



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ
ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΘΟΛΟΤΗΤΑ, ΤΟ pH, ΤΗΝ
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Β. Ντόγκας

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ
ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΘΟΛΟΤΗΤΑ, ΤΟ pH, ΤΗΝ
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Β. Ντόγκας

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Ιουνίου 2020.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Γκόνος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2020

.....

Νικόλαος Β. Ντόγκας

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

Copyright © Νικόλαος Ντόγκας, 2020.

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 Ευρωπαϊκή Ένωση και όλες οι αναπτυγμένες χώρες έχουν θεσμοθετήσει σχετική υποχρεωτική νομοθεσία που να εξασφαλίζει αποδεκτά όρια των παραμέτρων ποιότητας των υδάτων, γι' αυτό και οι χώρες προβαίνουν σε δειγματοληπτικούς ελέγχους σε συγκεκριμένα σημεία, όπως σε φράγματα νερού. Ωστόσο, η παραδοσιακή μέθοδος δειγματοληψίας αποτελεί χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία. Γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί σύγχρονες τεχνικές για συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας νερού.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός συστήματος αισθητήρων που θα εξετάζει την ποιότητα ενός δείγματος νερού. Για την επίτευξη της μέτρησης της ποιότητας χρησιμοποιούνται τέσσερις επιμέρους αισθητήρες που μετράνε την θολότητα, το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την θερμοκρασία. Επιλέχθηκαν τέσσερις κατάλληλοι αισθητήρες του εμπορίου, οι οποίοι προγραμματίστηκαν για παράλληλη χρήση σε συνδυασμό με την πλατφόρμα Arduino. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στέλνονται και αποθηκεύονται σε συνδεδεμένο στο Arduino υπολογιστή.

Λέξεις Κλειδιά: Ποιότητα νερού, Αισθητήρες, Θολότητα, pH, Ηλεκτρική Αγωγιμότητα,
Arduino

Abstract

The European Union and all the developed countries have enacted mandatory legislation to ensure acceptable water quality parameters, which is why countries are conducting sampling inspections at specific locations, such as water dams. However, the traditional sampling method is both time consuming and an expensive process. That is why modern techniques have been developed for systematic monitoring of water quality.

The purpose of this dissertation is to design and manufacture a sensor system that will examine the quality of a water sample. To achieve the quality measurement, four sub-sensors are used, which measure turbidity, pH, electrical conductivity and temperature. Four suitable commercial sensors were selected, which were programmed for parallel use, in conjunction with the Arduino platform. The results of the measurements are sent and stored on a computer that is connected to the Arduino.

Keywords: Water Quality, Sensors, Turbidity, pH, Electrical Conductivity, Arduino

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το Ακαδημαϊκό Έτος 2019-2020. Επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ευάγγελος Χριστοφόρου, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της εργασίας και για την καθοδήγησή του καθ' όλη την περίοδο της εκπόνησής της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές Π. Τσαραμπάρη και Ι. Γκόνο, θεωρώντας ιδιαίτερη τιμή μου την συμμετοχή τους στην επιτροπή εξέτασης της παρούσας διπλωματικής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Σπύρο Αγγελόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του, την διαρκή επικοινωνία και την εξαιρετική συνεργασία του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξή τους, τόσο κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διπλωματικής, όσο και κατά το σύνολο των σπουδών μου.

Η εργασία αυτή αποτελεί μια προσπάθεια να σχεδιασθεί και να υλοποιηθεί μια εύχρηστη, αξιόπιστη και οικονομική λύση για την μέτρηση της ποιότητας ενός δείγματος νερού με βάση τη θολότητα, το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη θερμοκρασία. Στα πλαίσια της εργασίας έγινε μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και των ήδη διαθέσιμων λύσεων, καθώς και στοιχείων που θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα για την επίτευξη ενός άριτου αποτελέσματος. Όλα τα προηγούμενα αναφέρονται στο πρώτο μέρος της εργασίας. Κατόπιν, επιλέχθηκαν οι κατάλληλοι αισθητήρες και σχεδιάστηκε σύστημα παράλληλης λήψης και αποθήκευσης των λαμβανόμενων μετρήσεων, τα οποία παρουσιάζονται στο δεύτερο μέρος της εργασίας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	1
1.2	Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	2
1.3	Δομή της διπλωματικής εργασίας	3
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	5
2.1	Παράμετροι ποιότητας νερού	5
2.1.1	Φυσικές Παράμετροι.....	5
2.1.2	Χημικές Παράμετροι.....	10
2.1.3	Βιολογικές Παράμετροι	15
2.1.4	Φαινόμενο ευτροφισμού: ένας συνδυασμός όλων των παραμέτρων.....	15
2.2	Ανάλυση λειτουργίας αισθητήρων για μέτρηση ποιότητας νερού	17
2.2.1	Αισθητήρες θολότητας	17
2.2.2	Αισθητήρες pH.....	21
2.2.3	Αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας	29
2.2.4	Αισθητήρες θερμοκρασίας.....	38
2.2.5	Αισθητήρες διαλυμένου οξυγόνου	41
3	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	45
3.1	Επιλογή υλικών και επεξήγηση χρησιμοποιούμενου κώδικα.....	45
3.1.1	Μικροελεγκτής.....	45
3.1.2	Αισθητήρας θολότητας.....	46
3.1.3	Αισθητήρας θερμοκρασίας.....	51
3.1.4	Αισθητήρας pH	56
3.1.5	Αισθητήρας αγωγιμότητας.....	61
3.2	Πακετάρισμα του συστήματος αισθητήρων	65
3.3	Συλλογή και αποθήκευση των μετρήσεων του συστήματος	70

4	ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	75
4.1	Λήψη μετρήσεων από διαφορετικά δείγματα νερού	75
4.1.1	Νερό βρύσης.....	75
4.1.2	Εμφιαλωμένο νερό	76
4.1.3	Νερό θάλασσας	76
4.2	Αύξηση της ποσότητας αλατιού σε δείγμα νερού και παρακολούθηση των μεταβολών στις μετρήσεις	77
4.3	Αυξομείωση της θερμοκρασίας σε δείγμα νερού και παρακολούθηση των μεταβολών στις μετρήσεις	81
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
5.1	Τελική αξιολόγηση του ολοκληρωμένου συστήματος.....	87
5.2	Μελλοντική εργασία	88
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	91
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	95
7.1	Πίνακες μετρήσεων πειραμάτων.....	95
7.2	Συνολικός κώδικας συστήματος μέτρησης ποιότητας νερού	105

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το νερό αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία του περιβάλλοντος στον πλανήτη μας. Είναι ίσως η πιο σημαντική παράμετρος για την επιβίωση τόσο της ανθρωπότητας, όσο και άλλων οργανισμών. Η ποιότητα των υδάτων σε γενικό επίπεδο, αποτελεί σήμερα ένα κεφάλαιο μελέτης πολλών επιστημών και είναι ένα θέμα υψίστης σημασίας μιας και ο πλανήτη μας είναι καλυμμένος στο μεγαλύτερο μέρος του από νερό το οποίο μπορεί είτε να αποθηκευτεί ή να χρησιμοποιηθεί για βιομηχανικούς σκοπούς, για άρδευση και ύδρευση ή να γίνει κατάλληλη επεξεργασία και παροχή για πόσιμο. Συνεπώς, απαιτείται η συνεχής παρακολούθηση και αξιολόγηση της ποιότητας των υδάτων, αλλά και συνεχής μέτρηση των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων του νερού.

Η ποιότητα του νερού είναι ένας όρος που εφαρμόζεται για να δείξει την καταλληλότητα του νερού για κάθε λειτουργία ή δραστηριότητα που θα χρησιμοποιηθεί. Κάθε συγκεκριμένη λειτουργία θα έχει προκαθορισμένες απαιτήσεις όσον αφορά τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του νερού, όπως για παράδειγμα ο δείκτης pH στο πόσιμο νερό ή το αποδεκτό επίπεδο θολότητας σε επεξεργασμένα απόβλητα εργοστασίων προτού αυτά απορριφθούν στα υδάτινα στρώματα.

Η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς η κακή ποιότητα νερού επηρεάζει όχι μόνο την υδρόβια ζωή, αλλά και το περιβάλλον οικοσύστημα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση και όλες οι αναπτυγμένες χώρες έχουν θεσμοθετήσει σχετική υποχρεωτική νομοθεσία που να εξασφαλίζει αποδεκτά επίπεδα στις διάφορες παραμέτρους ποιότητας των υδάτων, με φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς ελέγχους με απώτερο στόχο την αναβάθμιση της ποιότητας ζωής. Κατανοώντας τη σημασία του υδάτινου περιβάλλοντος, η Ευρωπαϊκή Ένωση προχώρησε στην εκπόνηση μιας νέας Οδηγίας Πλαισίου (2000/60/ΕΚ), που θεσπίζει τις βασικές αρχές μιας βιώσιμης πολιτικής των υδάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Σε προηγούμενα χρόνια, ειδικά πριν το 2000, η πιο συνηθισμένη μέθοδος αξιολόγησης της ποιότητας νερού ήταν η λήψη δειγμάτων από σημεία ενδιαφέροντος και η ανάλυσή τους σε εργαστήριο. Αυτή η διαδικασία όμως, πέρα του ότι ήταν και χρονικά και χρηματικά πιο δαπανηρή, περιλάμβανε και τον παράγοντα του ανθρώπινου σφάλματος

κατά τη διάρκεια συλλογής των δειγμάτων προς μέτρηση (για παράδειγμα μόλυνση του δείγματος με άλλο ή εσφαλμένη ταυτοποίηση), καθώς και σφάλματα κατά τη διάρκεια της ακόλουθης ανάλυσης και καταγραφής των δεδομένων.

Οι σύγχρονες υπηρεσίες αξιολόγησης της ποιότητας των υδάτων χρησιμοποιούν ειδικά σχεδιασμένα τεχνολογικά μέσα ώστε να λαμβάνουν ακριβή αποτελέσματα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Προκειμένου να βελτιωθούν οι παροχές νερού, πολλοί δημόσιοι και ιδιωτικοί παροχείς ύδρευσης ακολουθούν την πρόοδο της τεχνολογίας και προσθέτουν εξειδικευμένους αισθητήρες, στοιχεία τηλεπικοινωνιών και ψηφιακών συστημάτων, καθώς και συστήματα αυτοματισμού, με στόχο την συχνή λήψη μετρήσεων, αλλά και την επεξεργασία αυτών ώστε να γίνεται γρήγορη διάγνωση σε περίπτωση οποιασδήποτε πιθανής μόλυνσης ή αλλοίωσης της ποιότητας. Η χρήση αισθητήρων σε αυτό τον τομέα αποσκοπεί στη βελτίωση των συνθηκών ύδρευσης και τον έγκαιρο εντοπισμό μολύνσεων ή λοιπών αλλαγών στη σύσταση νερού και προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Συνεχής επιτόπου λήψη μετρήσεων
- Επίτευξη υψηλής ευαισθησίας και επιλεκτικότητας μετρήσεων
- Διεξαγωγή στατιστικής ανάλυσης βάσει παρελθοντικών δεδομένων
- Χαμηλό κόστος κατασκευής, εγκατάστασης και συντήρησης
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Δυνατότητα σύνδεσης του συστήματος στο διαδίκτυο για παρακολούθηση των δεδομένων από απόσταση
- Επιτόπου επεξεργασία μετρήσεων και προειδοποίηση σε περίπτωση αποκλίσεως από τις αποδεκτές τιμές
- Δυνατότητα λειτουργίας χωρίς συνεχή παρουσία ανθρωπίνου δυναμικού

1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Ο στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να σχεδιασθεί και να κατασκευαστεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων το οποίο θα εξετάζει την ποιότητα ενός δείγματος νερού βάσει τεσσάρων παραμέτρων:

- Την θολότητα, δηλαδή πόσα μικρά σωματίδια αιωρούνται μέσα στο υγρό,
- το pH, δηλαδή πόσο όξινο ή αλκαλικό είναι το δείγμα,

- την ηλεκτρική αγωγιμότητα, δηλαδή η ικανότητα του νερού να άγει ηλεκτρικό ρεύμα και
- τη θερμοκρασία, της οποίας η τιμή επηρεάζει σε μικρό βαθμό και τις τιμές του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Το σύστημα αυτό θα πρέπει καταρχάς να είναι αξιόπιστο και να αποτελεί μια φθηνή και εύκολη στη χρήση λύση. Θα πρέπει να σχεδιασθεί έτσι ώστε να μεταφέρεται και να τοποθετείται εύκολα και γρήγορα, καθώς και να παρέχει δυνατότητα για τροποποιήσεις και επέκταση της λειτουργίας του με τοποθέτηση περαιτέρω αισθητήρων που να μετράνε περισσότερα μεγέθη.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η εν λόγω διπλωματική εργασία χωρίζεται σε τέσσερα μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελεί μια σύντομη εισαγωγή στο θέμα και τους στόχους της εργασίας. Το δεύτερο μέρος της εργασίας είναι το θεωρητικό μέρος. Σε αυτό περιλαμβάνονται απαραίτητες θεωρητικές γνώσεις σχετικά με τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη διάταξη και άλλα παρόμοια στοιχεία και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά τους. Κατόπιν, παρουσιάζονται ήδη υπάρχουσες λύσεις για την λήψη και αξιοποίηση μετρήσεων για την ποιότητα νερού, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Στο τρίτο μέρος περιγράφεται η διαδικασία επιλογής των αισθητήρων και κατασκευής της προτεινόμενης λύσης. Αναλύεται η δοκιμή των επιμέρους υποσυστημάτων στο εργαστήριο, η σχεδίαση και ο προγραμματισμός του τελικού ενσωματωμένου συστήματος και ο τρόπος επικοινωνίας με τον υπολογιστή και η αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Στο τέταρτο μέρος παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο και συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις, εντυπώσεις για το συνολικό προτεινόμενο σύστημα., καθώς και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις του συστήματος. Έπειτα ακολουθεί η βιβλιογραφία και μετά το παράρτημα, όπου βρίσκονται συγκεντρωμένα τα τμήματα κώδικα που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα στάδια της εργασίας.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Παράμετροι ποιότητας νερού

Το νερό καλύπτει περίπου το 71% του πλανήτη μας [1] και βρίσκεται στην ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη λιθόσφαιρα, σε όλα τα τμήματα δηλαδή της βιόσφαιρας, στην επιφάνεια και στο εσωτερικό της Γης. Χαρακτηρίζεται από φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους, και με βάση τις τιμές αυτών μπορούν οι κατάλληλοι οργανισμοί να αποφανθούν για την ποιότητά του.

2.1.1 Φυσικές Παράμετροι

2.1.1.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι μια φυσική ιδιότητα της ύλης που εκφράζει ποσοτικά το ζεστό και το κρύο. Είναι η εκδήλωση της θερμικής ενέργειας που υπάρχει σε κάθε ύλη, η οποία είναι η πηγή της εμφάνισης θερμότητας, μιας ροής ενέργειας, όταν ένα σώμα έρχεται σε επαφή με ένα άλλο ψυχρότερο. Ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται, το νερό μπορεί να βρεθεί και στις τρεις καταστάσεις ύλης, δηλαδή στερεό (σε θερμοκρασία μικρότερη από τους 0°C), υγρό (σε συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες, δηλαδή θερμοκρασία δωματίου), και αέριο (όταν θερμαίνεται παραπάνω από 100°C).

2.1.1.2 Θολότητα ή Διαφάνεια

Η θολότητα προκύπτει από τη μέτρηση του διαχεόμενου φωτός, το οποίο προκύπτει από την αλληλεπίδραση του προσπίπτοντος φωτός με τα υλικά σωματίδια που βρίσκονται σε ένα υγρό δείγμα. Ο οργανισμός American Public Health Association (APHA) ορίζει τη θολότητα ως μια έκφραση των οπτικών ιδιοτήτων ενός δείγματος που προκαλεί ακτίνες φωτός να διαχέονται ή να απορροφώνται αντί να μεταδίδονται σε ευθεία γραμμή διαμέσου του δείγματος.

Στην περίπτωση που το υγρό δείγμα είναι δείγμα νερού, η αιωρούμενη ύλη μέσα στο δείγμα που προκαλεί τη διάχυση του φωτός αποτελείται από μία μεγάλη ποικιλία υλικών, οργανικών και ανόργανων στοιχείων. Έτσι, η θολότητα του νερού προκαλείται συχνά από την παρουσία αιωρούμενης και διαλυμένης ύλης, όπως για παράδειγμα από την παρουσία αργίλου, χύματος, σκόνης οργανικής ύλης, πλαγκτόν, άλλων μικροοργανισμών, οργανικών

οξέων και χρωστικών. Τυπικά, όλα αυτά τα σωματίδια είναι ανεπιθύμητα στο νερό, καθώς μπορούν να είναι επικίνδυνα για την υγεία των καταναλωτών όταν πρόκειται για πόσιμο νερό, συνεπώς ο έγκαιρος εντοπισμός τους και η αφαίρεσή τους είναι απαραίτητες ενέργειες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τις αρμόδιες υπηρεσίες. Γι' αυτό το λόγο η θολότητα έχει χρησιμοποιηθεί σαν παράμετρος κλειδί της ποιότητας του νερού για την εκτίμηση της επίπτωσης στην ανθρώπινη υγεία, αλλά και στο υδάτινο οικοσύστημα. Υψηλότερες τιμές θολότητας είναι συνήθως άμεσα συσχετισμένες με χαμηλότερη ποιότητα νερού.

Ωστόσο, η μέτρηση της θολότητας δεν είναι ευθέως συσχετισμένη με συγκεκριμένο αριθμό ή σχήμα σωματιδίων. Αντιθέτως, είναι μια μέτρηση, ποσοτικοποίηση δηλαδή, της διάχυσης που προκαλούν τέτοια σωματίδια όταν αυτά αλληλεπιδρούν με το φως. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω, η θολότητα έχει ιστορικά αντιμετωπιστεί σαν ποιοτική και όχι ποσοτική μέτρηση. Για αυτό το λόγο, για να μετατραπούν οι μέθοδοι μέτρησης της θολότητας έτσι ώστε να υπάρχει και ποσοτική αντιστοίχιση, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τυποποιημένες μέθοδοι και πρότυπα.

Επομένως, η μέτρηση της θολότητας είναι μια ποιοτική παράμετρος για το νερό, αλλά η ανιχνευσιμότητά της με βάση ένα πρωτεύον πρότυπο, της επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί και σαν ποσοτική μέτρηση. Όταν χρησιμοποιείται σαν ποσοτική μέτρηση, η θολότητα μπορεί να μετρηθεί στις εξής μονάδες:

- Νεφελομετρικές Μονάδες Θολότητας (Nephelometric Turbidity Units, or **NTU**). Σημαίνει ότι το όργανο μέτρησης χρησιμοποιεί λευκό φως και μετράει το φως που διαχέεται από το δείγμα σε γωνία 90 μοιρών από το προσπίπτον φως.
- Νεφελομετρικές Μονάδες Φορμαζίνης (Formazin Nephelometric Units, or **FNU**). Σημαίνει ότι το όργανο μέτρησης χρησιμοποιεί υπέρυθρο φως (860 nm), και μετράει το διαχεόμενο φως σε γωνία 90 μοιρών από το προσπίπτον φως.
- Μονάδες Εξασθένησης Φορμαζίνης (Formazin Attenuation Units, or **FAU**). Σημαίνει ότι το όργανο μέτρησης μετράει την μείωση της έντασης του μεταδιδόμενου φωτός μέσω του δείγματος υπό γωνία 180 μοιρών από το προσπίπτον φως. Αυτός ο τύπος μέτρησης συνήθως πραγματοποιείται με τη χρήση φασματοφωτομέτρου ή χρωματομετρητή και δεν θεωρείται έγκυρη μονάδα μέτρησης θολότητας από τις περισσότερες υπηρεσίες ελέγχου.

- Μονάδα Θολότητας Jackson (Jackson Turbidity Units, or **JTU**) είναι η εναλλακτική μονάδα μέτρησης της θολότητας, όπου ουσιαστικά μετριέται το μήκος που απαιτείται να έχει ένα διαφανές δοχείο νερού ώστε να καλύψει πλήρως τη φλόγα ενός κεριού που παρατηρείται μέσα από το δοχείο. Πιο σύγχρονα όργανα φυσικά δεν χρησιμοποιούν κεριά, αλλά μια δέσμη φωτός. Ωστόσο, αποτελεί μια ξεπερασμένη μέθοδο συγκριτικά με τις παραπάνω.

Η φορμαζίνη χρησιμοποιούταν για πάνω από 30 χρόνια ως το πρωτεύον πρότυπο για την ανίχνευση της θολότητας. Χρησίμευε δηλαδή, στη δημιουργία μειγμάτων βαθμονόμησης, ώστε να ρυθμίζονται οι τιμές μέτρησης στα όργανα ή στους αισθητήρες. Αυτό σημαίνει ότι οι παραπάνω μονάδες μέτρησης θολότητας είναι ισοδύναμες μεταξύ τους όταν μετριέται ένα πρότυπο φορμαζίνης, συνεπώς τα όργανα θα δίνουν την ίδια τιμή, αλλά στην περίπτωση μέτρησης άλλων δειγμάτων θα διαφέρουν αισθητά μεταξύ τους λόγω των διαφορών που έχουν στον τρόπο μέτρησης.

Πολλές κυβερνήσεις έχουν θέσει πρότυπα σχετικά με την επιτρεπτή θολότητα στο πόσιμο νερό. Οι περισσότερες εταιρίες παροχής πόσιμου νερού προσπαθούν να επιτύχουν επίπεδα θολότητας τόσο χαμηλά όσο 0.1 NTU. Τα ευρωπαϊκά πρότυπα για τα επίπεδα θολότητας απαιτούν να μην ξεπερνάνε τα 4 NTU. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει καθιερώσει για τις εγκαταστάσεις από όπου περνάει πόσιμο νερό να μην ξεπερνάνε τα 5 NTU και ιδανικά να είναι κάτω από 1 NTU.

2.1.1.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός υγρού μετράει την ικανότητά του να άγεται ρεύμα μέσα από αυτό. Η μονάδα μέτρησης της αγωγιμότητας στο SI είναι Siemens ανά μέτρο (S/m), ή οι υπομονάδες του (mS, μ S), όπου η μονάδα Siemens ισοδυναμεί με Ampere προς Volt (A/V). Οι μετρήσεις αγωγιμότητας χρησιμοποιούνται συνήθως σε πολλές βιομηχανικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές ως ένας γρήγορος, φθηνός και αξιόπιστος τρόπος μέτρησης του ιοντικού περιεχομένου σε ένα διάλυμα, καθώς και τον τύπο και την ποσότητα από διαλυμένες ουσίες μέσα σε αυτό.

Αφού η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένας τρόπος να μετριέται η δυνατότητα του νερού να επιτρέπει την ροή ηλεκτρικού ρεύματος, συνδέεται άμεσα με την συγκέντρωση αλατιού που είναι διαλυμένο μέσα στο νερό και, κατά συνέπεια, με το σύνολο των διαλυμένων στερεών μέσα στο νερό. Τα άλατα διαλύονται σε θετικά και αρνητικά

φορτισμένα ιόντα, τα οποία είναι καλοί αγωγοί ηλεκτρισμού. Ωστόσο, όταν η συγκέντρωση αλατιού φτάσει ένα συγκεκριμένο επίπεδο, η ηλεκτρική αγωγιμότητα δεν συνδέεται πλέον άμεσα με τη συγκέντρωση αλατιού. Αυτό συμβαίνει γιατί διαμορφώνονται ζεύγη ιόντων. Τα ζεύγη ιόντων αποδυναμώνουν τα φορτία μεταξύ τους, οπότε υψηλότερη συγκέντρωση συνόλου διαλυμένων στερεών δεν ισοδυναμεί απαραίτητα με υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται κυρίως από τις εξής παραμέτρους:

- τη συγκέντρωση των ιόντων
- τη κινητικότητα των ιόντων
- το σθένος των ιόντων
- τη θερμοκρασία του διαλύματος

Το καθαρό νερό δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Το τυπικό αποσταγμένο νερό σε ισορροπία με διοξείδιο του άνθρακα έχει αγωγιμότητα της τάξης των 20 dS/m. Το υψηλής ποιότητας απιονισμένο νερό συνήθως έχει αγωγιμότητα της τάξης των 5.5×10^{-6} S/m, ή 5.5 μS/m. Το πόσιμο νερό έχει συνηθισμένο αποδεκτό εύρος αγωγιμότητας 0.005 – 0.05 S/m, ή 5 – 50 mS/m. Το θαλασσινό νερό (που προφανώς είναι πλούσιο σε άλατα), έχει συνήθως αγωγιμότητα της τάξης των 5 S/m.

2.1.1.4 Στερεά (Σύνολο Αιωρούμενων Στερεών – Total Suspended Solids, TSS και Σύνολο Διαλυμένων Στερεών – Total Dissolved Solids, TDS)

Τα στερεά στα ύδατα ταξινομούνται σε επιμέρους κατηγορίες, όπως αιωρούμενα, διαλυμένα, ολικά, καθίζοντα κλπ. Τα αιωρούμενα στερεά, μπορούν να είναι οργανικής ή ανόργανης φύσης και η παρουσία τους στο νερό οδηγεί στην δημιουργία θολότητας, η οποία αναλύθηκε παραπάνω. Πέρα από την κακή αισθητική που δημιουργούν στα ύδατα, εμποδίζουν και τη διέλευση του ηλιακού φωτός, οπότε επηρεάζεται αρνητικά και η διαδικασία φωτοσύνθεσης και παραγωγής του φυτοπλαγκτόν. Επηρεάζουν, ακόμα, αρνητικά την ανάπτυξη υδρόβιων οργανισμών και τη μεταφορά συστατικών μεταξύ ατμόσφαιρας και νερού. Η μονάδα μέτρησής τους είναι τα mg/L, καθώς μετριέται ο όγκος που μειώνεται από το νερό όταν τα στερεά φιλτράρονται και αφαιρούνται από αυτό.

Το σύνολο των διαλυμένων στερεών είναι η μέτρηση της συνδυασμένης περιεκτικότητας όλων των οργανικών και ανόργανων ουσιών που παρευρίσκονται σε ένα υγρό σε μορφή μοριακή, ιονισμένη ή μικροσκοπικών κόκκων. Κατά τον γενικό ορισμό, τα στερεά πρέπει να είναι αρκετά μικρά ώστε να αντέχουν φιλτράρισμα μέσα από φίλτρο με

πόρους 2 μm. Είναι άμεσα συνδεδεμένη ποσότητα με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού, καθώς η παρουσία περισσότερων διαλυμένων στερεών συνήθως σημαίνει αύξηση της αγωγιμότητας. Η προέλευση των διαλυμένων στερεών μπορεί να είναι φυσική ή να οφείλεται σε ανθρώπινο παράγοντα. Τέτοια παραδείγματα είναι κοιτάσματα νερού κοντά σε βουνά πλούσια σε πηλό, γεωργικές απορροές ή απορροές μεγαλουπόλεων, καθώς και απόβλητα από βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή μονάδες καθαρισμού λυμάτων.

Τα καθίζοντα στερεά σχηματίζουν πυθμενική ιλύ, μια μορφή λάσπης στον βυθό, που μπορεί να δημιουργήσει αρνητικές επιπτώσεις στους ασπόνδυλους οργανισμούς και να φράξει τα πυθμενικά στρώματα χαλικιού όπου τα ψάρια εναποθέτουν τα αυγά τους. Τα ολικά στερεά είναι το σύνολο όλων των προαναφερθέντων στερεών. Η μέτρηση των ολικών στερεών είναι πολύ σημαντική γιατί παρέχει πληροφορίες που έχουν σχέση με το επίπεδο επιβάρυνσης που έχει υποστεί ο υδατικός αποδέκτης, καθώς και τον βαθμό επεξεργασίας που ενδέχεται να χρειαστεί ένα σώμα νερού ώστε να φτάσει σε αποδεκτά επίπεδα για ανθρώπινη κατανάλωση.

2.1.1.5 Χρώμα, Οσμή και Γεύση

Το χρώμα του νερού αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντός του. Ενώ σχετικά μικρές ποσότητες φαίνονται να μην έχουν καθόλου χρώμα, το καθαρό νερό εμφανίζει μια μπλε χροιά που γίνεται περισσότερο εμφανής όσο αυξάνεται το μέγεθος του παρατηρούμενου δείγματος. Η μπλε απόχρωση του νερού είναι μια εγγενής ιδιότητα και προκαλείται από την επιλεκτική απορρόφηση και τη διασπορά του λευκού φωτός. Το χρώμα στο νερό δεν έχει απαραίτητα σχέση με την υγιεινή του, αλλά με την προέλευσή του. Φυσικά, το χρώμα στο νερό είναι ανεπιθύμητο για αισθητικούς λόγους. Η εμφάνιση χρώματος στα ύδατα είναι αποτέλεσμα της παρουσίας μεταλλικών αλάτων, οργανικών ενώσεων και άλλων διαλυτών κολλοειδών στερεών. Τα ύδατα μπορεί να χαρακτηριστούν με διάφορα χρώματα, όπως κόκκινα, μαύρα, μπλε. Έντονη παρουσία σιδήρου σε αυτά δημιουργεί μια κόκκινη απόχρωση, ενώ όταν υπάρχει χαλκός ή μίγματα χαλκού σε αιώρηση ή διάλυση χρωματίζονται μπλε. Μαύρα ύδατα χαρακτηρίζονται αυτά που οφείλονται σε πλημμύρες, λόγω της παρουσίας μελάνης που σχηματίζεται από τον συνδυασμό οργανικών οξέων με μίγμα τανίνης. Επιπλέον, ο χρωματισμός των υδάτων εμποδίζει τη διέλευση του φωτός, επομένως και τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης των διαφόρων οργανισμών.

Πηκτικές ενώσεις που δημιουργούνται ως αποτέλεσμα της αποδόμησης της οργανικής ύλης, της παρουσίας αλγών, προϊόντων διάβρωσης μετάλλων και χημικών βιομηχανικής και γεωργικής προέλευσης μπορεί να είναι αιτίες για την εμφάνιση ασυνήθιστης οσμής ή γεύσης στο νερό. Φυσικά, το πόσιμο νερό συνήθως είναι άοσμο και άγευστο.

2.1.2 Χημικές Παράμετροι

2.1.2.1 pH

Το pH είναι ένας τρόπος έκφρασης της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου (H^+) σε ένα υδατικό διάλυμα. Ορίζεται, ακόμα, ως ο αντίστροφος λογάριθμος της μοριακής συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου. Ο λόγος που χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα είναι ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων ιόντων υδρογόνου μπορεί να είναι πολύ μικρές, οπότε χρησιμοποιώντας λογάριθμο με βάση το 10 η περιγραφή γίνεται πιο εύκολη. Το pH μετριέται σε κλίμακα από 0 – 14, με ουδέτερο σημείο την τιμή 7, όπου τα ιόντα υδρογόνου και υδροξυλίου βρίσκονται σε ίσες συγκεντρώσεις. Ύδατα με τιμές pH μικρότερες από 7 ορίζονται ως όξινα, ενώ πάνω από 7 ορίζονται ως αλκαλικά ή βασικά. Η τιμή του pH στα ύδατα έχει άμεση σχέση με το είδος των χημικών ουσιών που περιέχονται σε αυτά και ρυθμίζει τους μηχανισμούς των αντιδράσεων. Επιπρόσθετα, επιταχύνει ή παρεμποδίζει τις βιομηχανικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα. Αν τα ύδατα είναι έντονα όξινα ή έντονα αλκαλικά, δημιουργούν προβλήματα κατά την επεξεργασία και θα πρέπει να γίνεται ρύθμιση του pH στα επιθυμητά όρια.

Η μέτρηση του pH έχει τεράστια σημασία, καθώς επηρεάζει τους ζωντανούς οργανισμούς που ζουν μέσα στο νερό ή που το καταναλώνουν. Αν το νερό έχει pH πάνω από 11 ή κάτω από 4, προκαλεί ερεθισμό στα μάτια και στο δέρμα. Η τιμή του pH επηρεάζει τη διαλυτότητα και τη βιολογική διαθεσιμότητα χημικών συστατικών όπως θρεπτικά συστατικά (φώσφορος, άζωτο και άνθρακας) και βαρέα μέταλλα (μόλυβδος, χαλκός, κάδμιο). Ακόμα, αλλαγές στις τιμές pH αποτελούν ενδείξεις αυξανόμενης μόλυνσης.

Η τιμή pH απιονισμένου νερού είναι 7. Το αποδεκτό εύρος τιμών pH για επιφανειακά συστήματα ύδρευσης είναι από 6.5 έως 9, ενώ για συστήματα υπόγειων υδάτων είναι 6 με 9. Το θαλασσινό νερό έχει εύρος pH από 7.5 μέχρι περίπου 8.4.

2.1.2.2 Διαλυμένο Οξυγόνο (Dissolved Oxygen – DO)

Σημαντική παράμετρος της μέτρησης ποιότητας υδάτων είναι το διαλυμένο οξυγόνο για μέτρηση της χημικής ρύπανσης των νερών. Πρόκειται για τον λόγο του διαλυμένου οξυγόνου που βρίσκεται παρόν σε ένα σώμα νερού προς τη μέγιστη ποσότητα οξυγόνου που μπορεί να διαλυθεί μέσα σε αυτό το σώμα, δηλαδή το σημείο κορεσμού του. Τα καθαρά ύδατα εμφανίζουν υψηλές τιμές διαλυμένου οξυγόνου που φτάνουν τις τιμές κορεσμού, ενώ χαμηλές τιμές δείχνουν ότι τα νερά είναι πολύ μολυσμένα με μεγάλα ποσοστά οργανικών ουσιών. Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο νερό έχει άμεση σχέση με την ανάπτυξη μορφών ζωής. Σε ανοιχτά συστήματα νερού, πηγές διαλυμένου οξυγόνου είναι συνήθως ο ατμοσφαιρικός αέρας και οι αντιδράσεις φωτοσύνθεσης των υδρόβιων οργανισμών.

Το διαλυμένο οξυγόνο είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης σε σώματα νερού. Είναι μια καθοριστική παράμετρος για την εξακρίβωση της ποιότητας του νερού, αλλά και για την επιβίωση ζωντανών οργανισμών, καθώς οι υδρόβιοι οργανισμοί χρειάζονται οξυγόνο για να επιβιώσουν. Περαιτέρω, πολλές χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται μέσα στο νερό απαιτούν οξυγόνο για να ολοκληρωθούν.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο νερό. Πρώτον, εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση, η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η πίεση. Δεύτερον, η θερμοκρασία, όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία, μειώνεται το ποσοστό διαλυμένου οξυγόνου. Τρίτον, το επίπεδο μόλυνσεως, όσο πιο μολυσμένο είναι ένα σώμα νερού, τόσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, οπότε τόσο πιο δύσκολο είναι για ζωντανούς οργανισμούς να επιβιώσουν. Τέταρτον, εξαρτάται από την συγκέντρωση αλατιού, αφού καθώς ανεβαίνει η περιεκτικότητα σε αλάτι, η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου μειώνεται εκθετικά.

Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου μπορεί να μετριέται είτε σε mg/L, ή με αναπαράσταση ποσοστού, όπου 100% είναι η τιμή κορεσμού. Αυτή η τιμή κορεσμού σε mg/L εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την αλμυρότητα σε κάθε στιγμή μέσα στο νερό. Σε μερικές περιπτώσεις, το διαλυμένο οξυγόνο παρατηρείται να είναι πάνω από 100%. Αυτό σημαίνει ότι η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σε mg/L είναι περισσότερη από τη συγκέντρωση κορεσμού βασισμένη στη θερμοκρασία και την αλμυρότητα. Διαπιστώνεται εύκολα από την απότομη αλλαγή μιας κατάστασης όπως η φωτοσύνθεση, όπου όταν υπάρχει φως παράγεται περισσότερο οξυγόνο, ή όταν υπάρχουν απότομες αλλαγές

θερμοκρασίας. Επειδή λοιπόν η διαδικασία εξισορρόπησης του νερού είναι μια αργή διαδικασία, η τιμή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου μπορεί να είναι πάνω από 100%.

Οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου μπορούν να διαφέρουν σε συστήματα νερού, από λιγότερο από 1 mg/L σε περισσότερο από 20 mg/L. Κάθε τύπος υδρόβιων οργανισμών χρειάζεται διαφορετική συγκέντρωση για να επιβιώσει. Για παράδειγμα, σε συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου από 9.5 έως 12 mg/L, όλα τα ψάρια μπορούν να επιβιώσουν. Αν πέσει στο εύρος 6.5 με 9.5 mg/L, τα περισσότερα μεγάλα ψάρια αντέχουν, ενώ κάποια μικρά όχι. Πιο χαμηλά, από 4.0 έως 6.5 mg/L πολύ λίγα ψάρια μπορούν να ζήσουν, ενώ αν η συγκέντρωση πέσει από 0 έως 4.0 mg/L, όλα τα ψάρια θα είναι νεκρά. Για υγιές πόσιμο νερό, η ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου θα πρέπει να είναι πάνω από 6.5 με 8 mg/L, ή ανάμεσα 80 – 120 %.

