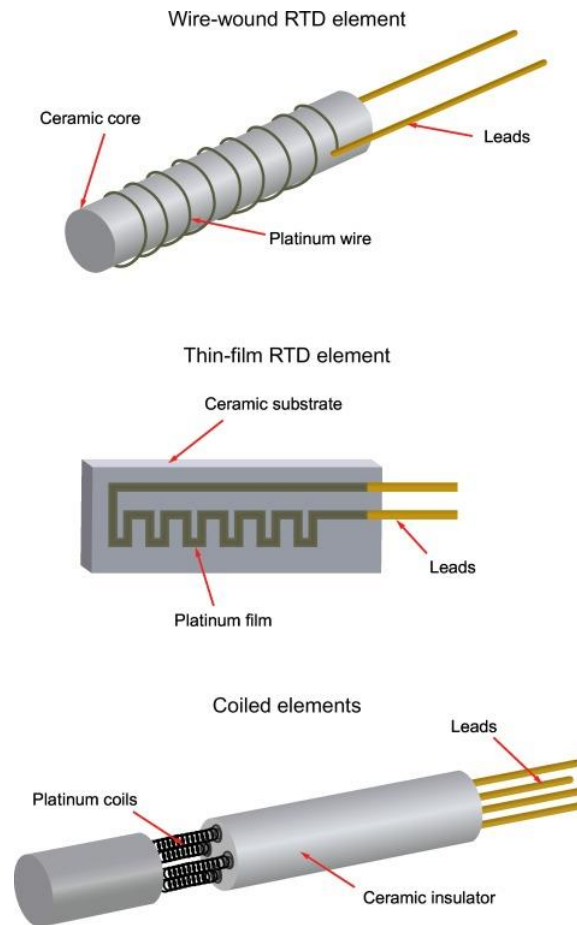
Πίνακας 1: Εύρος τιμών θερμοκρασίας για διάφορα μέταλλα.

Μέταλλο	Εύρος θερμοκρασιών (°C)
Πλατίνα	-270 έως 850
Χαλκός	-100 έως 200
Νικέλιο	-150 έως 300
Βολφράμιο	-270 έως 1100

Ο τρόπος κατασκευής αυτού του τύπου αισθητήρων περιλαμβάνει τη δημιουργία σπειρωμάτων υψηλής ποιότητας σύρματος από κάποιο από τα προαναφερθέντα μέταλλα, το οποίο τυλίγεται σε μη αγώγιμο υλικό. Στο πίσω μέρος αυτής της διάταξης βρίσκονται οι ακροδέκτες του αισθητήρα ενώ τοποθετείται και ένα κέλυφος από μεταλλικό είτε κεραμικό υλικό προστατεύοντας το αισθητήριο στοιχείο από διαβρωτικούς παράγοντες. Στο Σχήμα 32 είναι ξεκάθαρη αυτή η διάταξη RTD.

Η μέτρηση της τιμής ενός αισθητήρα RTD μπορεί να υλοποιηθεί με τη μέθοδο σταθερού ρεύματος και με τη μέθοδο σταθερής τάσης. Για την καλύτερη μέτρηση της τιμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια γέφυρα (συνήθως Wheatstone) τριών ή

τεσσάρων ακροδεκτών [45], [47]. Γενικότερα, τα στοιχεία RTD παρουσιάζουν έντονη γραμμικότητα και σταθερότητα.



Σχήμα 32: Αισθητήρας RTD [48].

4.1.2 Θερμίστορ

Τα θερμίστορς είναι αισθητήρες που προκύπτουν από ημιαγώγιμα υλικά που υπόκεινται σε επεξεργασία με οξείδια χρωμίου, κοβαλτίου, σιδήρου, μαγγανίου και νικελίου, ενώ μπορεί να έχουν μορφή δισκιδίων, καψουλών και στυλίσκων [45]. Όπως και στην περίπτωση των RTDs, τα θερμίστορς αποκτούν διαφορετική τιμή αντίστασης όταν η θερμοκρασία αλλάζει, ενώ χρησιμοποιούνται κεραμικά υλικά και πολυμερή για την κατασκευή τους.

Τα θερμίστορς διαθέτουν αρνητικό θερμικό συντελεστή (Negative Temperature Coefficient - NTC), δηλαδή η αντίστασή τους μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, ωστόσο με κατάλληλες προσμίξεις μπορούν να κατασκευαστούν και θερμίστορς με θετικό θερμικό συντελεστή (Positive Temperature Coefficient - PTC).

Στα NTC η σχέση που συνδέει την αντίσταση με τη θερμοκρασία φαίνεται παρακάτω:

$$R_{Th} = R_{REF} e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}})} \quad (4.3)$$

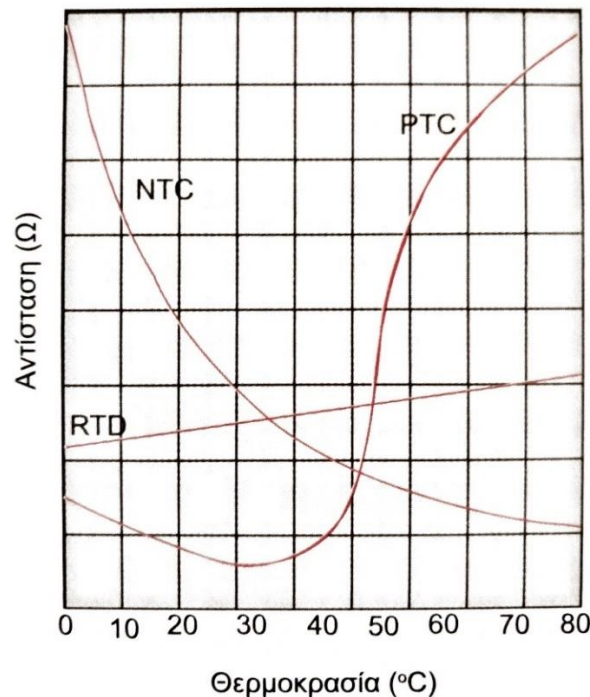
όπου R_{Th} : η αντίσταση του θερμίστορ, R_{Ref} : η αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς, T : η θερμοκρασία, T_{Ref} : η θερμοκρασία αναφοράς του θερμίστορ και β : ο συντελεστής βαθμονόμησης του θερμίστορ.

Στα PTC η σχέση αντίστασης θερμοκρασίας μπορεί να καταλήξει από την εξίσωση Steinhart & Hart στη μορφή που φαίνεται στη Σχέση 4.4.

$$T = \frac{B}{\ln(R) - A} - C \quad (4.4)$$

όπου T : η θερμοκρασία (K) σε θερμοκρασία αναφοράς (20°C), R : η αντίσταση σε θερμοκρασία αναφοράς (20°C) και A , B , C : οι συντελεστές του θερμίστορ, οι οποίοι συνήθως δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

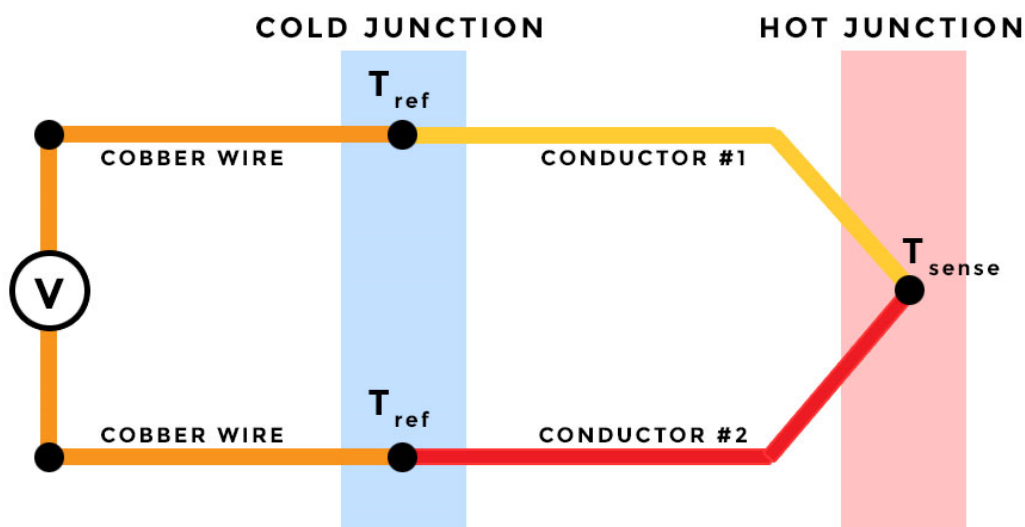
Στο Σχήμα 33 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας για τις περιπτώσεις RTD, NTC ΚΑΙ PTC. Παρατηρούμε, λοιπόν πως τα θερμίστορς είναι πιο ευαίσθητα σε μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας ενώ τα RTD χαρακτηρίζονται από γραμμικότητα.



Σχήμα 33: Μεταβολή Αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας για διατάξεις RTD, NTC, PTC [45].

4.1.3 Θερμοζεύγη

Η αρχή λειτουργίας ενός θερμοζεύγους βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ή φαινόμενο Seebeck, όπου αναπτύσσεται μικρή διαφορά δυναμικού στην περίπτωση που θερμανθεί ένα μέταλλο που οι άκρες του βρίσκονται σε διαφορετικά θερμικά περιβάλλοντα ($T_2 > T_1$). Υπό αυτό το πρίσμα, ηλεκτρόνια του υψηλότερου θερμοκρασιακά περιβάλλοντος διαχέονται προς το χαμηλότερο θερμοκρασιακά περιβάλλον εξαιτίας της υψηλότερης ενεργειακής στάθμης [45].



Σχήμα 34: Λειτουργία θερμοζεύγους [49].

Ένα θερμοζεύγος κατασκευάζεται ενώνοντας δύο ανόμοιους μεταλλικούς αγωγούς στο ένα άκρο, το οποίο αποτελεί και τη «θερμή ένωση», όπου εξαιτίας της διαφορετικής πυκνότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων δημιουργείται διαφορά δυναμικού. Το άλλο άκρο συνδέεται σε ένα βολτόμετρο για τον υπολογισμό της τάσης και αποτελεί την «ψυχρή ένωση». Η «θερμή ένωση» αποτελεί το αισθητήριο στοιχείο του θερμοζεύγους, ενώ η «ψυχρή ένωση» διατηρείται σε κάποια θερμοκρασία αναφοράς (Σχήμα 34).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι θερμοζευγών ανάλογα με το είδος των μεταλλικών αγωγών που ενώνονται για τη δημιουργία τους, καθένας από τους οποίους μπορεί να μετρήσει τη θερμοκρασία σε διαφορετικό εύρος τιμών. Για το λόγο αυτό ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή επιλέγεται και ο καταλληλότερος τύπος. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών των διαφορετικών τύπων θερμοζευγών.

Πίνακας 2: Εύρος θερμοκρασιών για κάθε τύπο θερμοζεύγους [50].

Θερμοζεύγος	Εύρος θερμοκρασιών (°C)
T	0 έως 35
J	95 έως 760
E	95 έως 900
K	95 έως 1260
N	95 έως 1260
R	870 έως 1450
S	980 έως 1450
B	871 έως 31704

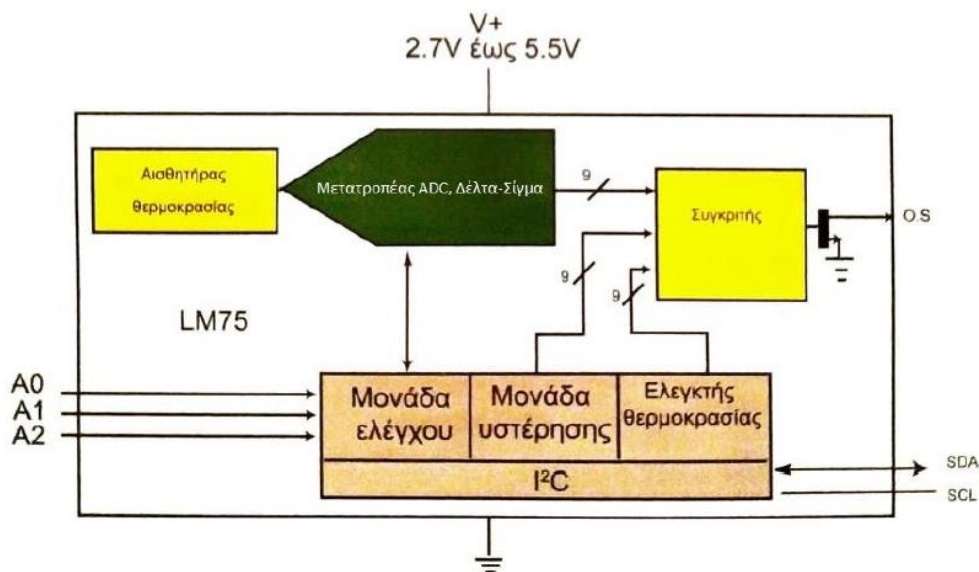
4.1.4 Ολοκληρωμένα κυκλώματα IC μέτρησης θερμοκρασίας

Η μέτρηση της θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί και με ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC) τα οποία συνδυάζουν την ανίχνευση θερμοκρασίας με το κύκλωμα και διαθέτουν τεχνικές βελτίωσης. Συγκεκριμένα, οι αισθητήρες αυτοί διαθέτουν υψηλότερη ακρίβεια, γραμμικοποίηση, ενισχυτές ακριβείας, μικρότερο μέγεθος, σταθερότητα καθώς και ψηφιακή έξοδο με κάποιο καθορισμένο πρωτόκολλο (π.χ. I²C, PWM, SPI), καθιστώντας εύκολη τη σύνδεση με κάποιο μικροελεγκτή [45], [47]. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι και αναλογικοί, οι οποίοι μπορούν να μετρούν την τάση είτε να μετρούν ρεύμα ανάλογα με τη θερμοκρασία, ενώ μπορούν να ανιχνεύσουν τη θερμοκρασία σε ένα εύρος από -55°C έως 150°C. Αισθητήρες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι και οι αισθητήρες θερμοκρασίας ημιαγωγών ή αισθητήρες στερεάς κατάστασης, που βασίζονται στο γεγονός πως η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος των ημιαγωγών είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία. Αναλυτικότερα, είναι γνωστό πως το ρεύμα μιας διόδου κατά την ορθή πόλωση δίνεται από την Σχέση 4.5

$$I_D \approx I_S \left[e^{\left(\frac{V_D}{\eta V_T} \right)} - 1 \right] \quad (4.5)$$

όπου I_S : το ρεύμα κορεσμού, η : ο συντελεστής επαφής, V_T : η θερμική τάση και V_D : η τάση πόλωσης της διόδου.

Ένα επίσης παράδειγμα τέτοιου ολοκληρωμένου κυκλώματος αποτελεί το LM75, που φαίνεται στο Σχήμα 35.



Σχήμα 35: Ολοκληρωμένο LM75 με ενσωματωμένο κύκλωμα γραμμικοποίησης και μονάδα A/D [45].

4.1.5 Αισθητήρες υπέρυθρων

Μία ακόμη κατηγορία αισθητήρων θερμοκρασίας είναι οι αισθητήρες υπέρυθρων (Infrared - IR), οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι ώστε να μετρούν την θερμοκρασία ενός στόχου από απόσταση εκπέμποντας μια δέσμη υπέρυθρης ενέργειας που εστιάζεται από έναν φακό σε αυτόν και λαμβάνοντας πίσω την ανακλώμενη δέσμη, ώστε να μετρήσουν την υπέρυθρη ενέργεια του στόχου. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του στόχου τόσο υψηλότερη είναι και η υπέρυθρη ενέργειά του. Δεδομένης της ικανότητας αυτών των αισθητήρων να μετρούν τη θερμοκρασία από απόσταση, καθίστανται κατάλληλοι για εφαρμογές σε θερμοκάμερες, σε θερμικά πυρόμετρα κτλ.

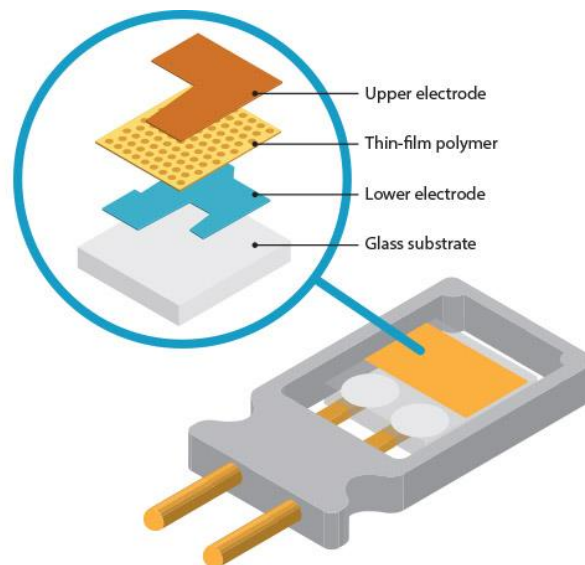
4.2 Αισθητήρες Θερμοκρασίας - Υγρασίας

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας - υγρασίας αποτελούν ηλεκτρονικούς αισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να λάβουν μετρήσεις σχετικά με την υγρασία και τη θερμοκρασία από τον περιβάλλοντα χώρο και να μετατρέψουν αυτές τις πληροφορίες σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία μπορούν να αποστείλουν σε κάποια συσκευή (π.χ. κάποιο μικροελεγκτή) μέσω του πρωτοκόλλου One-Wire. Το πρωτόκολλο αυτό καθιστά εφικτή την επικοινωνία με χαμηλή κατανάλωση διαθέτοντας ένα μόνο καλώδιο για τη μεταβίβαση δεδομένων, ενώ η δομή του βασίζεται στη λογική του Master/Slave.

Αναφορικά, με τις τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας ο αισθητήρας αναλαμβάνει να τις μεταδώσει και τις δύο ταυτόχρονα ψηφιακά.

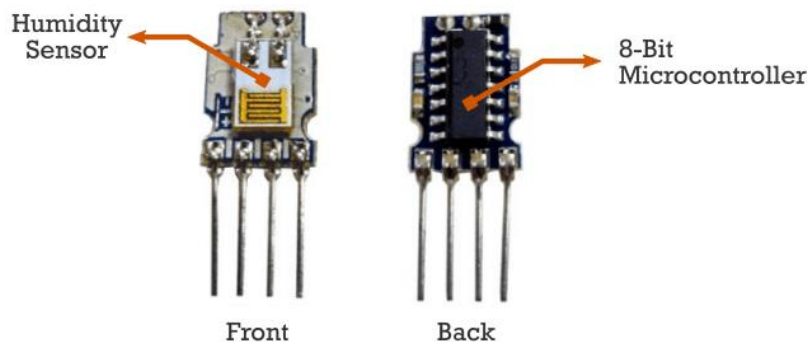
Ξεκινώντας την ανάλυση με την μέτρηση της θερμοκρασίας από τον αισθητήρα, θα αναφερθεί πως την υλοποιεί με τη χρήση ενός NTC θερμίστορ (που αναλύθηκε σε προηγούμενη υποενότητα). Εκμεταλλεύεται, λοιπόν, το γεγονός πως σε ένα θερμίστορ η αντίστασή του αλλάζει δραματικά σε μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας (μπορεί η αντίσταση να μειωθεί κατά 100 Ω με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1 °C).

Η υγρασία μετριέται μέσω ενός ευαίσθητου στην υγρασία πυκνωτή, ο οποίος αποτελείται από ένα υπόστρωμα γυαλιού, από 2 ηλεκτρόδια και ένα υλικό το οποίο απορροφά εύκολα την υγρασία (π.χ. κάποιο άλας είτε κάποιο μοριακό πολυμερές, που η διηλεκτρική του σταθερά διαφοροποιείται ανάλογα με την υγρασία που υπάρχει στο περιβάλλον). Ως εκ τούτου, στην περίπτωση που η σχετική υγρασία αυξηθεί, θα αυξηθεί και η χωρητικότητα του ευαίσθητου στην υγρασία πυκνωτή και αντιστρόφως (Σχήμα 37). Έπειτα αυτή η χωρητικότητα μετατρέπεται σε τάση (0-1V), η οποία αντικατοπτρίζει το ποσοστό της υπολογιζόμενης υγρασίας.



Σχήμα 36: Η εσωτερική δομή του αισθητήρα υγρασίας [51].

Αφού γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις για τη θερμοκρασία και την υγρασία, όπως περιγράφηκαν παραπάνω, τα αναλογικά αυτά σήματα επιδέχονται κάποιας βαθμονόμησης και μετατρέπονται σε ψηφιακά προκειμένου να αποσταλούν στη συσκευή που θα λάβει τα δεδομένα. Αυτή η διαδικασία βαθμονόμησης και μετατροπής σε ψηφιακά σήματα υλοποιείται από μια μικρή πλακέτα, η οποία είναι ενσωματωμένη στο συνολικό αισθητήρα και διαθέτει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (Σχήμα 38).



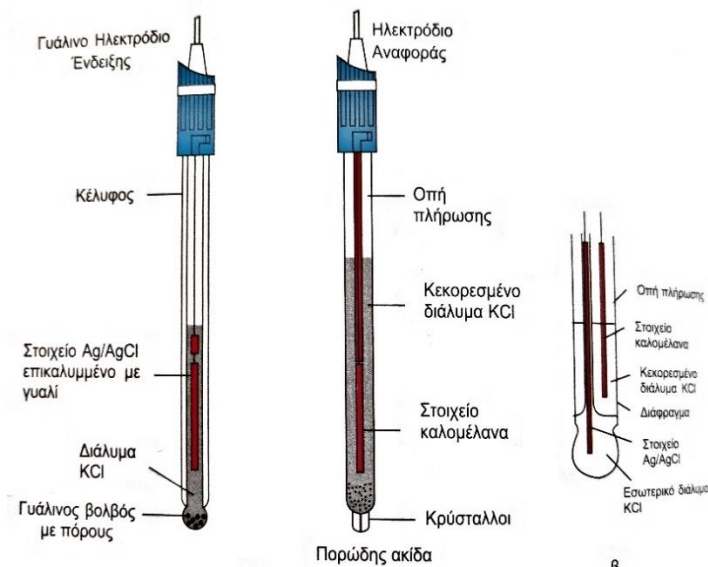
Σχήμα 37: Αισθητήρα μέτρησης υγρασίας - θερμοκρασίας εσωτερικά [52].