2.1.2.3 Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand – BOD) και Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand – COD)

Ο όρος βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο υποδηλώνει το οξυγόνο που χρειάζεται ώστε να αποδομηθούν βιοχημικά οι οργανικές ουσίες του υδάτινου αποδέκτη από αερόβιους μικροοργανισμούς σε διάστημα πέντε ημερών, χωρίς φως, σε σταθερή θερμοκρασία 20°C. Έτσι, υπολογίζεται έμμεσα το φορτίο σε οργανικές ουσίες που υπάρχει στο νερό. Η τιμή του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου συνήθως εκφράζεται σε milligrams του οξυγόνου που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία και χρησιμοποιείται πολλές φορές ως υποκατάστατο για την ένδειξη του βαθμού οργανικής μόλυνσης στο νερό. Η μείωση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου χρησιμοποιείται και σαν δείκτης της αποτελεσματικότητας των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων. Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο των αποβλήτων χρησιμοποιείται για να υποδειχθούν οι επιπτώσεις στα επίπεδα οξυγόνου του νερού που λαμβάνεται.

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο δείχνει την ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώνεται για τη χημική οξείδωση των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στα νερά σε ανόργανα παράγωγα. Η οξείδωση πραγματοποιείται με ισχυρά οξειδωτικά μέσα, υπό όξινες συνθήκες, με παρουσία καταλύτη. Κατά συνέπεια, είναι η έμμεση μέτρηση της ποσότητας των οργανικών ενώσεων στα ύδατα. Η μέτρηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα και μπορεί με κατάλληλη βαθμονόμηση και

συσχέτιση να παρέχει ένδειξη βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου. Η καλή ποιότητα των υδάτων χαρακτηρίζεται από τιμές μικρότερες των 10 mg/L.

2.1.2.4 Ολικός Οργανικός Άνθρακας (Total Organic Carbon – TOC)

Η τιμή του ολικού οργανικού άνθρακα εκφράζει την ολική φόρτιση των υδάτων σε οργανικές ενώσεις. Οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα δίνουν πληροφορίες για το σύνολο των ενώσεων του άνθρακα, ανεξάρτητα από τις βαθμίδες οξείδωσής του. Ως εκ τούτου, παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα και το επίπεδο ρύπανσης των υδάτων ως προς την παρουσία οργανικών συστατικών. Για τη μέτρηση του ολικού οργανικού άνθρακα, συνήθως λαμβάνεται υπόψη και ο ανόργανος άνθρακας. Μία τεχνική ανάλυσης αποτελείται από δύο βήματα: πρώτα μετριέται η ποσότητα ανόργανου άνθρακα που παράγεται από ένα οξινομένο μέρος του δείγματος και έπειτα μετριέται η ποσότητα του ολικού άνθρακα. Ο ολικός οργανικός άνθρακας είναι το αποτέλεσμα της αφαίρεσης του ανόργανου άνθρακα από τον ολικό άνθρακα. Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι, αλλά γενικά μπορούν να συμπεριληφθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Οξίνιση
- Οξείδωση
- Ανίχνευση και ποσοτικοποίηση

Η μελέτη του ολικού οργανικού άνθρακα είναι πολύ σημαντική για να εντοπίζονται ρυπαντικές ουσίες σε πόσιμο νερό, νερό που χρησιμοποιείται για ψύξη, σε τομείς κατασκευής ημιαγωγών, καθώς και για φαρμακευτικούς σκοπούς. Η ανάλυση μπορεί να γίνεται είτε σε εργαστήριο με μελέτη δειγμάτων, ή με συνεχείς μετρήσεις χρησιμοποιώντας μοντέρνα συστήματα αισθητήρων συνδεδεμένα στο διαδίκτυο για απομακρυσμένο έλεγχο.

Ο εντοπισμός του ολικού οργανικού άνθρακα αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική μέτρηση, λόγω ακόμα των επιπτώσεων που μπορεί να έχει στο περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία, αλλά και σε παραγωγικές διαδικασίες. Πρόκειται για μια πολύ ευαίσθητη, μη ακριβή μέτρηση όλων των οργανικών ουσιών που παραβρίσκονται μέσα σε ένα δείγμα. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγχεται η εκροή οργανικών χημικών ουσιών από μια μονάδα παραγωγής στο περιβάλλον. Περαιτέρω, χαμηλή ποσότητα ολικού οργανικού άνθρακα μπορεί να επιβεβαιώσει την απουσία επιβλαβών οργανικών ουσιών σε νερό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ιατροφαρμακευτικών προϊόντων, καθώς ο ανόργανος άνθρακας δεν αποτελεί ιδιαίτερη απειλή.

2.1.2.5 Σκληρότητα νερού

Η έννοια του σκληρού νερού αναφέρεται σε νερό που έχει υψηλό περιεχόμενο σε ανόργανα μεταλλικά στοιχεία. Το σκληρό νερό σχηματίζεται όταν αυτό διυλίζεται μέσα από αποθέματα ασβεστόλιθου, κιμωλίας ή γύψου, τα οποία αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ανθρακικές, διττανθρακικές και θειούχες ενώσεις ασβεστίου και μαγνησίου. Το σκληρό πόσιμο νερό δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, πιθανώς μάλιστα να έχει και κάποια μέτρια οφέλη για την υγεία. Ωστόσο, παρουσιάζει κρίσιμα προβλήματα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου η σκληρότητα του νερού παρατηρείται προσεκτικά ώστε να αποφευχθούν δαπανηρές βλάβες σε λέβητες, πύργους ψύξης ή σε άλλους εξοπλισμούς που διαχειρίζονται το νερό. Σε οικίες το σκληρό νερό συχνά υποδεικνύεται από τον σχηματισμό αλάτων σε βραστήρες και θερμοσίφωνες. Σε περιπτώσεις όπου η σκληρότητα του νερού αποτελεί ανησυχία, χρησιμοποιείται συνήθως η διαδικασία της μαλάκυνσης του νερού για να μειωθούν οι δυσμενείς επιπτώσεις του σκληρού νερού. Πολλά απορρυπαντικά εξουδετερώνουν τις επιδράσεις του σκληρού νερού στις επιφάνειες, οπότε σε τέτοιες περιπτώσεις δεν χρειάζεται κάποια περαιτέρω δράση. Αλλιώς, συνήθεις μέθοδοι μαλάκυνσης του νερού είναι η χρήση ρητινών ανταλλαγής ιόντων ή σόδας πλυσίματος (που είναι εύκολα προσβάσιμη).

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, δεν έχουν βρεθεί πειστικές ενδείξεις ότι η σκληρότητα του νερού προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Μάλιστα, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών διαπίστωσε ότι το σκληρό νερό μπορεί να χρησιμεύσει ως συμπλήρωμα διατροφής για ασβέστιο και μαγνήσιο.

2.1.2.6 Βαρέα Μέταλλα

Μέταλλα μπορούν να εισαχθούν σε συστήματα νερού ως αποτέλεσμα της φθοράς των εδαφών και των πετρωμάτων, από ηφαιστειακές εκρήξεις ή από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η εξόρυξη ή η επεξεργασία μετάλλων και ουσιών που περιέχουν μεταλλικούς ρύπους. Οι πιο συνηθισμένοι ρύποι βαρέων μετάλλων είναι το αρσενικό, το κάδμιο, το χρώμιο, ο χαλκός, το νικέλιο, ο μόλυβδος και ο υδράργυρος. Η πιο συνηθισμένη αιτία μόλυνσης σε γλυκό νερό είναι οι εταιρίες εξόρυξης.

Κάποια μέταλλα, όπως το μαγγάνιο, ο σίδηρος, ο χαλκός και ο ψευδάργυρος αποτελούν χρήσιμα μικροθρεπτικά συστατικά. Είναι απαραίτητα για τη ζωή σε σωστές συγκεντρώσεις, αλλά σε υπερβολικό βαθμό αυτές οι ουσίες μπορούν να είναι

δηλητηριώδεις. Ακόμα, η χρόνια έκθεση σε μικρές δόσεις βαρέων μετάλλων μπορεί να έχει σοβαρές μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία. Άλλα μέταλλα, όπως ο υδράργυρος, ο μόλυβδος και το κάδμιο είναι ιδιαίτερα τοξικά και δεν απαιτούνται από οποιονδήποτε οργανισμό, ακόμα και σε μικρές ποσότητες. Φυσικά έχουν κατασκευασθεί εξειδικευμένοι αισθητήρες που καταμετρώνε την ύπαρξη και την ποσότητα βαρέων μετάλλων μέσα στο νερό, μέσω μιας αντίδρασης που συμβαίνει όταν ένα δείγμα νερού που περιέχει συγκεκριμένα ιόντα μεταλλικών ρυπογόνων εισάγεται σε έναν ειδικό αισθητήρα.

2.1.3 Βιολογικές Παράμετροι

2.1.3.1 Μικροβιακή Μόλυνση

Το νερό είναι φορέας μικροοργανισμών, οι οποίοι δημιουργούνται κυρίως από τη διάσπαση της οργανικής ύλης. Τα μικρόβια αυτά, γνωστά και ως σαπρόφυτα δεν προκαλούν παθήσεις, αλλά ζουν σε βάρος των ζώων και των φυτών. Η μικροβιακή μόλυνση – ρύπανση του νερού μπορεί να προέλθει από τα αστικά ή τα βιομηχανικά απόβλητα, αλλά και από τα ζώα. Επηρεάζει τις χρήσεις του νερού όπως την κατανάλωσή του, την κολύμβηση, τις υδατοκαλλιέργειες κλπ. Η μικροβιακή μόλυνση αυξάνει την παθογένεια των υδάτων, καθώς αυξάνει την παρουσία παθογόνων βακτηρίων που προκαλούν ασθένειες όπως είναι η χολέρα, ο τύφος, η δυσεντερία, μαζί με την παρουσία παθογόνων ιών, που προκαλούν για παράδειγμα ηπατίτιδα και πολιομυελίτιδα, αλλά και παθογόνων παρασίτων, όπου για παράδειγμα οφείλεται η σχιστοσωμίαση. Ως δείκτης μικροβιακής μόλυνσης χρησιμοποιείται το κολοβακτηρίδιο. Η ανίχνευση των παθογόνων μικροβίων στα νερά απαιτεί μεγάλες ποσότητες δείγματος και χρονοβόρες τεχνικές για να προσδιοριστούν.

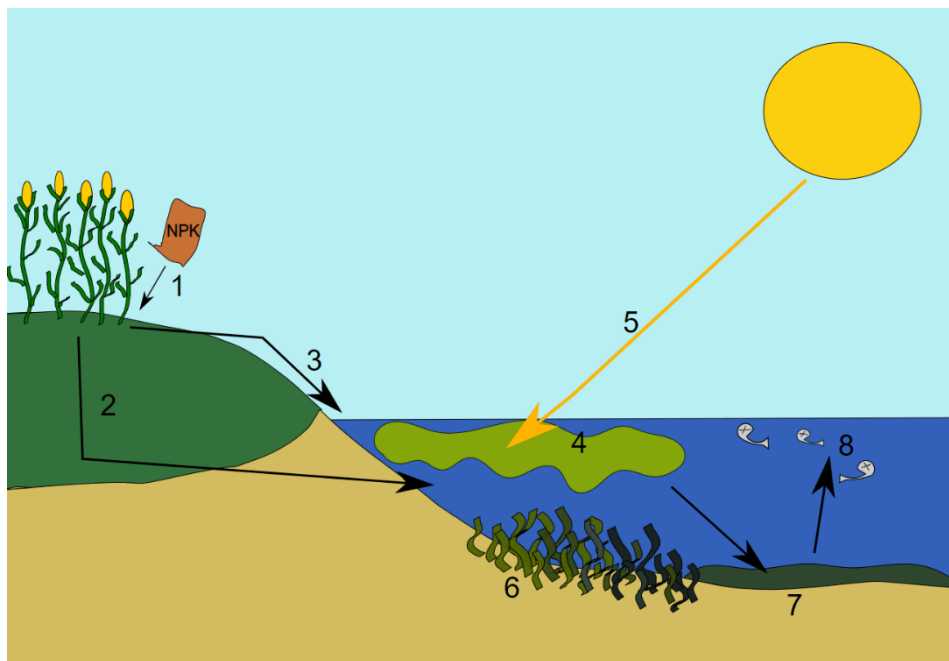
2.1.4 Φαινόμενο ευτροφισμού: ένας συνδυασμός όλων των παραμέτρων

Οι παραπάνω παράγοντες παίζουν όλοι σημαντικό ρόλο στη διατήρηση ισορροπίας σε σώματα νερού. Όταν ένας ή συνδυασμός αυτών ξεφεύγει από τις επιτρεπτές τιμές, προκαλούνται προβλήματα που επηρεάζουν είτε την καταλληλότητα του νερού για ανάλογες λειτουργίες ή το ζωικό και φυτικό οικοσύστημα μέσα και έξω από το νερό.

Το φαινόμενο του ευτροφισμού μπορεί να οφείλεται και σε φυσικά αίτια, λόγω της ύπαρξης μεγάλων ποσοτήτων θρεπτικών συστατικών, όπως το άζωτο ή ο φώσφορος, τα οποία οδηγούν σε υπερανάπτυξη φυτών και άλγης στα υδρόβια οικοσυστήματα. Όταν οι οργανισμοί αυτοί πεθαίνουν, η βακτηριακή αποσύνθεση της βιομάζας τους έχει ως

αποτέλεσμα την υψηλή κατανάλωση οξυγόνου, δημιουργώντας έτσι την κατάσταση της υποξίας. Ωστόσο, σε πολλές ακτές, λίμνες και ποτάμια, ο ανθρώπινος παράγοντας παίζει πολύ μεγαλύτερο ρόλο στην εμφάνιση αυτού του φαινομένου. Αναλόγως τη ποσότητα και τη χρήση, συστήματα νερού που βρίσκονται κοντά σε περιοχές όπου χρησιμοποιούνται πολλά γεωργικά λιπάσματα, ή που καταλήγουν απόβλητα από μονάδες παραγωγής, αλλά και λόγω του μεγέθους των πόλεων που βρίσκονται κοντά σε ακτές, ο ευτροφισμός επιταχύνει.

Στην παρακάτω εικόνα περιγράφεται το φαινόμενο του ευτροφισμού αναλυτικά, καθώς και η διαδικασία που ακολουθεί:



Σχήμα 1: Ευτροφισμός λόγω λιπασμάτων [2]

1. Τοποθετείται στο έδαφος μεγάλη ποσότητα θρεπτικών συστατικών σε μορφή λιπασμάτων για τις καλλιέργειες.
2. Μερικά από αυτά τα θρεπτικά συστατικά περνάνε μέσα στο έδαφος όπου μπορούν να παραμείνουν και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Σταδιακά, καταλήγουν μέσα στο υδατικό σύστημα.
3. Κάποια άλλα συστατικά διαρρέουν πάνω από το έδαφος και με τη βοήθεια της βροχής καταλήγουν και αυτά μέσα στο νερό.
4. Τα πλεονάζοντα θρεπτικά συστατικά προκαλούν έντονη αύξηση της άλγης.
5. Η μεγάλη ποσότητα άλγης εμποδίζει το φως του ήλιου να φτάσει μέχρι τον βυθό.

6. Τα φυτά κάτω από την άλγη πεθαίνουν εξαιτίας της αδυναμίας τους να λάβουν φως από τον ήλιο ώστε να φωτοσυνθέσουν.
7. Σταδιακά, η άλγη πεθαίνει και βυθίζεται στον πυθμένα.
8. Η αποσύνθεση προκαλεί την εξάντληση του οξυγόνου από το νερό. Μεγαλύτερες μορφές ζωής, όπως τα ψάρια, πνίγονται λόγω της έλλειψης οξυγόνου. Αυτό το σώμα νερού πλέον δεν μπορεί να διατηρήσει ζωή.

Συμπεραίνεται, λοιπόν, από τα παραπάνω ότι το φαινόμενο του ευτροφισμού οφείλεται σε συνδυασμό των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραγόντων που αναλύθηκαν. Η θολότητα θα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η άλγη. Η τιμή του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αυξάνονται ραγδαία. Η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου παρουσιάζει ραγδαίες μεταβολές ανάλογα με την ώρα της ημέρας λόγω της φωτοσύνθεσης στην άλγη. Γίνεται προφανής, λοιπόν, η ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση των παραμέτρων που προκαλούν το φαινόμενο του ευτροφισμού, ώστε να γίνεται έγκαιρη διαπίστωση και να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα. Η παρακολούθηση αυτή μπορεί να γίνει με τη χρήση συστημάτων αισθητήρων, όπου θα τοποθετούνται τόσοι αισθητήρες όσες και οι παράμετροι που χρήζουν μελέτη. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση του τρόπου λειτουργίας αυτών των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται κατά κόρο στον τομέα μέτρησης της ποιότητας των υδάτων.

2.2 Ανάλυση λειτουργίας αισθητήρων για μέτρηση ποιότητας νερού

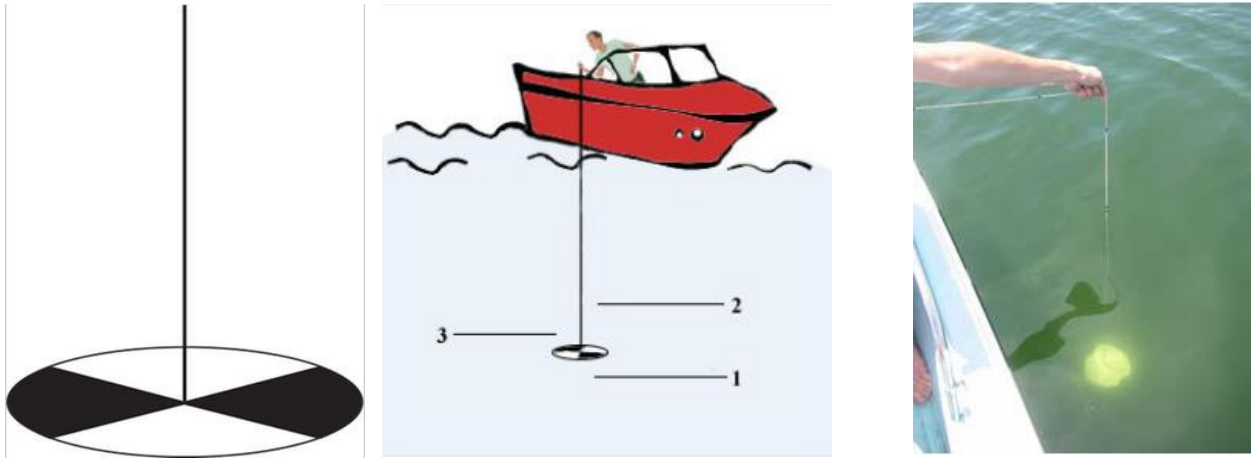
2.2.1 Αισθητήρες θολότητας

Ανά τα χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη αισθητήρων που μετράνε την θολότητα, από απλούς ενδείκτες μέχρι σύγχρονα φωτοευαίσθητα συστήματα. Για χάρην συντομίας, θα περιγραφούν παρακάτω 3 τύποι τέτοιων αισθητήρων, ο καθένας πιο σύνθετος και ακριβής στη λειτουργία του από τον προηγούμενο.

2.2.1.1 Δίσκος Secchi (Secchi Disk)

Ο δίσκος Secchi είναι το πιο απλό αλλά αρκετά αποτελεσματικό εργαλείο μέτρησης της θολότητας σε θάλασσες ή λίμνες. Η πρώτη ιστορική καταγραφή της θολότητας με

επιστημονικές μεθόδους έγινε το 1865, με τη χρήση δίσκων Secchi. Το εργαλείο αυτό αποτελείται από ένα δίχρωμο δίσκο, δεμένο με ένα σχοινί από το κέντρο του, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 2: Μορφή και τρόπος χρήσης του δίσκου Secchi [3] , [4]

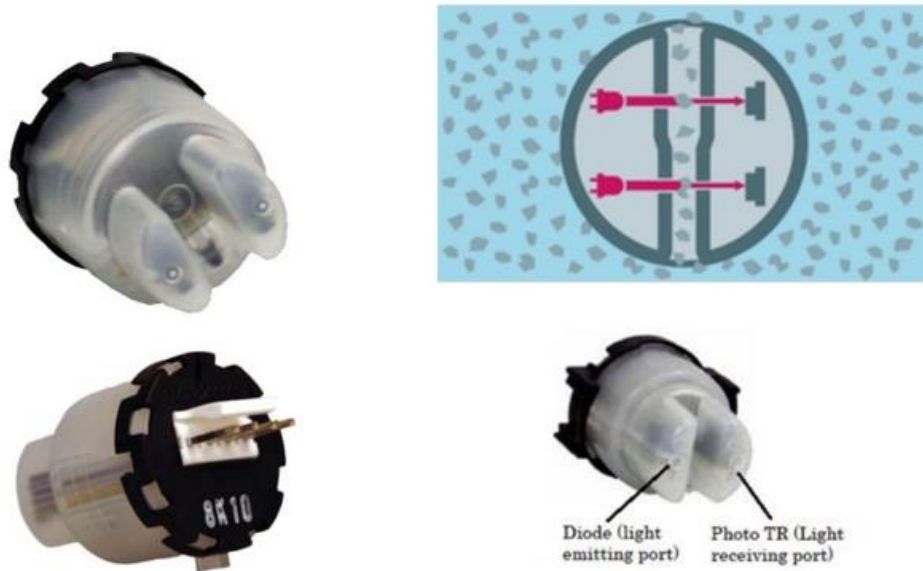
Ο τρόπος λειτουργίας είναι ο εξής: πρώτα, τοποθετείται ο δίσκος μέσα στο νερό από την πλευρά της βάρκας που έχει σκιά. Ο δίσκος βυθίζεται σιγά σιγά μέχρι να χαθεί η οπτική επαφή και σημειώνεται η απόσταση στο σχοινί. Στη συνέχεια, τραβιέται σιγά σιγά προς τα πάνω μέχρι να αρχίσει να φαίνεται ξανά. Σημειώνεται και αυτό το βάθος στο σχοινί. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των δύο μετρημένων βαθών και καταγράφεται μαζί με την ημερομηνία και ώρα που λήφθηκαν οι μετρήσεις.

Φυσικά, αυτές οι μετρήσεις δεν έχουν υψηλή ακρίβεια, καθώς υπάρχουν πολλές μεταβλητές που αλλάζουν από μέτρηση σε μέτρηση, όπως η γωνία από την οποία παρατηρεί κάποιος τον δίσκο, την ώρα της ημέρας και τη γωνία που χτυπάει το φως, αν έχει συννεφιά ή όχι κτλ. Γι' αυτό και αναπτύχθηκαν πιο ακριβείς μέθοδοι μέτρησης της θολότητας, ώστε να μην υπάρχει εξάρτηση από αυτές τις παραμέτρους.

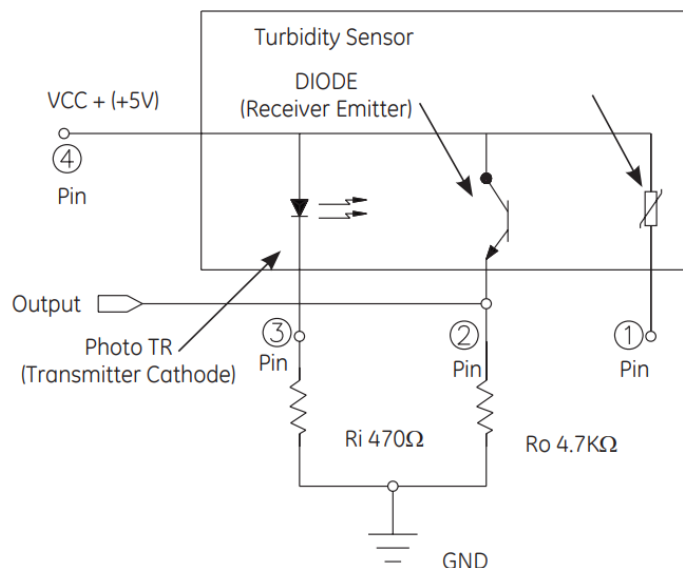
2.2.1.2 Αισθητήρες απορρόφησης φωτός

Οι αισθητήρες αυτού του τύπου μετράνε την ποσότητα του μεταδιδόμενου φωτός και του ρυθμού σκέδασης, τα οποία εξαρτώνται από το σύνολο αιωρούμενων σωματιδίων που υπάρχουν μέσα στο νερό. Χρησιμοποιούν μια λάμπα τύπου LED, η οποία στέλνει μια ακτίνα φωτός μέσα στο νερό. Αυτό το φως εμποδίζεται και διασκορπίζεται από τα διάφορα σωματίδια μέσα στο νερό και έπειτα λαμβάνεται από ένα φωτοτρανζίστορ, το οποίο

συνδέεται σε σειρά με μια αντίσταση (σχ.4). Η έξοδος είναι η τάση στα άκρα αυτής της αντίστασης. Όσο πιο καθαρό το νερό, τόσο πιο δυνατό το φως που λαμβάνεται, οπότε τόσο πιο υψηλή είναι η τάση εξόδου.



Σχήμα 3: Αισθητήρας και βασικός τρόπος λειτουργίας [5] , [6]



Σχήμα 4: Κυκλωματική διάταξη του αισθητήρα [5]

Οι αισθητήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ευρέως σε πλυντήρια πιάτων και ρούχων, όπου εξετάζουν τη θολότητα του νερού κατά την απόπλυση, ώστε να μην

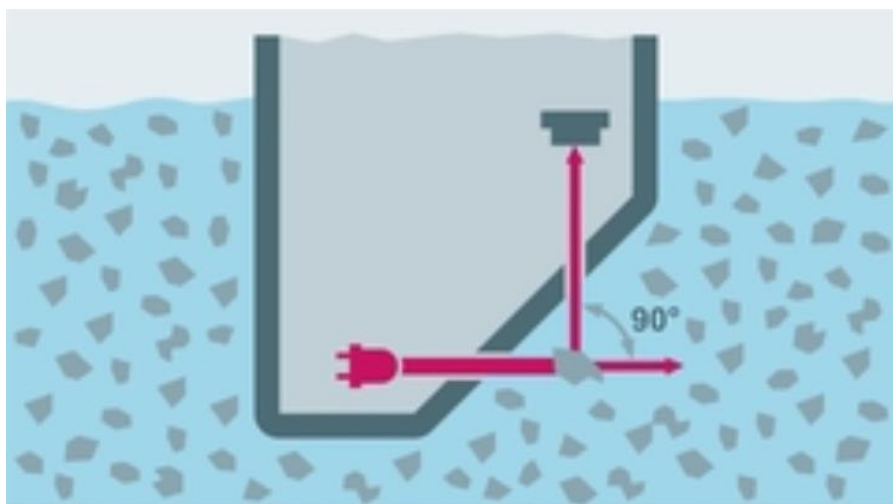
εκτελούνται περιττοί κύκλοι πλύσης και γίνεται άσκοπη κατανάλωση νερού. Είναι εύκολοι στη χρήση και το κόστος αγοράς τους είναι πολύ μικρό, ωστόσο η ακρίβειά τους δεν είναι πολύ υψηλή, οπότε για εργαστηριακούς και για ερευνητικούς σκοπούς αποφεύγεται η χρήση τους. Για τέτοιες χρήσεις είναι πιο κατάλληλος ο επόμενος τύπος αισθητήρων θολότητας.

2.2.1.3 Νεφελομετρικοί αισθητήρες θολότητας

Οι αισθητήρες που βασίζονται στη νεφελομετρική μέθοδο μέτρησης της θολότητας αποτελούνται από μία λάμπα LED και έναν ανιχνευτή φωτός τοποθετημένο σε γωνία ενενήντα μοιρών από την ακτίνα φωτός (σχ. 6).

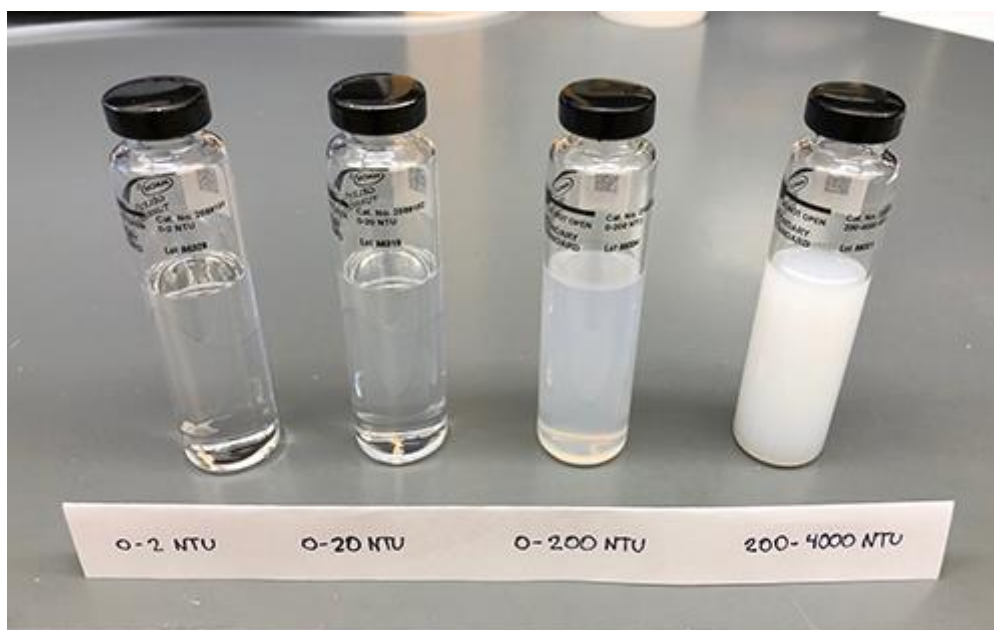


Σχήμα 5: Παράδειγμα αισθητήρα θολότητας από την εταιρία Endress + Hauser [7]



Σχήμα 6: Λειτουργία νεφελομετρικού αισθητήρα θολότητας [6]

Η λάμπα στέλνει μια δέσμη φωτός προς το νερό. Το φως διαθλάται λόγω σκέδασης σε κάποιο σωματίδιο που αιωρείται στην άμεση περιοχή. Ο ανιχνευτής μετατρέπει το λαμβάνον φως σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο έπειτα μεταφράζεται στην τελική τιμή θολότητας και εμφανίζεται στο επιθυμητό μέσο.



Σχήμα 7: Παράδειγμα εύρους θολότητας σε δείγματα μετρημένα σε NTU [8]

2.2.2 Αισθητήρες pH

Όπως και προηγουμένως, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την μέτρηση της τιμής του pH, με τις πιο σύγχρονες να είναι και πιο ακριβείς στις μετρήσεις και πιο αξιόπιστες. Παρακάτω παρατίθενται οι τρεις πιο συνηθισμένες, με αυξανόμενο βαθμό ακρίβειας.

2.2.2.1 Πεχαμετρικό χαρτί – χρωματομετρική μέτρηση του pH

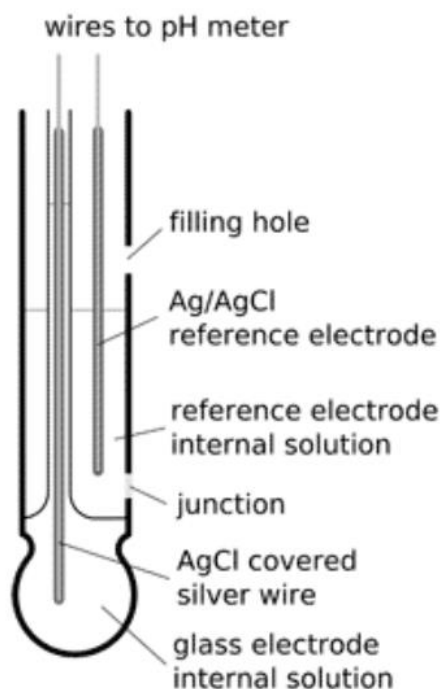
Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται χρήση δεικτών, δηλαδή μικρών ταινιών (λωρίδων) που αποτελούν δείκτες οξέος – βάσης στο διάλυμα. Αυτοί οι δείκτες (ονομάζονται και ηλεκτρολυτικοί ή πρωτολυτικοί δείκτες), μόλις εισέλθουν σε ένα διάλυμα αλλάζουν χρώμα, ανάλογα με την τιμή pH του διαλύματος. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος του χρώματος σε σχέση με τον αντίστοιχο πίνακα, ώστε να βρεθεί κατά προσέγγιση το εύρος τιμών pH που έχει το ίδιο χρώμα. Φυσικά αυτή είναι η πιο αναξιόπιστη από τις μεθόδους μέτρησης pH που παρουσιάζονται εδώ, καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα, τη σωστή τοποθέτηση των δεικτών στο διάλυμα και για το σωστό χρονικό διάστημα, καθώς και την σωστή παρατήρηση του χρώματος έπειτα, αφού κάποιες τιμές όπως πχ. οι 8 και 9 μοιάζουν αρκετά μεταξύ τους, οπότε η πιθανότητα λάθους και κατά συνέπεια ανακριβούς μέτρησης είναι σχετικά υψηλή.



Σχήμα 8: Χρωματομετρικές λωρίδες μέτρησης pH [9]

2.2.2.2 Αισθητήρες pH γυάλινου ηλεκτροδίου

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας (σχ. 9) αποτελείται από έναν εξωτερικό σωλήνα που περιέχει ένα κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου καλίου (KCl) για αναφορά, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου, και έναν εσωτερικό σωλήνα που αποτελείται από ένα διάλυμα με pH 7 (ουδέτερο). Το κατώτερο μέρος του εσωτερικού σωλήνα είναι κατασκευασμένο από μια ευαίσθητη γυάλινη μεμβράνη που επιτρέπει τη μεταφορά των ιόντων υδρογόνου ανάμεσα στον αισθητήρα και το υπό εξέταση διάλυμα. Κάθε ένας από αυτούς τους σωλήνες εμπεριέχει ένα σύρμα από ασήμι καλυμμένο με ένα στρώμα χλωριούχου αργύρου (AgCl), το οποίο μετά συνδέεται με την είσοδο του ενισχυτή του κυκλώματος του αισθητήρα.



Σχήμα 9: Η δομή ενός γυάλινου αισθητήρα pH [10]

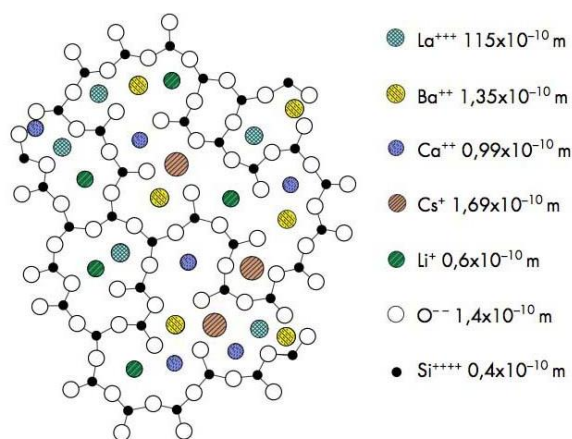
Όταν ο αισθητήρας τοποθετείται σε ένα διάλυμα, τα ιόντα υδρογόνου περνάνε μέσα από την γυάλινη μεμβράνη και αντικαθιστούν τα μεταλλικά ιόντα στο ασημένιο σύρμα, γεγονός το οποίο προκαλεί τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος, οπότε παράγεται και ηλεκτρική τάση (το εύρος τιμών συνήθως είναι $-0.4V$ έως $0.4V$, όπου $-0.4V$ αντιστοιχεί σε pH 14, $0V$ στην ουδέτερη τιμή pH 7 και $0.4V$ σε pH 0). Αυτή η τάση έπειτα στέλνεται σαν είσοδος σε ένα κύκλωμα ενίσχυσης. Τέλος, επεξεργάζεται από τον μικροελεγκτή για να λάβει την τιμή pH. Αν το διάλυμα είναι όξινο, τότε θα υπάρχει υψηλή συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου στο διάλυμα, οπότε το pH θα είναι κάτω από 7, ενώ αν είναι βασικό, θα υπάρχει χαμηλή συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου οπότε το pH θα είναι μεγαλύτερο του 7.

Ο λόγος που χρειάζεται το ηλεκτρόδιο αναφοράς (σχ. 9), είναι γιατί η μέτρηση pH με αισθητήρα γυάλινου ηλεκτροδίου βασίζεται στην μέτρηση τάσης. Για να μετρηθεί λοιπόν η τάση, απαιτείται να υπάρχουν δύο σημεία με διαφορετικές τιμές ηλεκτρικού δυναμικού. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς έχει σχεδιασθεί ώστε να διατηρεί ένα σταθερό ηλεκτρικό δυναμικό το οποίο να είναι ανεξάρτητο από τη σύσταση και τη θερμοκρασία του δείγματος. Αντίθετα, το επιλεκτικό ηλεκτρόδιο ιόντων υδρογόνου (hydrogen ion selective electrode – ISE) με τη γυάλινη μεμβράνη παρέχει ένα ηλεκτρικό δυναμικό που εξαρτάται από την δραστηριότητα

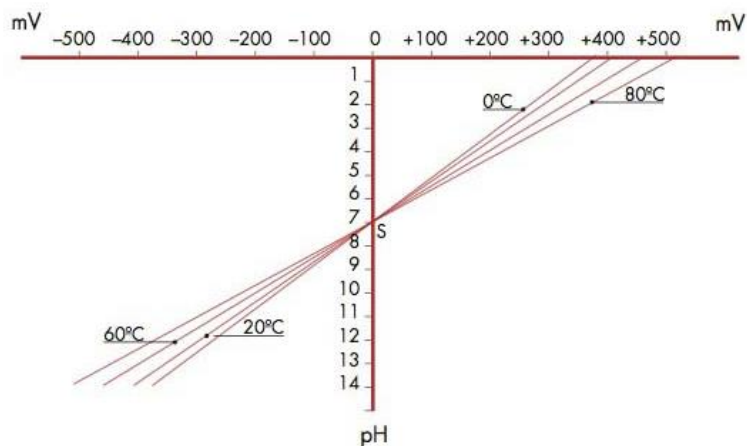
των ιόντων υδρογόνου (H+) στο διάλυμα. Χρειάζονται, επομένως, τόσο το ηλεκτρόδιο αναφοράς, όσο και το ISE υδρογόνου, ώστε να προσδιοριστεί η τιμή pH του διαλύματος.

Υπάρχει ακόμα μια μικρή επίδραση της θερμοκρασίας του διαλύματος στη μέτρηση της τιμής του pH, γι' αυτό και πολλές εταιρίες τοποθετούν και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας μέσα στον γυάλινο κύλινδρο, ή προτείνεται να χρησιμοποιηθεί εξωτερικός. Ωστόσο, η απόκλιση αυτή είναι πολύ μικρή, ειδικά σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου, που είναι περίπου 25°C. Στην περίπτωση όμως που υπάρχουν απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και στον κώδικα λειτουργίας του αισθητήρα pH. Στις προδιαγραφές κάθε αισθητήρα αναγράφονται πάντα και οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες αν ξεπεραστούν πάλι θα λαμβάνονται λανθασμένες μετρήσεις. Στο διάγραμμα του σχ. 10 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην αναλογία mV/pH.


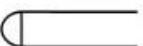


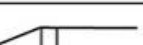
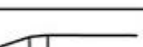
Τέλος, ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση του αισθητήρα, κατασκευάζονται διαφορετικά σχήματα γυάλινης μεμβράνης, ώστε να λαμβάνονται με τον βέλτιστο τρόπο οι μετρήσεις. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται σφαιρικές ή κωνικές, αλλά μερικές φορές χρειάζονται και εξειδικευμένες μεμβράνες. Παρακάτω φαίνονται οι διαφορετικοί τύποι μεμβρανών και οι περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται (σχ. 11). Η χημική αντοχή της γυάλινης μεμβράνης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες χρήσης του αισθητήρα. Οι υψηλές θερμοκρασίες και οι υψηλές συγκεντρώσεις αλατιού ή η χρήση σε ισχυρά αλκαλικά υγρά γενικά μειώνουν τη διάρκεια ζωής των ηλεκτροδίων. Κατά την κατασκευή του γυαλιού μπορούν να συμπεριληφθούν πρόσθετα που το καθιστούν πιο ανθεκτικό και κατά συνέπεια μπορούν να παραχθούν ηλεκτρόδια κατάλληλα για μετρήσεις είτε σε ισχυρό οξύ ή σε ισχυρά βασικά διαλύματα. Σε ακραίες περιπτώσεις, ένα ηλεκτρόδιο με μεμβράνη σε σχήμα θόλου προτιμάται (σχ. 12-2^η επιλογή).



Σχήμα 10: Χημική δομή γυαλιού αισθητήρα pH [11]



Σχήμα 11: Επίδραση θερμοκρασίας στον λόγο mV/pH [11]

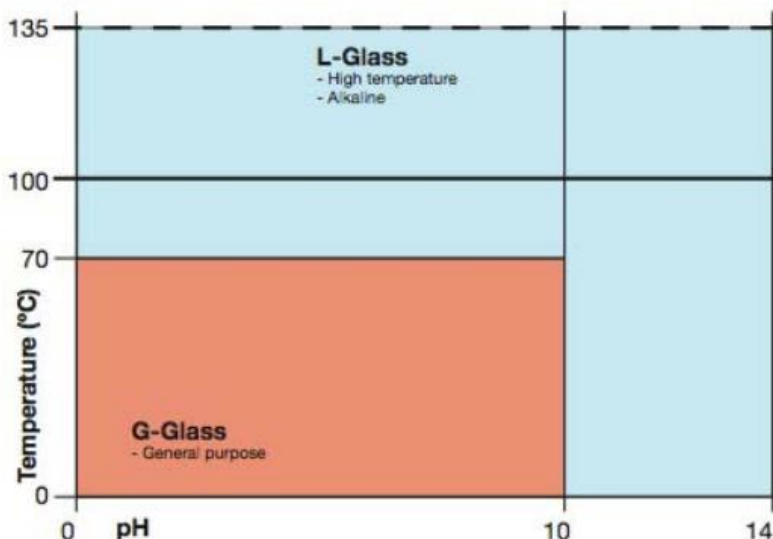
	form	property / application
	sphere (bulb)	constant quality, low resistance because of large surface, for most applications
	dome	high resistance, shock-proof, easy to clean and therefore applicable in measuring points with automatic cleaning
	flat	high resistance, shock-proof, easy to clean, especially for pH surface measurements
	cylinder	high resistance, shock-proof, for general application, especially useful for fermenter electrodes
	spear	high resistance, suitable for penetrating semi - solid media and for measuring points with automatic ultrasonic cleaning
	cone	robust, smooth, easy to clean, universally applicable

Σχήμα 12: Μορφές και εφαρμογές των διάφορων τύπων μεμβρανών [12]

Η γυάλινη μεμβράνη είναι πολύ σημαντικό μέρος του αισθητήρα, καθώς το ευαίσθητο στο pH γυαλί έχει την ιδιότητα ότι τα ιόντα μετάλλου που βρίσκονται πάνω στην επιφάνειά του ανταλλάσσονται με τα ιόντα υδρογόνου του διαλύματος. Για να διευκολυνθεί αυτή η διαδικασία, είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί η μεμβράνη, κάνοντάς την να απορροφήσει μια λεπτή στρώση νερού ή ζελατίνης. Η ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο στο νερό ή στην ειδική ζελατίνη για 24 ώρες. Η επιλογή του σωστού τύπου γυάλινου ηλεκτροδίου για την κατάλληλη χρήση εξαρτάται και από τον τύπο

και από το πάχος της γυάλινης μεμβράνης. Υπάρχουν δύο τύποι γυαλιού που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες pH:

- **“G” γυαλί:** χρησιμοποιείται για μεμβράνες ηλεκτροδίων όπου η συνηθισμένη τιμή pH είναι περίπου 7 (ουδέτερο). Αναφέρεται και ως γυαλί γενικής χρήσης.
- **“L” γυαλί:** η εφαρμογή αυτού του τύπου γυαλιού είναι για μετρήσεις σε αλκαλικά διαλύματα μέσα με υψηλές θερμοκρασίες.

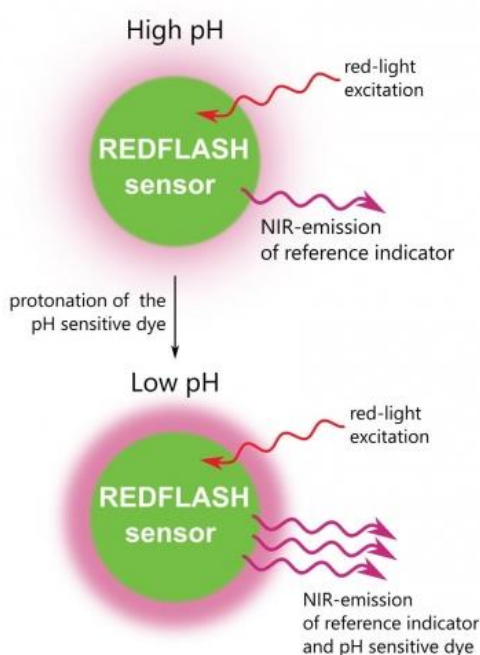


Σχήμα 13: Τύποι ευαίσθητου στο pH γυαλιού και οι εφαρμογές τους [11]

Η ευαισθησία αυτών των αισθητήρων αναπαρίσταται από τον λόγο mV/pH. Ο πιο σημαντικός παράγοντας στην επίτευξη υψηλής ευαισθησίας είναι η ποιότητα της γυάλινης μεμβράνης στο άκρο του αισθητήρα και συνήθως η μείωση της ακρίβειας των μετρήσεων οφείλεται στη φθορά της μεμβράνης. Είναι πολύ σημαντικό το ηλεκτρόδιο να καθαρίζεται καλά μετά από κάθε χρήση ή πριν από τη βαθμονόμηση. Αν ο αισθητήρας παραμείνει αποθηκευμένος σε ξηρό χώρο για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε το ηλεκτρόδιο χάνει την ακρίβειά του. Όταν όμως αυτή η πτώση στην ακρίβεια προκαλείται από τη γήρανση της γυάλινης μεμβράνης, τότε το ηλεκτρόδιο μπορεί να επαναενεργοποιηθεί με τη χάραξη της επιφάνειας της γυάλινης μεμβράνης. Αυτό γίνεται με τη βύθιση του ηλεκτροδίου για 10 δευτερόλεπτα σε διάλυμα ξυδιού (1 mol) και φθοριούχου καλίου (1 mol) σε αναλογία 1:1. Μετά τη διαδικασία, το ηλεκτρόδιο πρέπει να καθαριστεί καλά.

2.2.2.3 Φωτομετρικοί αισθητήρες pH

Ένας φωτομετρικός αισθητήρας pH αποτελείται από δύο στοιχειώδη μέρη: το αισθητήριο στρώμα με ευαισθησία στις μεταβολές του pH και μια συσκευή ανάγνωσης των αποτελεσμάτων (μετρητής pH). Ένα παράδειγμα τέτοιου τύπου αισθητήρα είναι από την εταιρία Pyro Science [13], ο οποίος αποτελείται από ένα LED και μια φωτοδίοδο που διεγείρουν τα στοιχεία στο αισθητήριο τμήμα και ανιχνεύουν την εκπομπή φωτοβολίας. Η διέγερση και το εκπεμπόμενο φως μεταφέρονται μέσω μιας οπτικής ίνας μεταξύ του αισθητήριου βαμμένου τμήματος και του μετρητή pH.

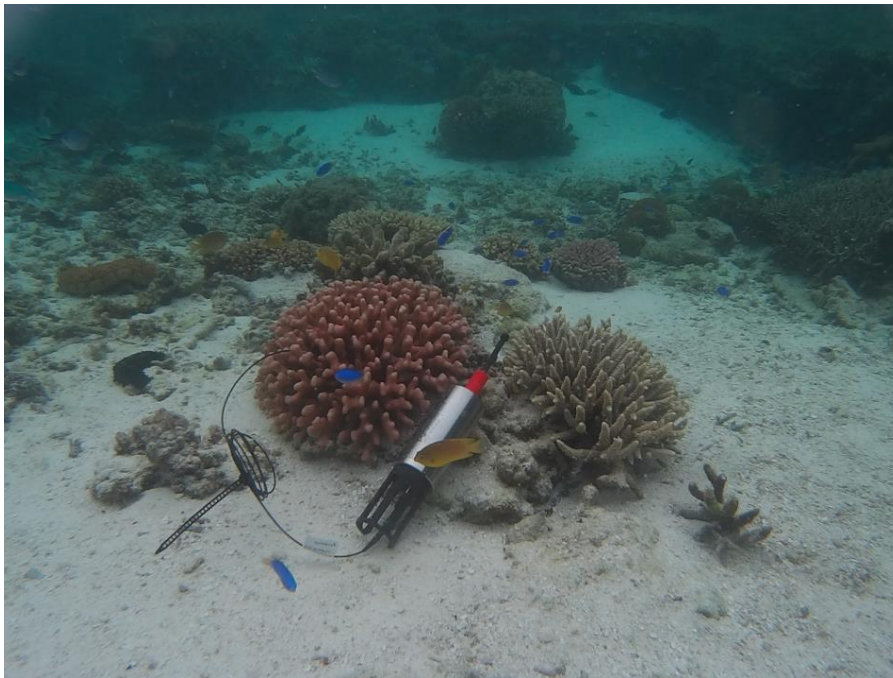


Σχήμα 14: Λειτουργία φωτομετρικού αισθητήρα από την εταιρία Pyro Science [13]

Ο φωτομετρικός αισθητήρας pH βασίζεται στην τεχνολογία REDFLASH (σχ. 14). Αποτελείται από έναν ευαίσθητο στις μεταβολές του pH δείκτη αναφοράς και μια χρωστική ουσία που αντιδρά στις μεταβολές του pH φωτοβολώντας. Και τα δύο παραπάνω μέρη αντιδρούν όταν φωτίζονται με κόκκινη δέσμη φωτός (σε μήκος κύματος 610-630 nm) και εκδύουν φως κοντά στο υπέρυθρο (near infra-red, NIR, στα 760-790 nm). Εάν στον δείκτη αναφοράς pH αφαιρεθούν πρωτόνια, η φωτοβολία του πέφτει και μετριέται μόνο η εκπομπή φωτός κοντά στο υπέρυθρο (NIR). Εάν το pH γίνει πιο όξινο, ο δείκτης pH παίρνει πρωτόνια και εκδύει έντονο φως κοντά στο υπέρυθρο φάσμα, οπότε εντοπίζεται η ακτινοβολία και των δύο δεικτών.



Σχήμα 15: Ο φωτομετρικός αισθητήρας pH της Pyro Science [14]

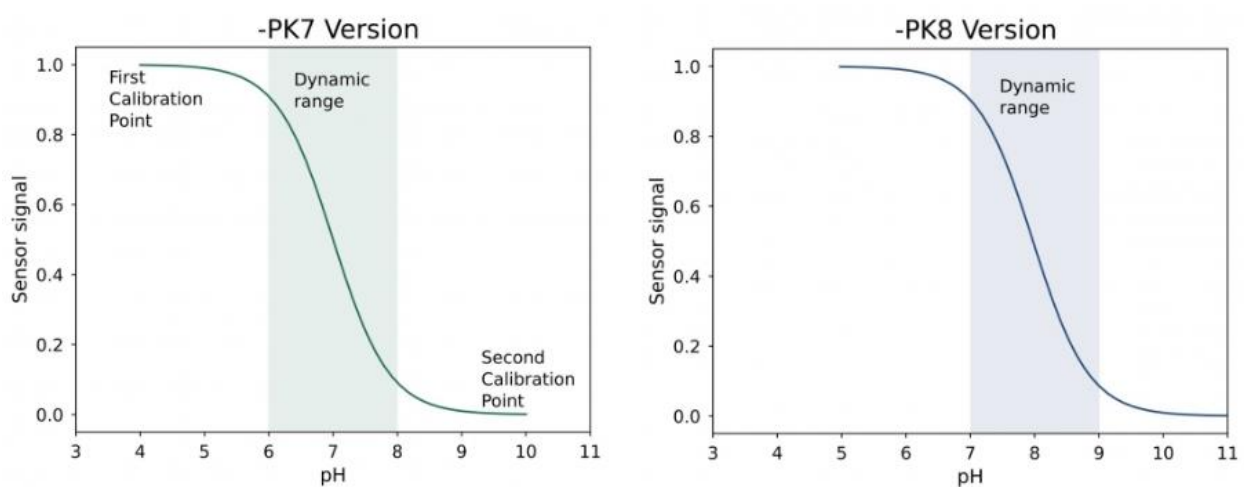


Σχήμα 16: Ο αισθητήρας τοποθετημένος για μετρήσεις σε κοραλλιογενή ύφαλο [14]

Η τεχνολογία αυτή εντυπωσιάζει με την υψηλή ακρίβεια, υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή κατανάλωση ρεύματος. Η ενεργοποίηση των δεικτών pH με τη χρήση κόκκινου φωτός μειώνει σημαντικά παρεμβολές που δημιουργούνται από τον φθορισμό διάφορων βιολογικών οργανισμών στο νερό. Η αρχή μέτρησης βασίζεται σε ένα ημιτονοειδώς διαμορφωμένο κόκκινο φως διέγερσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή σήματος με μεταβολή φάσης μετατοπισμένη ημιτονοειδώς, κοντά στο υπέρυθρο φάσμα φωτός. Έπειτα, η συσκευή λήψης μετρήσεων υπολογίζει αυτή τη μετατόπιση φάσης, την οποία μετατρέπει σε τιμή pH.

Παρόλο που οι αισθητήρες pH αυτού του τύπου παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία και δίνουν πολύ ακριβείς μετρήσεις, μπορούν να έχουν εύρος τιμών pH γύρω στις 2-3 μονάδες (συγκεκριμένα ανάμεσα σε 6.0 με 8.0 η έκδοση PK7 και 7.0 με 9.0 η έκδοση PK8,

σχ.17). Συνεπώς, πρέπει εκ των προτέρων ο χρήστης να γνωρίζει περίπου πού κυμαίνονται οι τιμές των διαλυμάτων που επιθυμεί να μετρήσει στην συγκεκριμένη εφαρμογή, ώστε να χρησιμοποιήσει τον κατάλληλο αισθητήρα. Αν οι τιμές του pH προβλέπεται να εμφανίζουν μεγάλες αλλαγές, τότε είναι προτιμότερο να επιλεγεί ο προηγούμενος τύπος αισθητήρα, δηλαδή με γυάλινο ηλεκτρόδιο για την μέτρηση. Η βαθμονόμηση των αισθητήρων πραγματοποιείται πρώτα σε χαμηλές τιμές pH (όπου η χρωματική στρώση ενδείξεως έχει όλα τα πρωτόνια της) και μετά σε υψηλές τιμές pH (λείπουν τα πρωτόνια από τη χρωματική στρώση).



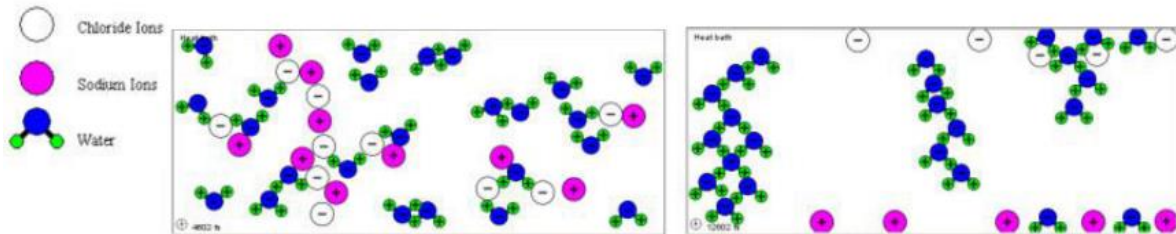
Σχήμα 17: Εύρος τιμών των δύο τύπων φωτομετρικών αισθητήρων pH [13]

2.2.3 Αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Οι αισθητήρες για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας έχουν ευρεία εφαρμογή, με χρήσεις στη γεωπονική, τις υδατοκαλλιέργειες, καθώς και στην παρακολούθηση των ποσοτήτων θρεπτικών συστατικών, αλάτων ή ατελειών σε συστήματα ύδρευσης και σε λίμνες ή θάλασσες. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες αισθητήρων αγωγιμότητας, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και το εύρος των αναμενόμενων τιμών.

Η πόλωση είναι η διαδικασία της μετανάστευσης των ιόντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία, πρέπει να εφαρμοστεί ρεύμα στο διάλυμα. Εναλλασσόμενο ρεύμα είναι προτιμότερο από συνεχές, καθώς αν εφαρμοστεί DC τάση στα ηλεκτρόδια του αισθητήρα προκαλείται πτώση τάσης. Αν εφαρμοστεί DC τάση, προκαλείται η διάσπαση των μορίων και τα αποτελέσματα της

μέτρησης θα είναι ανακριβή. Η AC τάση και τα ηλεκτρόδια από πλατίνα χρησιμεύουν για να μειωθεί η επίδραση του φαινομένου της πόλωσης του διαλύματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 18: Επίδραση εφαρμογής AC (αριστερά) και DC (δεξιά) τάσης σε μόρια νερού [15]



Σχήμα 19: Αισθητήρας ηλεκτρικής αγωγιμότητας [16]

2.2.3.1 Διπολικοί αισθητήρες (ή αισθητήρες 2 ηλεκτροδίων)

Μέσα στον αισθητήρα (σχ. 19) βρίσκονται τοποθετημένα δύο ηλεκτρόδια το ένα απέναντι από το άλλο, όπου όταν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση δημιουργείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στο διάλυμα. Μετρώντας αυτό το ρεύμα και γνωρίζοντας την τάση, από τον νόμο του Ohm, μπορεί να υπολογισθεί η αντίσταση και, κατά συνέπεια, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος (είναι αντιστρόφως ανάλογη της αντίστασης). Πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, καθώς και η επιφάνειά τους. Αυτές οι φυσικές διαστάσεις εκφράζονται ως μια τιμή γνωστή σαν σταθερά κυττάρου (cell constant). Μικρότερη σταθερά κυττάρου (0.1) είναι καλύτερη για διαλύματα χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας όπως το απιονισμένο νερό. Μεγαλύτερη σταθερά κυττάρου (1.0) δουλεύει καλά για γενικότερες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα το πόσιμο ή το θαλασσινό νερό.

$$K = d/a \quad (2.1)$$

Στην εξίσωση 2.1 παραπάνω φαίνεται ο υπολογισμός της σταθεράς κυττάρου (K), η οποία μετριέται σε cm^{-1} , όπου a είναι η επιφάνεια των ηλεκτροδίων (cm^2) και d η απόσταση ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια (cm). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ηλεκτρικές αγωγιμότητες διάφορων διαλυμάτων στους 25°C και οι απαιτούμενες σταθερές κυττάρων για την μέτρησή τους:

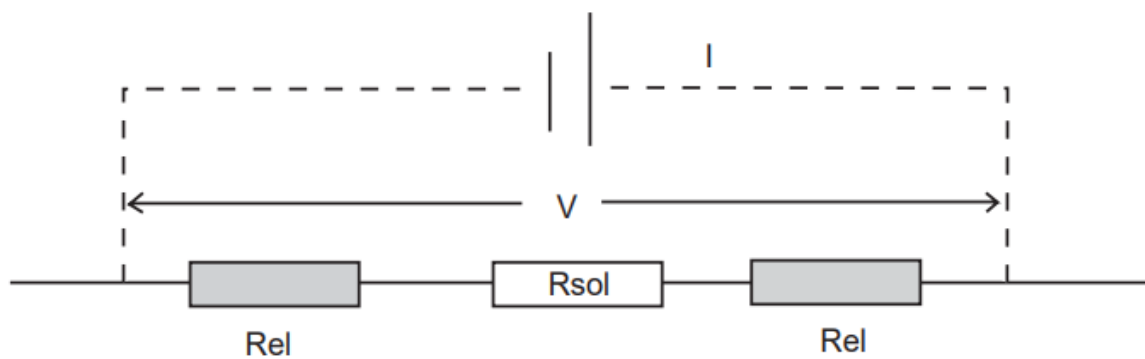
Πίνακας 1: Αγωγιμότητα διάφορων διαλυμάτων και απαιτούμενη σταθερά κυττάρου του αισθητήρα [15]

Διάλυμα	Αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$) στους 25°C	Βέλτιστη σταθερά κυττάρου (K)
Καθαρό νερό (pure water)	0.05	0.01
Νερό ηλεκτρικού λέβητα	0.05 – 1	0.01 – 0.1
Αποσταγμένο νερό	0.5	0.1
Απιονισμένο νερό	0.1 – 10	0.1
Πόσιμο νερό	150 – 800	1.0
Απόβλητα	900 – 9000	1.0
Διάλυμα KCl (0.01 M)	1400	1.0
Θαλασσινό νερό	53000	10

Οι διπολικοί αισθητήρες είναι πιο περιορισμένοι στο εύρος τιμών που μπορούν να μετρήσουν λόγω της επίδρασης των φαινομένων πόλωσης των φορτισμένων ιόντων μέσα στο διάλυμα σε υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας. Επειδή ακόμα οι αισθητήρες αυτού του τύπου έχουν εκτεθειμένα μεταλλικά ηλεκτρόδια, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σε καθαρά υγρά χωρίς πρόσθετα στρώματα, καθώς είναι πιο επιρρεπείς σε διάβρωση και στις φυσαλίδες.



Σχήμα 20: Διπολικός αισθητήρας αγωγιμότητας της εταιρίας Hamilton, κατάλληλος για εφαρμογές όπως το καθαρισμένο νερό [17]



Σχήμα 21: Απλοποιημένο διάγραμμα διπολικού αισθητήρα, όπου Rel η αντίσταση των ηλεκτροδίων και Rsol η αντίσταση του διαλύματος [18]

2.2.3.2 Τετραπολικοί αισθητήρες (4 ηλεκτροδίων)

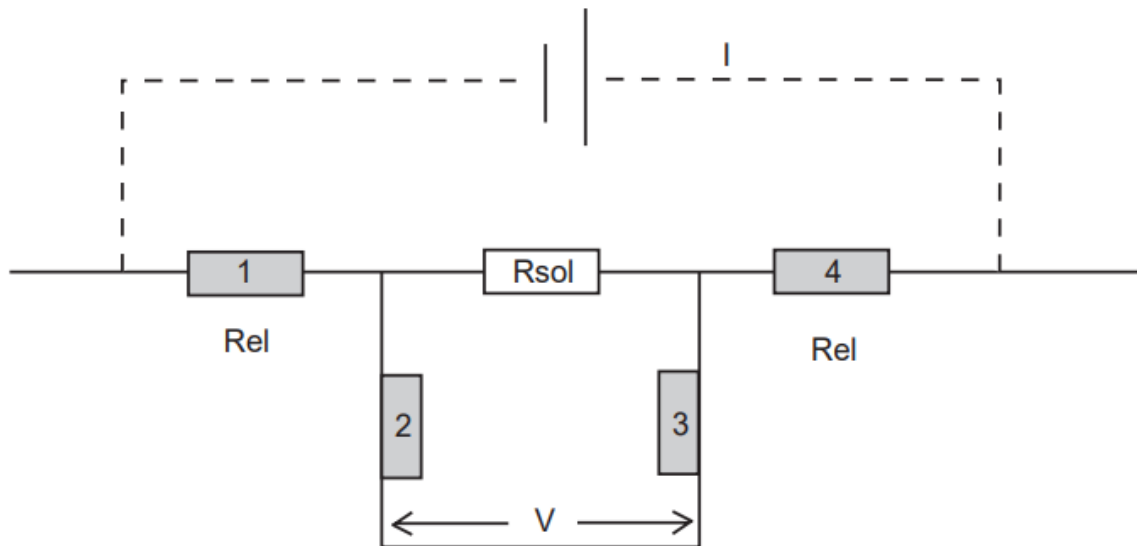
Οι αισθητήρες αγωγιμότητας τεσσάρων ηλεκτροδίων λειτουργούν με παρόμοιες αρχές όπως οι αισθητήρες δύο ηλεκτροδίων, παρουσιάζουν, όμως, πολύ μεγαλύτερο εύρος μετρήσεων. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στο δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων, το οποίο παράγει ένα γνωστό ρεύμα που επιτρέπει τη μέτρηση της πτώσης τάσης στα ηλεκτρόδια. Αυτή η διακυμαινόμενη πτώση τάσης χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση του φαινομένου της πόλωσης και των σφαλμάτων που παρατηρούνται στους αισθητήρες δύο ηλεκτροδίων.



Σχήμα 22: Τετραπολικός αισθητήρας αγωγιμότητας από την εταιρία Hamilton [17]

Οι τετραπολικοί αισθητήρες αγωγιμότητας είναι πιο κατάλληλοι για εφαρμογές όπου η αγωγιμότητα μπορεί να παρουσιάζει απότομες μεταβολές. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από κράματα τιτανίου ή ένα κράμα νικελίου, μολυβδαινίου και χρωμίου (με αγγλική ονομασία Hastelloy), τα οποία προσφέρουν καλύτερη συμβατότητα με ισχυρές χημικές ουσίες. Ο σχεδιασμός της αντιστάθμισης προσφέρει τη δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων σε περίπτωση ύπαρξης σωματιδίων ή φυσαλίδων στο διάλυμα, ωστόσο τα υγρά

με έντονες τάσεις συσσώρευσης θα πρέπει να αποφεύγονται. Ο σχεδιασμός των εκτεθειμένων ηλεκτροδίων πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν κατά την εγκατάσταση. Από τα ηλεκτρόδια παράγεται ένα μικρό ηλεκτρικό πεδίο, επομένως το άκρο του αισθητήρα θα πρέπει να είναι πλήρως εκτεθειμένο στο διάλυμα προς μέτρηση κατά 1 cm προς όλες τις κατευθύνσεις.



Σχήμα 23: Απλοποιημένο διάγραμμα τετραπολικού αισθητήρα αγωγιμότητας [18]

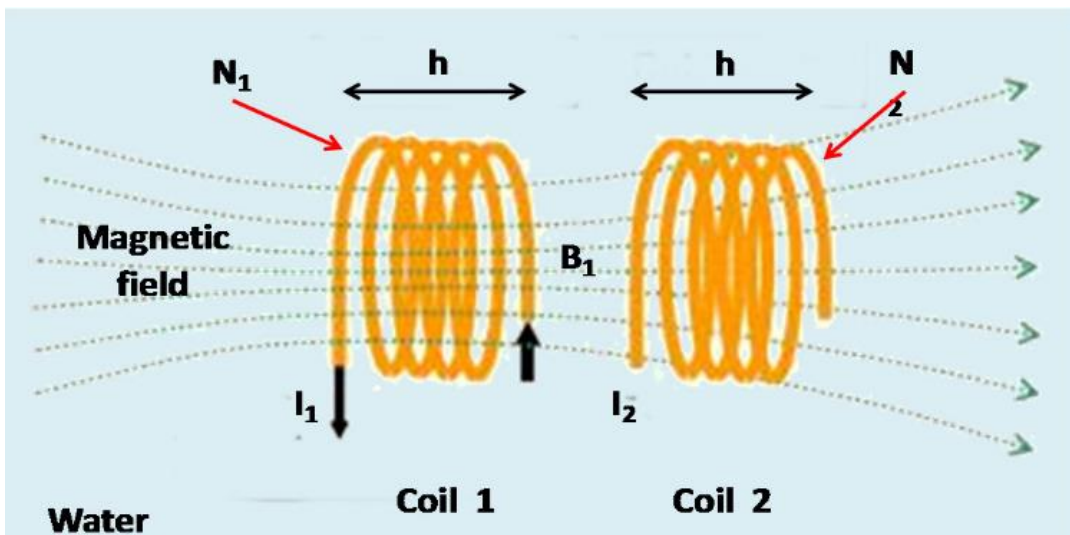
2.2.3.3 Επαγωγικοί αισθητήρες αγωγιμότητας

Άλλα συνηθισμένα ονόματα για τους επαγωγικούς αισθητήρες αγωγιμότητας είναι οι σπειροειδείς αισθητήρες, ή οι αισθητήρες χωρίς ηλεκτρόδια. Ενσωματωμένα μέσα στους αισθητήρες είναι δύο μονωμένα μαγνητικά πηνία. Μια σταθερή AC τάση εφαρμόζεται στο πρωτεύον πηνίο. Η διέγερση αυτή του πρωτεύοντος πηνίου παράγει μια ροή ρεύματος στο περιβάλλον διάλυμα. Το δευτερεύον πηνίο αντιδράει στη ροή ρεύματος και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Η ένταση αυτού του μαγνητικού πεδίου συνδέεται άμεσα με την αγωγιμότητα του διαλύματος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας. Το μαγνητικό πεδίο του δευτερεύοντος πηνίου παράγει τη δική του ροή ρεύματος, η οποία μπορεί στη συνέχεια να μετρηθεί ως αγωγιμότητα του υγρού.



Σχήμα 24: Επαγωγικός αισθητήρας μέτρησης αγωγιμότητας [19]

Για να γίνει αντιληπτή η λειτουργία αυτού του αισθητήρα, πρέπει να γίνει κατανοητό το φαινόμενο της κοινής επαγωγής, το οποίο εξηγείται και με τη βοήθεια του σχήματος 25. Έστω δύο πηνία με μήκος h , όπου N_1 και N_2 είναι ο αριθμός σπειρών τους αντίστοιχα. Αντί να τοποθετείται ένας φερρομαγνητικός πυρήνας με εμβαδόν διατομής S και σχετική διαπερατότητα μ_r , αφήνεται ένα διάστημα που καταλαμβάνεται από αλμυρό νερό εκεί που το τμήμα των πηνίων είναι N_1 με την σχετική διαπερατότητα του νερού να είναι μ_{r_water} .



Σχήμα 25: Ηλεκτρικό κύκλωμα του επαγωγικού αισθητήρα [20]

Μέσα από το πηνίο 1 (coil 1) περνάει ένα σταθερό ρεύμα I_1 , καθώς το πηνίο 2 είναι ανοιχτό. Για να απλοποιηθούν οι εξισώσεις, γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι γραμμές του

μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το πρώτο πηνίο περνάνε μέσα από το δεύτερο πηνίο. Το πηνίο 1 δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο \vec{B}_1 . Το πεδίο αυτό περιορίζεται στο κέντρο του πηνίου 1, σαν να ήταν πυρήνας. Με αυτό τον τρόπο, οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου \vec{B}_1 περνάνε μέσα από το πηνίο 2 και δημιουργούν μια μαγνητική ροή $\Phi_{2,1}$. Η αμοιβαία επαγωγή φαίνεται στην εξίσωση 2.2:

$$L_{1,2} = M = \frac{\Phi_{2,1}}{I_1} \quad (2.2)$$

Το μαγνητικό πεδίο στο πηνίο 1 δίνεται και από τη σχέση:

$$\vec{B}_1 = \mu_{r_water} \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_1}{h} \cdot I_1 \cdot \vec{n} \quad (2.3)$$

όπου \vec{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα, παράλληλο στον άξονα των πηνίων και με κατεύθυνση τη δεξιά πλευρά. Η ροή $\Phi_{2,1}$ που δημιουργείται στο πηνίο 2 δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi_{2,1} = N_2 \cdot \vec{B}_1 \cdot S = \frac{\mu_{r_water} \cdot \mu_0 \cdot N_2 \cdot N_1 \cdot S}{h} \cdot I_1 \quad (2.4)$$

Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής είναι:

$$L_{1,2} = M = \frac{\mu_{r_water} \cdot \mu_0 \cdot N_2 \cdot N_1 \cdot S}{h} \quad (2.5)$$

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη του πηνίου 2 (emf_2) μπορεί να υπολογισθεί από τη μαγνητική ροή που παράγεται στο πηνίο 2:

$$\Phi_{2,1} = M \cdot I_1 \quad (2.6)$$

Αν το ρεύμα I_1 εξαρτάται από τον χρόνο, η ροή αλλάζει κι αυτή ως συνάρτηση του χρόνου και παράγει μια emf_2 που δίνεται από τη σχέση:

$$emf_2 = -\frac{d\Phi_{2,1}}{dt} = -M \cdot \frac{dI_1}{dt} = \frac{M}{\tau} \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} =$$

$$= \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N_2 \cdot B_1 \cdot S}{h \cdot \tau} \cdot I_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.7)$$

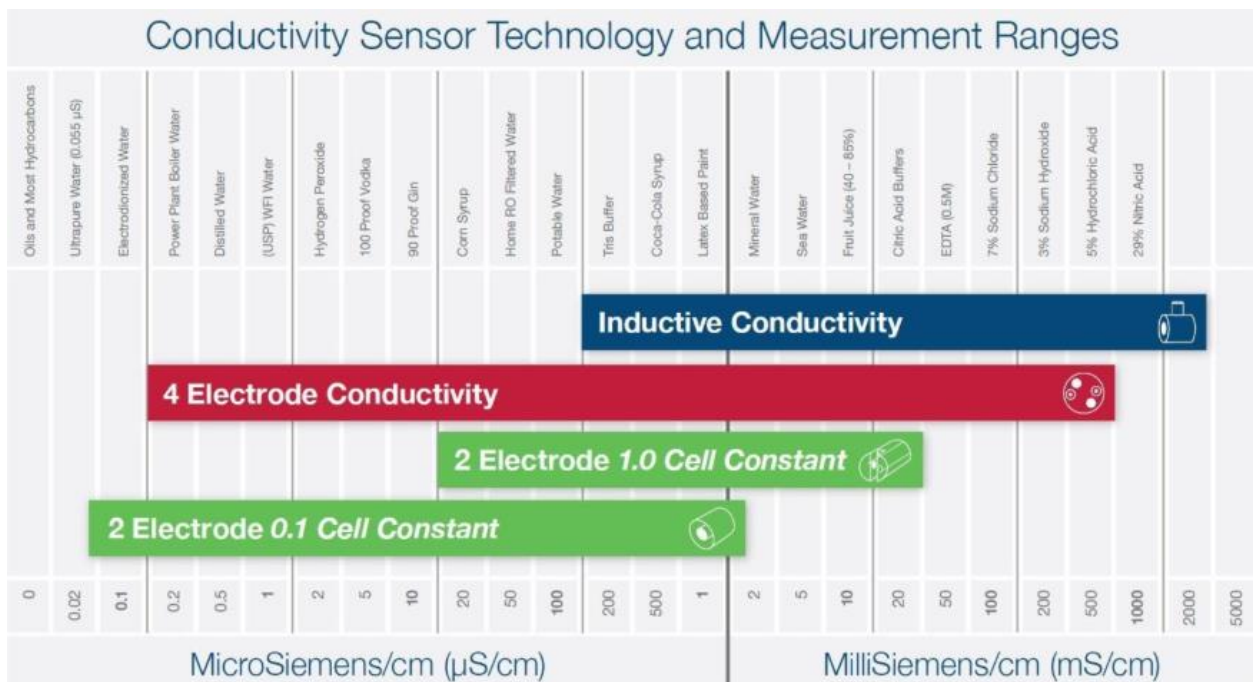
όπου τ : σχετίζεται με τη συχνότητα λειτουργίας της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

Το συμπέρασμα, λοιπόν, είναι ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη emf_2 συνδέεται με το μέσο μέσω της μεταβλητής μ_{r_water} , η οποία είναι αλληλένδετη με την ποσότητα των διαλυμένων αλάτων στο νερό.