4.3 Αισθητήρες Μέτρησης pH

Με τον όρο pH περιγράφεται το μέτρο της οξύτητας ή της αλκαλικότητας, δηλαδή της ποσότητας των ιόντων υδρογόνου που υπάρχουν σε ένα διάλυμα ή σε μία ουσία. Ο όρος αυτός αποτελεί τη συντομογραφία του “pondus hydrogenii” και προτάθηκε το 1990 από τον S.P.L. Sorensen περιγράφοντας την μικτή συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (H^+) σε κάποιο διάλυμα. Το pH ορίζεται ως ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των ιόντων H^+ σε ένα διάλυμα, ως εξής:

$$pH = -\log_{10} a_{H^+} \quad (4.5)$$

Για τη λήψη μετρήσεων pH χρησιμοποιείται μία διάταξη δύο ηλεκτροδίων, όπου το ένα αποτελεί ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode) και το άλλο το ηλεκτρόδιο ένδειξης (indicator electrode). Τα δύο αυτά ηλεκτρόδια συνδυάζονται σε ένα κοινό αισθητήριο ηλεκτρόδιο (combined electrode), το οποίο συνήθως λειτουργεί ως γαλβανικό στοιχείο και τοποθετείται διάλυμα KCl σε αυτό (συνήθως 3 mol). Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται κοινή θερμοκρασία και για τα δύο ηλεκτρόδια, κάτι το οποίο αποδεικνύεται ιδιαίτερος σημαντικό για τη λήψη ορθών μετρήσεων από τον αισθητήρα. Στο Σχήμα 39 παρουσιάζεται η διάταξη ενός τέτοιου ηλεκτροδίου μέτρησης του pH. Επισημαίνεται πως το γυαλί για την κατασκευή του βολβού του ηλεκτροδίου καθώς και το υλικό με το οποίο γεμίζονται τα ηλεκτρόδια (KCl) επηρεάζει το δυναμικό που θα λάβουμε από τον αισθητήρα κατά τη μέτρηση. Μάλιστα η πλήρωση του ηλεκτροδίου με ένα τέτοιο κεκορεσμένο διάλυμα βοηθά ώστε να μην επηρεάζει η σύνθεση του διαλύματος το δυναμικό αναφοράς [45].



Σχήμα 38: Ηλεκτρόδιο pH [45].

Η βάση λειτουργίας του αισθητήρα για τη μέτρηση του δυναμικού είναι η μετακίνηση κατιόντων υδρογόνου (H^+) προς το εξωτερικό και το εσωτερικό του ηλεκτροδίου ένδειξης διαμέσου του ημιπερατού πορώδους υλικού στη βάση του. Ως εκ τούτου, ανάλογα με τη συγκέντρωση των H^+ , μεταβάλλεται το pH και το μετρούμενο δυναμικό. Η διαφορά δυναμικού δίνεται από την εξίσωση του Nernst [45]:

$$E = E_{ind} - E_{ref} = E_T - R \frac{T}{F} \ln a_{H^+} \quad (4.6)$$

όπου E : η διαφορά δυναμικού, E_{ind} : το δυναμικό στην ένδειξη, E_{ref} : το δυναμικό αναφοράς, E_T : δυναμικό εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία, R : σταθερά αερίων, T : απόλυτη θερμοκρασία, F : σταθερά Faraday.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

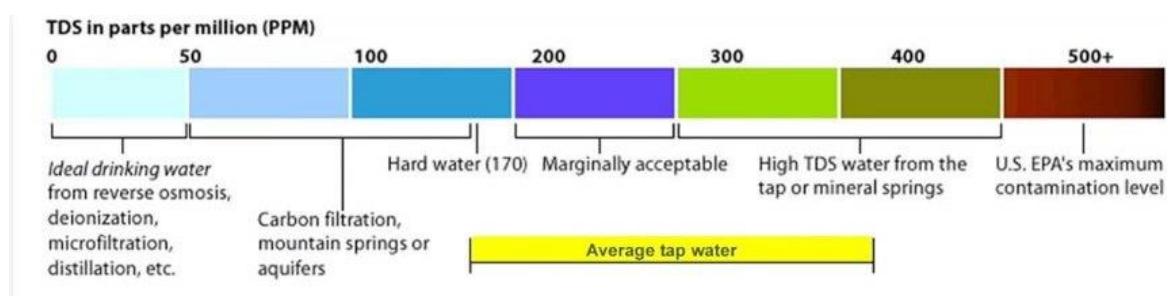
$$pH_T = pH_{T^0} - \frac{E}{R S T} \quad (4.7)$$

όπου R : σταθερά (0.1984 mV/K), S : σφάλμα του οργάνου, pH_{T^0} : το pH όταν $E = 0$.

Επισημαίνεται πως η τιμή του pH εξαρτάται από την τιμή της θερμοκρασίας του μετρούμενου διαλύματος.

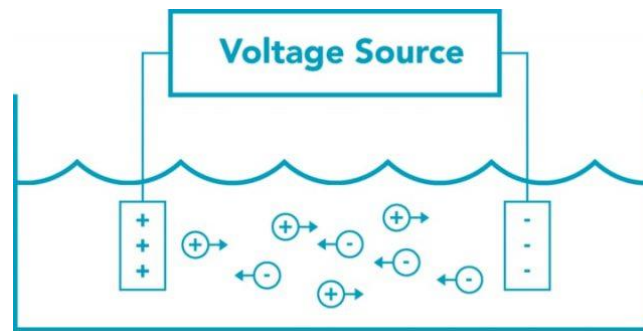
4.4 Αισθητήρες Μέτρησης Total Dissolved Solids (TDS)

Ένας αισθητήρας TDS αποτελεί έναν ηλεκτρονικό αισθητήρα, ο οποίος υπολογίζει το συνολικό αριθμό των στερεών σωματιδίων που είναι διαλυμένα στο νερό. Με τον όρο TDS αναφερόμαστε στο συνολικό αριθμό (σε χιλιόγραμμα) από οργανικές και ανόργανες ουσίες σε μοριακή ή ιοντική μορφή που είναι διαλυμένες σε ένα λίτρο νερού. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός TDS τόσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση στερεών σωματιδίων στο νερό. Άρα η καθαρότητα του νερού είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον αριθμό TDS. Ο υπολογισμός του TDS αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο για τον έλεγχο της ποιότητας του προς πόση νερού, για την υδροπονία και πολλές άλλες εφαρμογές. Η συγκέντρωση των διαφόρων στοιχείων που αναφέρθηκαν στο νερό υπολογίζεται σε parts per million (ppm) και στο Σχήμα 42 παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές τιμές αυτού.



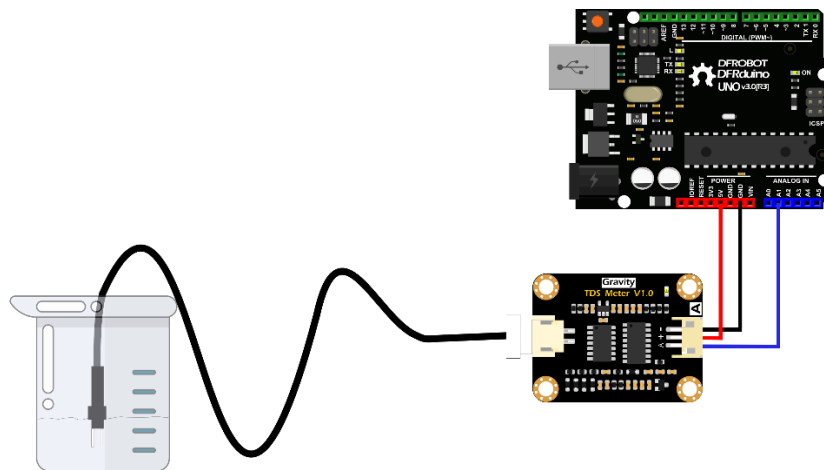
Σχήμα 39: Τιμές TDS για διαφορετικά δείγματα νερού [53].

Με τον αισθητήρα TDS (Σχήμα 42) πρακτικά μετριέται το ηλεκτρικό φορτίο που υπάρχει στο νερό (electrical charge - ec). Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην ύπαρξη δύο ηλεκτροδίων που εισάγονται στο νερό και μετρούν το φορτίο ερμηνεύοντας το αποτέλεσμα σε αριθμό ppm. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται πως οι ιοντικές ενώσεις που είναι διαλυμένες στο νερό έχουν την ικανότητα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα (Σχήμα 41). Έτσι, όταν υπάρχουν διαλυμένα σωματίδια στο νερό προκαλείται αγωγή ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επομένως, στην περίπτωση όπου το δείγμα νερού προς μέτρηση δεν διαθέτει κάποιο διαλυτό υλικό δεν άγει τον ηλεκτρισμό και ως εκ τούτου έχει 0 ppm. Η ένδειξη του TDS αισθητήρα είναι ανάλογη με τον αριθμό των διαλυμένων σωματιδίων στο νερό.



Σχήμα 40: Λειτουργία αισθητήρα TDS [53].

Σε αυτό τον αισθητήρα η πηγή διέγερσης αποτελείται από εναλλασσόμενο ρεύμα, προκειμένου να αποτρέπεται η πόλωση και να λαμβάνεται πιο σταθερό σήμα στην έξοδο του αισθητήρα [54].



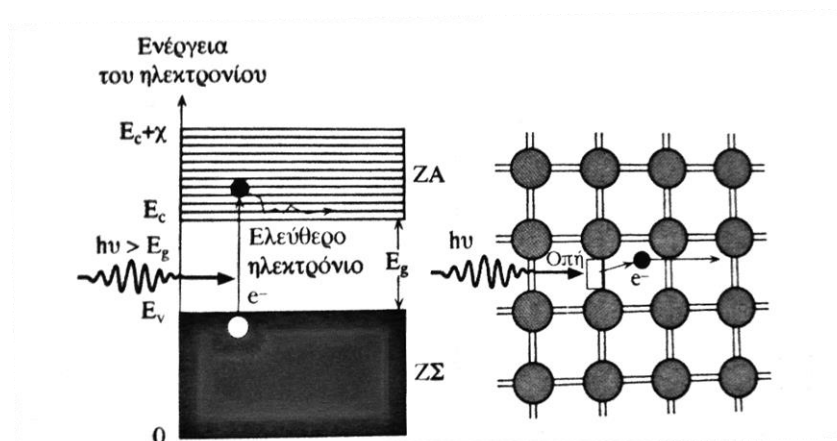
Σχήμα 41: Αισθητήρας TDS [54].

4.5 Αισθητήρας Φωτός

Οι αισθητήρες φωτός χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ενέργειας από κάποιο συγκεκριμένο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ολόκληρου του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας είτε μέρους αυτής. Οι ανιχνευτές αυτοί φωτονίων παράγουν κάποια διαφορά δυναμικού, η οποία με μία μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή μπορεί να δώσει τιμές σχετικά με το μετρούμενο μέγεθος. Μάλιστα επισημαίνεται πως οι αισθητήρες αυτοί εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα μήκη κύματος των ανιχνεύσιμων φωτονίων για τα οποία έχουν κατασκευαστεί [45]. Ακολούθως αναλύονται οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες φωτός.

4.5.1 Φωτοαντίσταση

Η φωτοαντίσταση κατασκευάζεται από κάποιο φωτοευαίσθητο ημιαγωγικό υλικό που εφαρμόζεται πάνω σε μία κεραμική βάση (Σχήμα 44). Στην περίπτωση που φωτόνια προσπέσουν πάνω στον ημιαγωγό αυτό με ενέργεια $h\nu > E_g$ (όπου E_g η ενέργεια του ηλεκτρικού διακένου), αυτά διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Το ηλεκτρόνιο δηλαδή απορροφά το προσπίπτον φωτόνιο αποκτώντας ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση του ηλεκτρικού διακένου φθάνοντας στη ζώνη αγωγιμότητας όπου γίνεται ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Ένα φωτόνιο επομένως μπορεί να σπάσει έναν δεσμό Si-Si κι έτσι στην περιοχή αυτή δημιουργείται ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μία οπή, που αντιστοιχεί στο ηλεκτρόνιο αυτό που μεταπήδησε από τη ζώνη σθένους (Σχήμα 43) [55].

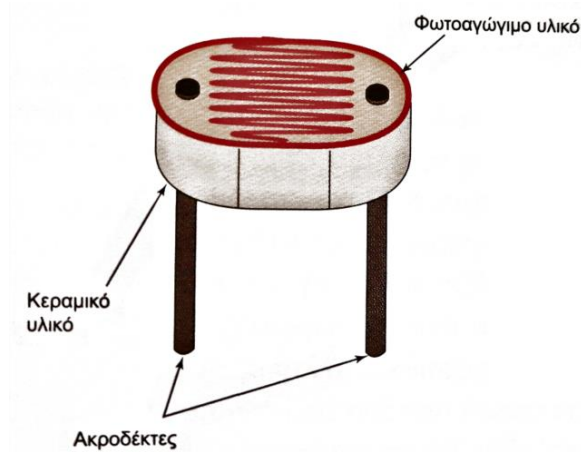


Σχήμα 42: Ενεργειακά πεδία μετάβασης φορέων κατά την πρόσπτωση [55].

Ως εκ τούτου και δεδομένης της Σχέσης 4.6, η οποία δείχνει πως υπολογίζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού, καθίσταται σαφές πως με την πρόσπτωση φωτονίων ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στη φωτοαντίσταση αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ημιαγωγού άρα και της φωτοαντίστασης.

$$\sigma = nq_e\mu_n + pq_e\mu_p \quad (4.6)$$

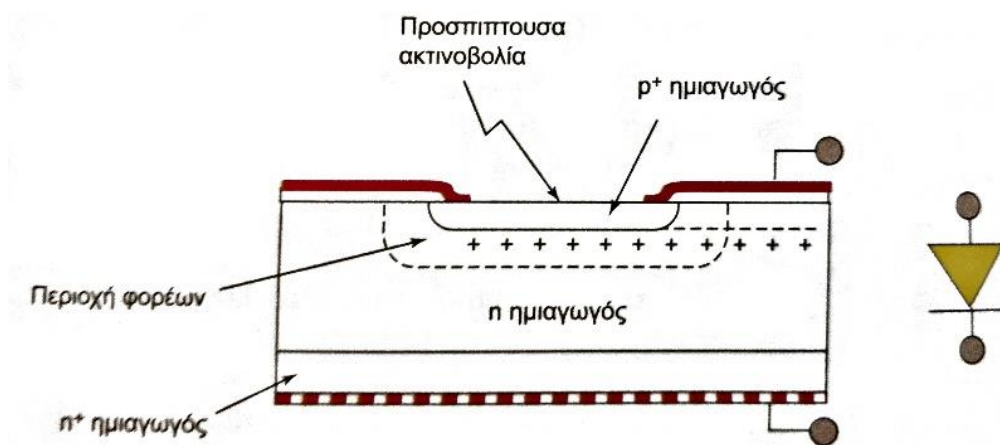
όπου n και p οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και των οπών στη ζώνη σθένους, q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου και μ_n και μ_p η κινητικότητα των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα.



Σχήμα 43: Δομή φωτοαντίστασης [45].

4.5.2 Φωτοдиодος

Η φωτοδιόδος αποτελεί μία επαφή τύπου p-n, η οποία κατασκευάζεται συνήθως από πυρίτιο (Si), όπως φαίνεται στο Σχήμα 45, όπου η περιοχή τύπου p κατασκευάζεται πολύ λεπτή και από αυτή εισέρχεται η ακτινοβολία στη φωτοδιόδο.



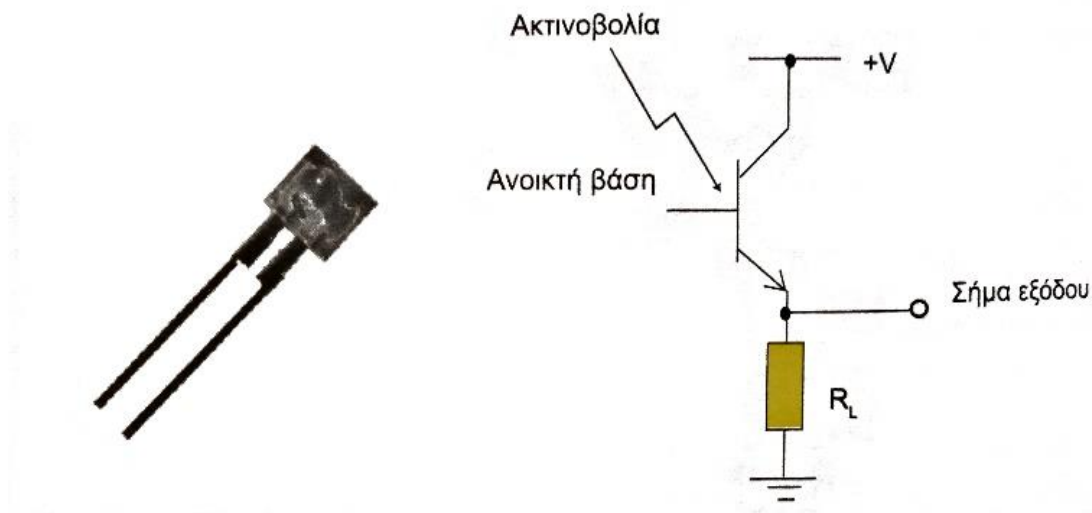
Σχήμα 44: Δομή στοιχείο φωτοδιόδου και ηλεκτρονικό σύμβολο [45].

Οι περιοχές τύπου n και τύπου p διαθέτουν ίσες τις αντίθετες συγκεντρώσεις προσμίξεων, ενώ η περιοχή όπου αυτές ενώνονται αποτελεί την περιοχή μετάβασης, όπου γίνεται η επανασύνδεση.

Όταν λοιπόν ένα φωτόνιο με επαρκή ενέργεια προσπέσει πάνω σε μία φωτοδιόδο, δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου - οπής εξαιτίας του φωτοηλεκτρικού φαινομένου παράγοντας ένα φωτορεύμα (οπές κινούνται προς την άνοδο και ηλεκτρόνια προς την κάθοδο), η ανίχνευση του οποίου μας δίνει πληροφορίες για την φωτεινή ακτινοβολία.

4.5.3 Φωτοτρανζίστορ

Το φωτοτρανζίστορ αποτελεί μία διάταξη τρανζίστορ, η οποία μετατρέπει την προσπίπτουσα ακτινοβολία στη βάση του τρανζίστορ σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο βέβαια εξαρτάται από το εσωτερικό κέρδος ρεύματος του στοιχείου. Μάλιστα τοποθετείται και μία αντίσταση στον εκπομπό στα άκρα της οποίας λαμβάνεται η παραγόμενη τάση (Σχήμα 47).



Σχήμα 45: Φωτοτρανζίστορ και τρόπος συνδεσμολογίας [34].

Κεφάλαιο 5

Στοιχεία Πειραματικής Διάταξης

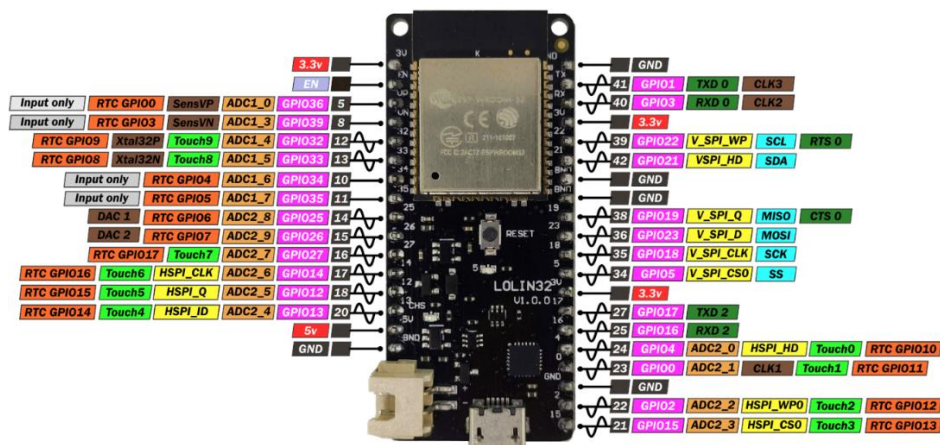
5.1 Επιλογή Υλικών Στοιχείων της Διάταξης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα έξυπνο σύστημα ανάπτυξης μαρουλιών με τη μέθοδο της υδροπονίας. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη περιλάμβανε τη σχεδίαση τόσο της διάταξης υδροπονίας, όπου αναπτύχθηκαν τα φυτά, αλλά και όλο το σύστημα των ηλεκτρονικών στοιχείων, στα οποία βασίστηκε η αυτόματη ανάπτυξη και ο απομακρυσμένος έλεγχος των φυτών. Για τη διάταξη ακολουθήθηκε η τεχνική NFT της υδροπονίας, για την οποία χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες PVC με 16 οπές για την τοποθέτηση των φυτών καθώς και μία αντλία για την ανακύκλωση του διαλύματος που διατρέχει τις ρίζες των φυτών. Επίσης, η αυτοματοποίηση της διαδικασίας ανάπτυξης τελέστηκε μέσω ενός συνόλου αισθητήρων, αντλιών και άλλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, με την κατάλληλη σύνδεση με έναν προγραμματισμένο για αυτό το σκοπό μικροελεγκτή. Ολόκληρη η σχεδίαση, η ανάπτυξη και η λειτουργία του συστήματος που κατασκευάστηκε θα αναλυθούν στη συνέχεια.