Η βασική αρχή σχεδιασμού των επαγωγικών αισθητήρων μέτρησης αγωγιμότητας, καθώς και η χρήση πλαστικού υλικού και όχι μετάλλου στη συσκευασία τους, τους κάνει ιδιαίτερα κατάλληλους για χρήση σε εφαρμογές με ιδιαίτερα όξινα ή βασικά διαλύματα που θα προκαλούσαν φθορές σε άλλου τύπου αισθητήρες. Ωστόσο, δεν έχουν την υψηλή ακρίβεια για να μετρήσουν πολύ χαμηλής αγωγιμότητας διαλύματα, όπως το καθαρό ή απιονισμένο νερό. Το φυσικό τους μέγεθος σε συνδυασμό με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται απαιτεί να αφήνεται σημαντική απόσταση κατά την τοποθέτησή τους από σωλήνες ή από τοιχώματα δεξαμενών, ώστε να μην παρουσιάζονται σφάλματα μετρήσεων.

2.2.3.4 Επιλογή κατάλληλου αισθητήρα αγωγιμότητας

Ανάλογα με την εφαρμογή που απαιτεί τη χρήση αισθητήρα μέτρησης αγωγιμότητας, καθώς και τις προβλεπόμενες τιμές που θα λαμβάνονται, γίνεται και η σωστή επιλογή του τύπου αισθητήρα, ώστε να δίνει ακριβείς μετρήσεις χωρίς σφάλματα, αλλά να αντέχει και στις απαιτούμενες συνθήκες. Παρακάτω (σχ. 26) φαίνονται οι κατηγορίες χρήσης των 3 τύπων αισθητήρων με βάση το προβλεπόμενο εύρος μέτρησης:



Σχήμα 26: Εύρη μετρήσεων των διαφορετικών τύπων αισθητήρων αγωγιμότητας [17]

2.2.3.5 Εξάρτηση αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία

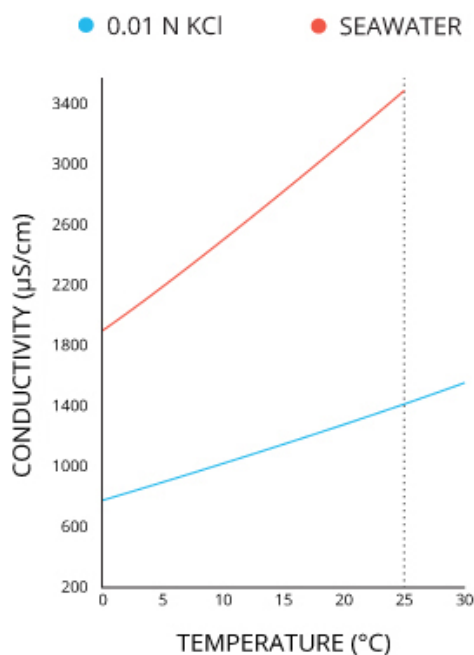
Η αγωγιμότητα ενός διαλύματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία, οπότε είναι σημαντικό είτε να χρησιμοποιείται ένα όργανο αντιστάθμισης της θερμοκρασίας ή ο αισθητήρας να βαθμονομείται στην ίδια θερμοκρασία με αυτή του διαλύματος που μετριέται (για το νερό συνήθως 25°C). Σε αντίθεση με τα μέταλλα, η αγωγιμότητα των ηλεκτρολυτών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας, ο τρόπος με τον οποίο η θερμοκρασία επηρεάζει την αγωγιμότητα ενός διαλύματος μπορεί να μοντελοποιηθεί γραμμικά χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο [15]:

$$\sigma_T = \sigma_{T_{cal}} [1 + \alpha(T - T_{cal})] \quad (2.8)$$

όπου: T είναι η θερμοκρασία του δείγματος, T_{cal} η θερμοκρασία βαθμονόμησης του διαλύματος, σ_T η ηλεκτρική αγωγιμότητα στη θερμοκρασία T, σ_{T_{cal}} η ηλεκτρική αγωγιμότητα στη θερμοκρασία βαθμονόμησης T_{cal} και α η κλίση αντιστάθμισης της θερμοκρασίας του διαλύματος.

Η εξάρτηση από τη θερμοκρασία συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό/°C. Συγκεκριμένα για το νερό, για κάθε 1°C που ανεβαίνει η θερμοκρασία, η τιμή της αγωγιμότητας αυξάνεται κατά 2-4%. Ο λόγος που έχει τέτοια επίδραση η θερμοκρασία είναι ότι αυξάνει την

κινητικότητα των ιόντων, καθώς και τη διαλυτότητα πολλών αλάτων και μεταλλικών στοιχείων.



Σχήμα 27: Εξάρτηση αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία σε δύο είδη διαλυμάτων [15]

2.2.4 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι αισθητήρων θερμοκρασίας, ανάλογα με το εύρος των απαιτούμενων εφαρμογών. Παρακάτω παρατίθεται μια σύντομη ανάλυση της λειτουργίας των έξι αυτών τύπων:

2.2.4.1 Θερμοστοιχεία

Οι αισθητήρες με θερμοστοιχεία είναι οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας. Είναι εξαιρετικά ανθεκτικοί, χαμηλού κόστους, αυτοτροφοδοτούμενοι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλες αποστάσεις και έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών. Ένα θερμοστοιχείο είναι μια συσκευή τάσης που δείχνει τη θερμοκρασία μετρώντας αλλαγές στην τάση. Αποτελείται από δύο διαφορετικά μέταλλα: ανοιχτά και κλειστά, τα οποία δουλεύουν βάσει της αρχής του θερμοηλεκτρικού φαινομένου. Όταν δύο ανόμοια μέταλλα παράγουν τάση, τότε υπάρχει θερμική διαφορά μεταξύ των δύο μετάλλων. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται και η τάση εξόδου του θερμοστοιχείου.

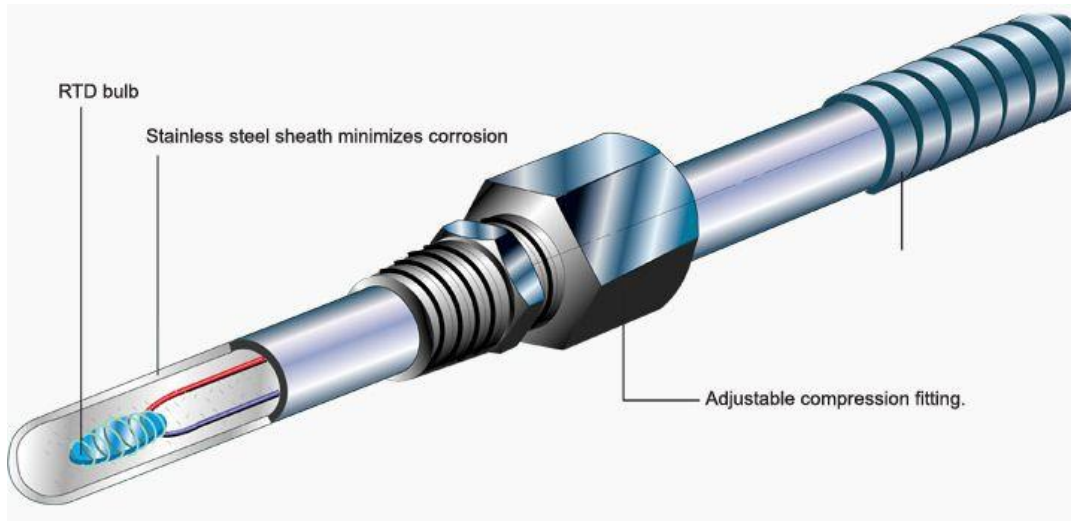


Σχήμα 28: Θερμοστοιχεία [21]

Αυτοί οι αισθητήρες συνήθως σφραγίζονται μέσα σε μια κεραμική θωράκιση ή ένα μέταλλο που τους προστατεύει από το περιβάλλον. Η πιο σημαντική ιδιότητα του θερμοστοιχείου είναι η μη γραμμικότητα – η τάση εξόδου του θερμοστοιχείου δεν είναι γραμμική σε σχέση με τη θερμοκρασία. Έτσι, για να μετατραπεί μια τάση εξόδου σε μια θερμοκρασία, απαιτείται μαθηματική γραμμικοποίηση.

2.2.4.2 Αισθητήρας θερμοκρασίας με αντίσταση (resistance temperature detector – RTD)

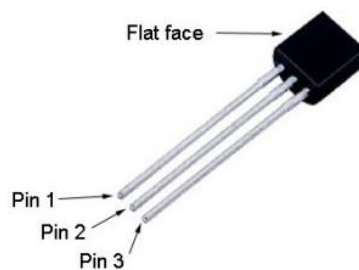
Οι αισθητήρες αυτού του τύπου παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια. Σε έναν αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας με χρήση αντιστάσεων, η αντίσταση είναι ανάλογη της θερμοκρασίας. Ο αισθητήρας κατασκευάζεται από μέταλλα πλατίνας, νικελίου και χαλκού. Έχει ευρύ φάσμα μέτρησης της θερμοκρασίας (από -270°C έως $+850^{\circ}\text{C}$). Ωστόσο, χρειάζεται εξωτερική πηγή ρεύματος για να λειτουργήσει, το οποίο ρεύμα παράγει θερμότητα στην αντίσταση και δημιουργεί σφάλματα κατά τις μετρήσεις, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να αντισταθμίζονται.



Σχήμα 29: Δομή αισθητήρα θερμοκρασίας με αντίσταση [21]

2.2.4.3 Αισθητήρες με ημιαγωγούς

Οι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας με τη χρήση ημιαγωγών έχουν τη μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες: αισθητήρες θερμοκρασίας ρεύματος εξόδου, τάσης εξόδου, αντίσταση εξόδου, διόδων και ψηφιακής εξόδου. Οι τρέχοντες αισθητήρες ημιαγωγών προσφέρουν υψηλή γραμμικότητα και υψηλή ακρίβεια σε εύρος λειτουργίας από περίπου -40°C έως 120°C .



Σχήμα 30: Αισθητήρες ημιαγωγών [21]

2.2.4.4 Θερμίστορ

Ένας άλλος τύπος αισθητήρα θερμοκρασίας είναι τα θερμίστορ, τα οποία είναι σχετικά φθηνά, προσαρμόσιμα και εύκολα στη χρήση. Τα θερμίστορ αλλάζουν την αντίστασή τους όπως οι αισθητήρες RTD. Κατασκευάζονται από μαγγάνιο και οξείδια νικελίου, τα οποία τα καθιστούν ευαίσθητα σε ζημιές. Αυτά τα υλικά ονομάζονται κεραμικά. Οι αισθητήρες με θερμίστορ προσφέρουν υψηλότερη ακρίβεια από τους αισθητήρες με αντίσταση. Τα περισσότερα θερμίστορ έχουν αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας, το οποίο σημαίνει ότι όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, η αντίσταση μειώνεται.

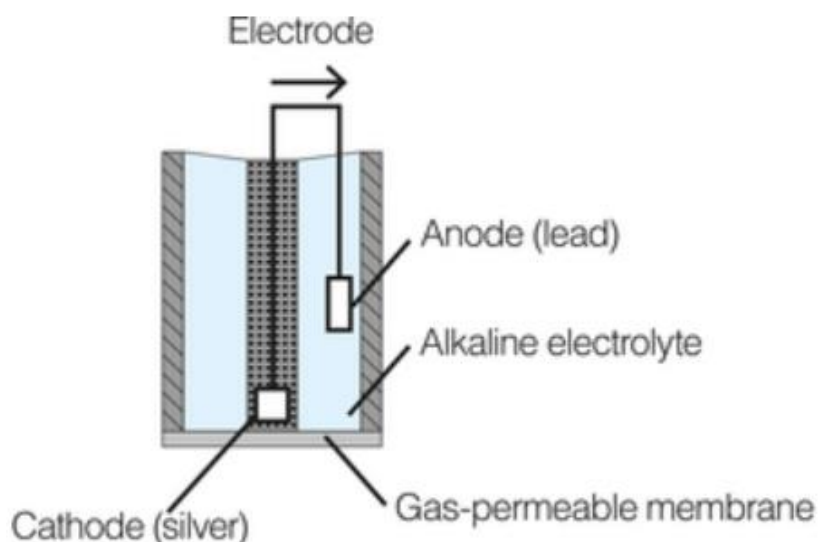


Σχήμα 31: Διάφορα θερμίστορ [21]

2.2.5 Αισθητήρες διαλυμένου οξυγόνου

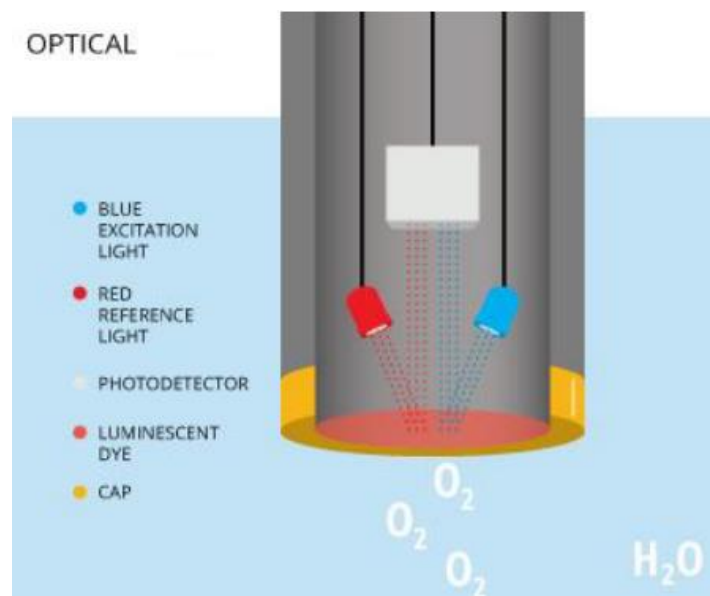
Οι αισθητήρες διαλυμένου οξυγόνου μετράνε την ποσότητα οξυγόνου που βρίσκεται μέσα στο νερό και που μετριέται σε mg/L. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αισθητήρων διαλυμένου οξυγόνου, ανάλογα με την βασική αρχή λειτουργίας τους, οι ηλεκτροχημικοί και οι οπτικοί.

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες (σχ. 32), που μπορεί να είναι είτε γαλβανικοί ή πολαρογραφικοί (polarographic), αποτελούνται από μια άνοδο, μια κάθοδο, ένα διάλυμα ηλεκτρολυτών και ένα ημιδιαπερατό μεμβρανικό κάλυμμα. Εάν υπάρχει διαφορά τάσης τουλάχιστον 0.4 Volts ανάμεσα στην άνοδο και τη κάθοδο, η κάθοδος παρέχει ηλεκτρόνια που αντιδρούν με το διαλυμένο οξυγόνο για να μειωθεί το συνολικό οξυγόνο. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργείται μια ροή ρεύματος ανάλογα με την συγκέντρωση του οξυγόνου. Η διαδικασία αυτή καταναλώνει το οξυγόνο στην άμεση περιοχή της μεμβράνης, και συνεπώς πρέπει να διασφαλιστεί η συνεχής ροή νερού, αλλιώς οι μετρήσεις θα μειωθούν και θα αναφέρουν εσφαλμένα χαμηλότερες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Η διαφορά μεταξύ των πολαρογραφικών και των γαλβανικών αισθητήρων, είναι ότι οι πολαρογραφικοί απαιτούν μια μόνιμη τάση να τους διαπερνάει, ώστε να παραμένουν πολωμένοι. Σε αντίθεση, οι γαλβανικοί αισθητήρες πολώνονται από μόνοι τους λόγω των ιδιοτήτων των υλικών τους. Έτσι, οι γαλβανικοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμέσως μετά τη βαθμονόμησή τους, ενώ οι πολαρογραφικοί χρειάζονται περίπου 5-15 λεπτά για να θερμανθούν.



Σχήμα 32: Δομή ηλεκτροχημικού αισθητήρα μέτρησης διαλυμένου οξυγόνου [22]

Οι οπτικοί αισθητήρες (σχ. 33) αποτελούνται από έναν ανιχνευτή φωτός, ένα κόκκινο LED (σε μερικούς μόνο αισθητήρες χρησιμοποιείται ως αναφορά και για καλύτερη ακρίβεια) και ένα μπλε LED, καθώς και μια φθορίζουσα βαφή, η οποία τοποθετείται μεταξύ των LEDs και του νερού. Όταν το μπλε φως χτυπάει τη βαφή, τα ηλεκτρόνια σε αυτήν αντιδρούν και φωτοβολούν πίσω το φως. Ο ανιχνευτής φωτός (φωτοτρανζίστορ) μετά εντοπίζει το φως που εκπέμπεται από τα ηλεκτρόνια. Αν υπάρχει οξυγόνο, θα παραμορφώσει το φως που περνά προς το φωτοτρανζίστορ λόγω της αλληλεπίδρασης των μορίων οξυγόνου με τη βαφή. Συνεπώς, όσο περισσότερο οξυγόνο υπάρχει στο νερό, τόσο λιγότερο φως θα ανιχνεύεται.



Σχήμα 33: Οπτικός αισθητήρας μέτρησης διαλυμένου οξυγόνου στο νερό [15]

Το βασικό κόστος συντήρησης των οπτικών αισθητήρων είναι η βαφή στη μεμβράνη που σταδιακά φθείρεται. Απαιτούν, δηλαδή, ένα με δύο βαθμονομήσεις το χρόνο και μια αλλαγή της μεμβράνης περίπου κάθε 18 μήνες. Οι οπτικοί αισθητήρες έχουν τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, χρειάζονται τη λιγότερη συντήρηση, δεν απαιτούν την ύπαρξη συνεχούς ροής νερού και δεν επηρεάζονται στις μετρήσεις από τη πιθανή ύπαρξη άλλων αερίων. Ωστόσο, είναι με διαφορά οι πιο ακριβοί όσον αφορά την αρχική τους αγορά.

Το κόστος αγοράς των πολαρογραφικών αισθητήρων είναι σημαντικά μικρότερο. Απαιτούν, ωστόσο, μια εξωτερική τάση για την πόλωση των ηλεκτροδίων πριν τη χρήση, οπότε υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση πριν αρχίσουν να λαμβάνουν μετρήσεις. Περαιτέρω, το διάλυμα ηλεκτρολυτών στο εσωτερικό του αισθητήρα σταδιακά καταναλώνεται (πιο γρήγορα από ότι φθείρεται η μεμβράνη βαφής στους οπτικούς), τα ηλεκτρόδια οξειδώνονται οπότε θέλουν καθαρισμό και οι μεμβράνες χρειάζεται να αντικαθίστανται. Από την άλλη, αυτοί οι αισθητήρες είναι με διαφορά οι πιο φθηνοί και οι διαδικασίες συντήρησης είναι εύκολες και γίνονται πιο γρήγορα όταν κάποιος τις μάθει.

Οι γαλβανικοί αισθητήρες δεν απαιτούν την εφαρμογή εξωτερικής τάσης και μπορούν να δώσουν μετρήσεις σε μικρό χρονικό διάστημα (5-10 δευτερόλεπτα). Έχουν παρόμοια διαδικασία συντήρησης με τους πολαρογραφικούς αισθητήρες, δηλαδή βαθμονόμηση, αντικατάσταση μεμβράνης και καθαρισμό των ηλεκτροδίων. Το κόστος αγοράς τους είναι παρόμοιο, ή λίγο μεγαλύτερο από τους πολαρογραφικούς, οπότε συνήθως είναι προτιμότεροι.

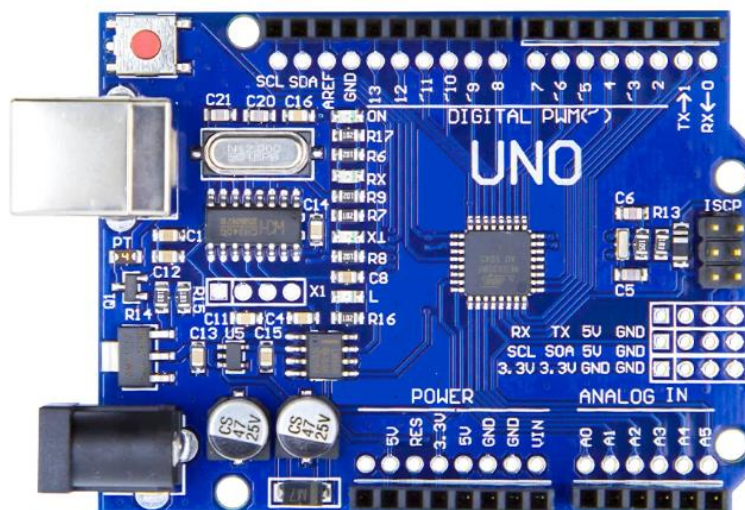
3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

3.1 Επιλογή υλικών και επεξήγηση χρησιμοποιούμενου κώδικα

3.1.1 Μικροελεγκτής

Ως πλακέτα μικροελεγκτή επιλέχθηκε το μοντέλο Arduino Uno R3. Ανάμεσα στο τεράστιο πλήθος επιλογών μικροελεγκτών που υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά, επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο για τρεις κυρίως λόγους:

Ο πρώτος και σημαντικότερος λόγος είναι το πολύ μικρό κόστος του σε σύγκριση με πολλά άλλα μοντέλα. Οι απαιτήσεις σε υπολογιστική δύναμη και δυνατότητες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι μικρές, και καθώς ένας από τους βασικούς στόχους κατά την ανάπτυξη του συστήματος αισθητήρων για τον έλεγχο της ποιότητας νερού είναι το τελικό κόστος της συσκευής να είναι μικρό, επιλέχθηκε ένας μικροελεγκτής με χαμηλότερη απόδοση συγκριτικά με άλλους που υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά, αλλά και με πολύ χαμηλότερη τιμή. Ενδεικτικά, η αγορά ενός Arduino Uno R3 Economy Starter Kit, το οποίο περιλαμβάνει και breadboard, καλώδια και αντιστάσεις στο πακέτο, κοστίζει 12€. Παρόμοιες συσκευές μεγαλύτερων δυνατοτήτων, όπως για παράδειγμα ένα Raspberry Pi, θα κόστιζε περισσότερα από 50€.



Σχήμα 34: Arduino Uno R3 [23]

Ο δεύτερος λόγος είναι το μικρό μέγεθός του. Το Arduino Uno R3 έχει διαστάσεις 68.6mm × 53.4mm και το μικρό του μέγεθος επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση και τη κατασκευή μικρών ενσωματωμένων συστημάτων που προσφέρουν ευκολία στην

εγκατάσταση και τη μετακίνηση. Για το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η δυνατότητα εύκολης μεταφοράς και εγκατάστασης είναι σημαντική, καθώς το σύστημα αισθητήρων θα μπορεί να μεταφέρεται και να συνδέεται σε άλλους υπολογιστές και σε χώρους πέραν του εργαστηρίου.

Ο τρίτος λόγος επιλογής του Arduino Uno είναι η μεγάλη ευελιξία του και η ευκολία στον προγραμματισμό. Το Arduino είναι ένα εργαλείο ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών. Προσφέρει μεγάλη ευκολία στη σχεδίαση συστημάτων με αισθητήρες χάρη στις πολλές εισόδους και εξόδους, αναλογικές και ψηφιακές, το περιβάλλον προγραμματισμού και την εύκολη σειριακή επικοινωνία με τον υπολογιστή μέσω καλωδίου USB, καθώς και τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας με τη χρήση κεραιών επέκτασης και, τέλος, λόγω της ύπαρξης πολλών βιβλιοθηκών και παραδειγμάτων εφαρμογών στο διαδίκτυο που συνεισφέρουν στην επίλυση προβλημάτων και δυσκολιών.

3.1.2 Αισθητήρας θολότητας

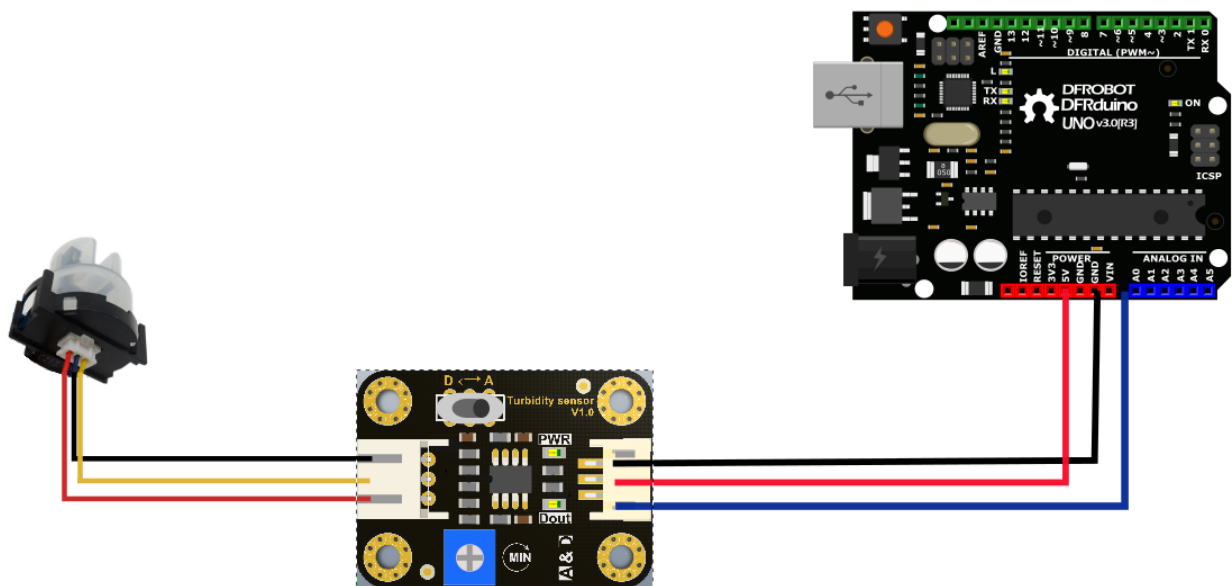
Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.2, οι πιο ακριβείς και αξιόπιστοι αισθητήρες θολότητας είναι οι νεφελομετρικοί. Ωστόσο, το κόστος τους είναι σημαντικά μεγαλύτερο, οπότε για τη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε ένας αισθητήρας τύπου απορρόφησης φωτός, ο οποίος με τη βοήθεια προγραμματισμού δίνει αποδεκτά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο Turbidity Sensor SEN0189 της εταιρίας DFROBOT.

Μέσα στη συσκευασία περιέχονται ο αισθητήρας, ο μετατροπέας που συνδέεται ανάμεσα στον αισθητήρα και το Arduino, καθώς και καλώδια για τη σύνδεση. Ο μετασχηματιστής μπορεί να μετατρέψει το αναλογικό σήμα που στέλνει ο αισθητήρας σε ψηφιακό που μπορεί να επεξεργασθεί το Arduino και στη συνέχεια να το στείλει στον υπολογιστή, αλλά και να σταθεροποιήσει τις εναλλαγές στην τάση κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ώστε να ληφθούν σωστές μετρήσεις. Αυτό γίνεται επιλέγοντας με ένα διακόπτη πάνω στο μετασχηματιστή αναλογική ή ψηφιακή λειτουργία. Ο αισθητήρας μετράει τη θολότητα με τη μορφή τάσης (Volts), την οποία επεξεργάζεται το υπόλοιπο σύστημα και με τη χρήση προγραμματισμού μέσω του Arduino μετατρέπεται σε NTU. Ο μετασχηματιστής συνδέεται στο Arduino με τρία καλώδια, ένα για την τροφοδοσία των 5V, ένα για τη γείωση και ένα για τη σύνδεση σε ένα από τα κανάλια του Arduino, επιλέγοντας αναλογικό ή ψηφιακό ανάλογα με τη θέση του αντίστοιχου διακόπτη στον μετασχηματιστή. Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι μόνο το κάτω μέρος του αισθητήρα είναι αδιάβροχο,

δηλαδή μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε νερό μέχρι εκεί που ξεκινάει το μαύρο κάλυμμα. Στην ενότητα 3.2 θα επεξηγηθεί πώς διορθώθηκε αυτός ο περιορισμός.



Σχήμα 35: Analog Turbidity Sensor for Arduino (SEN0189) [24]



Σχήμα 36: Συνδεσμολογία αισθητήρα θολότητας με το Arduino [25]

Ο κώδικας με τον οποίο προγραμματίστηκε ο μικροελεγκτής για να λαμβάνει τις μετρήσεις του αισθητήρα θολότητας παρατίθεται παρακάτω. Εντός της συνάρτησης `setup()`, η οποία εκτελείται μία φορά, εγκαθίσταται η σειριακή επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή για την καταγραφή των μετρήσεων. Ο αριθμός 115200 μέσα στη παρένθεση ισοδυναμεί με τον ρυθμό `baud` του Arduino, δηλαδή την ταχύτητα με την οποία το σήμα αλλάζει τιμή κάθε δευτερόλεπτο. Στη συνέχεια προσδιορίζεται ο ακροδέκτης στον οποίο συνδέεται η έξοδος του αισθητήρα (A0) και δηλώνονται οι μεταβλητές που αντιστοιχούν

στην τιμή της τάσης που δίνει ο αισθητήρας και στις νεφελομετρικές μονάδες θολότητας (NTU) στις οποίες μετατρέπεται η τάση στη συνέχεια του προγράμματος.

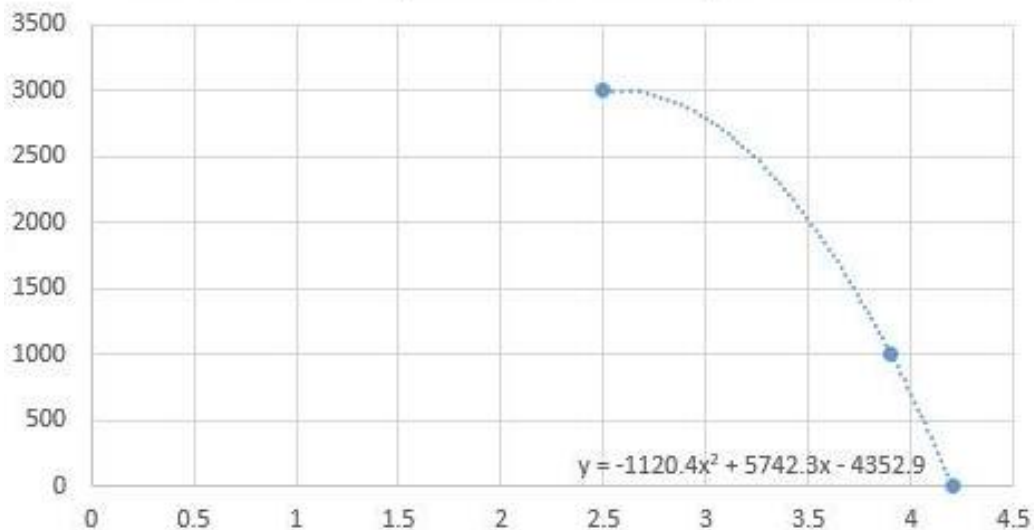
```
void setup(){  
  Serial.begin(115200);  
}
```

```
int sensorPin = A0;  
float volt;  
float ntu;
```

Στη συνέχεια, παρατίθεται η συνάρτηση loop(), η οποία τρέχει συνεχόμενα, όσο ο αισθητήρας είναι συνδεδεμένος στον υπολογιστή. Αρχικά, επειδή η τάση που λαμβάνεται από τον αισθητήρα παρουσιάζει αρκετό θόρυβο, παίρνονται 800 μετρήσεις και υπολογίζεται ο μέσος όρος. Οι αριθμοί 1023 και 5 έχουν αυτές τις τιμές γιατί οι αναλογικές τιμές έχουν εύρος 0-1023 και η τάση φτάνει από 0V έως 5V. Στη συνέχεια γίνεται στρογγυλοποίηση της τιμής της τάσης και μετατρέπεται το αποτέλεσμα σε NTU. Από τον γράφο στη σελίδα της DFROBOT (σχ. 37), φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ της τάσης και των NTU ισχύει μόνο για το εύρος τιμών τάσης από 2.5V έως 4.2V. Γι' αυτό και θέτεται το όριο, αν η τάση πέσει κάτω από 2.5V, η τιμή NTU να γίνεται ίση με το μέγιστο για το σύστημά μας, δηλαδή ίση με 3000. Σε αντίθετη περίπτωση η τιμή σε NTU ισοδυναμεί με την εξίσωση που προκύπτει από τον γράφο:

$$ntu = -1120.4 \cdot volt^2 + 5742.3 \cdot volt - 4353.8 \quad (3.1)$$

Υπάρχει ωστόσο μια μικρή διαφορά μεταξύ της αρχικής εξίσωσης και της 3.1. Παραπάνω φαίνεται η τιμή 4353.8 στο τέλος, ενώ στην εξίσωση που προκύπτει από τη γραφική παράσταση είναι 4352.9. Αυτή η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι στα 4.2V η τιμή σε NTU θα έπρεπε να είναι 0, αλλά η τιμή που δίνεται εδώ είναι 0.9. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ένα μικρό σφάλμα στον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Η μικρή αυτή διαφορά λοιπόν φιλτράρεται αφαιρώντας την από την αρχική τιμή, οπότε προκύπτει αυτή που φαίνεται στην εξίσωση 3.1. Έπειτα τυπώνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θολότητας σε Volts και σε NTU στο Serial Monitor του Arduino IDE και γίνεται μια καθυστέρηση στην εμφάνιση των αποτελεσμάτων της τάξης των 500ms, δηλαδή μισού δευτερολέπτου ώστε να υπάρχει χρόνος να δει ο χρήστης την κάθε μέτρηση πριν ληφθεί καινούρια.



Σχήμα 37: Σχέση μεταξύ θολότητας σε NTU και τάσης [25]

```

void loop()
{
    volt = 0;
    for(int i=0; i<800; i++)
    {
        volt += ((float)analogRead(sensorPin)/1023)*5;
    }
    volt = volt/800;
    volt = round_to_dp(volt,1);
    if(volt < 2.5){
        ntu = 3000;
    }else{
        ntu = -1120.4*square(volt)+5742.3*volt-4353.8;
    }
    Serial.print(volt);
    Serial.print(" V, ");

    Serial.print(ntu);
    Serial.println(" NTU");
    delay(500);
}

```

Τέλος, παρατίθεται η συνάρτηση `round_to_dp`, η οποία δέχεται σαν ορίσματα τη μέση τιμή της τάσης και το δεκαδικό σημείο στο οποίο θέλει ο χρήστης να γίνει η στρογγυλοποίηση και επιστρέφει την τάση στρογγυλοποιημένη στο σημείο αυτό:

```

float round_to_dp( float in_value, int decimal_place )
{
    float multiplier = powf( 10.0f, decimal_place );
    in_value = roundf( in_value * multiplier ) / multiplier;
    return in_value;
}

```

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της τάσης που δίνει ο αισθητήρας στην έξοδο μειώνεται όσο αυξάνεται η θολότητα του νερού. Αυτό είναι λογικό, καθώς όπως εξηγήθηκε

και στην ενότητα 2.2.1.2, ο αισθητήρας αποτελείται από μία φωτοδίοδο και ένα φωτοτρανζίστορ, οπότε όσο αυξάνεται η θολότητα του νερού, τόσο λιγότερο φως λαμβάνεται από το φωτοτρανζίστορ, οπότε η τάση εξόδου μειώνεται.