5.1.1 Επιλογή Μικροελεγκτή

Ως πλακέτα ανάπτυξης του αυτόματου συστήματος υδροπονίας επιλέχθηκε η WeMos LOLIN32 V1.0.0 Wi-Fi Bluetooth ESP-32 Based Board, η οποία είναι διαθέσιμη σε χαμηλό κόστος και καταναλώνει χαμηλή ενέργεια, καθιστώντας την ιδανική πλακέτα για ανάπτυξη εφαρμογών IoT. Η συγκεκριμένη πλακέτα βασίζεται στον μικροελεγκτή ESP32-WROOM-32, ο οποίος στη βάση του διαθέτει 2 chips «ESP32-DoWDQ6». Η επιλογή της συγκεκριμένης πλακέτας βασίστηκε στους εξής άξονες. Οι πρώτοι δύο αναφέρθηκαν ήδη και αφορούν στην χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση της συγκεκριμένης, καθώς και στο γεγονός πως διαθέτει ήδη

ενσωματωμένο Wi-Fi, χωρίς να απαιτείται η προσθήκη επιπλέον υλικού για την επίτευξη μιας τέτοιας σύνδεσης. Επιπροσθέτως, τέθηκε υπόψιν ο αριθμός των αισθητήρων και όλων των υπόλοιπων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που θα τροφοδοτούνταν από το μικροελεγκτή και δεδομένου πως απαιτούνταν αρκετά Pins του μικροελεγκτή για αυτές τις συνδέσεις, επιλέχθηκε η συγκεκριμένη αναπτυξιακή πλακέτα, η οποία διαθέτει 32 θύρες εισόδου - εξόδου, από τις οποίες οι 26 είναι ψηφιακές και οι 18 αναλογικές. Επιπλέον, επισημαίνεται πως και η ευελιξία και ευκολία που παρέχεται στον προγραμματισμό της, προσφέροντας εύκολη σειριακή επικοινωνία με τον υπολογιστή, αλλά και διαθέτοντας έναν πολύ μεγάλο αριθμό βιβλιοθηκών συντέλεσε επίσης στην επιλογή της πλακέτας αυτής. Ένας ακόμη παράγοντας της λήψης αυτής της απόφασης αποτέλεσε και το χαμηλό της κόστος (~ 10 €) συγκριτικά με άλλες. Ακολουθώντας, στο Σχήμα 46 φαίνεται η εν λόγω πλακέτα και το διάγραμμα αντιστοίχισης των pins της.



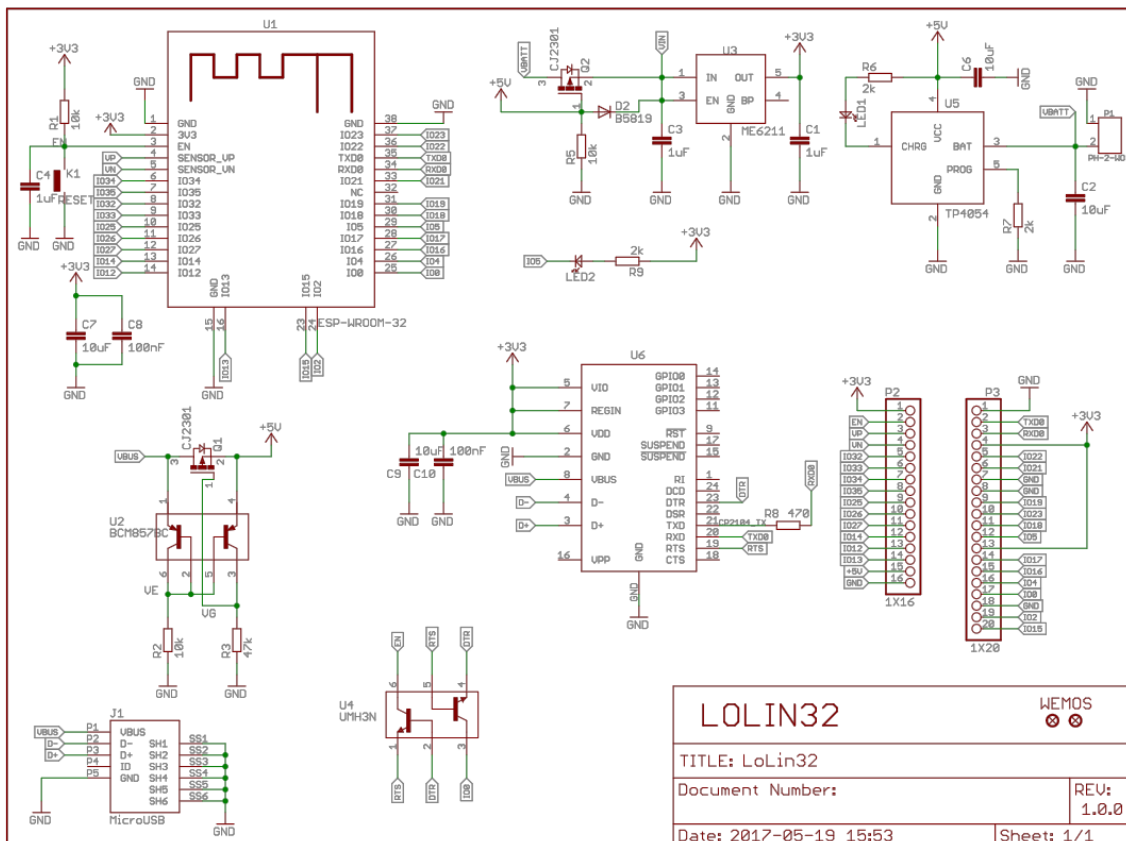
Σχήμα 46: Διάγραμμα των pins του ESP32 WeMos LOLIN32 [56].

Τα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή αυτού παρουσιάζονται ακολούθως.

- **ESP32 Module:** ESP-WROOM-32 της Espressif.
 - Διπύρηνος επεξεργαστής στα 240MHz
 - Μνήμη 4MB SPI (έως και 16MB)
- **Συνδεσιμότητα**
 - WiFi 802.11 b/g/n.
 - Ασφάλεια WEP, WPA / WPA2 PSK / Enterprise.
 - Μέγιστη Ισχύς για μεταφορά δεδομένων: 19.5 dBm@11b, 16.5 dBm@11g, 15.5 dBm@11n
 - Ευαισθησία μέγιστης λήψης: -97 dBm

- Bluetooth 4.0 LE
- **32 Είσοδοι - Έξοδοι**
 - 26 Ψηφιακές θύρες εισόδου - εξόδου (3.3V), που υποστηρίζουν PWM
 - 18 αναλογικές εισοδοι
 - 3 UART
 - 3 SPI
 - 2 I2S
 - 2 Digital to Analog Converter (DAC)
 - 2 I2C
- **Κατανάλωση στη λειτουργία ύπνου: 5 μ A**
- **Ενσωματωμένοι Αισθητήρες**
 - Αισθητήρας Hall
 - 10 εισοδοι για διεπαφή αφής
- **Τάση Λειτουργίας: 3.3V**

Ακολουθως στο Σχήμα 47, φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του WeMos LOLIN32.



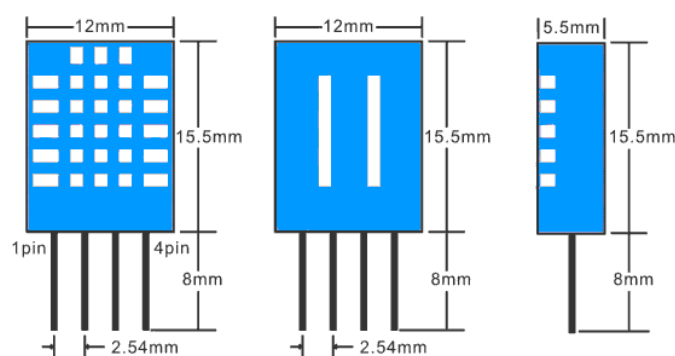
Σχήμα 47: Σχηματικό Διάγραμμα WeMos LOLIN32 [57].

5.1.2 Επιλογή Αισθητήρων Ελέγχου του Περιβάλλοντος

Σύμφωνα με τη Βιβλιογραφία ο έλεγχος των μικροκλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό περιβάλλον των θερμοκηπίων, όπου αναπτύσσονται ως επί το πλείστον τα συστήματα υδροπονίας, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ομαλή ανάπτυξη των φυτών εντός αυτού [11], [58]. Σε αυτές τις παραμέτρους εντάσσονται η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος ανάπτυξης των φυτών, καθώς και η ένταση της φωτεινότητας που επικρατεί στο χώρο ανάπτυξης. Επομένως, για την ανάπτυξη του αυτοματοποιημένου συστήματος υδροπονίας, που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ενός αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας καθώς και ενός αισθητήρα μέτρησης της έντασης της φωτεινότητας του χώρου ανάπτυξης.

5.1.2.1 Επιλογή Αισθητήρα Θερμοκρασίας - Υγρασίας

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας - υγρασίας που επιλέχθηκε είναι ο DHT11, ο οποίος έχει χαμηλό κόστος, πολύ καλή ακρίβεια, γρήγορη απόκριση, υψηλή αξιοπιστία και μεγάλη χρονική διάρκεια ζωής. Ο αισθητήρας αυτός, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, αποτελείται από δυο υποστρώματα για τη μέτρηση της υγρασίας, ανάμεσα στα οποία υπάρχει υλικό του οποίου η χωρητικότητα μεταβάλλεται με την απορρόφηση της υγρασίας δίνοντας την κατάλληλη τάση ως έξοδο και από ένα NTC θερμίστορ για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Οι δύο αυτές τιμές μεταβιβάζονται σε έναν 8-Bit μικροελεγκτή και μετατρέπονται από αναλογικές σε ψηφιακές.



Σχήμα 48: Αισθητήρας Θερμοκρασίας - Υγρασίας και οι διαστάσεις του [48].

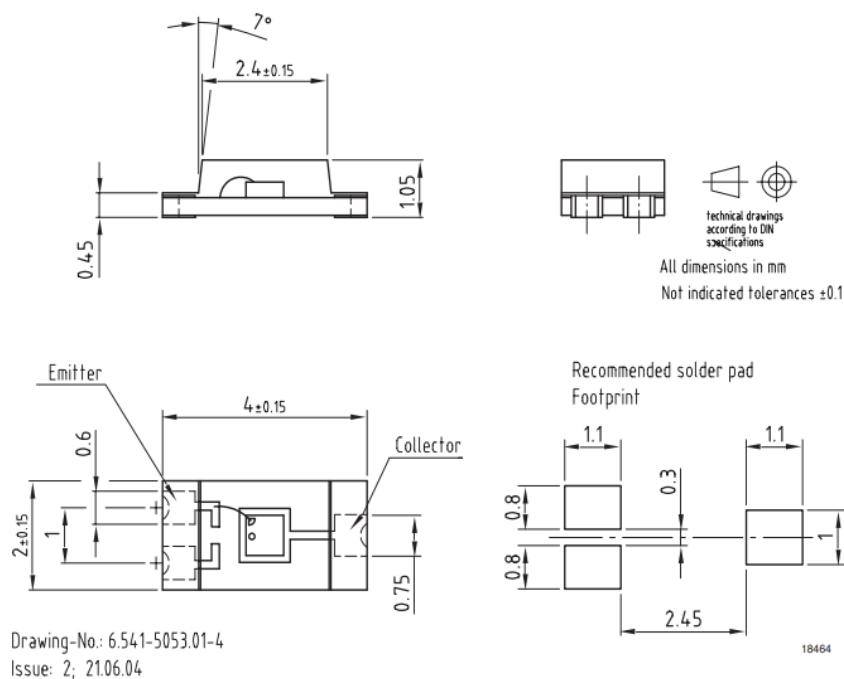
Η βαθμονόμηση του αισθητήρα έχει ήδη υλοποιηθεί στα εργαστήρια παραγωγής του με υψηλή ακρίβεια, χωρίς να απαιτείται εκ νέου. Στο Σχήμα 48 παρατίθεται το σχέδιο αυτού του αισθητήρα, ενώ ακολούθως παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του.

- Τυπική Τάση Εισόδου: 3 VDC, 3.3 VDC, 5 VDC
- Ρεύμα Λειτουργίας: 2.5mA
- Είδος Αισθητήρα: Ψηφιακός
- Πρωτόκολλο Επικοινωνίας: Μονού καλωδίου

Επισημαίνεται πως ο αισθητήρας αυτός βρίσκεται τοποθετημένος σε μια πλακέτα με ενσωματωμένη μία αντίσταση 4.7 kΩ.

5.1.2.2 Επιλογή Αισθητήρα Μέτρησης Φωτεινότητας

Για τη μέτρηση της φωτεινότητας επιλέχθηκε ο αισθητήρας TEMT6000, ο οποίος βασίζει τη λειτουργία του σε ένα φωτοτρανζίστορ. Ο εν λόγω αισθητήρας μετράει τη φωτεινότητα σε lux (lx). Η αρχή λειτουργίας ενός φωτοτρανζίστορ αναλύθηκε ενδελεχώς στο Κεφάλαιο 4. Παρακάτω στο Σχήμα 49 ακολουθεί το σχέδιο με τις διαστάσεις του συγκεκριμένου αισθητήρα, όπως υπάρχουν στο datasheet του [60].



Σχήμα 49: Αισθητήρας Φωτεινότητας και οι διαστάσεις του [60].



Σχήμα 50: Αισθητήρας Φωτεινότητας [61].

Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα Έντασης του Φωτός (Σχήμα 50) είναι τα εξής:

- Τάση Τροφοδοσίας: +5V
- Ρεύμα Λειτουργίας: 0.5mA

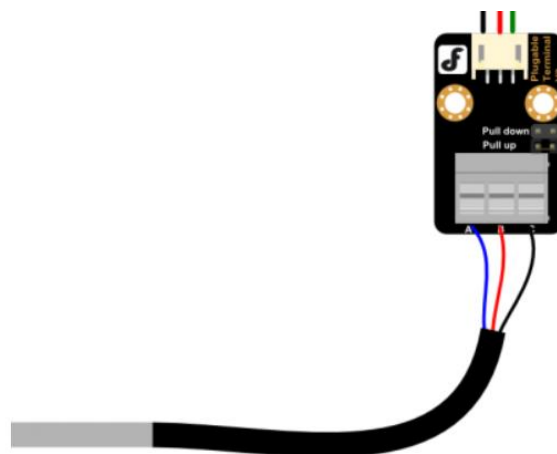
- Θερμοκρασία κατά τη Λειτουργία: -40°C / $+85^{\circ}\text{C}$
- Είδος Αισθητήρα: Αναλογικός

5.1.3 Επιλογή Αισθητήρων Μέτρησης Ποιότητας του Διαλύματος

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ποιότητα του διαλύματος της υδροπονίας, το οποίο διοχετεύεται ανακυκλούμενο στις ρίζες των φυτών, καθίσταται αναγκαία η τοποθέτηση αισθητήρων που ελέγχουν τη θερμοκρασία του, την τιμή του pH του και την ηλεκτρική αγωγιμότητά του (Electrical Conductivity - EC) [9], [62]. Για την καλύτερη λοιπόν επίβλεψη των συνθηκών ανάπτυξης του φυτού επιλέχθηκε ένας αισθητήρας θερμοκρασίας του υγρού διαλύματος, ένας αισθητήρας μέτρησης του pH και ένας αισθητήρας TDS, ο οποίος μετρά το EC του διαλύματος, όπως φαίνεται ακολούθως.

5.1.3.1 Επιλογή Αισθητήρα Θερμοκρασίας Διαλύματος

Για τη συγκεκριμένη μέτρηση ήταν αναγκαία η επιλογή ένας αδιάβροχου αισθητήρα. Υπό αυτή την προϋπόθεση επιλέχθηκε ο αισθητήρας DS18B20, ο οποίος μάλιστα διαθέτει και πολύ μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, διαθέτει διεπαφή ενός καλωδίου (one wire), ώστε μόνο ένα καλώδιο να χρειάζεται να συνδεθεί στο μικροελεγκτή για τη λήψη δεδομένων. Για τη σύνδεσή του δεν απαιτούνται επιπλέον υλικά, καθώς έχει ενσωματωμένη την αντίσταση $4.7\text{ k}\Omega$ που χρειάζεται μεταξύ σήματος και τροφοδοσίας του. Η έξοδός του είναι ψηφιακή με τη δυνατότητα επιλογής στα 9 είτε στα 12 bits. Στο Σχήμα 51 φαίνεται ο εν λόγω αισθητήρας.



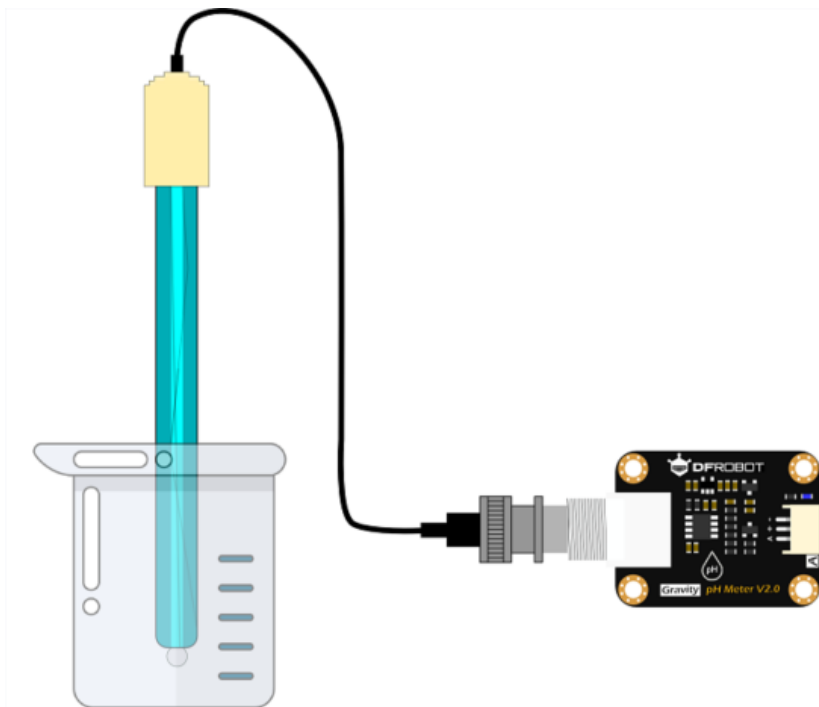
Σχήμα 51: Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20 [63].

Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα είναι τα ακόλουθα [63]:

- Τυπική Τάση Εισόδου: 3VDC, 3.3VDC, 5VDC, 5.5VDC
- Ρεύμα Λειτουργίας: 1.5mA
- Είδος Αισθητήρα: Ψηφιακός
- Πρωτόκολλο Επικοινωνίας: Dallas 1-Wire
- Εύρος Μετρούμενης Θερμοκρασίας: $-55\dots 125^{\circ}\text{C}$ (-67°F to $+257^{\circ}\text{F}$)
- Ακρίβεια Μετρούμενης Θερμοκρασίας: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (-10°C to $+85^{\circ}\text{C}$)

5.1.3.2 Επιλογή Αισθητήρας Μέτρησης pH Διαλύματος

Για τη μέτρηση του pH του διαλύματος επιλέχθηκε ο αισθητήρας SEN0161-V2 της DFRobot (Σχήμα 52), ο οποίος είναι εργοστασιακών προδιαγραφών, έχει μεγάλη αντοχή και καλή ακρίβεια



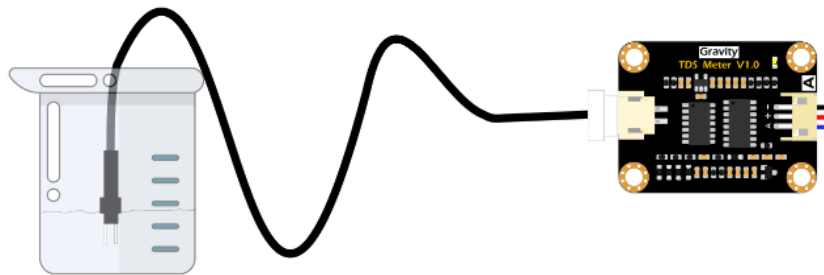
Σχήμα 52: Αισθητήρας Μέτρησης pH [64].

Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα συνοψίζονται παρακάτω:

- Τάση Τροφοδοσίας: 3.3~5.5V
- Τάση Εξόδου: 0~3.0V
- Σύνδεση Ηλεκτροδίου: BNC
- Ακρίβεια Μέτρησης: $\pm 0.1@25^{\circ}\text{C}$
- Εύρος Ανίχνευσης pH: 0~14
- Εύρος Θερμοκρασίας: 5~60 $^{\circ}\text{C}$
- Χρόνος Απόκρισης: < 2 λεπτά

5.1.3.3 Επιλογή Αισθητήρα μέτρησης EC

Για τη συγκεκριμένη μέτρηση επιλέχθηκε ο αισθητήρας SEN0244 της DFRobot (Σχήμα 53), ο οποίος μετρά τα διαλυμένα σωματίδια του διαλύματος. Ωστόσο, με κατάλληλη μετατροπή αυτή η τιμή αντικατοπτρίζει και την EC του διαλύματος. Οπότε επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος, λόγω του χαμηλού του κόστους έναντι σε κάποιον αισθητήρα άμεσης μέτρησης EC.



Σχήμα 53: Αισθητήρας TDS DFRobot [54].

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αισθητήρα είναι:

- Τάση Εισόδου: 3.3 ~ 5.5V
- Τάση Εισόδου: 0 ~ 2.3V
- Ρεύμα Λειτουργίας: 3 ~ 6mA
- Εύρος Μέτρησης TDS: 0 ~ 1000ppm
- Ακρίβεια Μέτρησης TDS: $\pm 10\%$ (25 °C)
- Διαστάσεις: 42 × 32mm

Ένα επιπλέον στοιχείο που καθόρισε τη συγκεκριμένη επιλογή ήταν το γεγονός πως το συγκεκριμένο προϊόν διαθέτει έτοιμη βιβλιοθήκη για τη χρήση του.

5.1.4 Επιλογή Φωτισμού LED

Όπως είναι γνωστό, τα φυτά προκειμένου να αναπτυχθούν σωστά χρειάζονται αρκετό φως και δεδομένου πως η ανάπτυξη του συστήματος υδροπονίας έγινε σε κλειστό χώρο (Εργαστήριο) κρίθηκε αποτελεσματικό να τοποθετηθεί κάποια διάταξη LED πάνω από τα φυτά, η οποία θα λειτουργεί επικουρικά με το λαμβανόμενο φως του ήλιου και μάλιστα σε περιοδικά διαστήματα που προσομοιάζουν τα διαστήματα ηλιοφάνειας και σκότους μιας ημέρας. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η χρήση του LED Ring Bundle - 61 × WS2812 RGB. Η συγκεκριμένη επιλογή βασίστηκε στις συστάσεις της βιβλιογραφίας για συγκεκριμένο φάσμα φωτός που είναι καταλληλότερο για την

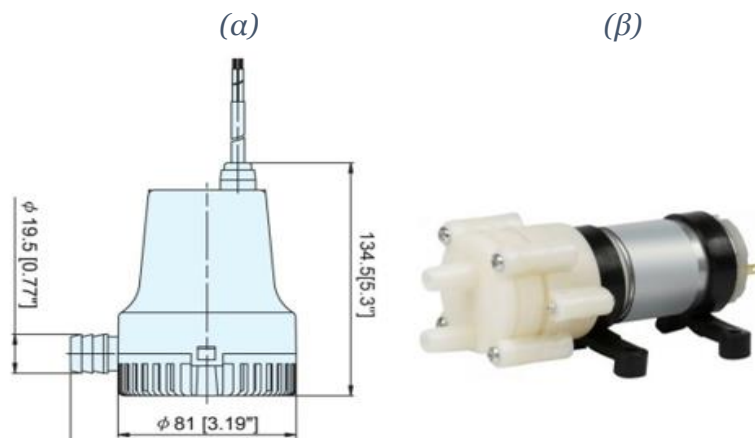
καλύτερη ανάπτυξη του φυτού, άρα για συγκεκριμένους συνδυασμούς σε RGB χρώματα, αντί για το κλασικό λευκό φως [65], [66]. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από 61 μικρά LEDs τοποθετημένα σε ομόκεντρους δακτυλίους, τα οποία ρυθμίστηκαν ώστε να λαμβάνουν την RGB αναλογία (80,10,10) ξεκινώντας από τις 06:30 το πρωί έως τις 20:00 το βράδυ, προσπαθώντας να συμβαδίζουν με τις ώρες φωτεινότητας του ήλιου. Η τροφοδοσία της διάταξης είναι στα 5 V, ενώ η ταχύτητα αποστολής δεδομένων είναι 800 kbps. Στο Σχήμα 54 παρουσιάζεται το η διάταξη LED που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή.



Σχήμα 54: LED Ring RGB [67].

5.1.5 Επιλογή Αντλιών

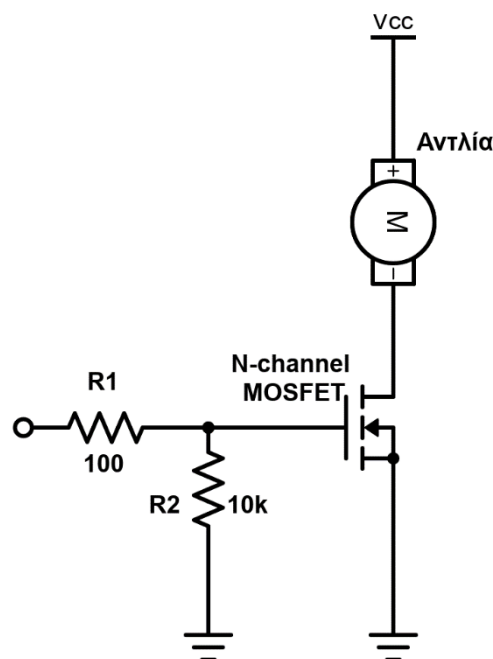
Για τη λειτουργία του συστήματος υδροπονίας NFT απαιτείται το διάλυμα με τα θρεπτικά συστατικά να διαρρέει συνεχώς τα κανάλια με τα φυτά και να ανακυκλώνεται. Προκειμένου να διοχετεύεται λοιπόν από τη δεξαμενή όπου είναι αποθηκευμένο καθίσταται αναγκαία η χρήση μίας αντλίας. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε μία αντλία τύπου bilge pump (Σχήμα 55), που συνήθως χρησιμοποιούνται



Σχήμα 55: Αντλία Διοχέτευσης Διαλύματος (α) και αντλία προσθήκης υγρού στο θρεπτικό διάλυμα (β) [67].

για την εξαγωγή του νερού που διεισδύει στα σκάφη. Η αντλία επιλέχθηκε να τροφοδοτείται από 12 V και διαθέτει σχετικά μικρή κατανάλωση ρεύματος, η οποία εξαρτάται από την τιμή της τροφοδοσίας της αντλίας (0-12 V). Σημαντική παράμετρο για την επιλογή μιας τέτοιου είδους αντλίας αποτέλεσε το γεγονός πως μπορεί να υποστηρίξει διαρκή λειτουργία.

Προκειμένου να καταστεί εφικτός ο πλήρης αυτόματος έλεγχος του συστήματος κρίθηκε απαραίτητο να τοποθετηθούν και 3 αντλίες, οι οποίες θα προσθέτουν στο διάλυμα κάποιο βασικό ή όξινο υγρό όταν οι αντίστοιχοι αισθητήρες ανιχνεύσουν πως το διάλυμα έχει ξεπεράσει τα όρια του pH, είτε διάλυμα υγρού λιπάσματος όταν εντοπιστεί έλλειμμα από τον αισθητήρα TDS. Για το σκοπό αυτό ο αρχικός σχεδιασμός περιλάμβανε την τοποθέτηση περισταλτικών αντλιών. Δεδομένου όμως πως κατά το διάστημα της ανάπτυξης του συστήματος οι περισταλτικές αντλίες ήταν σε έλλειψη, επιλέχθηκαν κάποιες DC αντλίες που επίσης τροφοδοτούνται με 12 V, ενώ έχουν μέγιστη ένταση ρεύματος 0.5- 0.7 A και μέγιστη ροή 3 L/minute.



Σχήμα 56: Σχηματικό κυκλώματος διακόπτη αντλιών με MOSFET.

Επισημαίνεται πως προκειμένου ο χρήστης να είναι σε θέση να ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί κατά βούληση τις αντλίες αν παραστεί κάποια ανάγκη και χρειαστεί να επέμβει στο αυτόματο σύστημα, έχει υλοποιηθεί σε επίπεδο hardware ένα κύκλωμα διακόπτη από MOSFET για κάθε αντλία. Το σχηματικό αυτού του κυκλώματος φαίνεται στο Σχήμα 56.

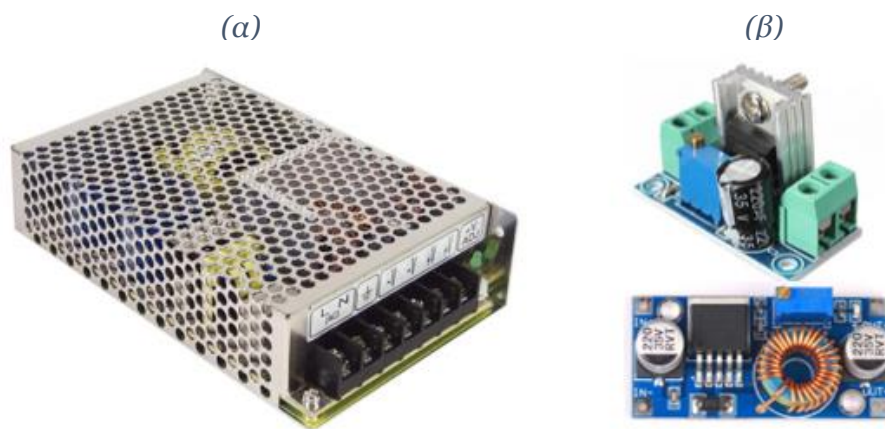
5.1.6 Επιλογή Μέσου Τροφοδοσίας

Όπως φάνηκε από τη μέχρι τώρα ανάλυση του hardware υπάρχουν πολλές και διαφορετικές απαιτήσεις αναφορικά με την τροφοδοσία στους αισθητήρες, στον μικροελεγκτή και τις αντλίες. Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί συγκεντρώνονται οι απαιτήσεις τροφοδοσίας για κάθε ηλεκτρονικό εξάρτημα.

Πίνακας 3: Τροφοδοσία ηλεκτρονικών εξαρτημάτων συστήματος.

Ηλεκτρονικό Εξάρτημα	Τροφοδοσία
WeMos LOLIN32	5 V
DHT11	5 V
TEMT6000	5 V
LED Ring	5 V
pH Sensor	5 V
TDS Sensor	5 V
DS18B20	5 V
Pumps	3 - 12 V

Προκειμένου να επιτευχθεί η τροφοδοσία όλων αυτών με ένα τροφοδοτικό επιλέχθηκε η χρήση ενός Τροφοδοτικού Βιομηχανικού τύπου (Σχήμα 57) το οποίο θα παρέχει τάση 12 V DC και μπορεί να υποστηρίξει έως και 8 Amperes (το οποίο φάνηκε αρκετό λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις όλου του Hardware). Επιλέχθηκε η χρήση τροφοδοτικού με τη μεγαλύτερη τιμή τάσης που απαιτείται ώστε στις υπόλοιπες περιπτώσεις να υποβαθμίσουμε (μέσω υποβαθμιστών τάσης) αυτή την τάση στα 5 V.



Σχήμα 57: Τροφοδοτικό Συστήματος (α) και υποβαθμιστές τάσης (β) [65].

Προκειμένου, λοιπόν, να μπορούν να τροφοδοτηθούν τα εξαρτήματα που απαιτούν τάση τροφοδοσίας 5 V επιλέχθηκε ένας υποβαθμιστής τάσης (step down module) (Σχήμα 57) ο οποίος μπορεί να υποστηρίξει είσοδο 4.2 - 40 V και να δώσει έξοδο 1.2 - 37 V. Οπότε είναι κατάλληλος για το σύστημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική, όπου επιθυμείται ο υποβιβασμός από τα 12 V στα 5 V. Μάλιστα μπορεί να υποστηρίξει ένταση ρεύματος 2.2 A που επίσης αποδεικνύονται αρκετή.

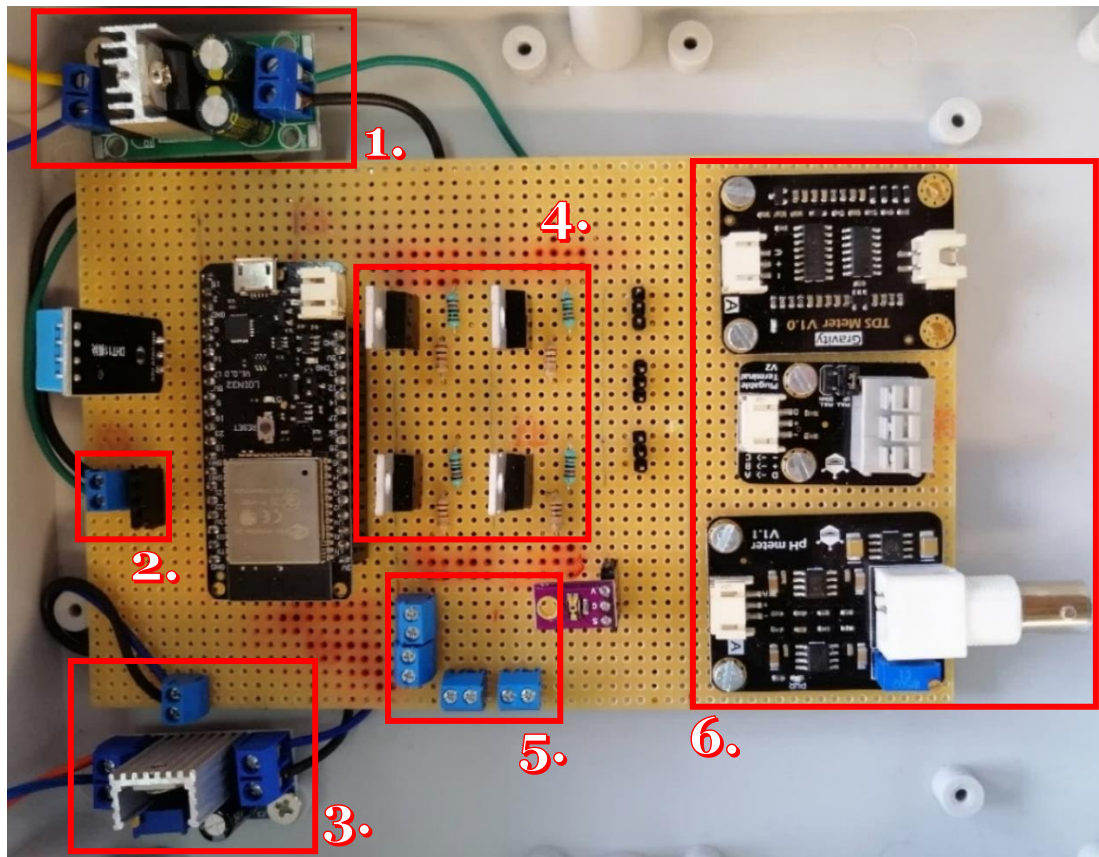
Επίσης δεδομένου πως οι αντλίες μπορούν να λειτουργήσουν έως τα 12 V και επειδή ανάλογα με την τάση τροφοδοσίας ρυθμίζεται και η ταχύτητά τους κρίθηκε σκόπιμο να τοποθετηθεί ένα επιπλέον step down module, το οποίο θα είναι ρυθμιζόμενο με κάποιο trimmer προκειμένου να μπορεί να ρυθμιστεί η ταχύτητα ροής τους. Εν προκειμένω, χρησιμοποιήθηκε ο υποβιβαστής τάσης που φαίνεται στο Σχήμα 57, που υποστηρίζει είσοδο 5-32 V, έξοδο 1-32 V και ένταση ρεύματος 5 A.

5.1.7 Συνολική Οργάνωση Συστήματος Hardware

Η οργάνωση όλων των παραπάνω εξαρτημάτων hardware έγινε πάνω σε μία διάτρητη μονοστρωματική πλακέτα, η οποία είναι βραχυκυκλωμένη σε γραμμές. Στο Σχήμα 58 παρουσιάζεται ο μικροϋπολογιστής ESP32 και όλα τα περιφερειακά του συστήματος τοποθετημένα και κολλημένα κατάλληλα στην εν λόγω πλακέτα.

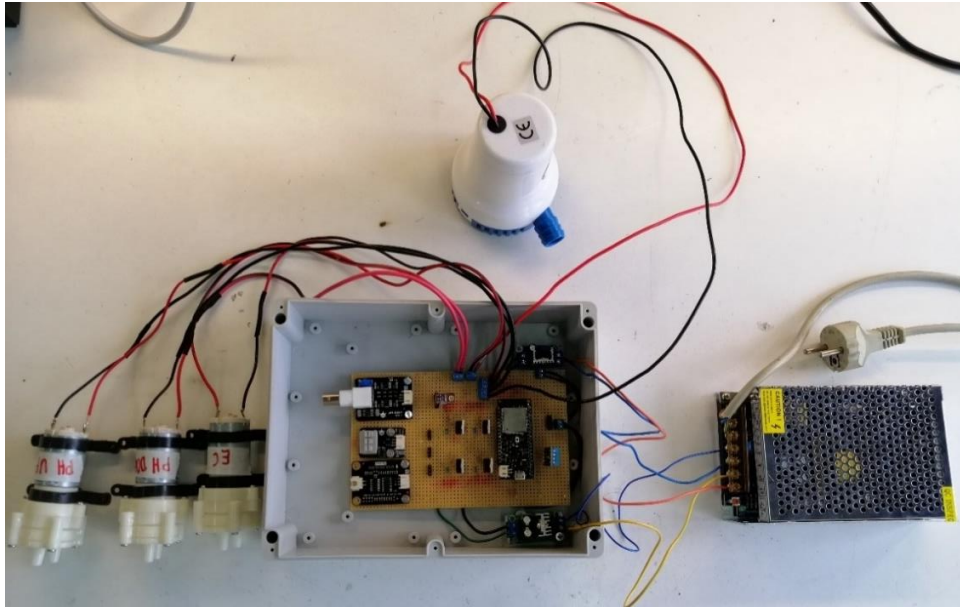
Προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανάλυση του κυκλώματος της παρακάτω πλακέτας, έχουν τοποθετηθεί στο Σχήμα 58 σε πλαίσια οι σημαντικότερες διατάξεις του. Αρχικά, λοιπόν, και στο πλαίσιο με αριθμό 1 φαίνεται το ένα από τα δύο step down modules, το οποίο υποβιβάζει την τάση τροφοδοσίας από τα 12 V που εξάγονται από το τροφοδοτικό στα 5 V. Η τάση αυτή (5 V και Ground) κατευθύνονται μέσω των καλωδίων στις 2 κλέμες του πλαισίου 2, από τις οποίες τροφοδοτούνται ο ESP32 και τα υπόλοιπα περιφερειακά που απαιτούν αυτή την τάση τροφοδοσίας μέσω καλωδίων που είναι κατάλληλα κολλημένα στο πίσω μέρος της πλακέτας. Στο πλαίσιο 3 είναι εμφανές το άλλο step down module, το οποίο υποβιβάζει την τάση από τα 12 V στην επιθυμητή ρυθμιζόμενη τιμή για την τροφοδοσία των αντλιών. Στο πλαίσιο 4 έχουν τοποθετηθεί τα κυκλώματα διακοπών με MOSFET για την τροφοδοσία των τεσσάρων αντλιών σύμφωνα με το Σχήμα 56. Οι 4 κατακόρυφες κλέμες του πλαισίου 5 είναι συνδεδεμένες με τα Drains καθενός από τα 4 MOSFETs, προκειμένου σε αυτές να συνδεθούν οι αρνητικοί ακροδέκτες της αντίστοιχης αντλίας. Οι 4 οριζόντιες κλέμες

βραχυκυκλώνονται με την τάση εξόδου του υποβαθμιστή τάσης του πλαισίου 3 ώστε σε αυτές να συνδεθούν οι θετικοί ακροδέκτες των 4 αντλιών. Στο πλαίσιο 6 είναι τοποθετημένες οι πλακέτες των αισθητήρων TDS, DS18B20 και pH (από πάνω προς τα κάτω), οι οποίες συνδέονται κατάλληλα με την τροφοδοσία, τη γείωση και το μικροελεγκτή μέσω καλωδίων στην κάτω πλευρά αυτής της πλακέτας. Τέλος, στο Σχήμα 58 φαίνονται ξεκάθαρα ο αισθητήρας υγρασίας και έντασης φωτεινότητας πάνω στην πλακέτα.



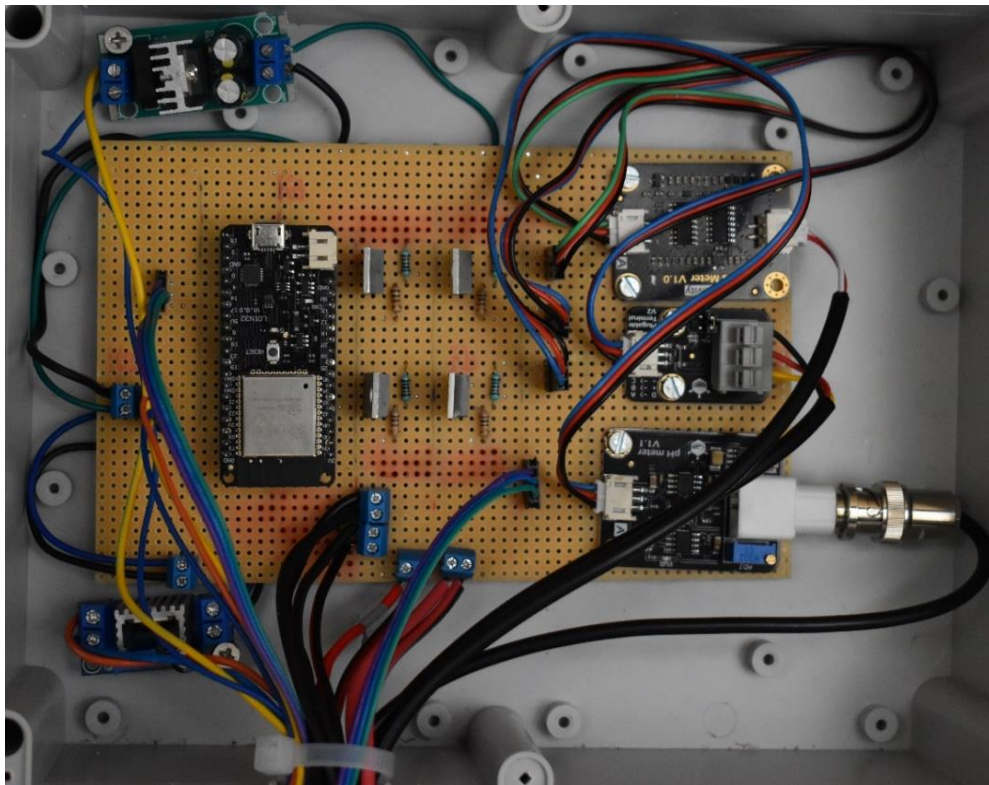
Σχήμα 58: Hardware συστήματος υδροπονίας τοποθετημένο σε πλακέτα.

Η πλακέτα αυτή συνδέεται με το τροφοδοτικό και τις αντλίες που αναφέρθηκαν παραπάνω δίνοντας τη συνδεσμολογία που φαίνεται στο Σχήμα 59. Επισημαίνεται πως το τροφοδοτικό δίνει δύο εξόδους των 12 V. Επομένως, συνδέουμε καθεμία από τις δύο με ένα από τα δύο step down modules.