Για να γίνει σωστή βαθμονόμηση του αισθητήρα, ώστε να λαμβάνονται σωστές μετρήσεις, χρειάζονται δύο γνωστές αναμενόμενες τιμές. Από το σχήμα 37, παρατηρείται πως στα 4.2V τα NTU είναι 0, ενώ στα 2.5V είναι 3000 (το μέγιστο). Αφαιρώντας από τον αισθητήρα το μαύρο καπάκι, μπορεί να βγει το αισθητήριο μέρος από το προστατευτικό κάλυμμα (σχ. 38). Πάνω στο αισθητήριο κομμάτι, στη μέση της μικρής πλακέτας, υπάρχει ένα ποτενσιόμετρο. Παίρνοντας λοιπόν δύο δείγματα νερού, ένα καθαρό (0 NTU) και ένα βρώμικο (3000 NTU), και γυρίζοντας το ποτενσιόμετρο μέχρις ότου η έξοδος δίνει τις επιθυμητές τιμές στα αντίστοιχα δείγματα, ολοκληρώνεται η διαδικασία της βαθμονόμησης του αισθητήρα. Επειδή, ωστόσο, ο αισθητήρας είναι ευαίσθητος, πιθανώς να χρειάζεται να επαναλαμβάνεται η διαδικασία αυτή ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να σιγουρεύεται η αξιοπιστία των μετρήσεων.

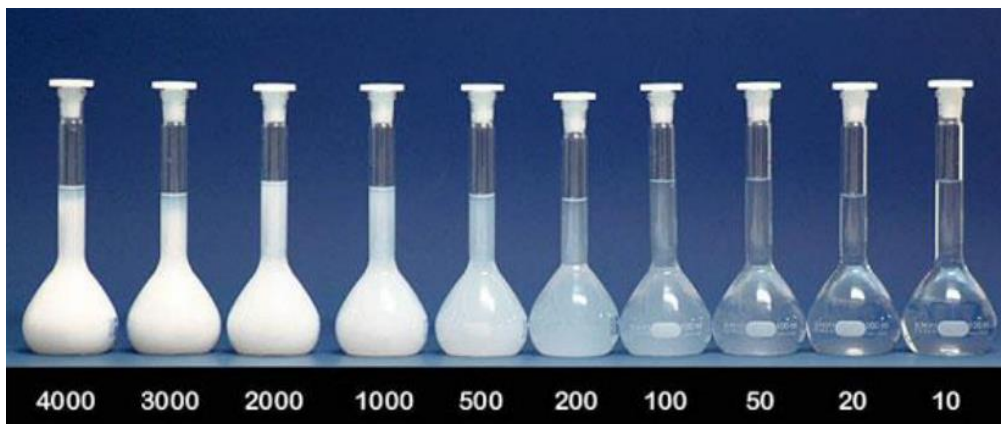
Ένας άλλος τρόπος βαθμονόμησης του αισθητήρα είναι με χρήση διαλυμάτων φορμαζίνης με συγκεκριμένες τιμές θολότητας το καθένα, έτσι ώστε ο αισθητήρας να μπορεί να ρυθμιστεί ακόμα πιο συγκεκριμένα και να υπάρχει μεγαλύτερη σιγουριά για την ακρίβεια των μετρήσεων μετά τη βαθμονόμηση, αλλά να μπορεί και να γίνεται εύκολος και συχνός έλεγχος ώστε να ξέρει ο χρήστης πότε ο αισθητήρας δίνει σωστά αποτελέσματα και πότε όχι, αλλά και να μπορεί να δει το μέγεθος της απόκλισης των λαμβανόμενων μετρήσεων από τα αναμενόμενα αποτελέσματα.



Σχήμα 38: Ο αισθητήρας χωρίς το πάνω καπάκι



Σχήμα 39: Η τοποθεσία του ποτενσιόμετρου στον αισθητήρα



Σχήμα 40: Διάφορα μείγματα προτύπου φορμαζίνης για βαθμονόμηση και έλεγχο του αισθητήρα θολότητας [15]

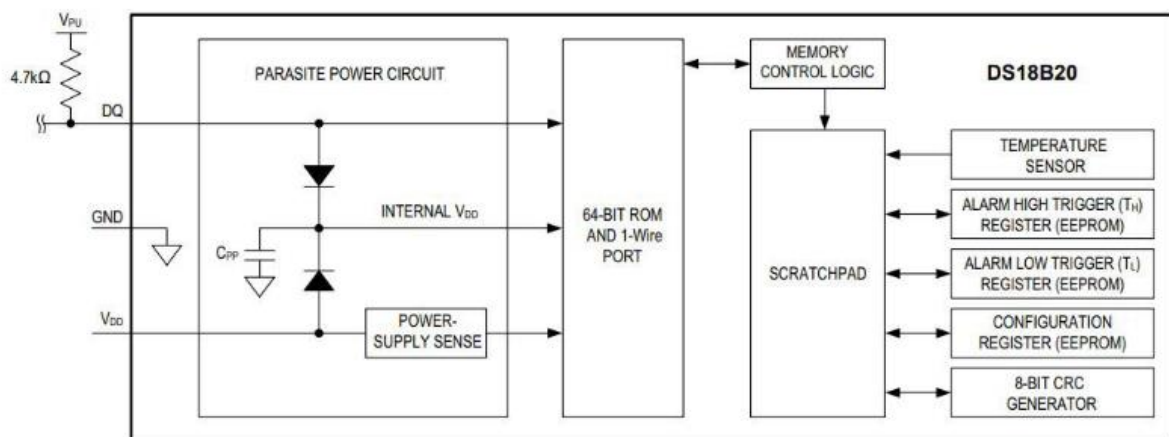
3.1.3 Αισθητήρας θερμοκρασίας

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας που επιλέχθηκε είναι ο Waterproof DS18B20 Temperature Sensor Kit (σχ. 41). Το σήμα με τις πληροφορίες των μετρήσεων μπορεί να σταλθεί από και προς τον αισθητήρα μέσω μιας διεπαφής του ενός καλωδίου, έτσι ώστε μόνο ένα καλώδιο (και η γείωση) χρειάζεται να είναι συνδεδεμένο από τον κεντρικό μικροελεγκτή στον αισθητήρα. Στο εσωτερικό του αισθητήρα υπάρχει ένα ενσωματωμένο κύκλωμα (σχ. 42), το οποίο περιέχει έναν καταχωρητή διαμόρφωσης (configuration register), συστήματα προειδοποίησης που χτυπάνε εάν η θερμοκρασία βγει εκτός εμβέλειας και μία ROM 64 bit με λείζερ. Διαθέτει έναν ακροδέκτη δεδομένων, ο οποίος στέλνει ψηφιακά δεδομένα (συνήθως χρησιμοποιούνται 9 bit για αυτή την εφαρμογή, αλλά μπορούν να

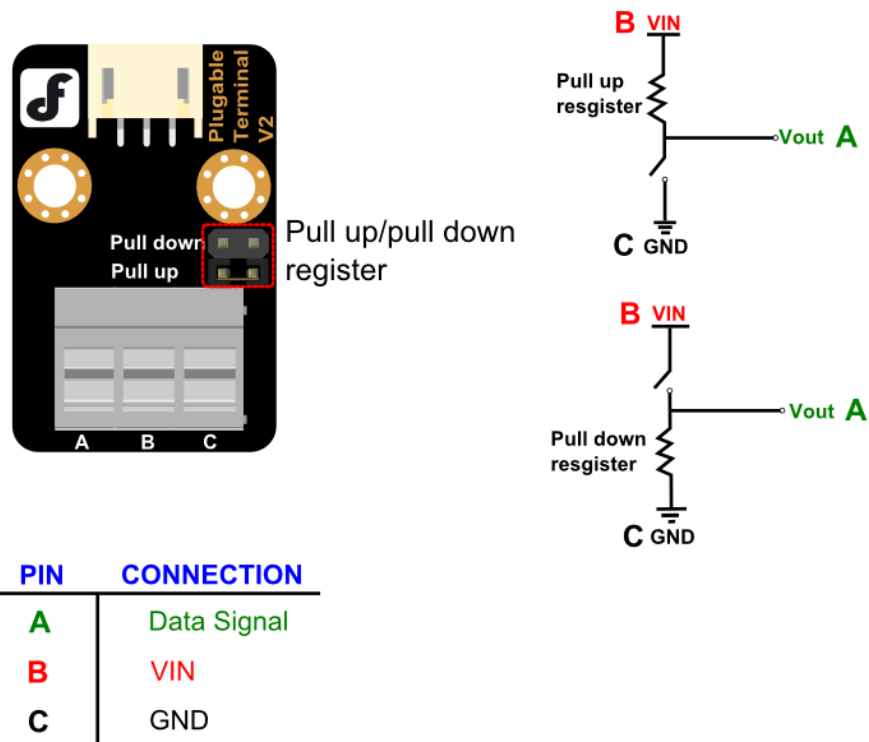
σταλούν έως 12 bit) στον μικροελεγκτή. Χρησιμοποιείται μια αντίσταση των 4.7KΩ σαν κλάδος ανέλκυσης, που συνδέεται από τον ακροδέκτη δεδομένων στην τροφοδοσία ρεύματος, ώστε ο μικροελεγκτής να λάβει τα ανεπεξέργαστα δεδομένα σωστά. Αντί αυτής της αντίστασης, μπορεί να συνδεθεί ανάμεσα στον αισθητήρα και τον μικροελεγκτή ένας προσαρμογέας (σχ. 43 και 44), ο οποίος αποτελείται από δύο αντιστάσεις και την επιλογή χρήσης κλάδου ανέλκυσης ή κλάδου καθέλκυσης, ανάλογα με τη χρήση. Αυτός είναι ένας πιο εύκολος και σίγουρος τρόπος σύνδεσης του αισθητήρα θερμοκρασίας με τον μικροελεγκτή.



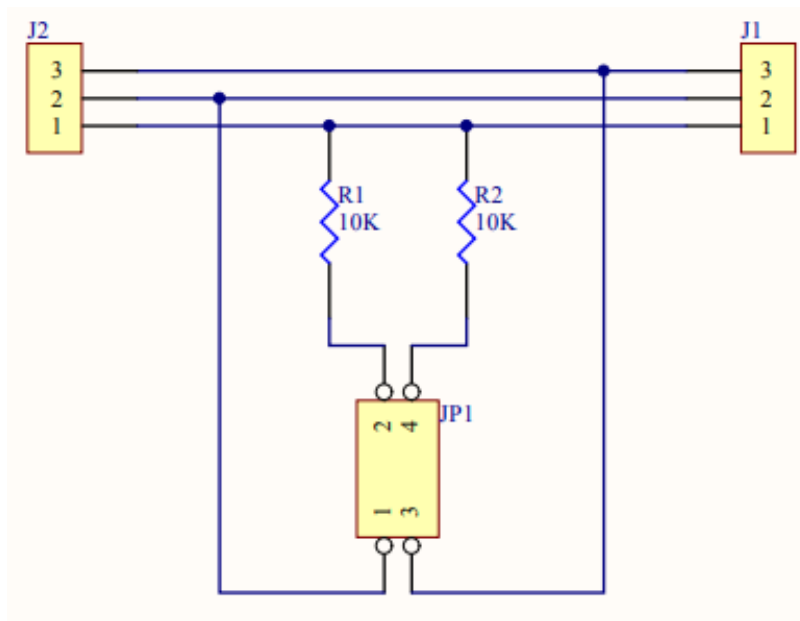
Σχήμα 41: Αισθητήρας θερμοκρασίας και προσαρμογέας [26]



Σχήμα 42: Δομή κυκλώματος αισθητήρα θερμοκρασίας [15]

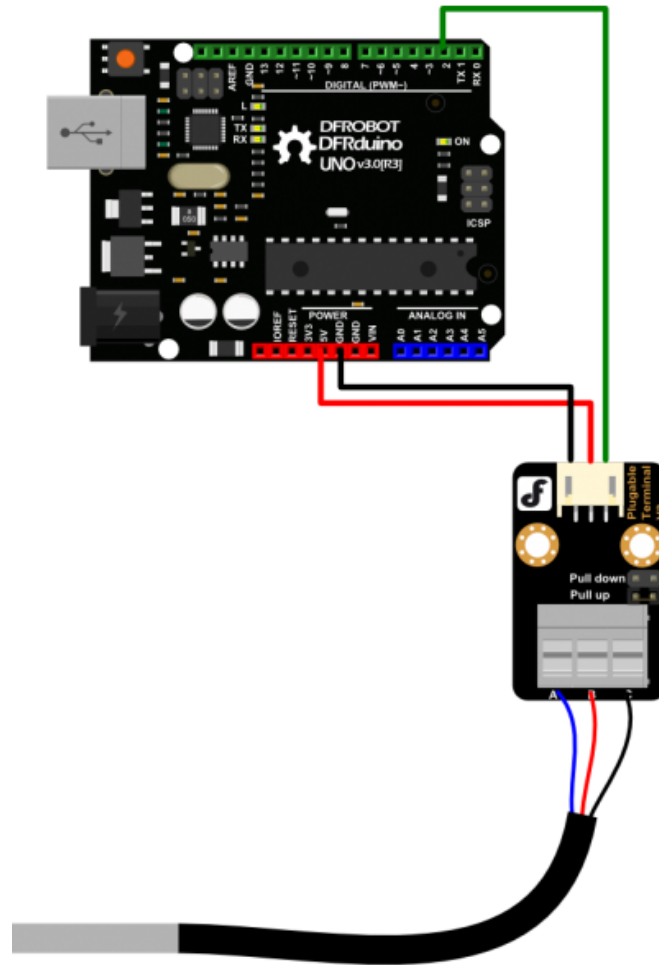


Σχήμα 43: Προσαρμογέας και κυκλωματική επεξήγηση [27]



Σχήμα 44: Εσωτερική κυκλωματική διάταξη προσαρμογέα [27]

Η σύνδεση του αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20 με το Arduino είναι αρκετά απλή, με τα τρία καλώδια του αισθητήρα να συνδέονται με τον προσαρμογέα, ο οποίος στη συνέχεια έχει τρία καλώδια που συνδέονται με την τροφοδοσία των 5V, τη γείωση και τον ψηφιακό ακροδέκτη.



Σχήμα 45: Σύνδεση του αισθητήρα θερμοκρασίας στο Arduino [28]

Ο κώδικας με τον οποίο προγραμματίστηκε ο αισθητήρας για να δείχνει τη θερμοκρασία στο Serial Monitor του Arduino IDE λήφθηκε από τη σελίδα της DFROBOT [28] και παρατίθεται παρακάτω. Αρχικά συμπεριλαμβάνεται η βιβλιοθήκη OneWire, για τη δυνατότητα λειτουργίας με ένα καλώδιο όπως εξηγήθηκε πιο πάνω, γίνεται δήλωση του ψηφιακού ακροδέκτη του Arduino στον οποίο συνδέεται ο αισθητήρας, καθώς και η εγκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή και ο ρυθμός Baud που λαμβάνονται οι μετρήσεις. Η συνάρτηση loop τρέχει συνεχόμενα και δείχνει μία μέτρηση θερμοκρασίας κάθε 100 ms, καλώντας τη συνάρτηση getTemp.

```
#include <OneWire.h>

int DS18S20_Pin = 2; //DS18S20 Signal pin on digital 2

//Temperature chip i/o
OneWire ds(DS18S20_Pin); // on digital pin 2

void setup(void) {
  Serial.begin(115200);
}
```

```

void loop(void) {
  float temperature = getTemp();
  Serial.println(temperature);

  delay(100); //just here to slow down the output so it is easier to read
}

```

Έπειτα, η συνάρτηση getTemp αρχικοποιεί τις θέσεις μνήμης στις οποίες θα αποθηκεύσει τις τιμές, ελέγχει και στέλνει ειδοποίηση σε περίπτωση που δεν υπάρχει συνδεδεμένος αισθητήρας ή δεν λειτουργεί σωστά και στη συνέχεια επιστρέφει τη τιμή της μέτρησης της θερμοκρασίας σε βαθμούς κελσίου.

```

float getTemp(){
  //returns the temperature from one DS18S20 in DEG Celsius
  byte data[12];
  byte addr[8];

  if ( !ds.search(addr)) {
    //no more sensors on chain, reset search
    ds.reset_search();
    return -1000;
  }
  if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) {
    Serial.println("CRC is not valid!");
    return -1000;
  }
  if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
    Serial.print("Device is not recognized");
    return -1000;
  }

  ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0x44,1); // start conversion, with parasite power on at the end

  byte present = ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0xBE); // Read Scratchpad

  for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
    data[i] = ds.read();
  }
  ds.reset_search();

  byte MSB = data[1];
  byte LSB = data[0];

  float tempRead = ((MSB << 8) | LSB); //using two's compliment
  float TemperatureSum = tempRead / 16;

  return TemperatureSum;
}

```

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα θερμοκρασία DS18B20 μπορεί να γίνει παίρνοντας δύο μετρήσεις, μία σε θερμοκρασία δωματίου και μία τοποθετώντας τον αισθητήρα σε βραστό νερό και σιγουρεύοντας ότι η μέτρηση είναι 100°C. Ωστόσο, λόγω του απλού σχεδιασμού του αισθητήρα και της ευρείας χρήσης του, δεν είναι τόσο απαραίτητο να γίνει βαθμονόμηση όσο στους υπόλοιπους, πιο σύνθετους αισθητήρες.

3.1.4 Αισθητήρας pH

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.2.2, οι βέλτιστοι αισθητήρες μέτρησης pH είναι οι φωτομετρικοί. Πρόκειται, όμως, για μια ιδιαίτερα πρωτοπόρα και, συνεπώς, ακριβή τεχνολογία. Για αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε, λοιπόν, ένας αισθητήρας pH με γυάλινο ηλεκτρόδιο. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ο Gravity: analog pH Sensor/Meter Kit V2 (SEN0161-v2) της εταιρίας DFROBOT.

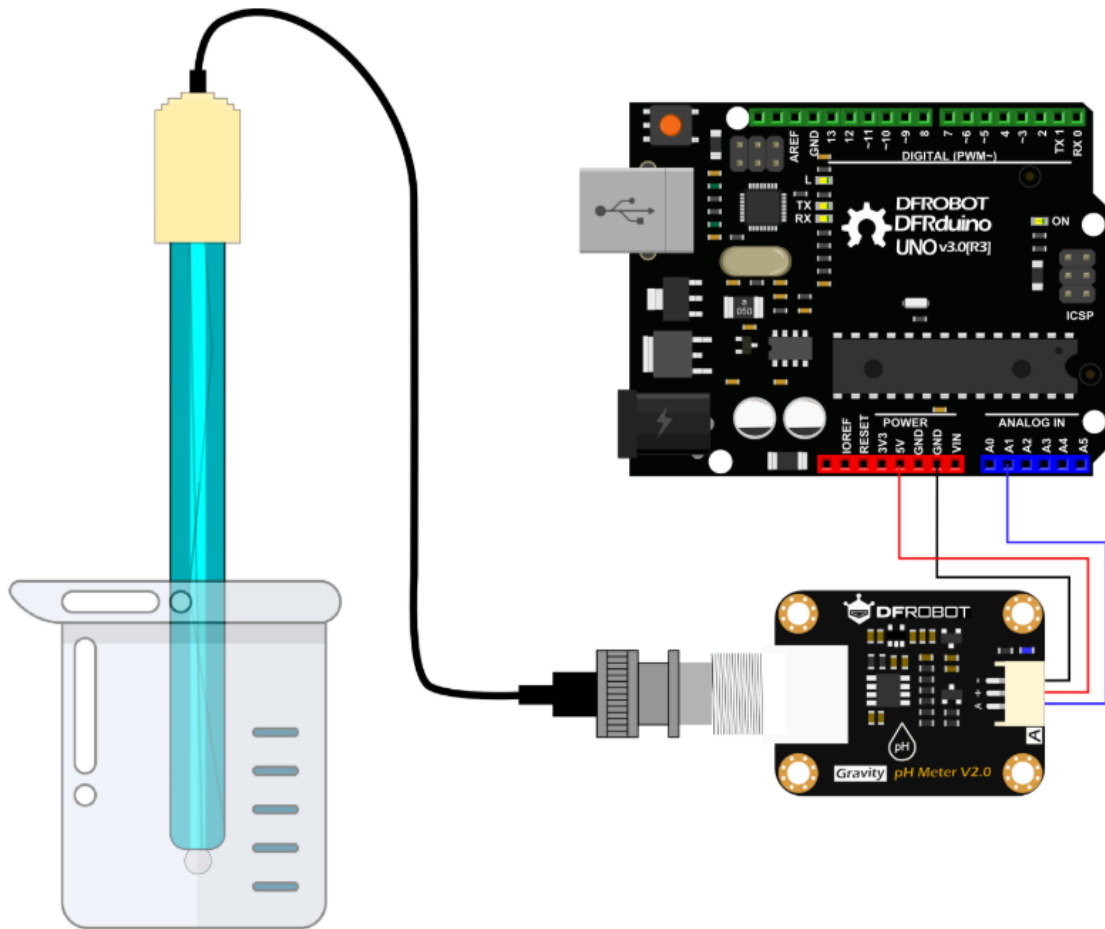
Μέσα στη συσκευασία (σχ. 46) περιέχονται ο αισθητήρας, ο μετασχηματιστής που συνδέει τον αισθητήρα με το Arduino, καλώδια για τις συνδέσεις και τέσσερα φιαλίδια που περιέχουν διαλύματα με συγκεκριμένες τιμές pH για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα. Ο τρόπος βαθμονόμησης του αισθητήρα θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω. Ο μετασχηματιστής, ή αλλιώς, η πλακέτα μετατροπής σημάτων, βοηθάει στη σταθεροποίηση της τάσης εξόδου που στέλνει ο αισθητήρας στο Arduino, τη μείωση του θορύβου και την προστασία του αισθητήρα από εναλλαγές τάσης. Ο αισθητήρας συνδέεται με τη πλακέτα μετατροπής σημάτων με τη χρήση ενός ομοαξονικού καλωδίου (BNC). Στη συνέχεια ο μετασχηματιστής συνδέεται με το Arduino με τη χρήση τριών καλωδίων, ένα για τη τροφοδοσία (5V), ένα για τη γείωση και ένα που συνδέεται με τον αναλογικό ακροδέκτη του Arduino για τη μεταφορά των δεδομένων. Παρόλο που ο αισθητήρας είναι αδιάβροχος, ο μετασχηματιστής και η ομοαξονική σύνδεση πρέπει να παραμένουν χωρίς καθόλου υγρασία, καθώς μπορεί να επηρεαστεί η αντίσταση εισόδου, το οποίο καταλήγει στη λήψη λανθασμένων μετρήσεων. Ακόμα, η γυάλινη μεμβράνη στο άκρο του αισθητήρα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη και πρέπει να αποφεύγεται η επαφή της με οποιαδήποτε σκληρή επιφάνεια, καθώς όποιες γρατζουνιές θα επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Για τη διατήρηση της σωστής λειτουργίας του αισθητήρα, πρέπει πρώτον όταν ολοκληρώνονται οι μετρήσεις ο αισθητήρας να αποσυνδέεται από τον μετασχηματιστή και δεύτερον να αποθηκεύεται με τη γυάλινη μεμβράνη βυθισμένη σε ένα διάλυμα με ουδέτερο pH, όπως περιεγράφηκε στην ενότητα 2.2.2.2. Στο άκρο του αισθητήρα βιδώνεται ένα πλαστικό

φιαλίδιο, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω, οπότε γεμίζοντας αυτό με ουδέτερο διάλυμα κατά την αποθήκευση και μη χρήση του αισθητήρα σιγουρεύεται η αντοχή του στο χρόνο.



Σχήμα 46: Περιεχόμενα συσκευασίας αισθητήρα pH [29]

Ο αισθητήρας αρχικά στέλνει στον μετασχηματιστή τις μετρήσεις του με τη μορφή τάσης και συγκεκριμένα σε Millivolts. Στη συνέχεια, προγραμματίζοντας κατάλληλα το Arduino μετατρέπονται αυτές οι τιμές τάσης σε τιμές pH. Η αντιστοιχία τάσης και pH φαίνεται στο σχήμα 48. Ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει τιμές pH από 0 έως 14 με απόκλιση μέτρησης ± 0.1 στους 25°C. Μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασία από 5°C έως 60°C. Όταν ο αισθητήρας τοποθετείται στο διάλυμα προς μέτρηση, έχει ένα χρόνο απόκρισης περίπου ενός λεπτού, μέχρις ότου σταθεροποιηθούν οι μετρήσεις που δίνει και λαμβάνεται σωστό αποτέλεσμα. Ανάλογα με τη συχνότητα χρήσης του, ο αισθητήρας έχει όριο ζωής περίπου μισό χρόνο. Συνεπώς δεν προτείνεται για συνεχόμενη χρήση, αλλά για λήψη μεμονωμένων μετρήσεων στο εργαστήριο.



Σχήμα 47: Συνδεσμολογία του αισθητήρα pH με τον μετασχηματιστή και το Arduino [30]

VOLTAGE (mV)	pH value	VOLTAGE (mV)	pH value
414.12	0.00	-414.12	14.00
354.96	1.00	-354.96	13.00
295.80	2.00	-295.80	12.00
236.64	3.00	-236.64	11.00
177.48	4.00	-177.48	10.00
118.32	5.00	-118.32	9.00
59.16	6.00	-59.16	8.00
0.00	7.00	0.00	7.00

Σχήμα 48: Αντιστοιχία τάσης και pH [30]

Όπως έχει αναλυθεί και στη θεωρία, υπάρχει μια εξάρτηση της τιμής του pH με τη θερμοκρασία του δείγματος. Αν δεν μπορεί να μετρηθεί η ακριβής θερμοκρασία ενός διαλύματος, μπορεί στον κώδικα να θεωρηθεί θερμοκρασία δωματίου και να μπει σαν σταθερά στους 25°C. Ωστόσο, αφού στο σύστημα της συγκεκριμένης εργασίας συμπεριλαμβάνεται και αισθητήρας θερμοκρασίας, θα ληφθεί υπόψιν και στον κώδικα, ο οποίος παρατίθεται και επεξηγείται παρακάτω, σε γλώσσα προγραμματισμού C.

Αρχικά, δηλώνονται οι βιβλιοθήκες που περιέχουν τις απαραίτητες για τη σωστή λειτουργία του κώδικα συναρτήσεις, καθώς και ο ακροδέκτης A5 του Arduino στον οποίο θα συνδεθεί το ένα καλώδιο από τον μετασχηματιστή για μεταφορά σήματος. Ορίζεται ακόμα ο ακροδέκτης στον οποίο συνδέεται ο αισθητήρας θερμοκρασίας (D2) και οι μεταβλητές για τη τάση, την τιμή pH και τη θερμοκρασία. Η συνάρτηση setup() εγκαθιστά τη σειριακή επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή, καθορίζει τον ρυθμό Baud με τον οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις και ξεκινά τη λειτουργία του αισθητήρα pH.

```
#include "DFRobot_PH.h"
#include <EEPROM.h>
#include <OneWire.h>

#define PH_PIN A5
float voltage_ph, pHValue, temperature;
DFRobot_PH ph;
int DS18S20_Pin = 2; //DS18S20 Signal pin on digital 2

//Temperature chip i/o
OneWire ds(DS18S20_Pin); // on digital pin 2

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  ph.begin();
}
```

Στη συνέχεια, η κύρια συνάρτηση loop() τρέχει συνεχόμενα μέχρι να αποσυνδεθεί το σύστημα. Η συνάρτηση millis() επιστρέφει τον αριθμό των milliseconds που έχουν περάσει από όταν το Arduino ξεκίνησε να τρέχει το πρόγραμμα. Με τη δομή της if, η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται ως χρονόμετρο που στέλνει στο Serial Monitor τις μετρούμενες τιμές κάθε ένα δευτερόλεπτο. Η τάση του αισθητήρα pH διαιρείται με 1024 γιατί το εύρος των λαμβανόμενων αναλογικών τιμών είναι 0-1024 και η τάση είναι 5000mV. Στη συνέχεια καλούνται οι συναρτήσεις getTemp και ph.readPH που επιστρέφουν τις τιμές της θερμοκρασίας και του pH. Η ph.readPH δέχεται σαν ορίσματα την τάση που δείχνει ο αισθητήρας και τη θερμοκρασία που έχει υπολογισθεί από τη getTemp. Μετά τυπώνονται τα αποτελέσματα με τα κατάλληλα μηνύματα στο Serial Monitor. Η συνάρτηση ph.calibration αφορά τη βαθμονόμηση του αισθητήρα, η οποία αναλύεται περαιτέρω παρακάτω.

```
void loop()
{
  static unsigned long timepoint = millis();
  if(millis()-timepoint>1000U) //time interval: 1s
  {
    timepoint = millis();
    voltage_ph = analogRead(PH_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage_ph
  }
}
```

```

    temperature = getTemp(); // read your temperature sensor to execute
temperature compensation
    pHValue = ph.readPH(voltage_ph,temperature); // convert voltage_ph to pH
with temperature compensation
    Serial.print("temperature:");
    Serial.print(temperature,1);
    Serial.print("^C  pH:");
    Serial.println(pHValue,2);
}
ph.calibration(voltage_ph,temperature); // calibration process by Serail CMD
}

```

Τέλος, παρατίθεται η συνάρτηση getTemp που έχει αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα.

```

float getTemp(){
//returns the temperature from one DS18S20 in DEG Celsius

byte data[12];
byte addr[8];

if ( !ds.search(addr)) {
//no more sensors on chain, reset search
ds.reset_search();
return -1000;
}

if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) {
Serial.println("CRC is not valid!");
return -1000;
}

if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
Serial.print("Device is not recognized");
return -1000;
}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44,1); // start conversion, with parasite power on at the end

byte present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0xBE); // Read Scratchpad

for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
data[i] = ds.read();
}

ds.reset_search();
byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];

float tempRead = ((MSB << 8) | LSB); //using two's compliment
float TemperatureSum = tempRead / 16;

return TemperatureSum;
}

```


Για να διασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων, ο αισθητήρας χρειάζεται να βαθμονομείται πριν τη πρώτη χρήση και όταν δεν έχει χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο πιο εύκολος τρόπος είναι η βαθμονόμηση δύο σημείων με τη χρήση των δύο διαλυμάτων που βρισκόντουσαν στη συσκευασία, με τιμές pH 4.0 και 7.0. Αρχικά πρέπει να γραφτεί και να περαστεί ο κώδικας στο Arduino, ώστε να φαίνονται τα αποτελέσματα στο Serial Monitor. Ο αισθητήρας πρέπει να καθαριστεί με απιονισμένο νερό και να απορροφηθεί η υπολειπόμενη υγρασία με μαλακό πανί. Στη συνέχεια ο αισθητήρας τοποθετείται στο διάλυμα με τιμή 7.0 pH μέχρις ότου σταθεροποιηθούν οι μετρούμενες τιμές. Αφού σταθεροποιηθούν, εισάγεται η εντολή ENTERPH στην οθόνη για είσοδο στη λειτουργία βαθμονόμησης. Θα εμφανισθεί στην οθόνη το μήνυμα “Please put the probe into the 4.0 or 7.0 standard buffer solution”. Στη συνέχεια εισάγεται η εντολή CALPH για να αναγνωρίσει το πρόγραμμα αυτόματα ποιο από τα δύο διαλύματα είναι παρόντα και να ρυθμιστεί η τιμή ανάλογα. Έπειτα εισάγεται η εντολή EXITPH για να αποθηκευτούν οι σχετικές παράμετροι και να ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση του πρώτου σημείου. Μετά καθαρίζεται ο αισθητήρας και εισάγεται στο διάλυμα με τιμή 4.0 pH για να επαναληφθεί η παραπάνω διαδικασία με τις ίδιες εντολές και να ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση.

3.1.5 Αισθητήρας αγωγιμότητας

Ο αισθητήρας αγωγιμότητας που επιλέχθηκε για αυτή την εργασία είναι ο Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor/Meter for Arduino (DFR0300), της εταιρίας DFROBOT. Πρόκειται για έναν διπολικό αισθητήρα (δύο ηλεκτροδίων), με σταθερά κυττάρου 1.0.

Μέσα στη συσκευασία περιέχονται ο αισθητήρας, ο μετασχηματιστής για τη σύνδεση με το Arduino, τα καλώδια για τις συνδέσεις και τέσσερα διαλύματα με σταθερές τιμές αγωγιμότητας για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα (τα διαλύματα δεν συμπεριλαμβάνονται πάντα). Ο ρόλος του μετασχηματιστή είναι ο ίδιος με αυτόν στον αισθητήρα pH, να μειώνει τον θόρυβο των μετρήσεων και να μετατρέπει το σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό. Η σύνδεση του αισθητήρα με τον μετασχηματιστή και το Arduino είναι πανομοιότυπη με τον αισθητήρα pH, καθώς κατασκευάζονται από την ίδια εταιρία. Συνδέεται, δηλαδή, ο αισθητήρας με ομοαξονικό καλώδιο με τον μετασχηματιστή και στη συνέχεια ο μετασχηματιστής συνδέεται με τρία καλώδια με το Arduino, ένα για την τροφοδοσία των 5V, ένα για τη γείωση και ένα για τον αναλογικό ακροδέκτη που δέχεται το σήμα. Επειδή τα ηλεκτρόδια που είναι υπεύθυνα για τη λήψη μετρήσεων στην άκρη του αισθητήρα είναι

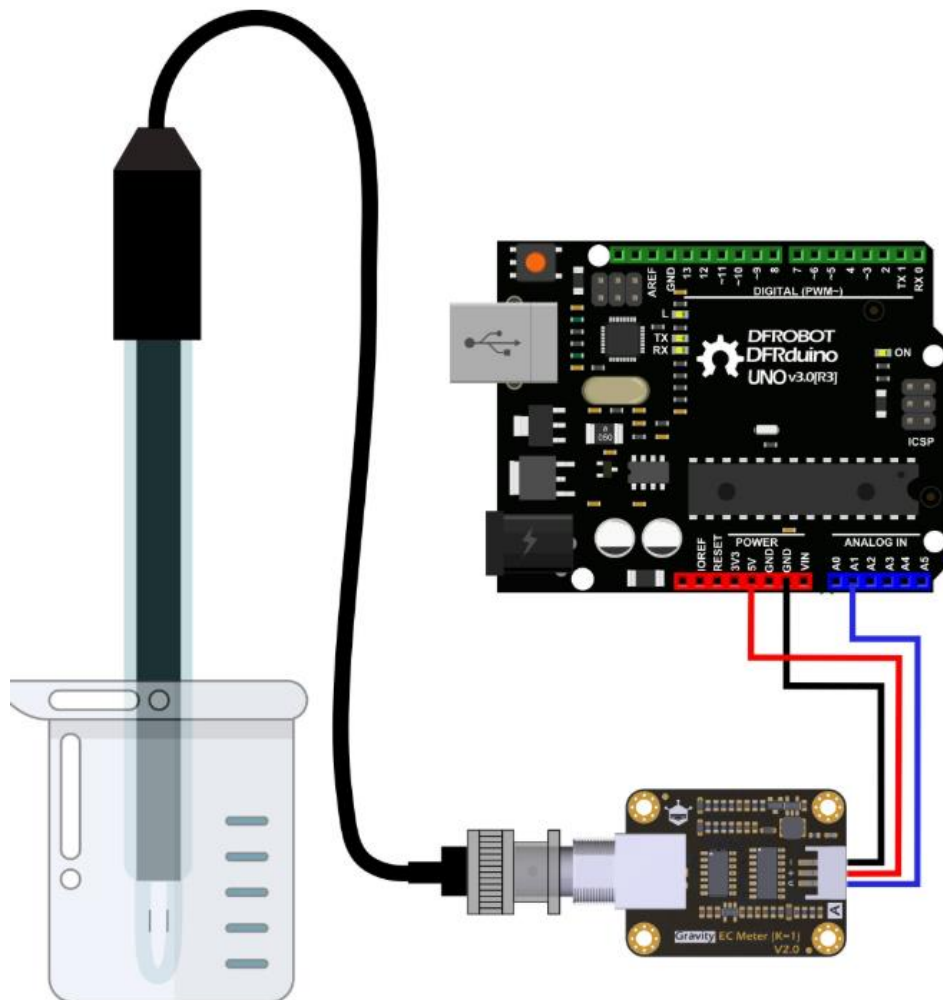
ευαίσθητα, βιδώνεται εκεί ένα πλαστικό καπάκι για την προστασία τους κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης του αισθητήρα. Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων του αισθητήρα, το άκρο πρέπει να καθαρίζεται με καθαρό νερό και να στεγνώνεται με μαλακό πανί για την αποφυγή φθοράς των ηλεκτροδίων. Ακόμα, όταν δεν χρησιμοποιείται ο αισθητήρας, πρέπει να αποσυνδέεται από τον μετασχηματιστή. Τέλος, ο αισθητήρας δεν πρέπει να παραμένει βυθισμένος σε υγρό μόνιμα, συνεπώς ενδείκνυται περισσότερο για εργαστηριακή χρήση και όχι για παρατεταμένη λήψη μετρήσεων.