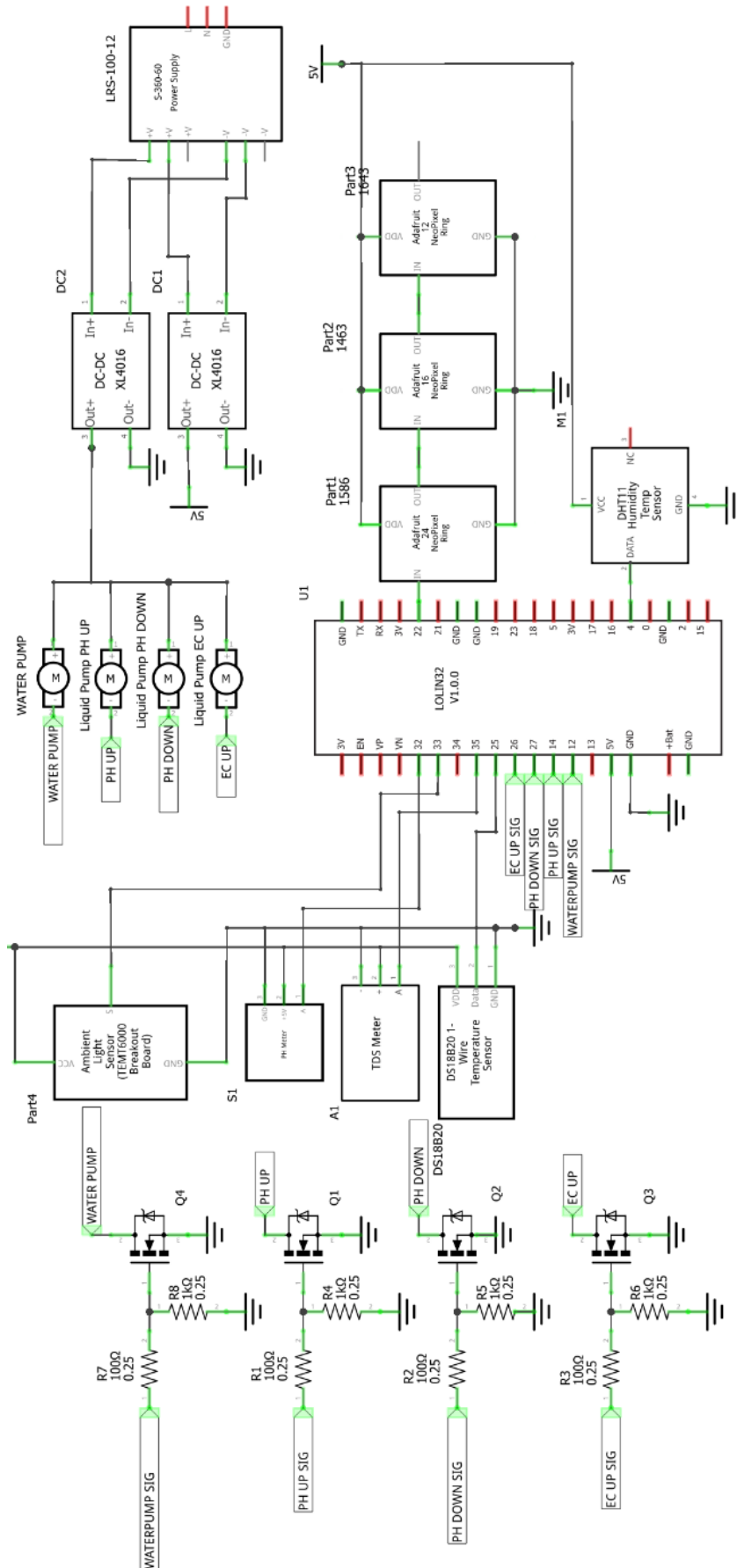
Σχήμα 59: Πλακέτα - τροφοδοτικό - αντλίες.

Έχοντας συνδέσει στην πλακέτα τα κατάλληλα καλώδια για τη λήψη σημάτων από τους αισθητήρες και τα probes κάποιων από αυτούς, προέκυψε η συνδεσμολογία που εμφανίζεται στο Σχήμα 60.



Σχήμα 60: Συνδεσμολογία πλακέτας.

Συνολικά, όλες οι συνδέσεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων συνοψίζονται στο Σχηματικό Διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 61.



Σχήμα 61: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του συστήματος.

5.1.8 Προστασία Συστήματος Hardware

Όπως έγινε εμφανές από τα Σχήματα που προηγήθηκαν, η πλακέτα τοποθετήθηκε μέσα σε μία θήκη, προκειμένου να μην είναι εκτεθειμένα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του συστήματος υδροπονίας. Δεδομένου μάλιστα πως η υδροπονία συνδέεται με τη διαρκή ροή υγρού διαλύματος, η χρήση μίας τέτοιας θήκης ήταν επιτακτική για την προστασία από τυχούσα επαφή κάποιου υγρού στοιχείου είτε υγρασίας με την πλακέτα. Η θήκη στην οποία τοποθετείται η πλακέτα για προστασία φαίνεται στο Σχήμα 62.



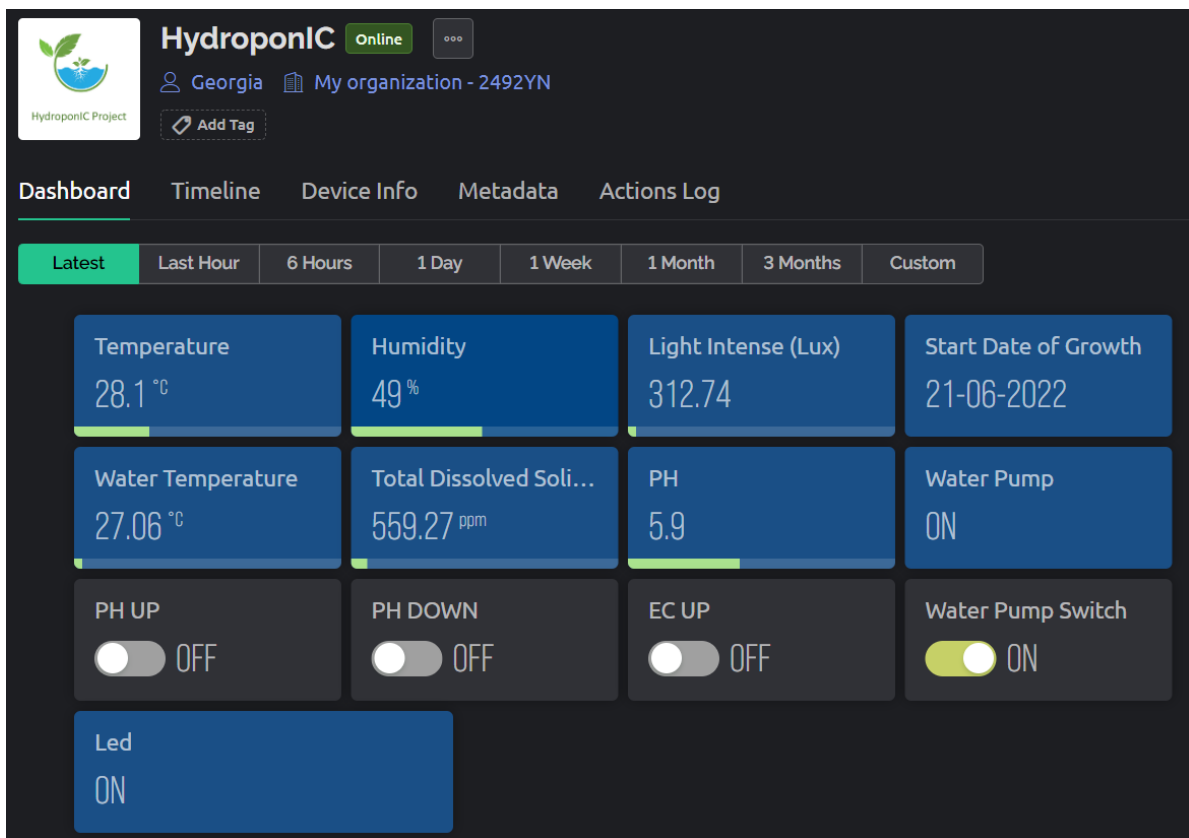
Σχήμα 62: Η συσκευασία της πλακέτας.

5.2 Επιλογή Λογισμικού της Διάταξης

Η ανάπτυξη του κώδικα του μικροελεγκτή έγινε στο πρόγραμμα Visual Studio Code και χρησιμοποιήθηκε το extension PlatformIO. Η επιλογή του συγκεκριμένου IDE βασίστηκε στη δυνατότητα που προσφέρει να επικοινωνεί κατευθείαν με το GitHub και να ενημερώνει το αντίστοιχο αποθετήριο (repository) που έχει δημιουργηθεί.

Αναφορικά με το Περιβάλλον Χρήστη (User Interface) χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Blynk, στην οποία ο χρήστης του συστήματος μπορεί να έχει πρόσβαση στο Dashboard με τα δεδομένα και μέσω του υπολογιστή (Web), αλλά και μέσω της εφαρμογής Blynk για κινητά με λειτουργικό Android.

Στο Dashboard μέσω κατάλληλων εντολών του κώδικα, αποστέλλονται τα δεδομένα που αφορούν στις τιμές όλων των αισθητήρων (θερμοκρασίας, υγρασίας, TDS, pH, έντασης φωτεινότητας), καθώς και την κατάσταση της αντλίας παροχής του διαλύματος στο σύστημα και την κατάσταση του LED Φωτός. Παράλληλα, μέσω εικονικών διακοπών δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επέμβει στον αυτοματισμό, όπου αυτό κριθεί απαραίτητο, ανοίγοντας είτε κλείνοντας όποια από τις αντλίες χρειάζεται. Επιπλέον, κάποια από αυτά τα δεδομένα εμφανίζονται και σε γραφήματα σε συνάρτηση με το χρόνο. Στο Σχήμα 63 παρουσιάζεται η εικόνα που βλέπει ο χρήστης.



Σχήμα 63: Blynk Web Dashboard.

Επίσης, έχουν δημιουργηθεί και συμβάντα (events) προκειμένου όταν το pH του διαλύματος, είτε ο αριθμός TDS βρίσκεται εκτός των ορίων που έχουν τεθεί στον κώδικα να στέλνεται ειδοποίηση στο mail του χρήστη.

Για τη δημιουργία της σύνδεσης με το Blynk δημιουργείται πρώτα ένα device στο οποίο δίνεται ένα `template_id` και ένα `device_name`. Εν προκειμένω αυτά φαίνονται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4: Πληροφορίες Σύνδεσης στο Blynk.

Πληροφορίες Blynk	
template_id	TMPLavWBd3ao
device_name	HydroponIC

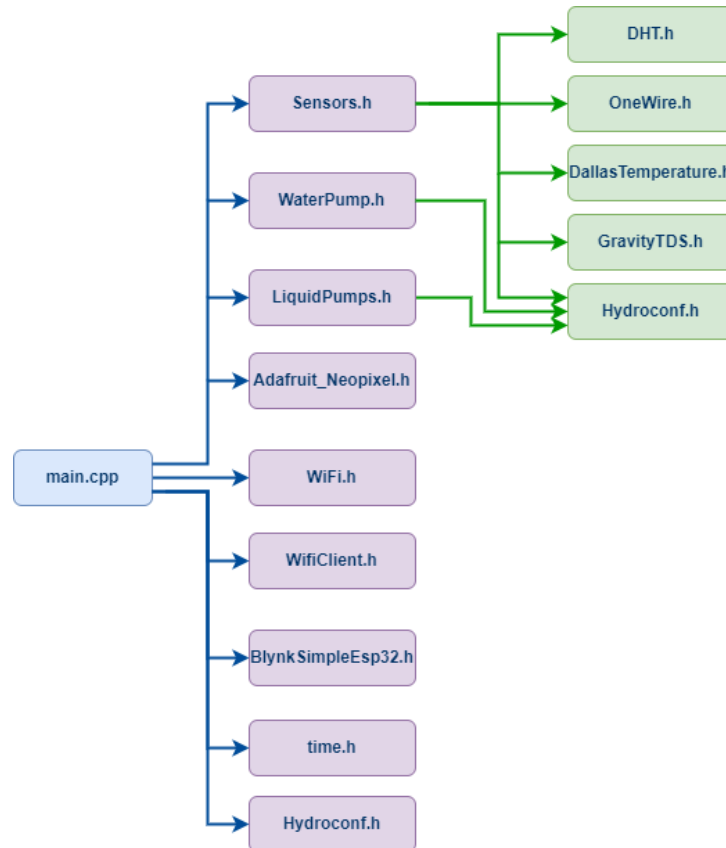
Με τα παραπάνω στοιχεία, με το Blynk_Auth-Token, το οποίο επίσης δίνεται από το περιβάλλον του Blynk, καθώς επίσης αποθηκεύοντας και το όνομα και τον κωδικό του Wi-Fi που πρόκειται να συνδεθεί το σύστημα στις μεταβλητές ssid και pass, αντίστοιχα, δημιουργείται η σύνδεση με τις ακόλουθες εντολές:

```
void setup(){
  Blynk.begin(auth, ssid, pass); //Initialize Blynk
  . . .
}
void loop(){
  Blynk.run();
  . . .
}
```

5.2.1 Χρήση Βιβλιοθηκών

Προκειμένου να οργανωθεί καλύτερα και πιο ξεκάθαρα ο κώδικας για τη λειτουργία του συστήματος έχει γίνει χρήση κάποιων έτοιμων βιβλιοθηκών για ορισμένους αισθητήρες, αλλά δημιουργήθηκαν και κάποιες βιβλιοθήκες εκ νέου στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Αναλυτικότερα, οι καινούργιες βιβλιοθήκες δημιουργήθηκαν προκειμένου να προσπελάζουν τους αισθητήρες και τις τιμές τους (Sensors.h), την αντλία νερού (WaterPump.h) και τις αντλίες που προσθέτουν διαλύματα pH και θρεπτικών συστατικών (LiquidPumps.h). Μέσω αυτών των βιβλιοθηκών δημιουργούνται αντικείμενα και καλούνται συναρτήσεις ήδη υπάρχουσών βιβλιοθηκών. Ωστόσο, ο ρόλος δημιουργίας τους είναι η καλύτερη οργάνωση και ομαδοποίηση των κλήσεων αυτών των συναρτήσεων. Η δομή αυτή του κώδικα φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 64. Συγκεκριμένα ο κώδικας ξεκινά από το αρχείο main.cpp, όπου μέσω των βιβλιοθηκών WifiClient.h, Wifi.h, BlynkSimpleEsp32.h γίνεται η σύνδεση του μικροελεγκτή με το δίκτυο Wi-Fi, από όπου λαμβάνει δεδομένα για την ημερομηνία (καθώς από τον κώδικα συγκρατείται η ημέρα πρώτης λειτουργίας του συστήματος), αλλά και την ώρα, καθώς ανά τακτά χρονικά διαστήματα ελέγχεται εάν η διάταξη LED πρέπει να είναι ανοιχτή είτε όχι σύμφωνα με τον ημερήσιο ηλιακό κύκλο που αναφέρθηκε και σε προηγούμενη

παράγραφο. Επιπλέον, μέσω αυτών των βιβλιοθηκών γίνεται και η σύνδεση στο Blynk, την πλατφόρμα για την απομακρυσμένη επιτήρηση του συστήματος υδροπονίας.



Σχήμα 64: Δομή κώδικα Συστήματος.

Η υλοποίηση όλων των παραπάνω φαίνεται ακολούθως σε κάποια αποσπάσματα κώδικα. Για παράδειγμα, στο ακόλουθο απόσπασμα, ο μικροελεγκτής συνδέεται στο Διαδίκτυο, εκκινεί τη σύνδεση με το Blynk και λαμβάνει την τοπική ώρα.

```

void printLocalTime(){
  struct tm timeinfo;
  if(!getLocalTime(&timeinfo)){
    Serial.println("Failed to obtain time");
    return;
  }
  Serial.println(&timeinfo, "%A, %B %d %Y %H:%M:%S");
  sprintf(hour_buffer, "%d \n", timeinfo.tm_hour);
  sprintf(min_buffer, "%d \n", timeinfo.tm_min);
}

```

```

void connectWifi_getTime(){
  Serial.printf("Connecting to %s ", ssid);
  WiFi.begin(ssid, pass);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
  }
}

```

```

    Serial.print(".");
  }
  Serial.println(" CONNECTED");
  configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
  printLocalDate();
}

void setup(){
  Blynk.begin(auth, ssid, pass); //Initialize Blynk
  connectWifi_getTime();
}

```

Επιπλέον, στη main έχει δημιουργηθεί ένα αντικείμενο Sensors (που προκύπτει από τη βιβλιοθήκη Sensors.h, που αναπτύχθηκε για αυτή την εφαρμογή). Στην κλάση Sensors αυτής της βιβλιοθήκης (Sensors.cpp, Sensors.h) έχουν οριστεί συναρτήσεις αρχικοποίησης των αισθητήρων θερμοκρασίας-υγρασίας, DS18B20, TDS, pH, έντασης φωτεινότητας, καθώς και συναρτήσεις με τις οποίες λαμβάνεται η τιμή της μέτρησής τους. Ενδεικτικά, μόνο κάποιες από τις συναρτήσεις αυτές φαίνονται ακολούθως.

```

static DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
static OneWire oneWire(oneWireBus); // Setup a oneWire instance
static DallasTemperature DS18B20_sensor(&oneWire);
static GravityTDS gravityTds;

void Sensors::Init_DS18B20(){
  DS18B20_sensor.begin();
  Serial.print("***** INITIALIZE DS18B20 SENSOR *****\n");
}

void Sensors::Init_TDS(){
  gravityTds.setPin(TDSPIN);
  gravityTds.setAref(VREF); //reference voltage on ADC
  gravityTds.setAdcRange(ADCRESOLUTION); //1024 → 10bit, 4096 → 12bit ADC
  gravityTds.begin();
  Serial.println("***** INITIALIZE TDS SENSOR *****");
}

/**
 * @brief Initialize all Sensors
 */
void Sensors::Init_sensors(){
  Init_Light();
  Init_DHT();
  Init_DS18B20();
  Init_TDS();
  Init_PH();
}

float Sensors::Read_Temp(){
  return dht.readTemperature(); // Read temperature as Celsius
}

```

```

float Sensors::Read_Light(){
    return ( analogRead(LightSensorPin)); // Read light level in lux
}

float Sensors::Read_DS18B20(){
    DS18B20_sensor.requestTemperatures();
    return DS18B20_sensor.getTempCByIndex(0);
}

float Sensors::Read_TDS(){
    Serial.print("TDS: ");
    Serial.println(tdsValue);
    gravityTds.setTemperature(Read_Temp()); //TDS is dependent of temperature
    gravityTds.update(); //sample and calculate
    tdsValue = gravityTds.getTdsValue(); // then get the value
    myTDS = tdsValue;
    return tdsValue;
}

void Sensors::Read_low_freq_sensors(){
    float tds_value = Read_TDS(); // Read TDS value
    float ph_value = Read_PH(); // Read PH Value
    Serial.print("TDS Value: ");
    Serial.print(tds_value);
    Serial.print("ppm ");
    Serial.print("PH Value: ");
    Serial.print(ph_value,2);
    Serial.println(" ");
    Serial.println("");
}

float Sensors::get_my_PH(){
    return myPH;
}

float Sensors::get_my_TDS(){
    return myTDS;
}

```

Αντιστοίχως, στη main έχει δημιουργηθεί ένα αντικείμενο WaterPump (που προκύπτει από τη βιβλιοθήκη WaterPump.h, που αναπτύχθηκε για αυτή την εφαρμογή). Στην κλάση WaterPump αυτής της βιβλιοθήκης (WaterPump.cpp, WaterPump.h) έχουν οριστεί συναρτήσεις αρχικοποίησης, ελέγχου της κατάστασης της αντλίας νερού (ON, OFF), καθώς και συναρτήσεις που τη θέτουν είτε σε ενεργή κατάσταση λειτουργίας (ON) είτε σε ανενεργή (OFF). Ορισμένες από αυτές παρατίθενται στη συνέχεια:

```

void WaterPump::Init_WaterPump(){ // Initialize WaterPump Object
    pinMode(WATERPUMPPIN, OUTPUT);
    Serial.println("***** INITIALIZE WATER PUMP *****");
}

```

```

void WaterPump::Set_WP_ON(){ // Set WaterPump ON
    digitalWrite(WATERPUMPPIN, HIGH);
    WaterPump_state = true;
    Serial.println("***** WATER PUMP STATE: ON *****");
}

bool WaterPump::Get_WP_State(){ // Get WaterPump state
    return WaterPump_state;
}

```

Με αντίστοιχη λογική έχει δημιουργηθεί κι ένα αντικείμενο LiquidPumps (που προκύπτει από τη βιβλιοθήκη LiquidPumps.h, που αναπτύχθηκε για αυτή την εφαρμογή). Στην κλάση LiquidPumps αυτής της βιβλιοθήκης (LiquidPumps.cpp, LiquidPumps.h) έχουν οριστεί συναρτήσεις αρχικοποίησης, ελέγχου της κατάστασης των αντλιών των διαλυμάτων (ON, OFF), καθώς και συναρτήσεις που τη θέτουν είτε σε ενεργή κατάσταση λειτουργίας (ON) είτε σε ανενεργή (OFF). Ακολουθούν κάποιες από αυτές παρακάτω:

```

void LiquidPumps::Init_LiquidPumps(){ // Initialize LiquidPumps Object
    pinMode(PH_UP_PIN, OUTPUT);
    pinMode(PH_DOWN_PIN, OUTPUT);
    pinMode(EC_UP_PIN, OUTPUT);
    Serial.println("***** INITIALIZE LIQUID PUMPS *****\n");
}

// Get the state of the pump that contains PH DOWN Liquid
int LiquidPumps::get_PH_DOWN_state(){
    return PH_DOWN_state;
}

// Set the pump containing PH UP Liquid ON
void LiquidPumps::set_PH_UP_PUMP_ON(){
    digitalWrite(PH_UP_PIN, HIGH);
    PH_UP_state = 1;
    Serial.println("PH UP PUMP STATE: ON ");
}

//Set the pump containing EC UP Liquid OFF
void LiquidPumps::set_EC_UP_PUMP_OFF(){
    digitalWrite(EC_UP_PIN, LOW);
    EC_UP_state = 0;
    Serial.println("EC UP PUMP STATE: OFF");
}

```

Ιδιαίτερος σημαντικό είναι το αρχείο Hydroconf.h, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις ορισμένες μεταβλητές (αναγνωριστικά) που χρησιμοποιούνται στον κώδικα ώστε εύκολα να γίνει μία αλλαγή στα pins των αισθητήρων είτε στα όρια π.χ. του pH του

διαλύματος αλλάζοντας την αντίστοιχη τιμή μόνο σε αυτό το κομμάτι του κώδικα. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια defines αυτού του αρχείου:

```
#define DHTPIN 4
#define LightSensorPin 33 // LDR sensor
#define onewireBus 25 // GPIO where the DS18B20 is connected to
#define TDSPIN 35
#define ADCRESOLUTION 4096.0
#define VREF 5.0 // analog reference voltage(Volt) of the ADC
#define SCOUNT 30 // sum of sample point for tds sensor
#define WATERPUMPPIN 12
#define PH_UP_PIN 13
#define PH_DOWN_PIN 27
#define EC_UP_PIN 26
#define MIN_PH 5.2
#define MAX_PH 6.6
#define MIN_EC 480
#define MAX_EC 950
#define PH_PIN 32
#define LED_RING_PIN 23
```

Όπως φαίνεται λοιπόν, στο παραπάνω τμήμα κώδικα υπάρχουν οι αντιστοιχίσεις αισθητήρων και θυρών του μικροελεγκτή, που είναι συγκεντρωμένες στον Πίνακα 6:

Πίνακας 5: Αντιστοίχιση αισθητήρων και θυρών του μικροελεγκτή

Αισθητήρας	Pin Μικροελεγκτή
Light Intensity	33
DHT11	4
LED Ring	23
pH Sensor	32
TDS Sensor	35
DS18B20	25
Αντλία Νερού	12
Αντλία Βασικού pH (PH UP)	13
Αντλία όξινου pH (PH DOWN)	27
Αντλία υγρού λιπάσματος (EC UP)	26