Σχήμα 49: Η συσκευασία και τα περιεχόμενα του αισθητήρα [31]

Όπως και στον αισθητήρα pH, ο αισθητήρας αρχικά στέλνει τις μετρήσεις με τη μορφή τάσης και προγραμματίζοντας κατάλληλα το Arduino μετατρέπονται σε μετρήσεις αγωγιμότητας (mS/cm). Ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει από 0 έως 20 mS/cm, κάτι που είναι λογικό λόγω της σταθεράς κυττάρου (1.0) και συγκρίνοντάς τη με το σχήμα 26. Αν οι μετρήσεις ενδέχεται να παρουσιάσουν αγωγιμότητες εκτός αυτών των ορίων, θα χρειαστεί αισθητήρας αγωγιμότητας με διαφορετικές προδιαγραφές. Το εύρος θερμοκρασίας όπου λειτουργεί ο αισθητήρας είναι 0°C – 40°C. Καθώς η θερμοκρασία επηρεάζει την τιμή της μετρούμενης αγωγιμότητας, στο σύστημα συμπεριλαμβάνεται και αισθητήρας θερμοκρασίας, ώστε να δίνονται όσο πιο ακριβείς μετρήσεις γίνεται. Αν δεν υπήρχε ο αισθητήρας θερμοκρασίας στο σύστημα, ένας τρόπος λήψης μετρήσεων με μικρό σφάλμα

είναι η μέτρηση σε θερμοκρασία δωματίου, περίπου 25°C. Όταν ο αισθητήρας τοποθετείται στο διάλυμα προς μέτρηση, έχει ένα χρόνο απόκρισης περίπου ενός λεπτού, μέχρις ότου σταθεροποιηθούν οι μετρήσεις που δίνει και λαμβάνεται σωστό αποτέλεσμα. Ανάλογα με τη συχνότητα χρήσης του, ο αισθητήρας έχει όριο ζωής περίπου μισό χρόνο.



Σχήμα 50: Συνδεσμολογία του αισθητήρα αγωγιμότητας με τον μετασχηματιστή και το Arduino [33]

Ο κώδικας (γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού C), είναι και αυτός όμοιος με του αισθητήρα pH. Αρχικά δηλώνονται οι βιβλιοθήκες, οι ακροδέκτες του Arduino στους οποίους συνδέονται οι αισθητήρες, οι μεταβλητές για την τάση, την αγωγιμότητα και τη θερμοκρασία, η σειριακή επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή και ο ρυθμός Baud των μετρήσεων.

```
#include "DFRobot_EC.h"  
#include <EEPROM.h>  
#include <OneWire.h>  
  
#define EC_PIN A2  
float voltage_ec, ecValue, temperature;  
DFRobot_EC ec;
```

```

int DS18S20_Pin = 2; //DS18S20 Signal pin on digital 2 for temperature

//Temperature chip i/o
OneWire ds(DS18S20_Pin); // on digital pin 2

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  ec.begin();
}

```

Η συνάρτηση loop() καλεί τις αντίστοιχες συναρτήσεις για να επιστραφούν και να εκτυπωθούν στο Serial Monitor οι τιμές της θερμοκρασίας και της αγωγιμότητας κάθε ένα δευτερόλεπτο. Η συνάρτηση getTemp είναι η ίδια που έχει αναλυθεί παραπάνω, οπότε δεν συμπεριλαμβάνεται παρακάτω (στο περιβάλλον του Arduino πρέπει ωστόσο να γραφεί στο ίδιο αρχείο).

```

void loop()
{
  static unsigned long timepoint = millis();
  if(millis()-timepoint>1000U) //time interval: 1s
  {
    timepoint = millis();
    voltage_ec = analogRead(EC_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage_ec
    temperature = getTemp(); // read your temperature sensor to execute
    temperature compensation
    ecValue = ec.readEC(voltage_ec,temperature); // convert voltage_ec to EC
    with temperature compensation
    Serial.print("temperature:");
    Serial.print(temperature,1);
    Serial.print("^C EC:");
    Serial.print(ecValue,2);
    Serial.println("ms/cm");
  }
  ec.calibration(voltage_ec,temperature); // calibration process by Serial CMD
}

```

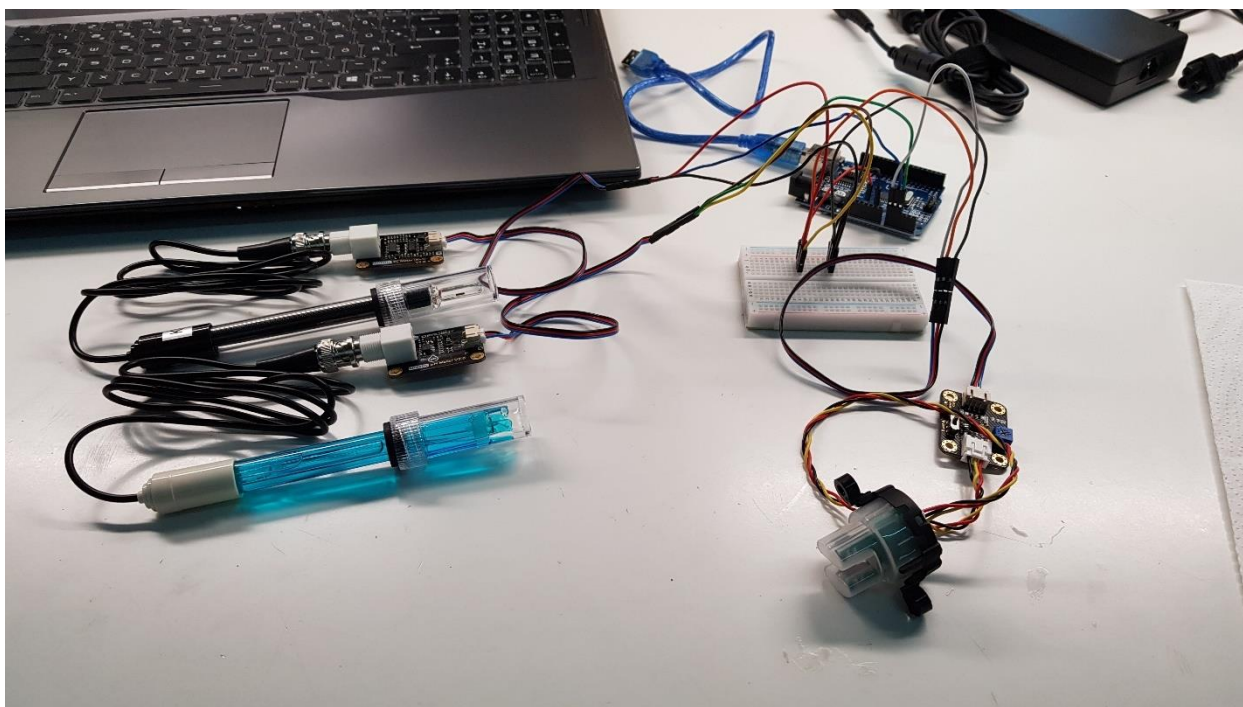
Η βαθμονόμηση του αισθητήρα αγωγιμότητας γίνεται με τον ίδιο τρόπο με τον αισθητήρα pH, με τη διαφορά ότι οι εντολές που εισάγονται σε κάθε βήμα είναι οι ENTEREC, CALEC και EXITEC. Στη περίπτωση που τα διαλύματα βαθμονόμησης δεν περιλαμβάνονται στη συσκευασία, μπορούν να αγοραστούν ανεξάρτητα από τρίτο πωλητή ή να γίνει βαθμονόμηση ενός σημείου, χρησιμοποιώντας ένα διάλυμα του οποίου η τιμή είναι γνωστή.

3.2 Πακετάρισμα του συστήματος αισθητήρων

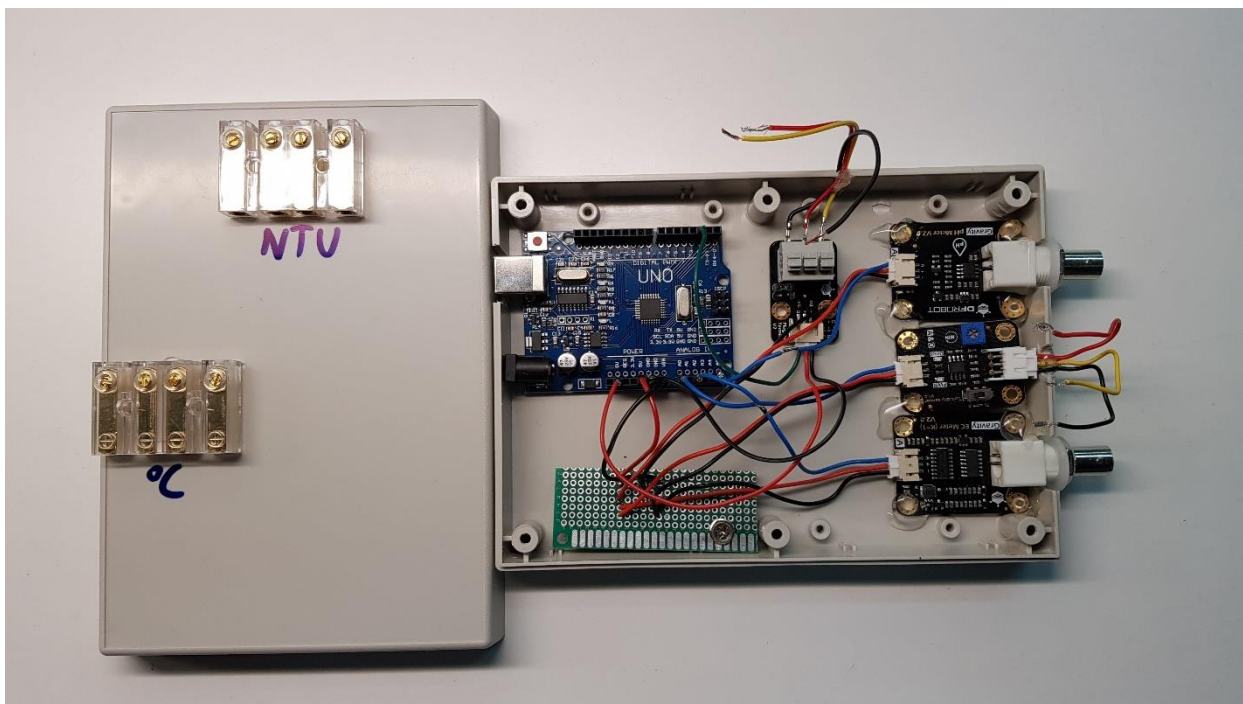
Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα εύχρηστο σύστημα, είναι αναγκαίο να κατασκευασθούν δύο επιμέρους τμήματα: ένα κουτί στο οποίο θα τοποθετηθούν ο μικροελεγκτής και όλες οι επιμέρους πλακέτες των μετασχηματιστών και όπου θα γίνουν οι απαραίτητες συνδέσεις μεταξύ τους, και ένα δοχείο όπου θα τοποθετηθούν όλοι αισθητήρες καθώς και το δείγμα του νερού προς μέτρηση. Τα δύο μέρη θα μπορούν να αποσπώνται μεταξύ τους, ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά και η αποθήκευσή τους.

Για την τοποθέτηση του Arduino και των πλακετών αγοράστηκε ένα μικρό κουτί διαστάσεων $176 \times 126 \times 57$ mm. Στις πλαϊνές όψεις ανοίχθηκαν οπές κατάλληλου μεγέθους για να περνάνε το καλώδιο USB που συνδέεται με τον υπολογιστή, καθώς και τα καλώδια που συνδέουν τους μετασχηματιστές με τους αισθητήρες (σχ. 51). Οι πλακέτες κολλήθηκαν πάνω στο κουτί με τη χρήση ζεστής κόλλας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν δεν χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες, πρέπει να είναι αποσυνδεδεμένοι από τις πλακέτες. Για τους αισθητήρες pH και αγωγιμότητας είναι απλό, καθώς χρησιμοποιούν συνδέσεις τύπου BNC. Για τους αισθητήρες θολότητας και θερμοκρασίας τοποθετήθηκαν και κολλήθηκαν στο πάνω μέρος του κουτιού δύο κλέμες διακλάδωσης καλωδίων, στις οποίες από τη μία πλευρά εισέρχονται τα τρία καλώδια που εξέρχονται από τις πλακέτες και στην άλλη πλευρά τα τρία καλώδια από τους αισθητήρες. Έτσι, τα δύο συστήματα αποσπώνται μεταξύ τους αποσυνδέοντας τις τέσσερις αυτές ενώσεις. Τέλος, δίπλα σε κάθε ένωση αναγράφεται και ο αισθητήρας με τον οποίο αντιστοιχεί (NTU για τη θολότητα, °C για τη θερμοκρασία, pH, και EC για την αγωγιμότητα), ώστε ακόμα και κάποιος χρήστης χωρίς προηγούμενη γνώση της δομής του συστήματος να μπορεί εύκολα να αναγνωρίσει ποιοι αισθητήρες συνδέονται σε ποιες ενώσεις.

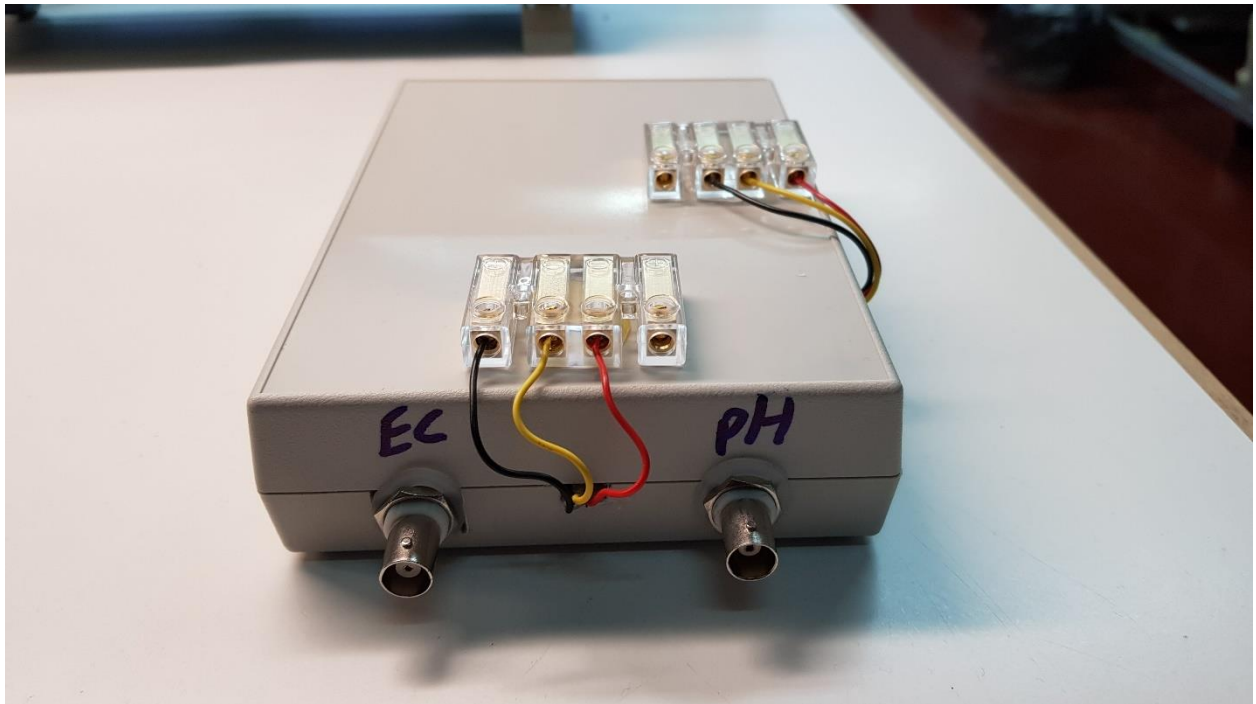
Για τις συνδεσμολογίες στο εσωτερικό του κουτιού, τοποθετήθηκε και μια μικρή πλακέτα όπου έχουν γίνει οι βραχυκυκλώσεις των καλωδίων που οδηγούνται στην τροφοδοσία και τη γείωση του Arduino, καθώς οι ακροδέκτες αυτοί είναι περιορισμένοι σε αριθμό.



Σχήμα 51: Η συνδεσμολογία των αισθητήρων με το Arduino για τον προγραμματισμό και τον έλεγχο της λειτουργίας τους



Σχήμα 52: Οι πλακέτες και το Arduino τοποθετημένα μέσα στο κουτί



Σχήμα 53: Πρόσοψη του τελικού κουτιού



Σχήμα 54: Πλαϊνή όψη του τελικού κουτιού

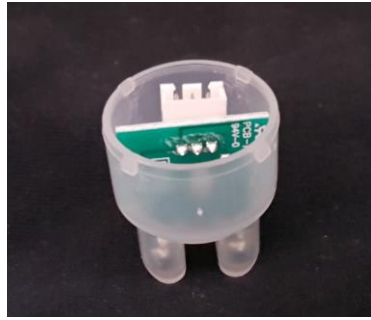
Μία παρατήρηση για τις δύο κλέμες στο πάνω μέρος του κουτιού είναι ότι προφανώς έχουν τέσσερις υποδοχές καλωδίων. Η μία υποδοχή έχει μείνει κενή, ώστε αν κάποιος συνδέσει την άλλη πλευρά ανάποδα να μην κλείσει το κύκλωμα και να αποφευχθεί βλάβη στους αισθητήρες.

Για την τοποθέτηση των αισθητήρων και του δείγματος νερού προς μέτρηση επιλέχθηκε ένα κυλινδρικό δοχείο ύψους 13,5 cm και διαμέτρου 10 cm με αποσπώμενο καπάκι. Δημιουργήθηκαν στο καπάκι τέσσερις οπές από τις οποίες διέρχονται οι αισθητήρες για να λαμβάνουν μετρήσεις μέσα από το δοχείο. Ο αισθητήρας αγωγιμότητας έχει μήκος 145 mm, ο αισθητήρας pH 137 mm και για τον αισθητήρα θερμοκρασίας μπορεί να επεκταθεί το μήκος του καλωδίου του όσο χρειάζεται και να τοποθετηθεί ως αντίστοιχο ύψος με τους άλλους δύο αισθητήρες. Ο αισθητήρας θολότητας έχει κυλινδρικό σχήμα με ύψος 34mm και διάμετρο 28mm. Ωστόσο, όπως ειπώθηκε και στην ενότητα 3.1.2, μόνο το κάτω μέρος του αισθητήρα είναι αδιάβροχο. Για να είναι πιο έγκυρες οι μετρήσεις της ποιότητας του νερού, θα πρέπει και οι τέσσερις αισθητήρες να λαμβάνουν μετρήσεις όσο γίνεται κοντινά μεταξύ τους μέσα στο νερό. Θα πρέπει, συνεπώς, να στεγανοποιηθεί ο αισθητήρας θολότητας ώστε να βυθίζεται μέχρι το σημείο που βρίσκονται και οι υπόλοιποι αισθητήρες.

Το πρόβλημα με τη στεγανοποίηση του αισθητήρα θολότητας είναι το μαύρο καπάκι στο πάνω μέρος του και το περίεργο σχήμα του. Ο λόγος ύπαρξης αυτού του καπακιού, πέρα από το να καλύπτει το πάνω μέρος του αισθητήρα, είναι να βοηθάει στην πλεύση του αισθητήρα πάνω στο νερό, κάτι που εδώ δεν χρειάζεται. Αποφασίστηκε, λοιπόν, στο εργαστήριο να αφαιρεθεί το καπάκι αυτό και να βρεθεί τρόπος μόνωσης του λοιπού αισθητήρα με τη μορφή κάποιου σωλήνα. Μετά από έρευνα σε κατάστημα υδραυλικών, επιλέχθηκε λευκή εύκαμπτη μόνωση πάχους 9mm και διαμέτρου 28mm, η οποία χρησιμοποιείται για μόνωση εξωτερικών σωλήνων και προστασία από νερό, θερμότητα και ακτίνες UV.

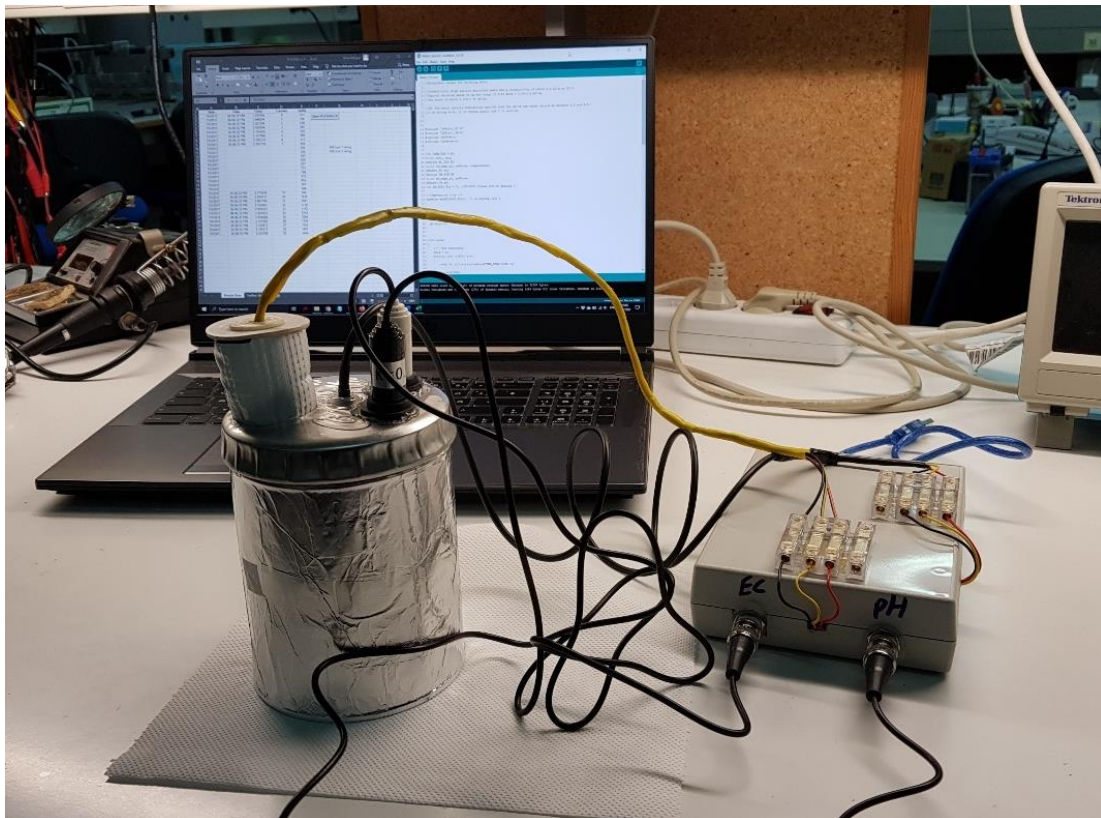


Σχήμα 55: Μονωτικό υλικό σωλήνων [33]

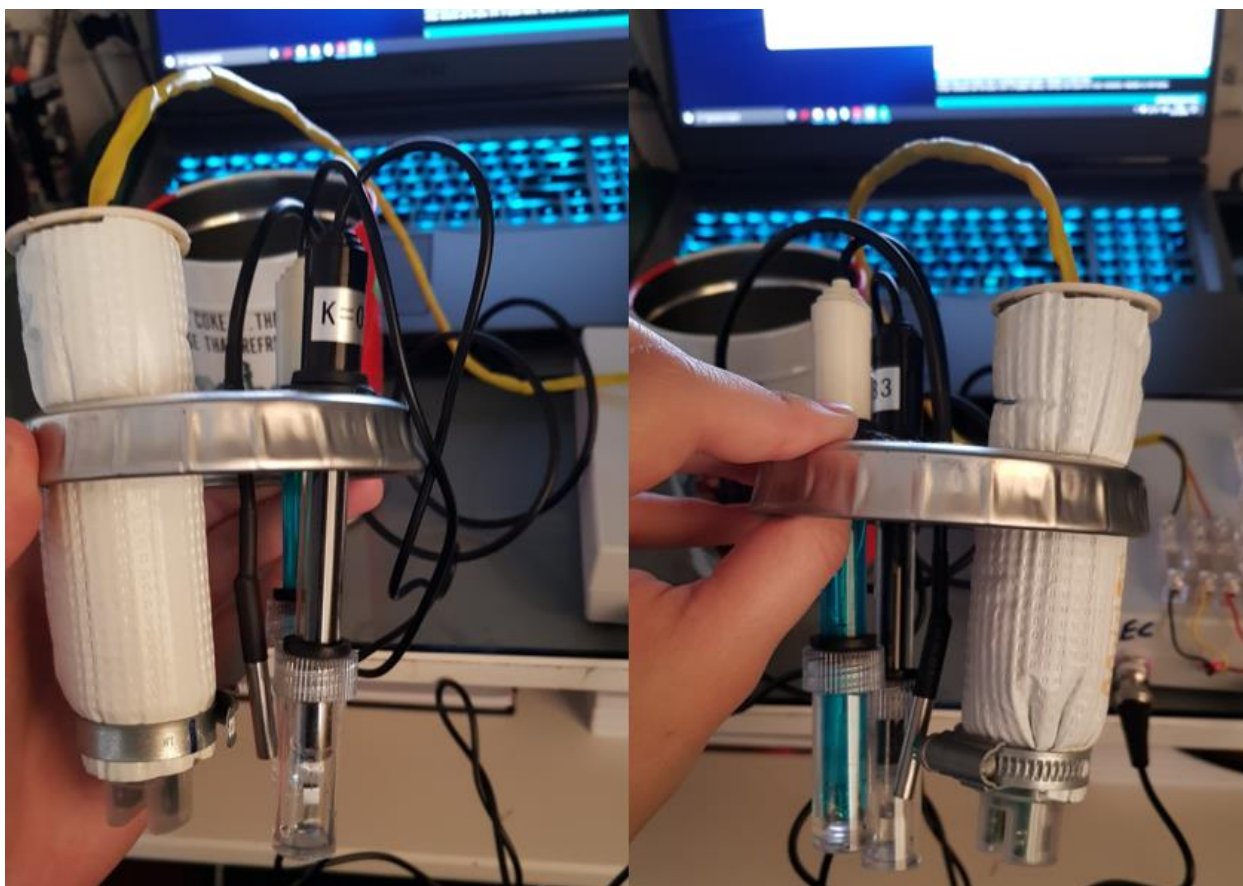


Σχήμα 56: Αισθητήρας θολότητας χωρίς το καπάκι

Έτσι, τυλίχθηκε η άκρη αυτού του υλικού στο άκρο του αισθητήρα θολότητας και, χρησιμοποιώντας έναν σφιγκτήρα σε μορφή μεταλλικού δαχτυλιδιού, στερεώθηκε πάνω στο πλαστικό μέρος του αισθητήρα. Έπειτα, έγινε επέκταση του καλωδίου του αισθητήρα αφαιρώντας την πλαστική μόνωση από κάθε ένα των τριών καλωδίων του και ενώνοντάς τα με συγκόλληση με χρήση καλαί, ώστε να φτάνει πιο εύκολα μέχρι το κουτί του μικροελεγκτή, περνώντας μέσα από το μονωτικό και φτάνοντας στη πλακέτα του αισθητήρα. Ανοίχτηκε, λοιπόν, στο καπάκι μια οπή διαμέτρου 24mm (αφού το μονωτικό υλικό είναι εύκαμπτο), μαζί με τις υπόλοιπες οπές διαμέτρων 12mm για τους αισθητήρες pH και αγωγιμότητας και 4mm για τον αισθητήρα θερμοκρασίας. Το τελικό αποτέλεσμα της τοποθέτησης των αισθητήρων στο καπάκι, του δοχείου και του συνολικού συστήματος φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 57: Ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων για μέτρηση ποιότητας νερού



Σχήμα 58: Το σύστημα των αισθητήρων στερεωμένο πάνω στο καπάκι του δοχείου από δύο όψεις

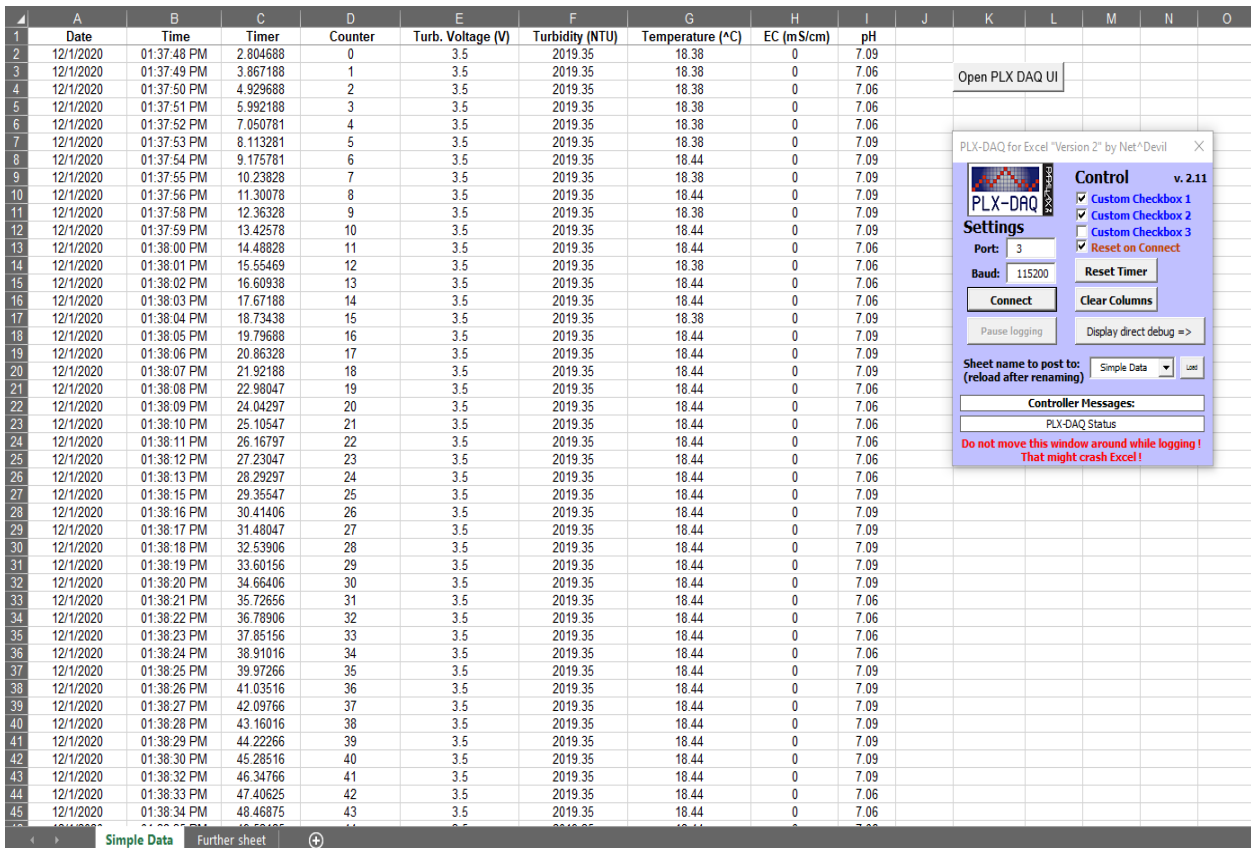
3.3 Συλλογή και αποθήκευση των μετρήσεων του συστήματος

Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκαν οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό του Arduino για κάθε έναν από τους τέσσερις αισθητήρες. Το πρώτο πρόβλημα είναι ότι πρέπει στο σύστημα αισθητήρων να στέλνουν όλοι οι αισθητήρες ταυτόχρονα μετρήσεις από κάθε δείγμα νερού και όχι μεμονωμένα. Συνεπώς, γράφεται ένας νέος κώδικας, όπου περιλαμβάνονται όλες οι απαραίτητες συναρτήσεις και εντολές για την παράλληλη λειτουργία των αισθητήρων. Το δεύτερο πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ότι με τον μέχρι τώρα σχεδιασμό του κώδικα, τα αποτελέσματα εμφανίζονται μόνο στο Serial Monitor του Arduino (σχ. 59). Εκεί όμως οι μετρήσεις δεν μπορούν να αποθηκευτούν και να επεξεργαστούν εύκολα, παρά μόνο αν τραβηχτεί κάποιο στιγμιότυπο της οθόνης. Επιλέχθηκε, λοιπόν, η χρήση του προγράμματος PLX-DAQ Version 2 (σχ. 60), το οποίο εισάγει στο πρόγραμμα Microsoft Excel μια κονσόλα χειρισμού του Arduino με τη μορφή μακροεντολών, ώστε όλες οι μετρήσεις να αποθηκεύονται με τη μορφή πινάκων απευθείας

σε αρχείο Excel και να καθίσταται εύκολη η επεξεργασία και η σχεδίαση γραφικών παραστάσεων με τις όποιες μετρήσεις επιλέγονται.

```
00:07:31.555 -> CW0000_neutralVoltage:1528.32
00:07:31.555 -> _acidVoltage:2001.95
00:07:31.695 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.94
00:07:33.978 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.81
00:07:35.160 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.75
00:07:36.303 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.75
00:07:37.476 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.75
00:07:38.649 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.72
00:07:39.788 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.66
00:07:40.964 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.66
00:07:42.138 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.66
00:07:43.281 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.66
00:07:44.463 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.63
00:07:45.608 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.57
00:07:46.781 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.57
00:07:47.961 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.60
00:07:49.105 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.60
00:07:50.283 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.57
00:07:51.426 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.54
00:07:52.605 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.54
00:07:53.781 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.4°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.57
00:07:54.926 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.3°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.57
00:07:56.099 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.4°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.51
00:07:57.276 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.4°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.47
00:07:58.418 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.4°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.51
00:07:59.593 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.4°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.54
00:08:00.767 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.4°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.54
00:08:01.900 -> Turb. sensor voltage:4.20 V, 0.00 NTU | temperature:19.4°C | EC:0.17ms/cm | pH:9.51
```

Σχήμα 59: Παράδειγμα εμφάνισης μετρήσεων στο Serial Monitor του Arduino



Σχήμα 60: Παράδειγμα αποθήκευσης μετρήσεων σε αρχείο Excel με χρήση του PLX-DAQ V2

Ο τελικός κώδικας για το σύστημα μέτρησης ποιότητας νερού αναλύεται παρακάτω.

Αρχικά, όπως και προηγουμένως, δηλώνονται οι βιβλιοθήκες, οι μεταβλητές και οι

ακροδέκτες του Arduino στους οποίους συνδέονται οι αισθητήρες. Οι αισθητήρες θολότητας, pH και αγωγιμότητας συνδέονται στους αναλογικούς ακροδέκτες A0, A5 και A2 αντίστοιχα, ενώ ο αισθητήρας θερμοκρασίας συνδέεται με τον ψηφιακό ακροδέκτη D2. Στη συνάρτηση setup() ξεκινά η σειριακή επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή, δηλώνεται ο ρυθμός Baud και ξεκινάει η λειτουργία των αισθητήρων. Η μία εντολή Serial.println έχει ως σκοπό τη διαγραφή οποιωνδήποτε στοιχείων υπήρχαν από πριν στο αρχείο Excel και η άλλη ορίζει εννέα στήλες στις οποίες αποθηκεύονται από κάτω οι μετρήσεις, με τις κατηγορίες να είναι: ημερομηνία, ώρα, χρονόμετρο, μετρητής, τάση αισθητήρα θολότητας, θολότητα σε NTU, θερμοκρασία, ηλεκτρική αγωγιμότητα σε mS/cm και τιμή pH.

```
#include "DFRobot_EC.h"
#include "DFRobot_PH.h"
#include <EEPROM.h>
#include <OneWire.h>

int TURB_PIN = A0;
float volt, ntu;
#define EC_PIN A2
float voltage_ec, ecValue, temperature;
DFRobot_EC ec;
#define PH_PIN A5
float voltage_ph, phValue;
DFRobot_PH ph;
int DS18S20_Pin = 2; //DS18S20 Signal pin on digital 2
int k;

//Temperature chip i/o
OneWire ds(DS18S20_Pin); // on digital pin 2

void setup(){
  Serial.begin(115200);
  ec.begin();
  ph.begin();

  Serial.println("CLEARDATA");

  // define 5 columns named "Date", "Time", "Timer", "Counter" and
  Serial.println("LABEL, Date, Time, Timer, Counter, Turb. Voltage (V), Turbidity
  (NTU), Temperature (^C), EC (mS/cm), pH");
}
```

Στη συνέχεια, η συνάρτηση loop() τρέχει συνεχόμενα μέχρι να αποσυνδεθεί το σύστημα από τον υπολογιστή. Η βασική δομή της είναι και πάλι ίδια με προηγουμένως, απλά έχουν συγκεντρωθεί οι εντολές για το κάλεσμα των κατάλληλων συναρτήσεων και την εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Η μόνη διαφορά είναι στην εντολή Serial.println, η οποία έχει τροποποιηθεί για να εμφανίσει τα δεδομένα στο αρχείο Excel, σύμφωνα με τη σειρά που ορίστηκε στο προηγούμενο τμήμα κώδικα.

```
void loop()
```

```

{
  //---for turbidity
  volt = 0;
  for(int i=0; i<800; i++)
  {
    volt += ((float)analogRead(TURB_PIN)/1023)*5;
  }
  volt = volt/800;
  volt = round_to_dp(volt,1);
  if(volt < 2.5){
    ntu = 3000;
  }else{
    ntu = -1120.4*square(volt)+5742.3*volt-4353.8;
  }

  //---for temperature, electrical conductivity and pH
  static unsigned long timepoint = millis();
  if(millis()-timepoint>1000U) //time interval: 1s
  {
    timepoint = millis();
    voltage_ec = analogRead(EC_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage_ec
    voltage_ph = analogRead(PH_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage_ph
    temperature = getTemp(); // read your temperature sensor to execute
    temperature compensation
    ecValue = ec.readEC(voltage_ec,temperature); // convert voltage_ec to EC
    with temperature compensation
    phValue = ph.readPH(voltage_ph,temperature); // convert voltage_ph to pH
    with temperature compensation

    Serial.println( (String) "DATA, DATE, TIME, TIMER," +k++ + "," + volt + ","
+ ntu + "," + temperature + "," + ecValue + "," + phValue + "," + ",AUTOSCROLL_40"
);
  }
  ec.calibration(voltage_ec,temperature);
  ph.calibration(voltage_ph,temperature);
}

```

Οι συναρτήσεις round_to_dp και getTemp έχουν ακριβώς την ίδια δομή με προηγουμένως, καθώς η λειτουργία τους είναι απλά να επιστρέψουν τις σωστές τιμές στον κύριο κώδικα που τις καλεί και όχι να εμφανίσουν κάποια μέτρηση.

```

float round_to_dp( float in_value, int decimal_place )
{
  float multiplier = powf( 10.0f, decimal_place );
  in_value = roundf( in_value * multiplier ) / multiplier;
  return in_value;
}

```

```

float getTemp(){
  //returns the temperature from one DS18S20 in DEG Celsius

  byte data[12];
  byte addr[8];

  if ( !ds.search(addr) ) {
    //no more sensors on chain, reset search
    ds.reset_search();
  }
}

```

```

    return -1000;
}

if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) {
    Serial.println("CRC is not valid!");
    return -1000;
}

if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
    Serial.print("Device is not recognized");
    return -1000;
}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44,1); // start conversion, with parasite power on at the end

byte present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0xBE); // Read Scratchpad

for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
    data[i] = ds.read();
}

ds.reset_search();

byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];

float tempRead = ((MSB << 8) | LSB); //using two's compliment
float TemperatureSum = tempRead / 16;

return TemperatureSum;
}

```

4 ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα για τρεις διαφορετικούς τύπους πειραμάτων, για τη μελέτη της λειτουργίας του συστήματος μέτρησης ποιότητας νερού που κατασκευάσθηκε, με σκοπό να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την απόδοση του συστήματος και την ποιότητα του σχεδιασμού και της ανάπτυξής του.

4.1 Λήψη μετρήσεων από διαφορετικά δείγματα νερού

4.1.1 Νερό βρύσης

Λήφθηκαν δείγματα από το νερό βρύσης σε δύο διαφορετικές περιοχές της Αθήνας, το πρώτο από το Εργαστήριο Αισθητήρων στο Ε.Μ.Π. στην περιοχή Ζωγράφου και το δεύτερο από βρύση κουζίνας στην περιοχή Ελληνικού. Παρακάτω παρατίθενται οι μέσοι όροι των μετρήσεων από τα δείγματα, με τους συνολικούς πίνακες να παρατίθενται στο Παράρτημα.

Πίνακας 2: Μέσοι όροι μετρήσεων νερού βρύσης

Δείγμα	Εργ. Αισθητήρων 9/1/2020	Βρύση Ελληνικού 8/1/2020
Θολότητα (NTU)	0	0
Θερμοκρασία (°C)	11.3	10.9
Αγωγιμότητα (mS/cm)	0.89	0.12
pH	9	7.8

Αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας [34],[35],[36] οι αποδεκτές τιμές για πόσιμο νερό βρύσης έχουν ως εξής: η θολότητα από 0 έως 5 NTU, η αγωγιμότητα από 0.05 έως 0.5 mS/cm και η τιμή του pH από 6.5 έως 9.5. Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές του πίνακα, το νερό στην περιοχή του Ελληνικού είναι εντός των αποδεκτών ορίων, ενώ η τιμή του pH στο Εργαστήριο Αισθητήρων είναι λίγο αυξημένη συγκριτικά και η αγωγιμότητα ξεπερνάει τα επιτρεπτά όρια, το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη περισσότερων αλάτων στο νερό σε σχέση με το δείγμα από την περιοχή Ελληνικού, καθώς και την πιθανή κακή συντήρηση των σωλήνων που διοχετεύουν το νερό.

4.1.2 Εμφιαλωμένο νερό

Λήφθηκαν δείγματα από τρεις διαφορετικούς τύπους εμφιαλωμένου νερού για σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ τους: επιτραπέζιο, φυσικό μεταλλικό και νερό πηγής. Οι διαφορές τους παρουσιάζονται στην προέλευση του νερού και στον τρόπο επεξεργασίας. Το επιτραπέζιο μπορεί να είναι οποιασδήποτε προέλευσης (λίμνη, ποτάμι, γεώτρηση, δίκτυο ύδρευσης), το φυσικό μεταλλικό προέρχεται υποχρεωτικά από υπόγεια πηγή και το νερό πηγής προέρχεται και αυτό από υπόγεια πηγή αλλά δεν επιδέχεται καμία επεξεργασία απολύμανσης και δεν πρέπει να περιέχει υψηλές ποσότητες μετάλλων και ιχνοστοιχείων, σε αντίθεση με το φυσικό μεταλλικό νερό. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων που έγιναν, με τους πίνακες των αναλυτικών μετρήσεων να βρίσκονται στο παράρτημα.

Πίνακας 3: Μέσοι όροι μετρήσεων δειγμάτων εμφιαλωμένου νερού

Δείγμα νερού	Επιτραπέζιο	Φυσικό μεταλλικό	Πηγής
Θολότητα (NTU)	0	0	0
Θερμοκρασία (°C)	20	20	20
Αγωγιμότητα (mS/cm)	0.24	0.48	0.3
pH	8	7.3	7.5

Παρατηρείται πως το φυσικό μεταλλικό νερό έχει αυξημένη τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας, το οποίο είναι λογικό, λόγω της παρουσίας περισσότερων μεταλλικών στοιχείων, όπως είναι το μαγνήσιο, το κάλλιο, το ασβέστιο και άλλα. Και τα τρία δείγματα, βέβαια, εξακολουθούν να βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Μια άλλη σημαντική παρατήρηση, είναι ότι οι τιμές των μετρήσεων που ελήφθησαν είναι αρκετά κοντά στις αναγραφόμενες τιμές πάνω στις ετικέτες των μπουκαλιών.

4.1.3 Νερό θάλασσας

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: πρώτα ελήφθη ένα δείγμα θαλασσινού νερού από μια παραλία στην περιοχή της Βουλιαγμένης και στη συνέχεια τοποθετήθηκε στο δοχείο του συστήματος αισθητήρων για να γίνουν οι μετρήσεις. Το σημείο όπου πάρθηκε το δείγμα ήταν σχετικά βραχώδες, συνεπώς το νερό ήταν αρκετά καθαρό, οπότε η τιμή της θολότητας που μετρήθηκε ήταν 0 NTU. Η θερμοκρασία που έδειξε ο αισθητήρας

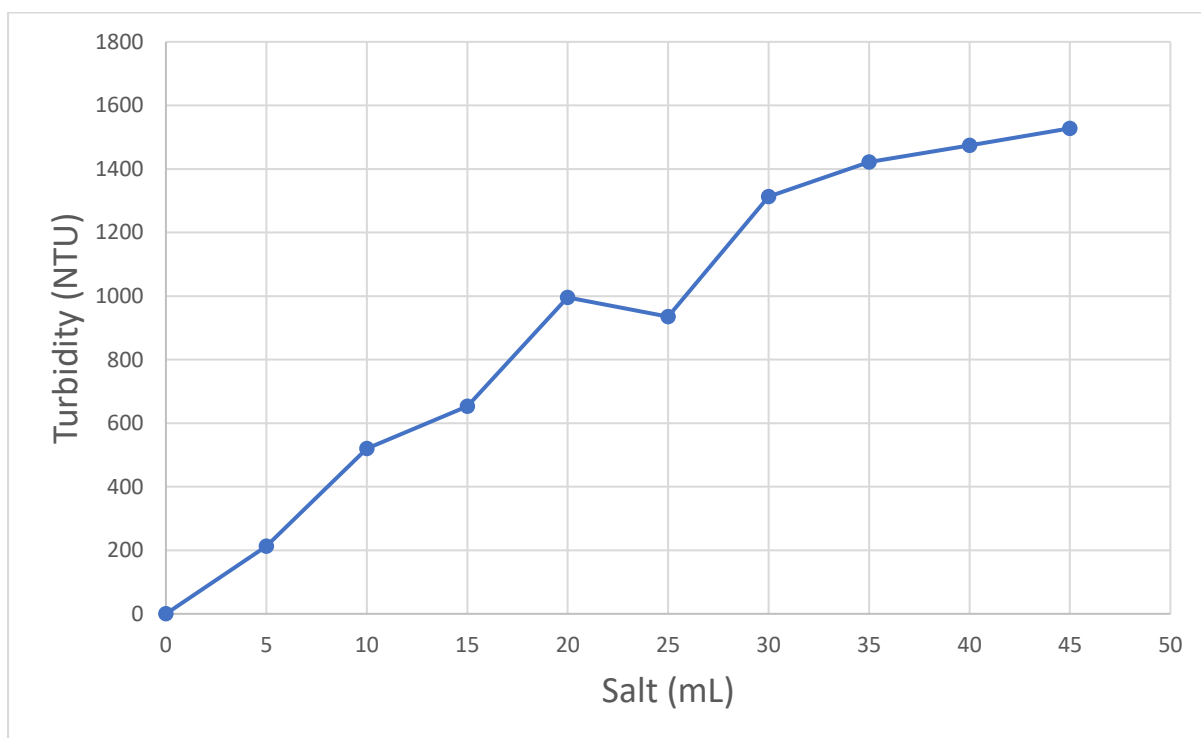
θερμοκρασίας δεν ήταν ισοδύναμη με αυτή της θάλασσας όταν λήφθηκε το δείγμα, καθώς οι μετρήσεις έγιναν μετά από ώρα σε εσωτερικό χώρο, συνεπώς η μέτρηση ήταν 19.3°C (κατά μέσο όρο). Ο αισθητήρας αγωγιμότητας έδειξε κατά μέσο όρο τιμή 24.3 mS/cm, το οποίο απέχει πολύ από τις συνήθεις τιμές αγωγιμότητας του θαλασσινού νερού, που κυμαίνονται στα 5 S/m ή ισοδύναμα, στα 50 mS/cm. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.1.5, ο αισθητήρας αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία έχει εύρος τιμών 0-20 mS/cm, συνεπώς δεν μπορεί να δείξει τη σωστή τιμή της αγωγιμότητας του θαλασσινού νερού. Για να γίνει σωστά αυτή η μέτρηση, χρειάζεται είτε ένας αισθητήρας με σταθερά κυττάρου $K=10$, ο οποίος έχει εύρος μετρήσεων 10-100 mS/cm, ή η αγορά πιο ακριβών αισθητήρων, είτε με τέσσερα ηλεκτρόδια ή επαγωγικών. Τέλος, η τιμή του pH ήταν κατά μέσο όρο στα 8.2, που είναι μέσα στο αποδεκτό εύρος για θαλασσινό νερό (7.5 – 8.4).

4.2 Αύξηση της ποσότητας αλατιού σε δείγμα νερού και παρακολούθηση των μεταβολών στις μετρήσεις

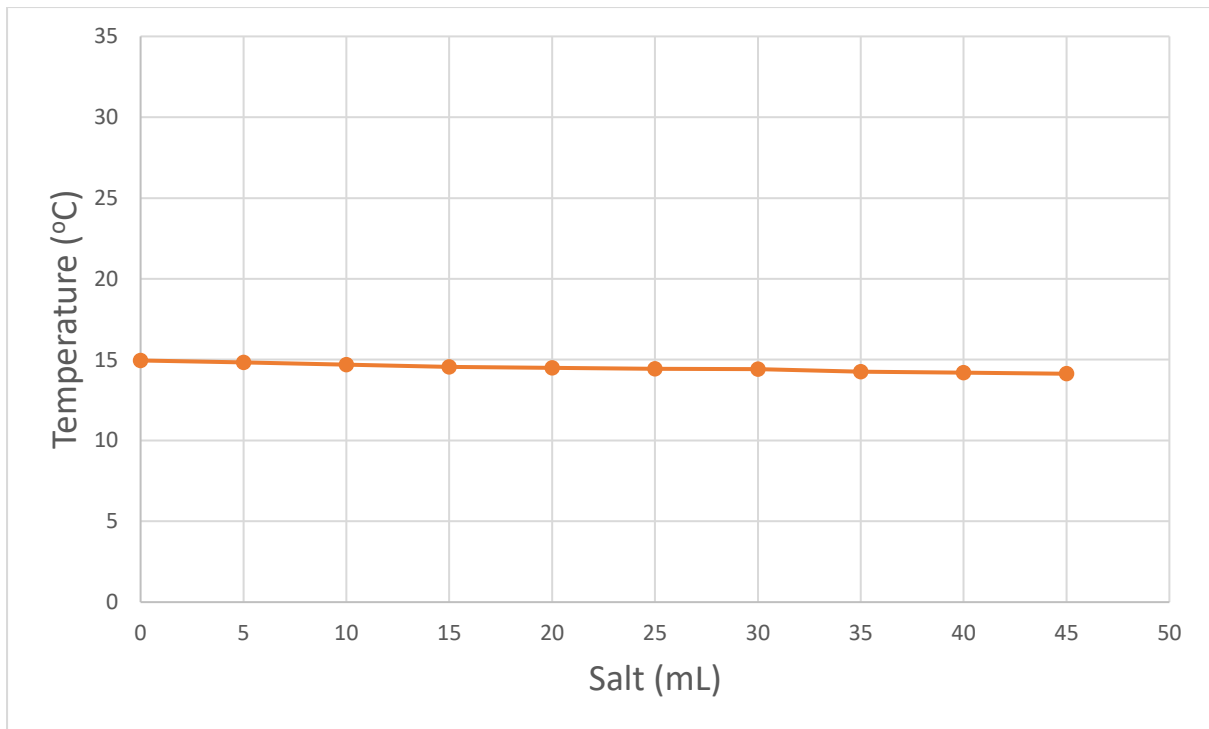
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για αυτό το πείραμα ήταν η εξής: τοποθετήθηκαν στο δοχείο του συστήματος αισθητήρων 0.6L νερού και μετρήθηκαν οι παράμετροί του, έως ότου σταθεροποιηθούν οι τιμές. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν στο δοχείο 5mL μαγειρικού αλατιού και ανακατεύθηκε το δείγμα ώστε να διαλυθεί πλήρως. Ελήφθησαν ακόμα εκατό μετρήσεις, μέχρι να κατασταλάξουν οι αισθητήρες σε κάποιες τιμές. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε, μέχρι οι μετρούμενες τιμές να μη μεταβάλλονται από την προσθήκη άλλης μίας δόσης αλατιού. Στην τελευταία επανάληψη της διαδικασίας, η ποσότητα αλατιού που είχε προστεθεί στο δείγμα συνολικά ήταν 45mL. Παρακάτω παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις με τις μεταβολές που υπέστησαν οι μετρήσεις της θολότητας, της θερμοκρασίας, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του pH, και ο πίνακας των μέσων όρων των μετρήσεων για κάθε δοσολογία αλατιού, με τον πίνακα με τις πιο αναλυτικές μετρήσεις να βρίσκεται στο παράρτημα. Φυσικά, προτού ξεκινήσει το πείραμα βαθμονομήθηκαν ξανά οι αισθητήρες, ώστε να δώσουν όσο το δυνατό ακριβείς μετρήσεις.

Πίνακας 4: Μέσοι όροι μετρήσεων για κάθε 5mL αλατιού

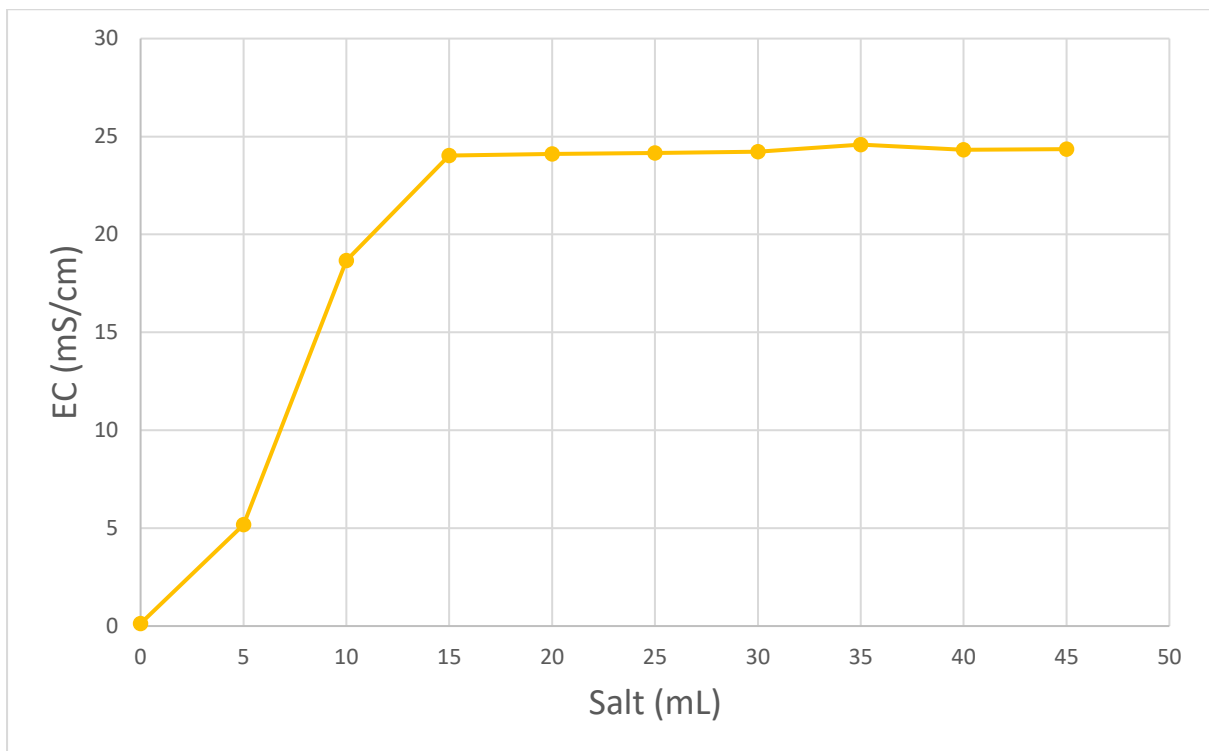
Ποσότητα Αλατιού (mL)	Θολότητα (NTU)	Θερμοκρασία (°C)	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (mS/cm)	pH
0	0	14.95	0.13	7.73
5	213.42	14.83	5.175	7.91
10	520.109	14.69	18.669	7.77
15	653.429	14.56	24.028	7.84
20	995.406	14.488	24.106	8.12
25	935.523	14.44	24.166	7.95
30	1312.727	14.416	24.224	7.63
35	1421.395	14.25	24.586	7.92
40	1474.609	14.19	24.319	8.21
45	1527.823	14.13	24.356	7.95



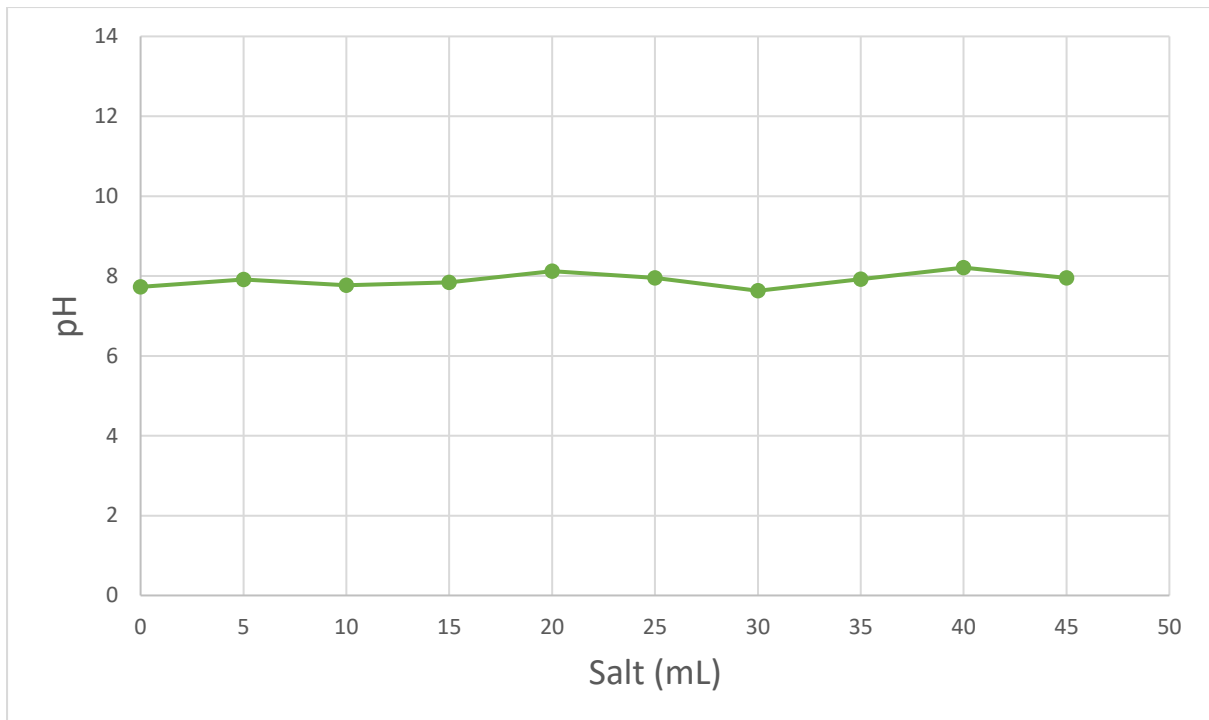
Σχήμα 61: Σχέση μεταξύ ποσότητας αλατιού και θολότητας



Σχήμα 62: Σχέση μεταξύ ποσότητας αλατιού και θερμοκρασίας



Σχήμα 63: Σχέση μεταξύ ποσότητας αλατιού και ηλεκτρικής αγωγιμότητας



Σχήμα 64: Σχέση μεταξύ ποσότητας αλατιού και pH

Στις τέσσερις γραφικές παραστάσεις πιο πάνω, φαίνονται οι παράμετροι ποιότητας νερού που μετρούνται από το σύστημα που κατασκευάστηκε για την εργασία, σε σχέση με την ποσότητα αλατιού που προστέθηκε βαθμιαία στο δείγμα.

Η θολότητα αυξήθηκε σταδιακά καθώς αυξανόταν η ποσότητα αλατιού, το οποίο ήταν και αναμενόμενο, αφού όσο περισσότερο αλάτι διαλύεται μέσα σε ένα δείγμα νερού, τόσο λιγότερο διαυγές γίνεται. Μια μικρή διακύμανση της θολότητας που παρατηρείται περίπου στα 25mL αλατιού, οφείλεται είτε στον αισθητήρα που, λόγω της μικρής του ακρίβειας, μπορεί να εμφανίζει λανθασμένες τιμές, ή στο γεγονός ότι, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας σε σχέση με το νερό, το διαλυμένο αλάτι μετά από λίγη ώρα κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου, οπότε στο σημείο που βρίσκεται ο αισθητήρας δείχνει χαμηλότερη θολότητα.

Η θερμοκρασία του νερού παρουσίασε μια μικρή μείωση, το οποίο είναι λογικό, καθώς όταν διαλύεται το αλάτι στο νερό, διασπάται σε νάτριο και ιόντα χλωρίου, που είναι μια ενδόθερμη αντίδραση. Η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική, συνεπώς η μέση θερμοκρασία του διαλύματος πέφτει ελαφρώς.

Η παράμετρος, της οποίας η τιμή είναι λογικό να επηρεαστεί περισσότερο είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, καθώς συνδέεται άμεσα με την παρουσία ιόντων αλάτων και άλλων στοιχείων στο νερό. Από το σχήμα 55 φαίνεται, λοιπόν, πως η αγωγιμότητα αυξήθηκε

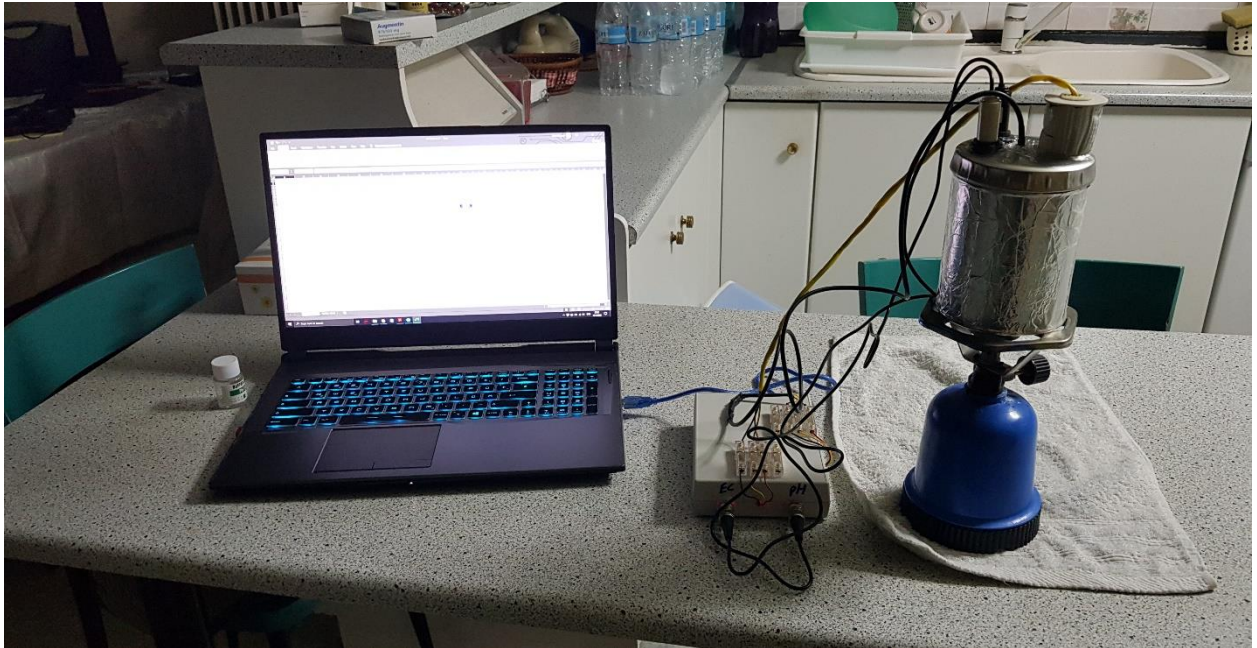
απότομα από την εισαγωγή αλατιού, το οποίο συνάδει με τις θεωρητικές προσδοκίες του πειράματος. Ωστόσο, παρατηρείται ακόμα πως μετά τα 15mL αλατιού η αγωγιμότητα σταματάει να αυξάνεται και διατηρεί σταθερές τιμές. Αυτό, όπως και οι μετρήσεις του θαλασσινού νερού, οφείλεται στο εύρος του αισθητήρα αγωγιμότητας που επιλέχθηκε, το οποίο είναι 0-20 mS/cm. Με την προσθήκη 45mL αλατιού σε 0.6L νερού, η μετρούμενη αγωγιμότητα θα έπρεπε να είχε ξεπεράσει τα 50 mS/cm (συνήθης αγωγιμότητα θαλασσινού νερού), καθώς ένα λίτρο θαλασσινού νερού περιέχει κατά μέσο όρο 35 mg αλατιού, το οποίο ισοδυναμεί με 28.75 mL. Για να μετρηθεί πιο καλά νερό με τέτοια ποσοστά αλμυρότητας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί είτε διπολικός τύπος αισθητήρα ηλεκτρικής αγωγιμότητας με σταθερά κυττάρου $K=10$, ή να επιλεγθούν άλλοι τύποι, όπως είναι οι τετραπολικοί και οι επαγωγικοί, οι οποίοι όμως έχουν μεγάλη διαφορά στο κόστος αγοράς.

Τέλος, η τιμή του pH παρατηρήθηκε πως έμεινε ίδια κατά την προσθήκη αλατιού, το οποίο επίσης ήταν το θεωρητικά αναμενόμενο. Το αλάτι δεν αντιδρά χημικά με το νερό, καθώς όταν διαλύεται στο νερό διασπάται σε ξεχωριστά ιόντα νατρίου και χλωρίου. Συνεπώς, η προσθήκη αλατιού στο νερό αυξάνει τον όγκο του, αλλά αφού το αλάτι δεν απελευθερώνει ή δεσμεύει τα άτομα υδρογόνου του νερού για να προκαλέσει χημική αντίδραση, η τιμή του pH θα παραμείνει στο ίδιο επίπεδο. Οποιοσδήποτε αποκλίσεις στις μετρούμενες τιμές εδώ οφείλονται στους κατασκευαστικούς περιορισμούς του αισθητήρα και τις χαμηλές αντοχές του.

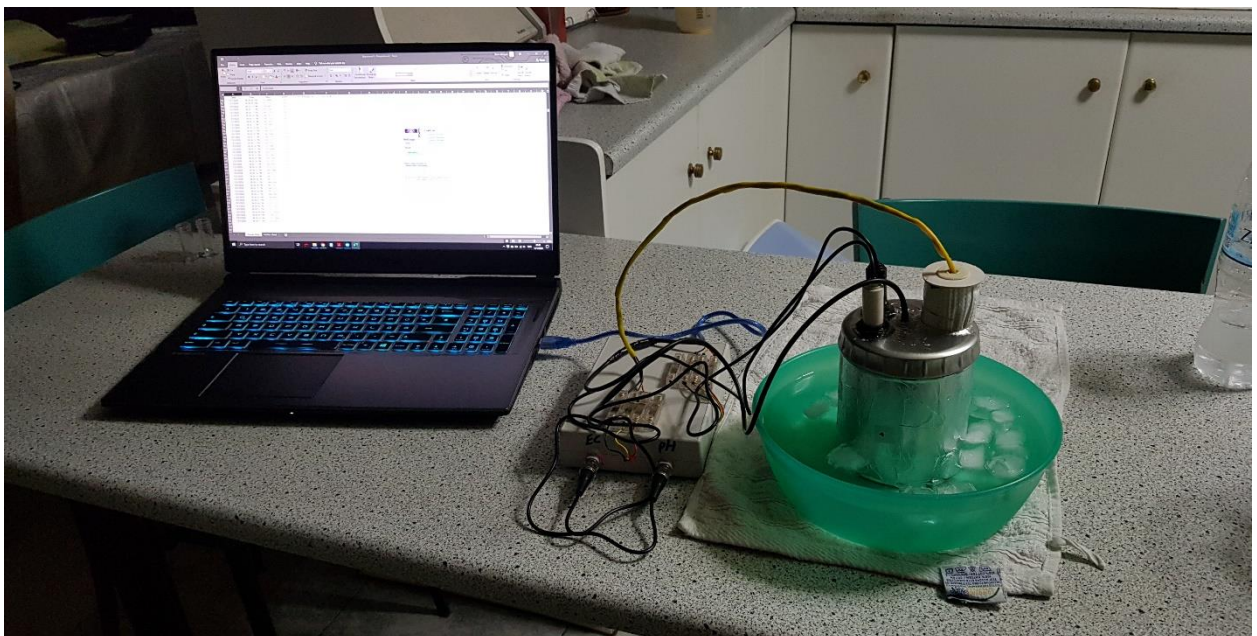
4.3 Αυξομείωση της θερμοκρασίας σε δείγμα νερού και παρακολούθηση των μεταβολών στις μετρήσεις

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για αυτό το πείραμα ήταν η εξής: τοποθετήθηκε στο δοχείο του συστήματος αισθητήρων ένα δείγμα νερού βρύσης, το οποίο είχε αρχική θερμοκρασία 3.8°C (ήταν στο ψυγείο). Στη συνέχεια, το δοχείο τοποθετήθηκε πάνω σε μια μικροσυσκευή υγραερίου (γκαζάκι), ώστε να ανέβει σταδιακά η θερμοκρασία του νερού και να μετρηθούν παράλληλα οι μεταβολές στις παραμέτρους (σχ. 65). Λόγω των περιορισμών όμως των περιοχών λειτουργίας των αισθητήρων που έχουν τεθεί από τους κατασκευαστές, η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν με ασφάλεια οι αισθητήρες είναι οι 40°C, οπότε δεν πρέπει να ξεπεραστεί αυτό το όριο. Στη συνέχεια, αφού το σύστημα έφτασε στη μέγιστη θερμοκρασία, τοποθετήθηκε το δοχείο με τους αισθητήρες και το δείγμα νερού

μέσα σε ένα μεγαλύτερης χωρητικότητας δοχείο, το οποίο είχε γεμίσει με κρύο νερό και παγάκια, ώστε να πέσει πάλι σταδιακά η θερμοκρασία του δείγματος μέχρι τους 25°C (θερμοκρασία δωματίου) και να μετρηθούν πάλι οι τιμές των παραμέτρων (σχ. 66).