Στη συνάρτηση main χρησιμοποιείται ακόμη μία βασική βιβλιοθήκη για το συγχρονισμό των μετρήσεων και την αποστολή δεδομένων στο Blynk. Η βιβλιοθήκη αυτή είναι η time.h και μέσω αυτής τίθενται χρονικές διακοπές οι οποίες εκτελούν

κάποια συγκεκριμένη συνάρτηση ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (ορίζεται από τον προγραμματιστή). Εν προκειμένω, έχει τεθεί στον κώδικα κάθε 3 δευτερόλεπτα να ελέγχονται οι τιμές των αισθητήρων και να ενημερώνεται το dashboard του Blynk, κάθε 2 λεπτά να γίνεται έλεγχος της ώρας ώστε να καθορίζεται εάν το LED θα είναι αναμμένο είτε όχι και κάθε 2 ώρες να ελέγχεται εάν η τιμή των αισθητήρων pH και TDS είναι εντός των ορίων που έχουν τεθεί στο Hydroconf.h. Εάν, οι τιμές αυτές είναι εκτός αυτών των οριακών τιμών τότε εκτελείται και η κατάλληλη ενέργεια ανοίγοντας για πολύ μικρό χρονικό διάστημα την αντλία με το αντίστοιχο διάλυμα, ώστε το νερό που διατρέχει τις ρίζες των φυτών να διαθέτει την κατάλληλη σύσταση. Ακολούθως φαίνονται οι ορισμοί των χρονικών αυτών διακοπών καθώς και οι συναρτήσεις που καλούνται από αυτές:

```
void setup(){
  ...
  timer.setInterval(720000L, LowFreqData); // reads data every 2 hours
  timer.setInterval(3000L, HighFreqData); // reads data every 3 secs
  timer.setInterval(120000L, Check_Led); // checks every 2 mins
}

void loop()
{
  ...
  timer.run();
}

/**
 * @brief Upload PH and TDS to Blynk and check if correction is needed
 */
void LowFreqData()
{
  s.Read_low_freq_sensors();
  check_ph();
  check_ec();
  float tds_val = s.get_my_TDS();
  Blynk.virtualWrite(V8, tds_val);
  if(tds_val > MAX_EC || tds_val < MIN_EC){
    Blynk.logEvent("ec_check");
  }
  float ph_val = s.get_my_PH();
  Blynk.virtualWrite(V9, ph_val);
  if(ph_val > MAX_PH) {
    Blynk.logEvent("ph_high_warning");
  }
  if(ph_val < MIN_PH){
    Blynk.logEvent("ph_low_warning");
  }
}
```

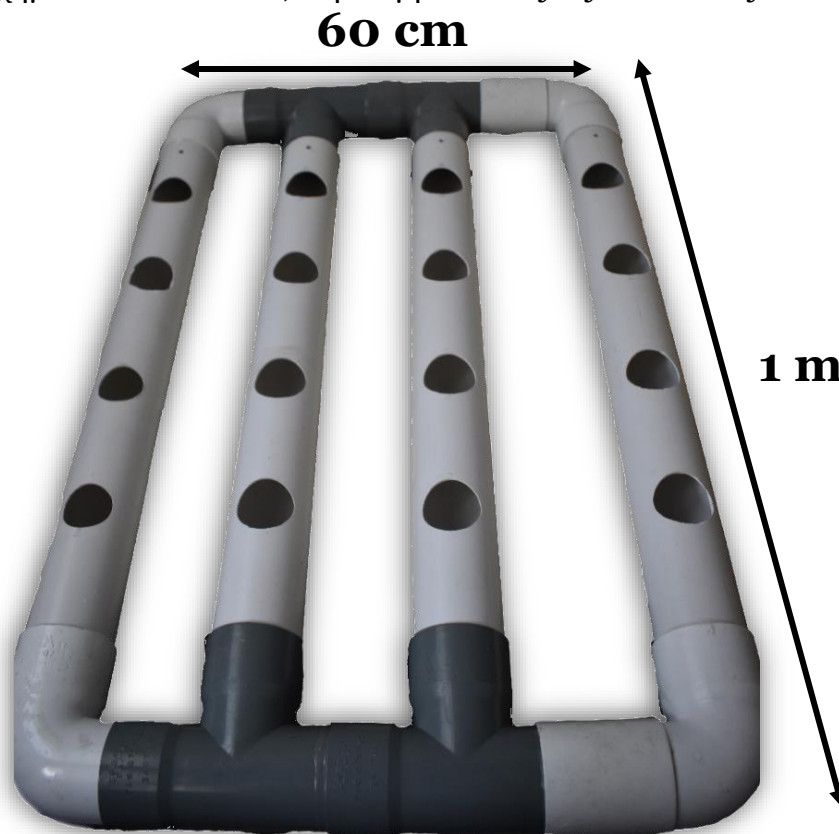
```
}
}

/**
 * @brief Reads sensors objects and upload their values to Blynk
 */
void HighFreqData()
{
  s.Read_high_freq_sensors();
  ...
  Blynk.virtualWrite(V4, s.Read_Temp()); //send data to Blynk
  Blynk.virtualWrite(V7, s.Read_DS18B20());
  Blynk.virtualWrite(V8, s.Read_TDS());
  Blynk.virtualWrite(V9, s.Read_PH());
}

/**
 * @brief Checks if LED must be on or off
 */
void Check_Led()
{
  configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
  printLocalTime();
  if((atoi(hour_buffer) > LED_START_HOUR_TIME || (atoi(hour_buffer) ==
LED_START_HOUR_TIME && atoi(min_buffer) >= LED_START_MIN_TIME))
  && (atoi(hour_buffer) < LED_STOP_HOUR_TIME || (atoi(hour_buffer) ==
LED_STOP_HOUR_TIME && atoi(min_buffer) <= LED_STOP_MIN_TIME))){
    Blynk.virtualWrite(V21, "ON");
    Serial.println("Led is ON");
    for(int i=0;i<NUMPIXELS;i++)
    {
      pixels.setPixelColor(i, pixels.Color(80,10,10));
      pixels.show();
    }
  }
  else{
    Blynk.virtualWrite(V21, "OFF");
    Serial.println("Led is OFF");
    for(int i=0;i<NUMPIXELS;i++)
    {
      pixels.setPixelColor(i, pixels.Color(0,0,0));
      pixels.show();
    }
  }
}
}
```

5.3 Διάταξη υδροπονίας NFT

Προκειμένου να εφαρμοστεί αυτό το σύστημα αυτοματισμού ήταν αναγκαίο να κατασκευαστεί αρχικά το σύστημα υδροπονίας. Πρωτίστως, επιλέχθηκε η καλλιέργεια μαρουλιού, καθώς απαιτεί λιγότερο χρόνο συγκριτικά με άλλα φυτά (όπως η ντομάτα) ώστε να ολοκληρωθεί το στάδιο της καρποφορίας. Υπό αυτό το πρίσμα, επιλέχθηκε να κατασκευαστεί ένα NFT σύστημα δεδομένου πως σύμφωνα με συστάσεις ειδικών αποτελεί μία από τις καλύτερες μεθόδους υδροπονίας για την ανάπτυξη του μαρουλιού. Προς το σκοπό αυτό, αγοράστηκαν σωλήνες PVC οι οποίοι λειτούργησαν σαν κανάλια ροής του διαλύματος. Πάνω σε αυτούς δημιουργήθηκαν οπές προκειμένου να τοποθετηθούν τα λεγόμενα net pots, δηλαδή πλαστικές βάσεις που υποστηρίζουν το φυτό. Η συνολική διάταξη του συστήματος ανάπτυξης του φυτού φαίνεται στο Σχήμα που ακολουθεί, περιλαμβάνοντας τις διαστάσεις του.



Σχήμα 65: Σύστημα Σωλήνων για την Υδροπονία.

Συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 6: Εξαρτήματα για Βάση Υδροπονίας.

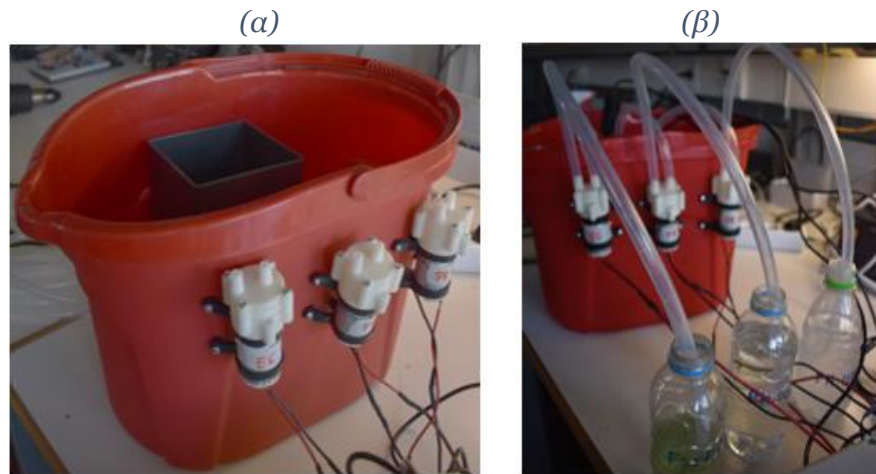
Εξάρτημα	Ποσότητα
Σωλήνας PVC 75 mm – Ø75 mm	4 τμχ.
Γωνίες PVC 90° - Ø75 mm	4 τμχ.
Ταφ PVC – Ø75 mm	4 τμχ.
Net Pots	16 τμχ.
Διογκωμένη Άργιλος	5 L

Αφού υλοποιήθηκε η συγκόλληση των σωλήνων με ειδική κόλλα για PVC και δημιουργήθηκαν οι οπές διαμέτρου 50 mm για την στήριξη των net pots στους φαίνεται στο Σχήμα 66 και δημιουργήθηκε μία επιπλέον οπή στο κάτω μέρος της διάταξης και στο σημείο όπου βρίσκεται η μία γωνία προκειμένου να λειτουργεί σαν μέσο αποστράγγισης του νερού που θα βρίσκεται στους σωλήνες. Εκεί, τοποθετήθηκε ένα λάστιχο Ø20 mm ώστε να μπορεί να επιστρέφει το διάλυμα στη δεξαμενή από όπου ξεκινά, καθιστώντας εφικτή την ανακύκλωσή του (Σχήμα 66).



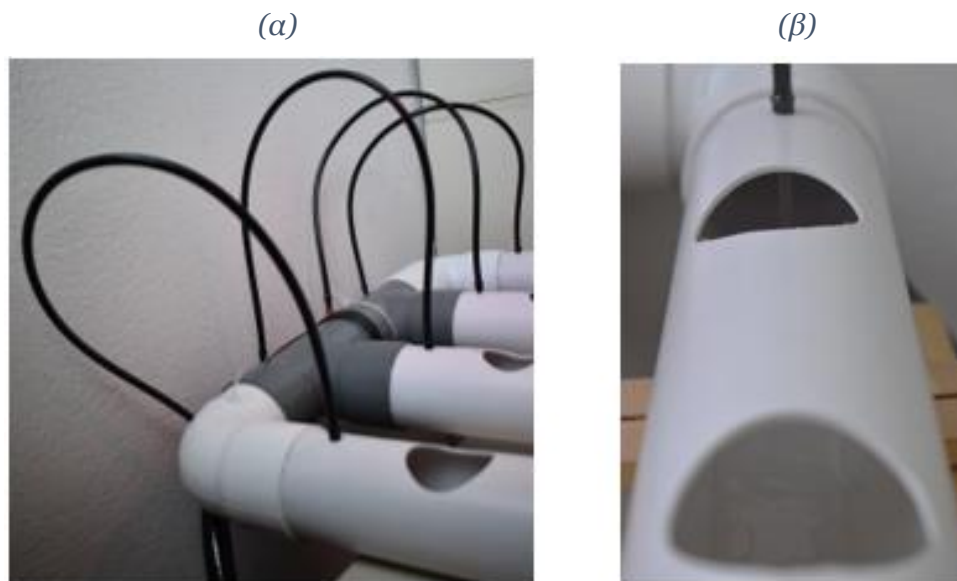
Σχήμα 66: Τοποθέτηση net pots (α) και μέσου αποστράγγισης (β).

Για την αποθήκευση του διαλύματος χρησιμοποιήθηκε μία λεκάνη, στο εσωτερικό της οποίας τοποθετήθηκε ένα μικρό κυβικό δοχείο, προκειμένου επάνω του να τοποθετούνται οι αισθητήρες λήψης δεδομένων του υγρού (pH, TDS, DS18B20). Στο πλαϊνό μέρος της λεκάνης στερεώθηκαν οι τρεις αντλίες που διοχετεύουν αυτόματα όξινο ή βασικό pH, είτε υγρό λίπασμα, όποτε απαιτείται. Στο Σχήμα 67 είναι εμφανής η λεκάνη με το δοχείο εσωτερικά της, καθώς και οι αντλίες στο εξωτερικό της μέρος, οι οποίες συνδέονται με τα διαλύματα ρύθμισης.



Σχήμα 67: Λεκάνη Διαλύματος (α) συνδεδεμένη με τα διαλύματα μέσω αντλιών (β).

Επιπλέον αυτών χρησιμοποιήθηκε και ένα λάστιχο διαμέτρου 20 mm το οποίο συνδέθηκε στην αντλία νερού που λαμβάνει το διάλυμα από τη λεκάνη, καθώς και μικρότερα σωληνάκια διαμέτρου 6 mm που συνδέονται στο μεγάλο λάστιχο, ώστε να τροφοδοτούνται τα 4 κανάλια με τα φυτά (Σχήμα 68).



Σχήμα 68: Σωληνάκια $\varnothing 6$ mm συνδεδεμένα στο σωλήνα $\varnothing 20$ mm για παροχή διαλύματος στα κανάλια (α) και παροχή σε κάθε κανάλι (β).

Αφού στήθηκε η διάταξη αυτή για την υποστήριξη και την ανάπτυξη των φυτών στα πλαίσια της υδροπονίας, έγινε χρήση και τριών διαλυμάτων τα οποία διοχετεύονταν αυτόματα στο διάλυμα της δεξαμενής όποτε η σύστασή του ήταν εκτός ορίων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ένα διάλυμα με βασικό pH (PH UP) -

υδροξείδιο του καλίου, ένα διάλυμα με όξινο pH (PH DOWN) - φωσφορικό οξύ και ένα διάλυμα με θρεπτικά συστατικά απαραίτητα για την ανάπτυξη του φυτού (υγρό λίπασμα), πλούσιο σε αζωτούχες ενώσεις που μπορούν να απορροφηθούν άμεσα, με πολύτιμες χημικές ενώσεις σιδήρου καθώς και ιχνοστοιχεία. Σύμφωνα, με τις συστάσεις της εταιρείας αγοράς του υγρού λιπάσματος [68] τα όρια του pH και της συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων που είναι κατάλληλα για την ομαλή ανάπτυξη του μαρουλιού είναι τα εξής (Πίνακας 7):

Πίνακας 7: Όρια pH και TDS για την ανάπτυξη μαρουλιού σε υδροπονία.

Μετρούμενο Μέγεθος	Όρια
pH	5.2 - 6.6
TDS	480 - 950

Τα προαναφερθέντα διαλύματα τοποθετήθηκαν αραιωμένα το καθένα σε ένα διαφορετικό δοχείο στο οποίο συνδέθηκαν τα άκρα καθεμιάς από τις 3 μικρές αντλίες, ώστε μόλις ενεργοποιηθεί κάποια από τις 3 αυτές αντλίες με εντολή του μικροελεγκτή, να διοχετεύεται το αντίστοιχο διάλυμα στη λεκάνη, με στόχο τη διόρθωση της σύστασης του νερού. Στο Σχήμα 69 παρουσιάζονται τα διαλύματα αυτά που χρησιμοποιήθηκαν:



Σχήμα 69: Όξινο Διάλυμα (α), Βασικό Διάλυμα (β), Υγρό Λίπασμα (γ) [69], [68].

Κεφάλαιο 6

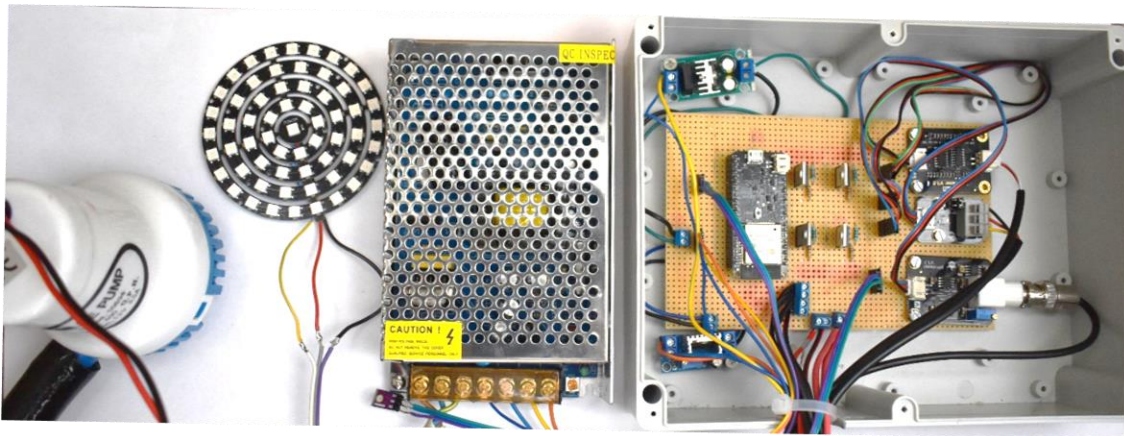
Πειραματική Διαδικασία

6.1 Ανάπτυξη του Συστήματος και Βαθμονόμηση Αισθητήρων

Το αυτόματο σύστημα υδροπονίας που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενες ενότητες πλήθος αισθητήρων και άλλων ηλεκτρονικών διατάξεων που συνδέονται σε έναν μικροελεγκτή, ο οποίος λειτουργεί σαν «εγκέφαλος» και καθορίζει το συγχρονισμό και τη λειτουργία όλου του συστήματος. Σαφώς, λοιπόν, αποδεικνύεται ότι τόσο το υλικό (hardware) όσο και το λογισμικό (software), το οποίο δίνει τις εντολές στο υλικό, πρέπει να είναι άρτια συγκροτημένα τόσο το καθένα ξεχωριστά όσο και στο σύνολό τους. Προκειμένου, ωστόσο, να διαμορφωθεί και να υλοποιηθεί το σύστημα στην τελική του μορφή υπήρξαν αρκετά στάδια διαδικασιών, τα οποία θα αναλυθούν σε αυτή την ενότητα.

Σε πρώτο στάδιο, αναπτύχθηκε ο κώδικας που απαιτείται για την αλληλεπίδραση με κάθε μεμονωμένο αισθητήρα ξεχωριστά. Έπειτα από τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας καθενός από αυτούς πραγματοποιήθηκε η σύνθεση ενός ενιαίου κώδικα, ο οποίος θα χειριζόταν παράλληλα την λήψη δεδομένων από όλους τους αισθητήρες και την ορθή λειτουργία των τεσσάρων αντλιών. Η δοκιμή και ο έλεγχος λειτουργίας του έγινε τοποθετώντας όλο το απαραίτητο υλικό σε μια πλακέτα δοκιμών (breadboard). Αφού επιβεβαιώθηκε η σωστή αλληλεπίδραση του κώδικα με το hardware προστέθηκαν στον πρώτο οι απαιτούμενες εντολές προκειμένου όλες αυτές οι μετρήσεις να λαμβάνονται και απομακρυσμένα, αλλά και να υπάρχει η δυνατότητα για έλεγχο αυτών μέσω της πλατφόρμας Blynk. Ο κώδικας καθώς και οι συνδέσεις σε επίπεδο hardware έχουν ήδη αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Αφού

διασφαλίστηκε πως όλες οι συνδέσεις και η επικοινωνία με το Blynk λειτουργούν απρόσκοπτα, η ανάπτυξη προχώρησε σε επόμενο βήμα όπου όλη αυτή η κυκλωματική διάταξη μεταφέρθηκε από το breadboard σε μία διάτρητη πλακέτα. Αφού έγινε λοιπόν η μελέτη για την τοποθέτηση του υλικού στη διάτρητη πλακέτα, έγιναν οι απαραίτητες κολλήσεις χρησιμοποιώντας κολλητήρι, καλά και καλώδια για τις συνδέσεις (Σχήμα 70). Εκτός από τους αισθητήρες που συνδέονται απευθείας με τον μικροελεγκτή, επάνω στην πλακέτα κολλήθηκαν και οι υποβιβαστές τάσης ενώ έγινε και η σύνδεση με το τροφοδοτικό, το οποίο με τη σειρά του συνδέεται με μια πρίζα εναλλασσόμενης τάσης για την τροφοδοσία του. Το σύνολο των ηλεκτρονικών αυτών στοιχείων απεικονίζεται στο Σχήμα 59.



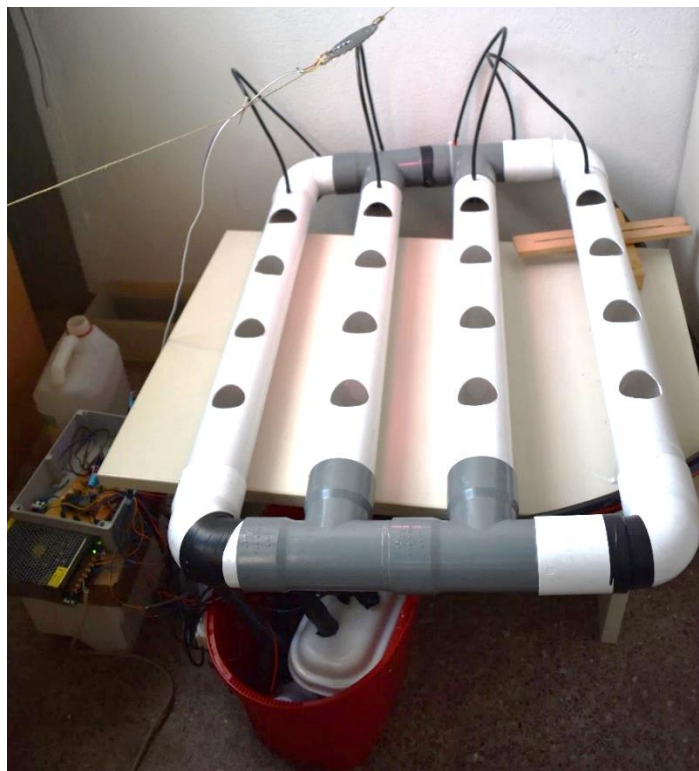
Σχήμα 70: Συνδέσεις πλακέτας.

Μετά την ολοκλήρωση όλων αυτών των ηλεκτρονικών συνδέσεων και τον έλεγχο της επικοινωνίας τους με το Blynk, ως επόμενο βήμα δημιουργήθηκε το υδροπονικό σύστημα που υποστηρίζει τα φυτά. Αρχικά, κόπηκαν και κολλήθηκαν οι σωλήνες που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5, ενώ δημιουργήθηκαν και τέσσερις οπές σε κάθε σωλήνα για την υποστήριξη των net pots (Σχήμα 71). Συνολικά δηλαδή αυτή η διάταξη



Σχήμα 71: Σωλήνες του συστήματος υδροπονίας.

μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη 16 φυτών. Έπειτα τοποθετήθηκε και η λεκάνη όπου βρίσκεται αποθηκευμένο το διάλυμα κάτω ακριβώς από το σωλήνα αποστράγγισης της διάταξης, προκειμένου το νερό που ανακυκλώνεται να ρέει απευθείας μέσα στη λεκάνη. Στην έξοδο της αντλίας νερού συνδέθηκε ένα λάστιχο διαμέτρου 20 mm από το οποίο ξεκινούν στη συνέχεια τέσσερα σωληνάκια διαμέτρου 6 mm, καθένα από τα οποία καταλήγει σε μία από τους τέσσερις σωλήνες PVC. Έτσι, η συνολική διάταξη που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 72, όπου αριστερά είναι τοποθετημένο το τροφοδοτικό και το κουτί με τα ηλεκτρονικά ενώ στο κέντρο βρίσκεται η διάταξη με τους σωλήνες, οι οποίοι τροφοδοτούνται με το διάλυμα της λεκάνης που βρίσκεται ακριβώς από κάτω της διαμέσου των μικρών σωλήνων.



Σχήμα 72: Συνολικό Αυτόματο Σύστημα Υδροπονίας.

Ιδιαίτερος σημαντικό βήμα έπειτα από την κατασκευή της διάταξης αποτέλεσε η βαθμονόμηση κάποιων αισθητήρων προκειμένου η λήψη των τιμών των αισθητήρων να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη στην πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Αρχικά, βαθμονομήθηκε ο αισθητήρας pH τοποθετώντας τον σε ένα ρυθμιστικό διάλυμα (buffer) με pH 4.0 και μετρώντας την τάση εξόδου του αισθητήρα, και έπειτα σε ένα ρυθμιστικό διάλυμα με pH 7.0 εκτελώντας την ίδια μέτρηση. Παράλληλα, στον μικροελεγκτή, μέσω της εντολής analogRead, ελήφθη η τιμή της μέτρησης, η οποία πολλαπλασιάστηκε με την τάση (3.3 V) και διαιρέθηκε με την

ανάλυση του ADC του συγκεκριμένου μικροελεγκτή (12 bits, άρα 4096). Τελικά, ελήφθη η ίδια τιμή τάσης με αυτή που μετρήθηκε μέσω του πολυμέτρου στον αισθητήρα. Προκειμένου όμως να υπολογιστεί η τιμή του pH μέσω της τάσης λύθηκε η γραμμική εξίσωση:

$$y = a \cdot x + b \quad (6.1)$$

όπου y : η τιμή του pH για τα διαλύματα σταθερού pH 4.0 και 7.0, x : η τιμή της τάσης του σήματος εξόδου του αισθητήρα και a, b : συντελεστές που προέκυψαν από την επίλυσή της.

Συγκεκριμένα, τοποθετώντας τις τιμές των x και y για τις περιπτώσεις των μετρήσεων σε διαλύματα με pH 4.0 και 7.0 προέκυψε πως $a = 4.5454$ και $b = -0.6363$.

Επομένως, κάθε φορά που λαμβάνεται κάποια μέτρηση από τον αισθητήρα αυτό, είναι αναγκαίο να γίνει η παραπάνω μετατροπή από τάση σε τιμή pH προκειμένου να προκύψει η σωστή τιμή. Παρακάτω, λοιπόν, παρατίθεται το τμήμα του κώδικα το οποίο αντιστοιχεί στην ανάγνωση της τιμής του αισθητήρα αυτού (βρίσκεται στη βιβλιοθήκη Sensors.h):

```
float Sensors::Read_PH(){
    static unsigned long samplingTime = millis();
    static unsigned long printTime = millis();
    static float pHValue, voltage;
    if(millis()-samplingTime > PH_samplingInterval)
    {
        pHArray[pHArrayIndex++]=analogRead(PH_PIN);
        if(pHArrayIndex==PH_ArrayLenth)pHArrayIndex=0;
        voltage = avergearray(pHArray, PH_ArrayLenth) * 3.3 / 4096.0;
        pHValue = 4.5454 * voltage - 0.6363;
        samplingTime=millis();
    }
    if(millis() - printTime > PH_printInterval)
    {
        Serial.print("Voltage:");
        Serial.print(voltage,2);
        Serial.print(" pH value: ");
        Serial.println(pHValue,2);
        printTime=millis();
    }
    myPH = pHValue;
    return pHValue;
}
```

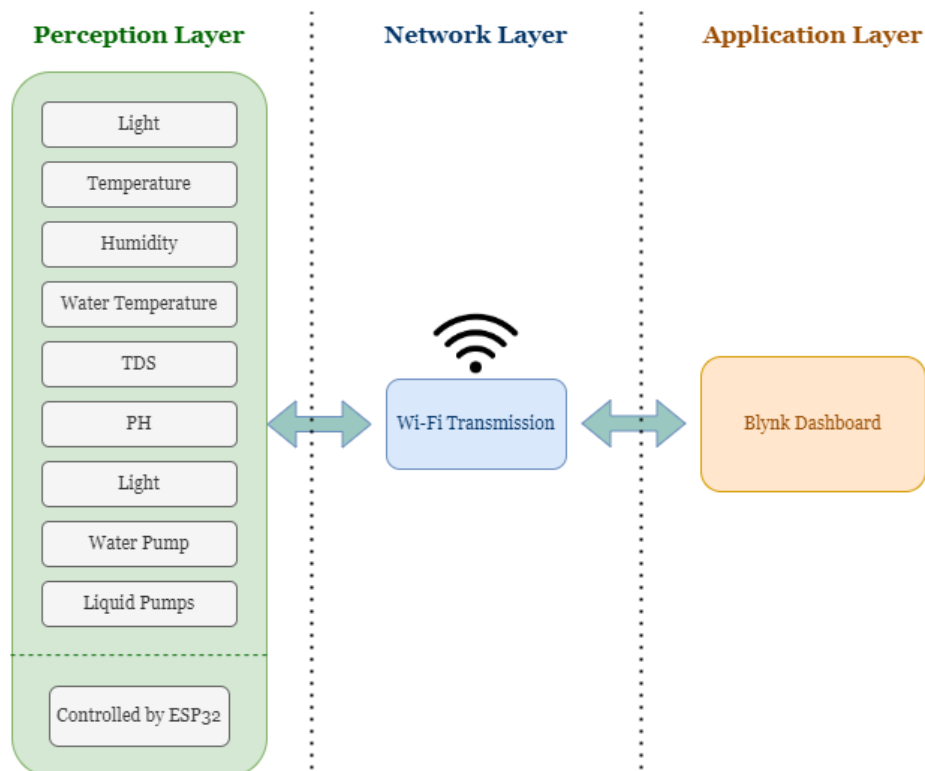
Εκτός, όμως από τον αισθητήρα αυτό απαραίτητη ήταν η βαθμονόμηση του αισθητήρα TDS για τη λήψη ορθότερων μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό

χρησιμοποιήθηκε ένα ρυθμιστικό διάλυμα με ηλεκτρική αγωγιμότητα 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, το οποίο όμως αντιστοιχεί σε 904 ppm δεδομένου πως η συγκέντρωση σε ppm αντιστοιχεί σε 0.640 φορές την ηλεκτρική αγωγιμότητα [70]. Στη συνέχεια, η κεφαλή του αισθητήρα βυθίστηκε στο διάλυμα με σταθερή συγκέντρωση σε ppm και τελέστηκε απευθείας η βαθμονόμησή του, μέσω κατάλληλων εντολών που προσφέρονται από τη βιβλιοθήκη του αισθητήρα. Έπειτα και από αυτό το βήμα, μπορεί το συνολικό σύστημα να λάβει τιμές με σχετικά καλή ακρίβεια μέσω των αισθητήρων του.

Σαν επόμενο βήμα τοποθετείται νερό μέσα στη λεκάνη (8 Λίτρα), το οποίο όμως με τη χρήση των διαλυμάτων όξινου και βασικού υγρού, καθώς και του υγρού λιπάσματος λαμβάνει την απαραίτητη σύσταση για την ανάπτυξη του φυτού (μαρούλι). Έτσι, μόλις εκκινήσει η αντλία, το διάλυμα που θα διατρέχει τις ρίζες των φυτών θα είναι το ιδανικό (αρχική συνθήκη εκκίνησης).

Έπειτα, τοποθετείται το τροφοδοτικό στην πρίζα και εκκινεί το σύστημα ανοίγοντας την αντλία νερού και τα LEDs, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και η σύνδεση με το Blynk, ώστε να αποστέλλει τα δεδομένα.

Η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος αυτού συνοψίζεται στο Σχήμα 73, παρουσιάζοντας τα επίπεδα στα οποία διαρθρώνεται.



Σχήμα 73: Αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου IoT συστήματος αυτόματης υδροπονίας.

6.2 Τοποθέτηση Φυτών

Εφόσον έχουν υλοποιηθεί όλα τα παραπάνω βήματα και εφόσον περάσει κάποιος χρόνος λειτουργίας του συστήματος ώστε να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη λειτουργία του, τοποθετούνται σε 16 net pots τα φυτά, εν προκειμένω τα μαρούλια. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται σε αυτό το στάδιο, ώστε κατά την τοποθέτησή τους να προεξέχουν κάτω από τη βάση κάθε φυτού αρκετά οι ρίζες του προκειμένου να είναι σε θέση να φθάσουν την επιφάνεια του νερού από όπου θα προσλάβουν τα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξή του. Αφού επιτευχθεί αυτό, τοποθετείται μέσα στα net pots η διογκωμένη άργιλος παρέχοντας στήριξη στο φυτό, αλλά και προσφέροντας υγρασία σε όλο το σκελετό του φυτού.



Σχήμα 74: Μαρούλι τοποθετημένο σε net pot.

Έτσι, ετοιμάζονται τα net pots όπως στο Σχήμα 74 και μπορούν πλέον να τοποθετηθούν στις οπές των σωλήνων PVC.

6.3 Μετρήσεις - Αποτελέσματα

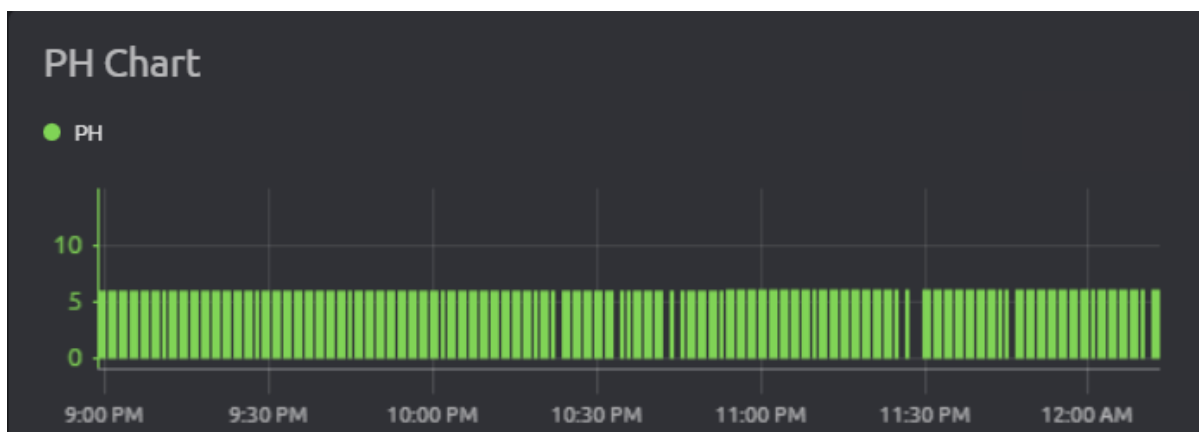
Αφού το σύστημα τέθηκε σε λειτουργία και τοποθετήθηκαν τα μαρούλια στις υποδοχές για τα net pots, η διάταξη αφέθηκε να λειτουργεί αυτόματα για 24 ημέρες. Επισημαίνεται πως δεδομένου πως η ανάπτυξη έγινε κατά το μήνα Ιούνιο, όπου η θερμοκρασία ήταν υψηλή και αφού η υλοποίηση του συστήματος έγινε σε εσωτερικό χώρο εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε ένα κλιματιστικό που υπήρχε στο χώρο προκειμένου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου να διατηρείται σε σταθερό σημείο και όχι πολύ υψηλό που θα δυσχέραινε την ανάπτυξή τους. Στο Σχήμα 75

απεικονίζονται τα μαρούλια στο σύστημα υδροπονίας την ημέρα της τοποθέτησής τους, δηλαδή την πρώτη ημέρα ανάπτυξής τους.

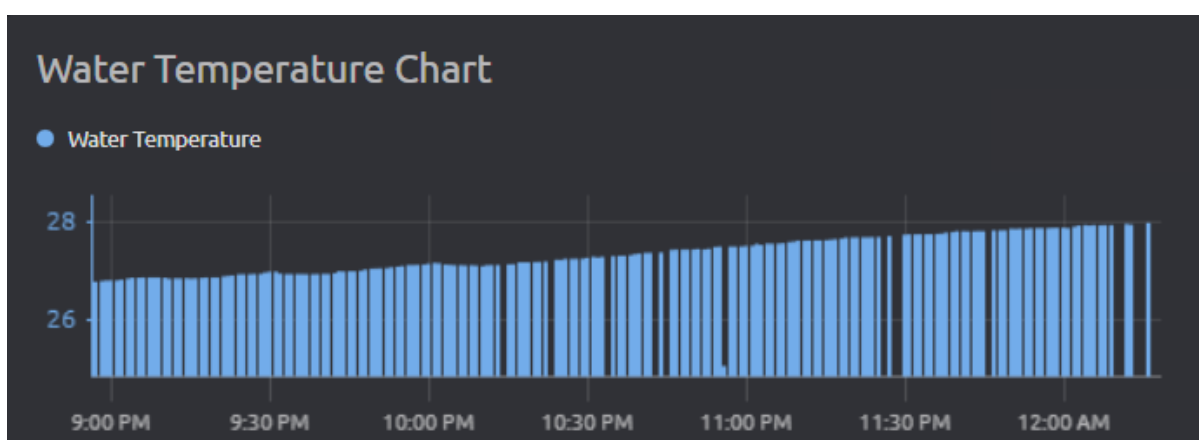


Σχήμα 75: Πρώτη ημέρα ανάπτυξης μαρουλιών.

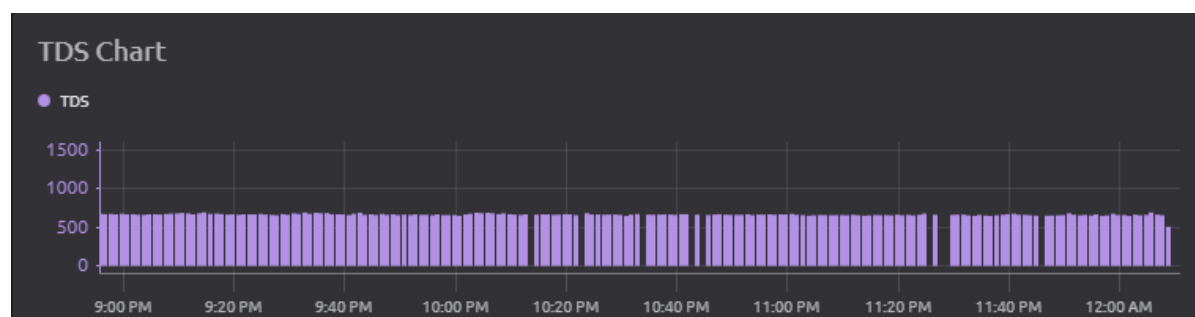
Κατά το διάστημα αυτόματης λειτουργίας του συστήματος τελούνταν συχνός έλεγχος της προόδου της ανάπτυξης των φυτών, ενώ όποτε κρινόταν αναγκαίο γινόταν προσθήκη νερού στο διάλυμα καθώς ένα μέρος του υπάρχοντος απορροφιόταν από το ριζικό σύστημα των φυτών, ενώ κάποιο μικρό μέρος του εξατμιζόταν. Παράλληλα και για την καλύτερη επίβλεψη της λειτουργίας του συστήματος υδροπονίας γινόταν σε τακτά χρονικά διαστήματα έλεγχος του pH του διαλύματος με έναν μετρητή χειρός μεγάλης ακρίβειας [70] προκειμένου να επιβεβαιώνονται οι μετρήσεις του αισθητήρα pH του συστήματος. Παράλληλα, υπήρχε και ο έλεγχος των τιμών όλων των αισθητήρων μέσω της πλατφόρμας Blynk ανά πάσα στιγμή και από οπουδήποτε. Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποια γραφήματα από τις τιμές του pH (Σχήμα 76), της θερμοκρασίας (Σχήμα 77), καθώς και της συγκέντρωσης TDS (Σχήμα 78) του διαλύματος για κάποια χρονικά διαστήματα λειτουργίας.



Σχήμα 76: Γραφική Παράσταση μεταβολής pH συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 77: Γραφική Παράσταση μεταβολής θερμοκρασίας διαλύματος συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 78: Γραφική Παράσταση μεταβολής TDS συναρτήσει του χρόνου.

Μετά το πέρας 24 ημερών τα μαρούλια έλαβαν την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 79. Συγκρίνοντας μάλιστα την ανάπτυξη των μαρουλιών από την πρώτη ως την τελευταία μέρα (Σχήμα 80) παρατηρείται πως τα μαρούλια καλλιεργήθηκαν με επιτυχία, οδηγώντας αβίαστα στο συμπέρασμα πως το σύστημα της υδροπονίας στο σύνολό του λειτούργησε αποτελεσματικά δημιουργώντας κατάλληλο περιβάλλον για την επιβίωση και ανάπτυξη των φυτών.



Σχήμα 79: Τελευταία ημέρα Ανάπτυξης Μαρουλιών.

(α)

(β)



Σχήμα 80: Σύγκριση Ανάπτυξης από την πρώτη ως την τελευταία μέρα.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1 Αξιολόγηση του Συστήματος

Όπως έχει καταστεί σαφές η παρούσα εργασία περιλάμβανε την κατασκευή ενός ενσωματωμένου συστήματος πολλαπλών αισθητήρων για την ασύρματη και απομακρυσμένη επιτήρηση σε πραγματικό χρόνο μίας διάταξης υδροπονίας με τη χρήση της τεχνολογίας IoT. Έπειτα από το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του συνολικού αυτού συστήματος και αφότου τέθηκε σε λειτουργία για το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε για την ανάπτυξη των φυτών, αποδείχθηκε πως σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό το σύστημα λειτούργησε με τον αναμενόμενο τρόπο. Οι λαμβανόμενες μετρήσεις μάλιστα ήταν πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκαν εξωτερικά όργανα του συστήματος (όργανο μέτρησης θερμοκρασίας, όργανο μέτρησης pH κτλ.) προκειμένου να πιστοποιηθεί η ορθότητά τους.

Συγκεντρωτικά θα αναφερθούν κάποια από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος επιτήρησης και ελέγχου ενός υδροπονικού συστήματος. Το τελικό σύστημα, λοιπόν, όπως διαμορφώνεται από την παραπάνω μελέτη είναι ιδιαίτερος εύχρηστο καθώς μπορεί να εφαρμοστεί και να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε NFT υδροπονικό σύστημα (αυτών των διαστάσεων) δεδομένου πως ο χρήστης απαιτείται απλώς να συνδέσει το τροφοδοτικό στην πρίζα και όλες οι υπόλοιπες λειτουργίες εκκινούν με αυτόματο τρόπο χάρη στο σωστό προγραμματισμό του ενσωματωμένου συστήματος. Αυτό σαφώς προϋποθέτει πως ο χρήστης έχει ήδη έτοιμα τα απαιτούμενα εξαρτήματα όπως σωλήνες, δεξαμενή, διαλύματα διόρθωσης της ποιότητας του νερού σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φυτού. Συνεπώς, με την εγκατάσταση του ενσωματωμένου συστήματος αυτού είναι σε θέση να μεταβεί από

την χειροκίνητη επιτήρηση στον πλήρη αυτοματισμό της ανάπτυξης των φυτών. Πρόκειται για μία πολύ σημαντική καινοτομία στο χώρο της αγροτικής παραγωγής καθώς με αυτό τον τρόπο ο παραγωγός μπορεί να εξοικονομήσει πολύ χρόνο καθημερινά, τον οποίο θα διέθετε ώστε να επιτηρεί από κοντά την πρόοδο ανάπτυξης των φυτών. Επίσης, δεδομένου πως μέσω του Wi-Fi όλες οι μετρήσεις στέλνονται απομακρυσμένα στην πλατφόρμα που έχει πρόσβαση ο χρήστης κατά τη διάρκεια όλου του 24ώρου και δέχεται μέσω email ειδοποιήσεις όταν κάποια μέτρηση είναι εκτός ορίων, μπορούν να αποφευχθούν άμεσα οποιαδήποτε αναδυόμενα σφάλματα στην παραγωγή, που χωρίς την ύπαρξη του αυτοματισμού θα γίνονταν πιθανόν αντιληπτά μετά από αρκετό χρονικό διάστημα. Επιπλέον, το συγκεκριμένο σύστημα αποτελεί μία οικονομική λύση για τον αυτοματισμό και τον ασύρματο έλεγχο της υδροπονίας δεδομένου πως το συνολικό κόστος κατασκευής του ενσωματωμένου συστήματος ανήλθε περίπου στα 170 €, ενώ περίπου στα 120 € ανήλθε το κόστος κατασκευής της βάσης της υδροπονικής διάταξης και των διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για το υδροπονικό σύστημα αυτό καθ' αυτό. Συγκρίνοντας μάλιστα την τιμή κατασκευής ενός τέτοιου ενσωματωμένου συστήματος επιτήρησης με ήδη υπάρχοντα προϊόντα της αγοράς (~1500 €), γίνεται εύκολα αντιληπτό πως πρόκειται για ένα αρκετά οικονομικό σύστημα προσιτό προς εγκατάσταση. Επισημαίνεται, επιπλέον, πως το συγκεκριμένο σύστημα είναι εύκολα επεκτάσιμο αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις υδροπονίας άλλων φυτών, όπως π.χ. ντομάτα και άλλα τροποποιώντας απλά τα ιδανικά όρια του pH και της συγκέντρωσης TDS σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε φυτού.

Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί επιπλέον πως για τη λήψη των μετρήσεων δεν χρειάζεται κάποια σύνδεση με καλώδιο στην αντίστοιχη συσκευή (υπολογιστής, κινητό) παρά μόνο η σύνδεση με το email του χρήστη στην πλατφόρμα ασύρματης επικοινωνίας. Επιπλέον, είναι γρήγορη η απόκριση των αισθητήρων χωρίς να απαιτείται μεγάλος χρόνος αναμονής από την τοποθέτηση μέχρι τη λήψη των μετρήσεων. Μάλιστα, οι αισθητήρες είναι αυτοδύναμοι κι έτσι στην περίπτωση που κάποιος σταματήσει λόγω κάποιου σφάλματος να λαμβάνει μετρήσεις, το υπόλοιπο σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά ανεξάρτητα από αυτόν. Επίσης, η διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων αποτελεί μία εύκολη διαδικασία χρησιμοποιώντας κάποια ειδικά διαλύματα συγκεκριμένου pH, είτε συγκεκριμένης συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων, ανάλογα με τον αισθητήρα που θα βαθμονομηθεί.

Αναφορικά με τη συνολική λειτουργία του αυτόματου συστήματος υδροπονίας παρατηρήθηκε πως η ανάπτυξη του φυτού ήταν η αναμενόμενη και μάλιστα πιο γρήγορη από την αντίστοιχη ανάπτυξη σε χώμα. Το φυτό χρειάστηκε μόλις 24 μέρες για να αναπτυχθεί πλήρως δίνοντας ένα πολύ καλό ποιοτικά αποτέλεσμα.

Ωστόσο, είναι αναγκαίο να επισημανθεί το γεγονός πως ο αισθητήρας pH κάποιες φορές έδινε εσφαλμένες μετρήσεις, γεγονός το οποίο αναδεικνύει την απαίτηση για συχνή βαθμονόμηση του αισθητήρα αυτού. Ωστόσο για ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις και αποφυγή αυτού του είδους σφαλμάτων προτείνεται η σύνδεση ενός αναλογικού οπτικού απομονωτή (optocoupler) με τον αισθητήρα pH και ακόμη καλύτερα η σύνδεση ακόμη ενός απομονωτή με τον αισθητήρα TDS. Αυτή η σύσταση είναι ιδιαίτερος σημαντική, καθώς στις περιπτώσεις που οι δύο αυτοί αισθητήρες λαμβάνουν μετρήσεις από το ίδιο δοχείο και είναι συνδεδεμένοι στην ίδια τροφοδοσία επηρεάζουν ο ένας τα αποτελέσματα του άλλου παράγοντας εσφαλμένες μετρήσεις. Επιπλέον, δεδομένου πως τα υλικά κατασκευής του αισθητήρα αυτού είναι αρκετά ευαίσθητα απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη μεταχείρισή τους. Διαφορετικά, μπορεί να προκύψουν εσφαλμένες μετρήσεις.

Εναλλακτικά, σε περιπτώσεις αστάθειας του συγκεκριμένου αισθητήρα όταν αυτός λειτουργεί λαμβάνοντας την ίδια τροφοδοσία με τον αισθητήρα TDS μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας επιπλέον μικροελεγκτής συνδεδεμένος σε διαφορετική τροφοδοσία προκειμένου σε αυτόν να συνδέεται ο αισθητήρας pH και έτσι οι δύο αυτοί αισθητήρες να λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον χωρίς παρεμβολές μεταξύ τους.

Στο σημείο αυτό, θα επισημανθεί για ακόμη μία φορά η υπεροχή της μεθόδου της υδροπονίας έναντι της παραδοσιακής μεθόδου ανάπτυξης των φυτών σε χώμα. Συγκεκριμένα, κατά το ίδιο διάστημα ανάπτυξης των μαρουλιών στη διάταξη υδροπονίας, τοποθετήθηκαν επίσης κάποια μαρούλια σε μία γλάστρα με χώμα. Συγκρίνοντας το ρυθμό ανάπτυξής τους παρατηρήθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, πως ο ρυθμός των φυτών που αναπτύχθηκαν με υδροπονία είναι ταχύτερος από τον αντίστοιχο ρυθμό ανάπτυξης των φυτών σε χώμα. Στην περίπτωση της ανάπτυξης σε περιβάλλον υδροπονίας τα φυτά αναπτύχθηκαν πιο γρήγορα αποκτώντας μεγαλύτερο ύψος και πιο πυκνό φύλλωμα σε σχέση με τα φυτά που καλλιεργήθηκαν στο χώμα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η σύγκριση των φυτών των δύο αυτών μεθόδων στο Σχήμα

81. Επισημαίνεται πως οι δύο ομάδες φυτών είχαν καλλιεργηθεί στο αντίστοιχο περιβάλλον για το ίδιο χρονικό διάστημα (16 μέρες ανάπτυξης).



Σχήμα 81: Καλλιέργεια των μαρουλιών στο χώμα (α) και στη διάταξη υδροπονίας (β).

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε κατά την παρούσα εργασία αποδείχθηκε ιδιαιτέρως αποτελεσματικό για την ανάπτυξη μαρουλιών με τη μέθοδο της NFT υδροπονίας, ωστόσο υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης και επέκτασής του. Αρχικά, ένα σημείο περισσότερης έρευνας στο συγκεκριμένο σύστημα που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μελλοντικές ερευνητικές εργασίες είναι βελτίωση της χρήσης του αισθητήρα μέτρησης του pH σε ένα τέτοιο σύστημα ώστε να λαμβάνονται όσο το δυνατόν ασφαλέστερες μετρήσεις και για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Επιπλέον, μία επέκταση που θα μπορούσε να μελετηθεί είναι η προσθήκη αισθητήρων μέτρησης του διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα ανάπτυξης του φυτού καθώς και του οξυγόνου που είναι διαλυμένο στο διάλυμα που διοχετεύεται στις ρίζες των φυτών, προκειμένου να γίνεται μία όσο τον δυνατόν καλύτερη και πιο ρεαλιστική απεικόνιση των περιβαλλοντικών συνθηκών ανάπτυξης του φυτού. Οι αισθητήρες αυτοί δεν ενσωματώθηκαν στην παρούσα διπλωματική καθώς το κόστος τους θα αύξανε αρκετά το συνολικό κόστος της κατασκευής και ανάπτυξης του συστήματος.

Μία σημαντική επέκταση του θέματος που πραγματεύεται η παρούσα εργασία θα ήταν να ερευνηθεί η εγκατάστασή του σε κάποιο σύστημα υδροπονίας μεγαλύτερων διαστάσεων είτε, ακόμη πιο ρεαλιστικά, να εγκατασταθεί σε κάποιο θερμοκήπιο

υδροπονίας. Στην περίπτωση αυτή και προκειμένου οι μετρήσεις να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερες στις πραγματικές, θα κρινόταν ορθό να τοποθετηθούν παραπάνω από έναν τέτοια συστήματα επίβλεψης των συνθηκών του διαλύματος και του περιβάλλοντα χώρου, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η παραγωγή.

Βιβλιογραφία

- [1] J. B. Jones, *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [2] W. F. Gericke, “HYDROPONICS--CROP PRODUCTION IN LIQUID CULTURE MEDIA,” *Science*, vol. 85, no. 2198, pp. 177–178, Feb. 1937, doi: 10.1126/science.85.2198.177.
- [3] “What Is Hydroponic Chillers And Why It Is Used For Hydroponics? » Industrial Water Chiller Manufacturer From China,” Jan. 06, 2022. <https://sychiller.com/what-is-hydroponic-chillers/> (accessed Jul. 05, 2022).
- [4] D. Saraswathi, P. Manibharathy, R. Gokulnath, E. Sureshkumar, and K. Karthikeyan, “Automation of Hydroponics Green House Farming using IOT,” in *2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*, Pondicherry, Jul. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICSCAN.2018.8541251.
- [5] “Hydroponics Market Size & Share Report, 2021-2028.” <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/hydroponics-market> (accessed Jun. 21, 2022).
- [6] W. F. Gericke, *The Complete Guide to Soilless Gardening*. 1940.
- [7] IPCC, Revised and others, “IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories,” 2006.
- [8] M. A. Martinez-Mate, B. Martin-Gorritz, V. Martínez-Alvarez, M. Soto-García, and J. F. Maestre-Valero, “Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: Energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 1298–1310, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.275.
- [9] H. Andrianto, Suhardi, and A. Faizal, “Development of Smart Greenhouse System for Hydroponic Agriculture,” in *2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, Bandung - Padang, Indonesia, Oct. 2020, pp. 335–340. doi: 10.1109/ICITSI50517.2020.9264917.
- [10] D. Shinde and N. Siddiqui, “IOT Based Environment change Monitoring & Controlling in Greenhouse using WSN,” in *2018 International Conference on Information , Communication, Engineering and Technology (ICICET)*, Pune, Aug. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICICET.2018.8533808.

- [11] G. S. Gupta and V. M. Quan, "Multi-sensor integrated system for wireless monitoring of greenhouse environment," in *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Seoul, Korea (South), Mar. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/SAS.2018.8336723.
- [12] "pixabay.com." [Online]. Available: <https://pixabay.com/>
- [13] "What Is The Best Growing Medium For Hydroponics?," *Smart Garden Guide*, Jul. 17, 2018. <https://smartgardenguide.com/best-growing-medium-for-hydroponics/> (accessed Jun. 21, 2022).
- [14] F. Modu, F. Aliyu, and A. Mabu, "A Survey of Smart Hydroponic Systems," *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 233–248, Jan. 2020, doi: 10.25046/aj050130.
- [15] "What Are Hydroponic Systems and How Do They Work?," *Fresh Water Systems*. <https://www.freshwatersystems.com/blogs/blog/what-are-hydroponic-systems> (accessed Jun. 21, 2022).
- [16] A. Jamie, "NFT Hydroponics: Basics, Setup, Pros/Cons, FAQ," *WhyFarmIt.com*, Mar. 11, 2021. <https://whyfarmit.com/nft-hydroponics/> (accessed Jun. 21, 2022).
- [17] A. Collaborator, "Hydroponic Systems & What's Right For You," *HP*, 13:00 400AD. <https://hydropros.com/blogs/growers-corner/6-types-hydroponic-systems> (accessed Jun. 22, 2022).
- [18] A. EI-Kazzaz, "Soilless Agriculture a New and Advanced Method for Agriculture Development: an Introduction," *Agric. Res. Technol. Access J.*, vol. 3, no. 2, Jan. 2017, doi: 10.19080/ARTOAJ.2017.03.555610.
- [19] "How to Set Up DIY Deep Water Culture Hydroponic System?," *Hydroponic Way*. <http://hydroponicway.com/how-to-set-up-a-deep-water-culture-type-hydroponic-system-b93bb60ae307> (accessed Jul. 05, 2022).
- [20] "What Is Wick System Hydroponics?," *Smart Garden Guide*, Jul. 29, 2018. <https://smartgardenguide.com/what-is-wick-system-hydroponics/> (accessed Jul. 05, 2022).
- [21] "Ebb & Flow (Flood and Drain) Hydroponic System," *Trees.com*, Dec. 15, 2017. <https://www.trees.com/gardening-and-landscaping/ebb-and-flow-hydroponics> (accessed Jul. 05, 2022).
- [22] "Hydroponic Drip System Explained," *Trees.com*, Dec. 18, 2017. <https://www.trees.com/gardening-and-landscaping/hydroponic-drip-system> (accessed Jul. 05, 2022).
- [23] P. M P, "VERTICAL FARMING: A CONCEPT," May 2018.
- [24] "Aeroponics: The Definitive Guide to Get Started with Aeroponic Systems," Apr. 30, 2020. <https://www.plantedwell.com/aeroponics/> (accessed Jul. 06, 2022).
- [25] "embedded systems." [Online]. Available: https://www.kth.se/social/upload/214/Lecture2_2.pdf

- [26] “EHB326.” <https://web.itu.edu.tr/yalcinmust/ehb326.html> (accessed Jul. 09, 2022).
- [27] “What is an embedded system?” <https://www.rs-online.com/designspark/what-is-an-embedded-system> (accessed Jun. 28, 2022).
- [28] *Hardware Security*. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/C2016-0-03251-5.
- [29] “Embedded System - Characteristics, Types, Advantages & Disadvantages,” *electricalfundablog.com*, Sep. 04, 2018. <https://electricalfundablog.com/embedded-system-characteristics-types-advantages-disadvantages/> (accessed Jun. 24, 2022).
- [30] Z. Shi, “Rapid Prototyping of an FPGA-Based Video Processing System,” Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2016. [Online]. Available: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/71389/Shi_Z_T_2016.pdf?sequence=1
- [31] “V. Tsoutsouras (2018 National Technical University of Athens (NTUA)) Design methodologies for resource management of many-core embedded systems.” <https://freader.ekt.gr/eadd/index.php?doc=44698#p=10> (accessed Jun. 24, 2022).
- [32] “Basics of Microcontrollers: History, Structure, Applications,” *Electronics Hub*, Nov. 13, 2017. <https://www.electronicshub.org/microcontrollers-basics-structure-applications/> (accessed Jun. 24, 2022).
- [33] “ESP32-DevKitC-32D Espressif Systems | Mouser,” *Mouser Electronics*. <https://gr.mouser.com/ProductDetail/356-ESP32-DEVKITC32D> (accessed Jun. 28, 2022).
- [34] “Esp32 Datasheet.” [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [35] “Internet of Things Global Standards Initiative,” *ITU*. <https://www.itu.int:443/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx> (accessed Jun. 25, 2022).
- [36] “Towards a definition of the Internet of Things(IoT).” IEEE Internet Initiative, May 27, 2015. [Online]. Available: https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf
- [37] S. Vashi, J. Ram, J. Modi, S. Verma, and C. Prakash, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and security issues,” in *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, Palladam, Tamilnadu, India, Feb. 2017, pp. 492–496. doi: 10.1109/I-SMAC.2017.8058399.
- [38] R. Porkodi and V. Bhuvaneshwari, “The Internet of Things (IoT) Applications and Communication Enabling Technology Standards: An Overview,” in *2014*

- International Conference on Intelligent Computing Applications*, Mar. 2014, pp. 324–329. doi: 10.1109/ICICA.2014.73.
- [39] “Homepage,” *IoT Analytics*, Nov. 08, 2014. <https://iot-analytics.com/> (accessed Jun. 27, 2022).
- [40] “IEEE SA - IEEE 2413-2019,” *IEEE Standards Association*. <https://standards.ieee.org/ieee/2413/6226/> (accessed Jun. 25, 2022).
- [41] I. Mashal, O. Alsaryrah, T.-Y. Chung, C.-Z. Yang, W.-H. Kuo, and D. P. Agrawal, “Choices for interaction with things on Internet and underlying issues,” *Ad Hoc Netw.*, vol. 28, pp. 68–90, May 2015, doi: 10.1016/j.adhoc.2014.12.006.
- [42] “Top IoT Communication Protocols Updated 2021 - ZigBee, NFC, And More,” Aug. 25, 2020. <https://hashstudioz.com/blog/top-iot-communication-protocols-2020/> (accessed Jun. 28, 2022).
- [43] “The impact of the communication technology protocol on your IoT application’s power consumption,” *Saft | Batteries to energize the world*, Jul. 01, 2020. <https://www.saftbatteries.com/energizing-iot/impact-communication-technology-protocol-your-iot-application%E2%80%99s-power-consumption> (accessed Jun. 25, 2022).
- [44] “Blynk.” <https://blynk.io> (accessed Jun. 27, 2022).
- [45] Δρ. Κ. Καλοβρέκτης and Δρ. Ν. Κατέβας, *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου, Ηλεκτρικές Μετρήσεις Τεχνολογία Μετρήσεων*, 3η. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [46] R. K. Attri, *Research and design of snow hydrology sensors and instrumentation: selected research papers*. 2018.
- [47] J. Liu, L. Ma, and J. Yang, “Methods and techniques of temperature measurement,” in *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, Sep. 2011, pp. 5332–5334. doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057907.
- [48] “Ohms Law - an overview | ScienceDirect Topics.” <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ohms-law> (accessed Jun. 26, 2022).
- [49] P. N. Stroski, “Avionic sensors and instruments (Part 1),” *Electrical e-Library.com*, Jun. 07, 2018. <https://www.electricalibrary.com/en/2018/06/07/avionic-sensors-and-instruments-part-1/> (accessed Jun. 26, 2022).
- [50] I. Mohammed, A. R. A. Talib, M. T. H. Sultan, and S. Saadon, “Temperature and heat flux measurement techniques for aeroengine fire test: a review,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 152, p. 012036, Oct. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/152/1/012036.
- [51] W. R. Wan Ahmad, M. Mamat, A. Zoolfakar, Z. Khusaimi, and M. Rusop, *A review on hematite α -Fe₂O₃ focusing on nanostructures, synthesis methods and applications*. 2016, p. 6. doi: 10.1109/SCORED.2016.7810090.

- [52] circuitgeeks, "DHT11 & DHT22 Humidity and Temperature Sensor with Arduino," *Circuit Geeks*, Nov. 12, 2021. <https://www.circuitgeeks.com/arduino-dht11-and-dht22-sensor-tutorial/> (accessed Jun. 27, 2022).
- [53] "TDS Sensor & Arduino Interfacing for Water Quality Monitoring," *How To Electronics*, Mar. 04, 2020. <https://how2electronics.com/tds-sensor-arduino-interfacing-water-quality-monitoring/> (accessed Jun. 27, 2022).
- [54] "Gravity__Analog_TDS_Sensor___Meter_For_Arduino_SKU___SEN0244-DFRobot."
https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_TDS_Sensor___Meter_For_Arduino_SKU___SEN0244 (accessed Jun. 27, 2022).
- [55] S. O. Kasap, *Principles of electronic materials and devices*, 3 rd ed. Boston London: McGraw-Hill, 2006.
- [56] R. Mischianti, "ESP32 WeMos LOLIN32 high resolution pinout and specs," *Renzo Mischianti*, Feb. 21, 2021. <https://www.mischianti.org/2021/02/21/esp32-wemos-lolin32-high-resolution-pinout-and-specs/> (accessed Jun. 29, 2022).
- [57] O. Prelipceanu - Galai, M. Prelipceanu, M. Cazacu, and I.-A. Roşu, "WIRELESS SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROL OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS," *Bull. Polytech. Inst. Jassy Constr. Archit. Sect.*, vol. Volume 64 (68), pp. 77–89, Dec. 2018.
- [58] R. R. Shamshiri *et al.*, "Model-based evaluation of greenhouse microclimate using IoT-Sensor data fusion for energy efficient crop production," *J. Clean. Prod.*, vol. 263, p. 121303, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121303.
- [59] "DHT11 Temperature and Humidity Sensor and the Raspberry Pi," *Raspberry Pi Spy*, Sep. 21, 2017. <https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2017/09/dht11-temperature-and-humidity-sensor-raspberry-pi/> (accessed Jun. 29, 2022).
- [60] "DHT11 Datasheet." [Online]. Available: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Imaging/TEMT6000.pdf?_ga=2.255136202.37149979.1656511925-2053266540.1647971333
- [61] Admin, "TEMT6000 Ambient Light Sensor & Arduino - Measure Light Intensity," *How To Electronics*, Sep. 25, 2019. <https://how2electronics.com/temt6000-ambient-light-sensor-arduino-measure-light-intensity/> (accessed Jun. 29, 2022).
- [62] S. Zhang *et al.*, "Investigation on environment monitoring system for a combination of hydroponics and aquaculture in greenhouse," *Inf. Process. Agric.*, vol. 9, no. 1, pp. 123–134, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.inpa.2021.06.006.
- [63] "Waterproof_DS18B20_Digital_Temperature_Sensor___SKU_DFR0198_-DFRobot."
https://wiki.dfrobot.com/Waterproof_DS18B20_Digital_Temperature_Sensor___SKU_DFR0198_ (accessed Jun. 29, 2022).

- [64] "Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2-DFRobot." https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2 (accessed Jun. 29, 2022).
- [65] B. Matysiak, S. Kaniszewski, J. Dyśko, W. Kowalczyk, A. Kowalski, and M. Grzegorzewska, "The Impact of LED Light Spectrum on the Growth, Morphological Traits, and Nutritional Status of 'Elizium' Romaine Lettuce Grown in an Indoor Controlled Environment," *Agriculture*, vol. 11, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/agriculture11111133.
- [66] T. Namgyel, C. Khunarak, S. Siyang, T. Pobkrut, J. Norbu, and T. Kerdcharoen, "Effects of supplementary LED light on the growth of lettuce in a smart hydroponic system," in *2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, Jan. 2018, pp. 216–220. doi: 10.1109/KST.2018.8426202.
- [67] "LED Ring Bundle - 61 x WS2812 5050 RGB," *grobotronics.com*. <https://grobotronics.com/led-ring-bundle-61-x-ws2812-5050-rgb.html?sl=en> (accessed Jun. 29, 2022).
- [68] "CANNA Terra Vega | CANNA." https://www.canna-gr.com/terra_vega (accessed Jul. 06, 2022).
- [69] "Welcome to VitaLink," *Vitalink*. <http://www.vitalink.eu/> (accessed Jul. 06, 2022).
- [70] "How to Convert Conductivity to Concentration," *Sciencing*. <https://sciencing.com/convert-conductivity-concentration-6925703.html> (accessed Jul. 04, 2022).
- [71] "HI98103 pH Meter Hanna Manual." [Online]. Available: https://www.chem.uci.edu/~jsnowick/groupweb/files/Hanna_manual.pdf