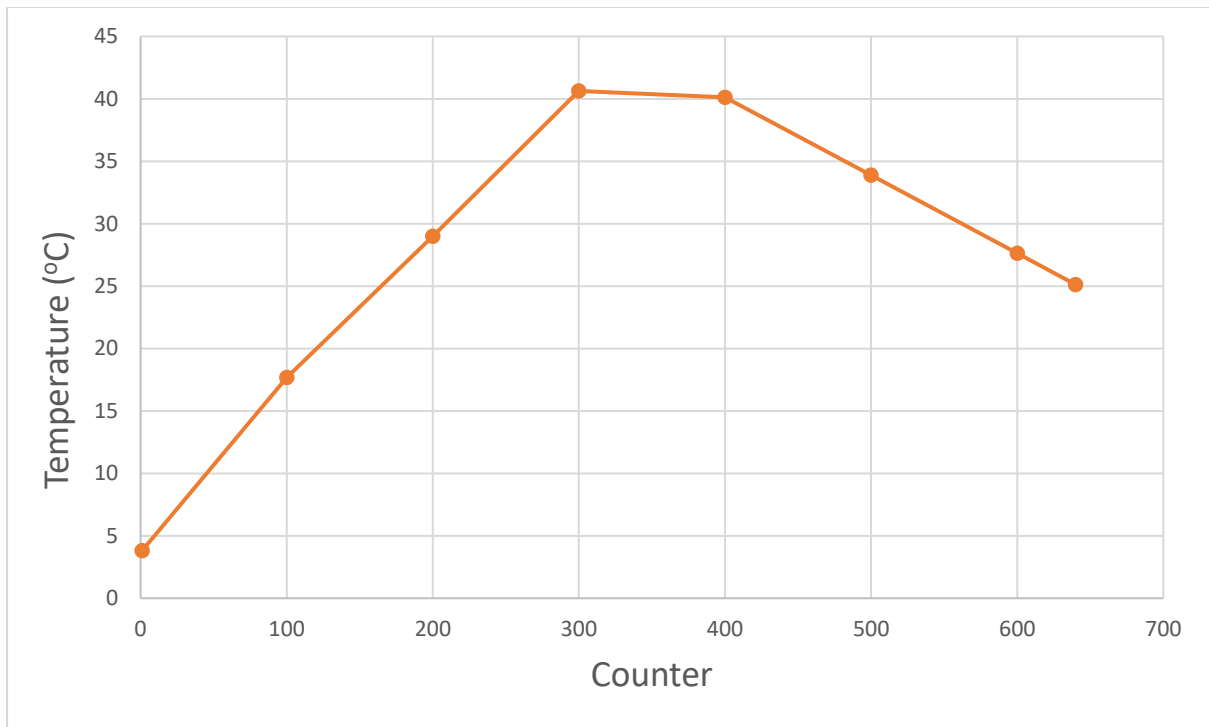


Σχήμα 65: Πειραματική διάταξη για αύξηση της θερμοκρασίας

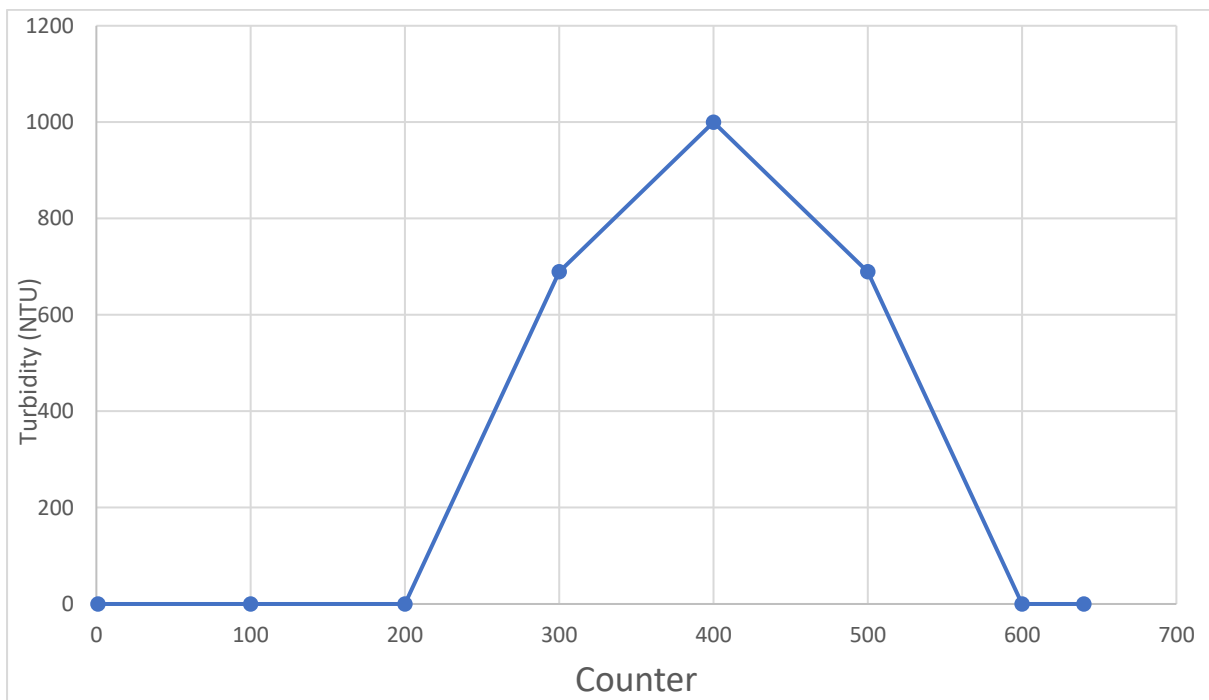


Σχήμα 66: Πειραματική διάταξη για μείωση της θερμοκρασίας

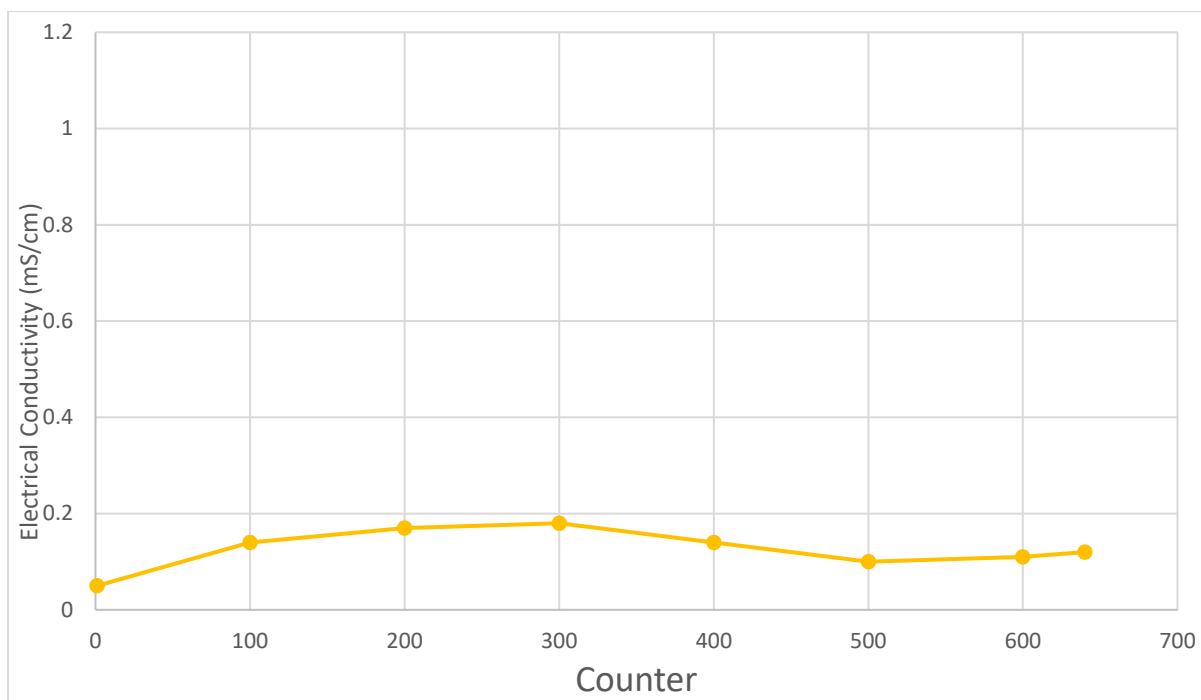
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα με την πορεία που ακολουθήσανε οι τέσσερις μετρούμενες παράμετροι, με τους πιο αναλυτικούς πίνακες να βρίσκονται στο παράρτημα.



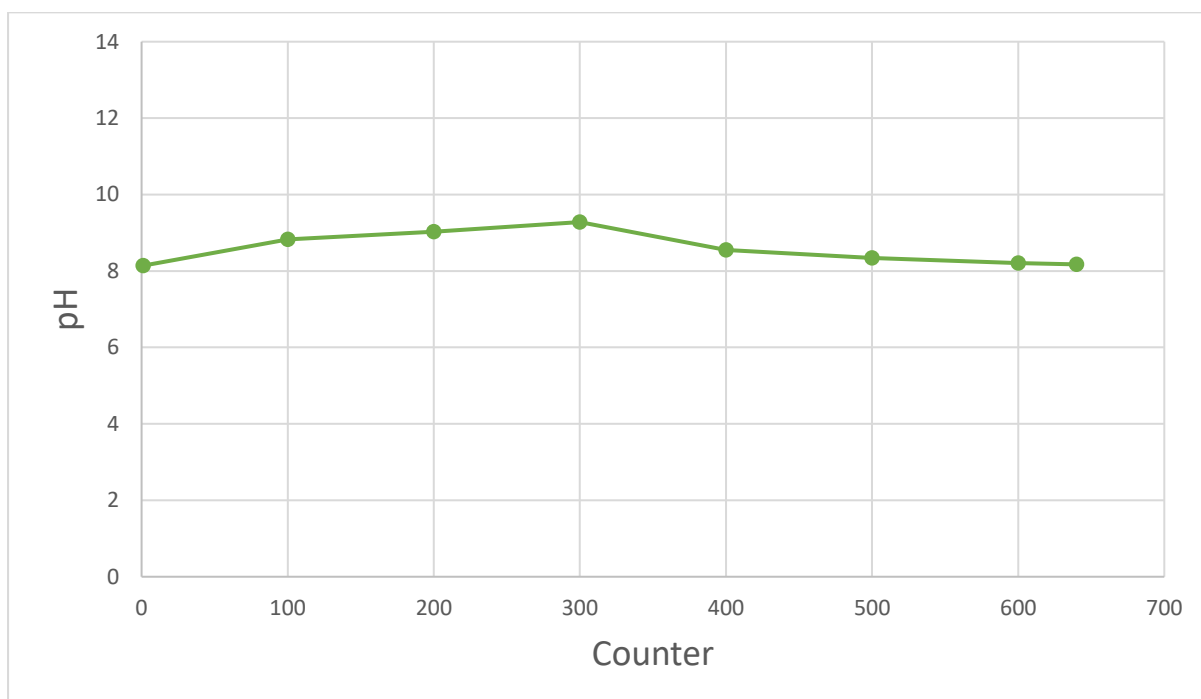
Σχήμα 67: Πορεία θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων



Σχήμα 68: Μεταβολές στη θολότητα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων



Σχήμα 69: Μεταβολές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων



Σχήμα 70: Μεταβολές στο pH κατά τη διάρκεια των μετρήσεων

Λόγω των διαφορών στις τάξεις μεγέθους ανάμεσα στις παραμέτρους, δεν υπήρχε η δυνατότητα να τοποθετηθούν οι γραφικές παραστάσεις στο ίδιο σχήμα. Παρατηρείται, ωστόσο, ότι η θολότητα έγινε μέγιστη όταν ήταν μέγιστη και η θερμοκρασία. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς όταν ένα δοχείο με νερό θερμαίνεται, δημιουργούνται φυσαλίδες

μέσα σε αυτό. Αυτές οι φυσαλίδες (δεν σχετίζονται με τις φυσαλίδες από τη βράση νερού εδώ) οφείλονται στο διαλυμένο οξυγόνο που διαφεύγει από το νερό. Αυτές οι φυσαλίδες λοιπόν, εντοπίζονται από τον αισθητήρα, ο οποίος τις μετράει σαν θολότητα του νερού.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα φαίνεται πως επίσης αυξήθηκε κατά ένα μικρό ποσοστό καθώς αυξήθηκε η θερμοκρασία. Αυτό ήταν επίσης αναμενόμενο, καθώς όταν αυξάνεται η θερμοκρασία στο νερό, αυξάνεται και η κινητικότητα των ιόντων υδρογόνου μέσα σε αυτό, αλλά και η συγκέντρωση ιόντων. Συνεπώς, όταν ανεβαίνει η θερμοκρασία σε ένα δείγμα νερού, αυξάνεται μη γραμμικά και η αγωγιμότητα.

Τέλος, οι τιμές του pH παρατηρήθηκαν και αυτές να αυξάνονται με την άνοδο της θερμοκρασίας και να μειώνονται με την πτώση της. Αυτό ήταν αντίστροφο σε σχέση με το θεωρητικά αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς με τη θερμοκρασία αυξάνονται και οι μοριακές δονήσεις, με αποτέλεσμα το νερό να μην μπορεί να σχηματίσει περισσότερα ιόντα υδρογόνου, οπότε η τιμή του pH μειώνεται. Η αύξηση του pH στην περίπτωση των μετρήσεων εδώ μπορεί να οφείλεται είτε σε μικρές συγκεντρώσεις μεταλλικών στοιχείων στο νερό που αλλοιώνουν ελαφρώς τα μετρούμενα μεγέθη, είτε στα τοιχώματα του μεταλλικού δοχείου που μπορεί να ελευθερώνουν πρόσθετα στοιχεία στο νερό λόγω της θέρμανσής τους ή, ακόμα, από σφάλμα του αισθητήρα.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Τελική αξιολόγηση του ολοκληρωμένου συστήματος

Στη συντριπτική πλειοψηφία των πειραμάτων, το σύστημα μέτρησης ποιότητας νερού που κατασκευάστηκε για αυτή την εργασία λειτούργησε σωστά, δείχνοντας μετρήσεις αρκετά κοντά στα αναμενόμενα αποτελέσματα και χωρίς να επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες.

Το σύστημα είναι εύχρηστο, καθώς για την εγκατάστασή του αρκούν μερικά μόνο δευτερόλεπτα και η μεταφορά του είναι πολύ εύκολη, χάρη στο μικρό μέγεθος των επιμέρους τμημάτων και την απλή σύνδεση και αποσύνδεσή τους. Το κόστος κατασκευής του είναι σχετικά χαμηλό, καθώς για όλους τους αισθητήρες, τον μικροελεγκτή και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, το κόστος που δαπανήθηκε ήταν περίπου 200€. Συγκριτικά, η αγορά ενός παρόμοιου συστήματος αισθητήρων από τρίτο πωλητή, που να μετράει τις αντίστοιχες παραμέτρους αλλά με υψηλότερη ακρίβεια, κοστίζει πάνω από 1000€.

Μερικά ακόμα πλεονεκτήματα του κατασκευασμένου συστήματος είναι τα εξής:

- Εύκολη λήψη, επεξεργασία και αποθήκευση των μετρήσεων, συνδέοντας το σύστημα μόνο με ένα καλώδιο με τον υπολογιστή.
- Απλή διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων, με χρήση προγραμματιστικών εργαλείων ή ειδικών διαλυμάτων.
- Γρήγορη απόκριση των αισθητήρων, μικρός χρόνος αναμονής από την τοποθέτηση του συστήματος μέχρι την αρχή λήψης μετρήσεων.
- Αν ένας από τους τέσσερις αισθητήρες παρουσιάσει σφάλμα και σταματήσει να λειτουργεί, δεν επηρεάζεται η λειτουργία των υπόλοιπων, οπότε διευκολύνεται η επισκευή και συντήρηση του συστήματος.

Ωστόσο, λόγω χρονικών και οικονομικών περιορισμών, το σχεδιασμένο σύστημα παρουσιάζει και μερικά μειονεκτήματα, όπως:

- Μικρή ακρίβεια στον αισθητήρα θολότητας και περιορισμένο εύρος τιμών στον αισθητήρα ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

- Απαίτηση συχνής βαθμονόμησης των αισθητήρων, ώστε να παρέχουν ακριβή αποτελέσματα.
- Απαίτηση συνεχούς συντήρησης του συστήματος.
- Τα υλικά κατασκευής των αισθητήρων είναι ευαίσθητα και επιρρεπή σε ζημιά, με συνέπεια είτε την ολική καταστροφή του αισθητήρα ή τη λήψη ανακριβών μετρήσεων.
- Οι αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και pH πρέπει να αποθηκεύονται σε ειδικά δοχεία ώστε να προστατεύονται τα γυάλινα ηλεκτρόδια. Ειδικά ο αισθητήρας pH χρειάζεται και ειδικό διάλυμα αποθήκευσης για την προστασία της μεμβράνης.

Συμπερασματικά, το σύστημα εκπληρώνει τους στόχους που τέθηκαν αρχικά και προσφέρει μια ικανοποιητική και οικονομική λύση στην παρακολούθηση της ποιότητας του νερού, έχοντας, βέβαια, περιθώρια βελτίωσης.

5.2 Μελλοντική εργασία

Το σύστημα που κατασκευάστηκε στην παρούσα εργασία έχει περιθώρια βελτίωσης και επέκτασης που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν από μελλοντικούς ερευνητές και μηχανικούς. Παρατίθενται, λοιπόν, σαν επίλογος της εργασίας ορισμένες ιδέες που ενδεχομένως να συμβάλουν στην περαιτέρω ανάπτυξή του.

- Έλεγχος και κατανόηση των αιτιών για τις οποίες η πραγματική συμπεριφορά του pH στο πείραμα αυξομείωσης της θερμοκρασίας ήταν αντίθετη από την αναμενόμενη.
- Προσθήκη αισθητήρα μέτρησης διαλυμένου οξυγόνου και αντικατάσταση των αισθητήρων που παρουσιάζουν μικρότερη ακρίβεια με πιο αξιόπιστους και πιο ανθεκτικούς για χρήση σε εξωτερικό περιβάλλον. Αυτοί οι αισθητήρες θα είναι πιο κατάλληλοι για συνεχόμενη λειτουργία και δεν θα απαιτούν τόσο συχνή βαθμονόμηση για να δώσουν ακριβείς μετρήσεις.
- Βελτίωση του τρόπου συσκευασίας των αισθητήρων ώστε να επιτρέπεται η τοποθέτησή τους για λήψη μετρήσεων σε κάποια λίμνη ή σε ποτάμι με αργή ροή. Θα μπορούσε να σχεδιασθεί ένα κυλινδρικό δοχείο παρόμοιου μεγέθους με αυτό που επιλέχθηκε για αυτή την εργασία, το οποίο να έχει μερικές οπές περιμετρικά και από κάτω, ώστε να μπορεί να περνάει νερό μέσα στο δοχείο και να λαμβάνουν μετρήσεις οι αισθητήρες, αλλά παράλληλα να προστατεύονται από τυχόν χτυπήματα με τυχόν

υπάρχοντα σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους μέσα στο νερό που θα προκαλούσαν ζημιές στους αισθητήρες. Φυσικά αυτό θα προϋπέθετε ακόμα την κατασκευή αδιάβροχου κουτιού για την τοποθέτηση του μικροελεγκτή και των λοιπών πλακετών του συστήματος, καθώς και ειδικό καλώδιο για τη σύνδεση του συστήματος με υπολογιστή.

- Σε συνδυασμό με την προηγούμενη πρόταση, μπορεί να προστεθεί στον μικροελεγκτή μια κεραία, είτε RF ή Wi-Fi, οι οποίες είναι μικρού κόστους και δίνουν τη δυνατότητα να στέλνονται οι μετρήσεις και να ελέγχεται το συνολικό σύστημα απομακρυσμένα. Σε συνδυασμό με την ανάπτυξη μιας διαδικτυακής βάσης δεδομένων και μιας εφαρμογής για υπολογιστή και για smartphone, θα μπορεί ένας χρήστης να ελέγχει το σύστημα και τις λαμβανόμενες μετρήσεις εύκολα, γρήγορα, αλλά και από οποιαδήποτε τοποθεσία επιθυμεί.
- Θα μπορούσε, τέλος, με συνδυασμό των παραπάνω, να δημιουργηθεί ένα δίκτυο συστημάτων αισθητήρων, ώστε να τοποθετούνται πολλαπλά συστήματα σε διάφορα σημεία μιας λίμνης, ενός ποταμού ή στη θάλασσα, και να σχηματίζεται μια συνολική εικόνα για την ποιότητα των υδάτων, αλλά και η δυνατότητα προειδοποίησης σε πραγματικό χρόνο σε περίπτωση που προκαλείται κάποια μόλυνση ή κάποια άλλη απότομη αλλαγή στις παραμέτρους του νερού, σε ένα ή περισσότερα σημεία.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] USGS, “How much water is there on earth?” [Online]. Available: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/how-much-water-there-earth?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- [2] Wikipedia, “Eutrophication” [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Eutrophication>
- [3] Coastal Wiki, “Turbidity Sensors” [Online]. Available: http://www.coastalwiki.org/wiki/Turbidity_sensors
- [4] RMB, “How to use a Secchi Disk” [Online]. Available: <https://www.rmbel.info/training/how-to-use-a-secchi-disk/>
- [5] General Electric, “Turbidity Sensor” [Online]. Available: https://www.mouser.com/catalog/specsheets/920-480A_E_LR.pdf
- [6] Endress, “Turbidity sensors and transmitters” [Online]. Available: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/liquid-analysis-product-overview/turbidity-sensors-transmitters>
- [7] Endress, “Turbidity sensor Turbimax” [Online]. Available: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/liquid-analysis-product-overview/turbidity-drinking-water-sensor-cus52d>
- [8] Montana State University, “Turbidimeter range” [Online]. Available: <http://www.montana.edu/barleybreeding/malt-quality-lab/learning-center/learn-about-testing/turbidimeter.html>
- [9] <https://www.aliexpress.com/i/32906809161.html>
- [10] “pH meter construction” [Online]. Available: <http://www.ph-meter.info/pH-electrode-construction>
- [11] Yokogawa “Basics of pH theory” [Online]. Available: <https://www.yokogawa.com/eu/library/resources/white-papers/basics-of-ph-theory/>
- [12] YSI “Method of pH Measurement” [Online]. Available: <https://www.ysi.com/ysi-blog/water-blogged-blog/2019/02/anatomy-of-ph-electrodes>

- [13] Pyro Science “Optical pH Sensors” [Online]. Available:
<https://www.pyroscience.com/en/products/theory/optical-ph-sensors>
- [14] Pyro Science “Underwater pH Logger” [Online]. Available:
<https://www.pyroscience.com/en/products/all-meters/aquaphox-lx#overview>
- [15] Manoharan, Aaruththiran & Yujia, Zhang & Bagherian, Mohammad. (2019).
Smartphone-based Real-Time Water Quality Monitoring System.
10.13140/RG.2.2.35136.99848.
- [16] https://wiki.dfrobot.com/Analog_EC_Meter_SKU_DFR0300
- [17] Hamilton, “Conductivity Sensor Selection” [Online]. Available:
<https://www.hamiltoncompany.com/process-analytics/conductivity-knowledge/conductivity-sensor-selection#top>
- [18] Radiometer Analytical, “Conductivity Theory and Practice” [Online]. Available:
http://www.analytical-chemistry.uoc.gr/files/items/6/618/agwgimometria_2.pdf
- [19] Mettler Toledo, “Inductive Conductivity Sensors” [Online]. Available:
<https://www.mt.com/my/en/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/conductivity-meter-inductive.html>
- [20] Parra, Lorena & Sendra, Sandra & Lloret, Jaime & Bosch, Ignacio. (2015).
Development of a Conductivity Sensor for Monitoring Groundwater Resources to
Optimize Water Management in Smart City Environments. Sensors (Basel,
Switzerland). 15. 20990-21015. 10.3390/s150920990.
- [21] WatElectrical.com “Various types of temperature sensors” [Online]. Available:
<https://www.watelectrical.com/6-different-types-of-temperature-sensors-with-their-specifications/>
- [22] Horiba Scientific, “Galvanic vs Optical Dissolved Oxygen Sensors” [Online]. Available:
<https://www.horiba.com/sg/application/material-property-characterization/water-analysis/water-quality-electrochemistry-instrumentation/support/product-selection-support/technical-tips/electrodes/galvanic-vs-optical-dissolved-oxygen-sensors/>
- [23] Hellas Digital, “Arduino Uno R3 Economy Starter Kit” [Online]. Available:
<https://www.hellasdigital.gr/go-create/kits/arduino-uno-r3-new-starter-kit/>
- [24] Hellas Digital, “Gravity: Analog Turbidity Sensor for Arduino” [Online]. Available:
<https://www.hellasdigital.gr/electronics/sensors/humidity-sensor/gravity-analog-turbidity-sensor-for-arduino-sen0189/>

- [25] DFROBOT Wiki, "Turbidity Sensor SKU SEN0189" [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU__SEN0189
- [26] Hellas Digital, "Waterproof DS18B20 Sensor Kit" [Online]. Available: <https://www.hellasdigital.gr/electronics/sensors/temperature-sensors/waterproof-ds18b20-sensor-kit-kit0021/>
- [27] DFROBOT Wiki, "Terminal Sensor Adapter V2.0" [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Terminal_sensor_adapter_V2_SKU_DFR0055
- [28] DFROBOT Wiki, "Waterproof DS18B20 Temperature Sensor" [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Waterproof_DS18B20_Digital_Temperature_Sensor__SKU__DFR0198_
- [29] Hellas Digital, "Gravity: Analog pH Sensor/Meter kit V2" [Online]. Available: <https://www.hellasdigital.gr/electronics/sensors/humidity-sensor/gravity-analog-ph-sensor-meter-pro-kit-for-arduino/>
- [30] DFROBOT Wiki, "PH Meter SKU SEN0361" [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/PH_meter_SKU__SEN0161_
- [31] Hellas Digital, "Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor" [Online]. Available: <https://www.hellasdigital.gr/electronics/sensors/conductive/gravity-analog-electrical-conductivity-sensor-meter-for-arduino-dfr0300/>
- [32] DFROBOT Wiki, "Analog Electrical Conductivity Sensor" [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Electrical_Conductivity_Sensor__Meter__V2__K%3D1__SKU_DFR0300
- [33] <https://www.leroymerlin.gr/gr/udraulika/kukloma-parohis-nerou-/monosi/monosi-eukampti-leuki-tc-isopipe-me-pahos-9mm-gia-exoterikes-solinoseis-diametrou-o28mm-62074810/>
- [34] Lenntech, "Maximum allowed turbidity in drinking water" [Online]. Available: <https://www.lenntech.com/turbidity.htm#ixzz3R3yPreK7>
- [35] WHO, "pH in Drinking water" [Online]. Available: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/ph_revised_2007_clean_version.pdf
- [36] Lenntech, "Electrical conductivity in water" [Online]. Available: <https://www.lenntech.com/applications/ultrapure/conductivity/water-conductivity.htm>

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

7.1 Πίνακες μετρήσεων πειραμάτων

Πίνακας 5: Νερό βρύσης Εργ. Αισθητήρων 9/1/2020

Counter	Turbidity (NTU)	Temperature (°C)	EC (mS/cm)	pH
1	0	11.2	0.88	8.96
2	0	11.2	0.88	8.96
3	0	11.2	0.88	8.96
4	0	11.3	0.88	8.96
5	0	11.3	0.88	8.96
6	0	11.3	0.88	9
7	0	11.3	0.88	9
8	0	11.3	0.88	9
9	0	11.3	0.89	9
10	0	11.3	0.89	9
11	0	11.3	0.9	9.03
12	0	11.3	0.9	9.04
13	0	11.2	0.9	9.04
14	0	11.2	0.9	9.04
15	0	11.2	0.9	9.04
16	0	11.2	0.89	9.04
17	0	11.3	0.89	9.04
18	0	11.3	0.88	9
19	0	11.3	0.88	9
20	0	11.3	0.89	9
21	0	11.4	0.9	8.98
22	0	11.4	0.9	8.99
23	0	11.4	0.9	9
24	0	11.4	0.88	9.02
25	0	11.3	0.88	9
26	0	11.3	0.89	9.02
27	0	11.3	0.9	9.02
28	0	11.3	0.9	9
29	0	11.3	0.89	9
30	0	11.3	0.9	9
Μέσος Όρος	0	11.3	0.89	9

Πίνακας 6: Νερό βρύσης Ελληνικού 8/1/2020

Counter	Turbidity (NTU)	Temperature (°C)	EC (mS/cm)	pH
1	0	11.2	0.12	7.9
2	0	11.2	0.12	7.9
3	0	11.2	0.12	7.9
4	0	11.1	0.12	7.8
5	0	11.1	0.12	7.8
6	0	11	0.12	7.8
7	0	11	0.12	7.8
8	0	11	0.12	7.8
9	0	11	0.12	7.8
10	0	11	0.13	7.7
11	0	11	0.13	7.7
12	0	10.9	0.13	7.7
13	0	10.9	0.13	7.7
14	0	10.9	0.13	7.7
15	0	10.9	0.13	7.8
16	0	10.8	0.13	7.8
17	0	10.8	0.12	7.8
18	0	10.8	0.12	7.8
19	0	10.8	0.12	7.8
20	0	10.8	0.12	7.7
21	0	10.8	0.12	7.7
22	0	10.8	0.11	7.7
23	0	10.8	0.11	7.7
24	0	10.8	0.11	7.8
25	0	10.8	0.12	7.8
26	0	10.8	0.12	7.8
27	0	10.7	0.12	7.8
28	0	10.7	0.12	7.8
29	0	10.7	0.12	7.8
30	0	10.7	0.12	7.8
Μέσος Όρος	0	10.9	0.12	7.8

Πίνακας 7: Επιτραπέζιο νερό

Counter	Turbidity (NTU)	Temperature (°C)	EC (mS/cm)	pH
1	0	20.2	0.24	8.2
2	0	20.2	0.24	8.2
3	0	20.2	0.24	8.2
4	0	20.1	0.25	8.1
5	0	20.1	0.25	8.1
6	0	20.1	0.25	8.1
7	0	20.1	0.25	8.1
8	0	20.1	0.24	8
9	0	20.1	0.24	8
10	0	20.1	0.24	8
11	0	20	0.24	8
12	0	20	0.24	8
13	0	20	0.23	8
14	0	20	0.23	8
15	0	20	0.23	8
16	0	20	0.23	8.1
17	0	20	0.23	8.1
18	0	20	0.24	8
19	0	20	0.24	8
20	0	20.1	0.25	8
21	0	20.1	0.25	7.9
22	0	20.1	0.25	7.9
23	0	20	0.25	7.9
24	0	20	0.25	8
25	0	20	0.25	8
26	0	20.1	0.25	8
27	0	20.1	0.24	8.1
28	0	20	0.24	8.1
29	0	20	0.24	8
30	0	20	0.24	8
Μέσος Όρος	0	20	0.24	8

Πίνακας 8: Φυσικό μεταλλικό νερό

Counter	Turbidity (NTU)	Temperature (°C)	EC (mS/cm)	pH
1	0	20.2	0.5	7.5
2	0	20.2	0.5	7.5
3	0	20.2	0.49	7.5
4	0	20.1	0.49	7.4
5	0	20.1	0.49	7.4
6	0	20.1	0.48	7.4
7	0	20	0.48	7.4
8	0	20	0.48	7.3
9	0	20.1	0.48	7.3
10	0	20.1	0.48	7.3
11	0	20	0.5	7.3
12	0	20	0.5	7.3
13	0	20	0.48	7.3
14	0	20.1	0.48	7.3
15	0	20.1	0.45	7.3
16	0	20	0.45	7.3
17	0	20	0.45	7.3
18	0	20	0.48	7.2
19	0	20	0.48	7.2
20	0	20.1	0.49	7.2
21	0	20.1	0.49	7.3
22	0	20.2	0.47	7.3
23	0	20.1	0.47	7.3
24	0	20	0.48	7.3
25	0	20	0.48	7.3
26	0	20.1	0.49	7.2
27	0	20.1	0.48	7.2
28	0	20	0.48	7.3
29	0	20	0.48	7.3
30	0	20	0.48	7.3
Μέσος Όρος	0	20	0.48	7.3

Πίνακας 9: Νερό πηγής

Counter	Turbidity (NTU)	Temperature (°C)	EC (mS/cm)	pH
1	0	20.2	0.28	7.6
2	0	20.2	0.28	7.6
3	0	20.2	0.28	7.6
4	0	20.1	0.29	7.7
5	0	20.1	0.29	7.7
6	0	20.2	0.29	7.6
7	0	20.2	0.3	7.5
8	0	20.1	0.3	7.5
9	0	20	0.3	7.5
10	0	20	0.3	7.5
11	0	20	0.29	7.5
12	0	20	0.29	7.5
13	0	20	0.3	7.6
14	0	20.1	0.3	7.6
15	0	20.2	0.31	7.6
16	0	20.1	0.31	7.5
17	0	20	0.31	7.5
18	0	20	0.32	7.5
19	0	20	0.32	7.5
20	0	20.1	0.31	7.5
21	0	20.1	0.31	7.4
22	0	20.1	0.3	7.4
23	0	20	0.3	7.4
24	0	20	0.3	7.4
25	0	20.1	0.3	7.4
26	0	20.1	0.3	7.5
27	0	20.1	0.3	7.5
28	0	20	0.31	7.5
29	0	20	0.31	7.5
30	0	20	0.3	7.5
Μέσος Όρος	0	20	0.3	7.5

Πίνακας 10: Νερό θάλασσας

Counter	Turbidity (NTU)	Temperature (°C)	EC (mS/cm)	pH
1	0	19.4	24.34	8.3
2	0	19.4	24.34	8.3
3	0	19.4	24.34	8.3
4	0	19.4	24.34	8.2
5	0	19.4	24.3	8.2
6	0	19.5	24.38	8.2
7	0	19.5	24.34	8.2
8	0	19.5	24.34	8.2
9	0	19.5	24.34	8.2
10	0	19.5	24.34	8.1
11	0	19.4	24.34	8.1
12	0	19.4	24.34	8.2
13	0	19.4	24.38	8.2
14	0	19.4	24.34	8.3
15	0	19.4	24.38	8.3
16	0	19.4	24.3	8.2
17	0	19.3	24.34	8.2
18	0	19.3	24.38	8.2
19	0	19.3	24.3	8.2
20	0	19.3	24.38	8.2
21	0	19.3	24.38	8.1
22	0	19.3	24.38	8.1
23	0	19.2	24.38	8
24	0	19.2	24.34	8
25	0	19.2	24.34	8
26	0	19.2	24.34	8.1
27	0	19.2	24.34	8.1
28	0	19.2	24.3	8.1
29	0	19.2	24.3	8.1
30	0	19.2	24.3	8
Μέσος Όρος	0	19.3	24.3	8.2

Πίνακας 11: Πείραμα αλατιού

Counter	Salt (mL)	Turbidity (NTU)	Temperature (°C)	EC (mS/cm)	pH
1	0	0	15.06	0.11	7.7
2	0	0	15	0.11	7.7
3	0	0	15	0.15	7.7
4	0	0	15	0.15	7.7
5	0	0	14.94	0.11	7.8
6	0	0	14.94	0.15	7.8
7	0	0	14.94	0.11	7.7
8	0	0	14.88	0.15	7.7
9	0	0	14.88	0.15	7.7
10	0	0	14.88	0.11	7.8
11	5	0	14.88	4.72	8
12	5	0	14.88	4.8	8
13	5	355.7	14.88	5.25	8
14	5	355.7	14.81	5.25	7.9
15	5	0	14.81	5.28	7.9
16	5	355.7	14.81	5.25	7.9
17	5	355.7	14.81	5.28	7.9
18	5	0	14.81	5.32	7.9
19	5	355.7	14.81	5.28	7.8
20	5	355.7	14.81	5.32	7.8
21	10	355.7	14.69	18.58	7.9
22	10	355.7	14.69	18.58	7.9
23	10	689	14.69	18.62	7.8
24	10	689	14.69	18.62	7.8
25	10	355.7	14.69	18.62	7.8
26	10	689	14.69	18.62	7.7
27	10	999.89	14.69	18.69	7.7
28	10	355.7	14.69	18.76	7.7
29	10	355.7	14.69	18.8	7.7
30	10	355.7	14.69	18.8	7.7
31	15	689	14.56	24.02	8
32	15	689	14.56	24.02	8
33	15	355.7	14.56	24.06	8
34	15	689	14.56	24.06	7.9
35	15	689	14.56	24.02	7.9
36	15	999.89	14.56	24.02	7.8
37	15	689	14.56	24.02	7.8
38	15	355.7	14.56	24.02	7.7
39	15	689	14.56	24.02	7.7
40	15	689	14.56	24.02	7.6
41	20	689	14.5	24.09	8.2
42	20	689	14.5	24.09	8.2
43	20	999.89	14.5	24.09	8.1
44	20	999.89	14.5	24.13	8.1
45	20	999.89	14.5	24.13	8.2
46	20	1288.36	14.5	24.09	8.2
47	20	1288.36	14.44	24.09	8.1

48	20	999.89	14.44	24.13	8.1
49	20	999.89	14.5	24.13	8
50	20	999.89	14.5	24.09	8
51	25	999.89	14.44	24.16	8.1
52	25	999.89	14.44	24.16	8.1
53	25	999.89	14.44	24.17	8.1
54	25	689	14.44	24.17	8
55	25	689	14.44	24.17	8
56	25	999.89	14.44	24.17	7.9
57	25	999.89	14.44	24.17	7.9
58	25	689	14.44	24.16	7.8
59	25	999.89	14.44	24.16	7.8
60	25	1288.89	14.44	24.17	7.8
61	30	999.89	14.44	24.2	7.7
62	30	1288.36	14.44	24.2	7.7
63	30	1288.36	14.44	24.24	7.7
64	30	1554.43	14.44	24.24	7.7
65	30	1288.36	14.44	24.24	7.7
66	30	1288.36	14.44	24.2	7.6
67	30	1288.36	14.38	24.2	7.6
68	30	1288.36	14.38	24.24	7.6
69	30	1554.43	14.38	24.24	7.5
70	30	1288.36	14.38	24.24	7.5
71	35	1288.36	14.25	24.27	7.9
72	35	1288.36	14.25	27.27	7.9
73	35	1288.36	14.25	24.27	7.9
74	35	1554.43	14.25	24.31	7.9
75	35	1554.43	14.25	24.31	8
76	35	1554.43	14.25	24.31	8
77	35	1554.43	14.25	24.27	8
78	35	1288.36	14.25	24.27	7.9
79	35	1288.36	14.25	24.31	7.9
80	35	1554.43	14.25	24.27	7.8
81	40	1554.43	14.19	24.3	8.3
82	40	1554.43	14.19	24.3	8.3
83	40	1554.43	14.19	24.3	8.3
84	40	1288.36	14.19	24.31	8.2
85	40	1288.36	14.19	24.31	8.2
86	40	1554.43	14.19	24.34	8.2
87	40	1554.43	14.19	24.34	8.2
88	40	1554.43	14.19	24.31	8.2
89	40	1288.36	14.19	24.34	8.1
90	40	1554.43	14.19	24.34	8.1
91	45	1554.43	14.13	24.34	7.9
92	45	1554.43	14.13	24.38	7.9
93	45	1554.43	14.13	24.34	7.9
94	45	1554.43	14.13	24.38	8
95	45	1554.43	14.13	24.38	8
96	45	1554.43	14.13	24.38	8

97	45	1288.36	14.13	24.34	8
98	45	1554.43	14.13	24.34	8
99	45	1554.43	14.13	24.34	7.9
100	45	1554.43	14.13	24.34	7.9

Πίνακας 12: Μετρήσεις πειράματος αυξομείωσης θερμοκρασίας

Counter	Temperature (°C)	Turbidity (NTU)	EC (mS/cm)	pH
1	3.8	0	0.05	8.14
2	4	0	0.05	8.17
3	4.5	0	0.1	8.21
4	5	0	0.09	8.24
5	5.5	0	0.09	8.24
6	6	0	0.09	8.28
7	6.5	0	0.09	8.28
8	7	0	0.09	8.28
9	7.5	0	0.09	8.31
10	8	0	0.09	8.31
11	8.5	0	0.09	8.38
12	9	0	0.08	8.41
13	9.5	0	0.08	8.45
14	10	0	0.12	8.52
15	10.5	0	0.12	8.55
16	11	0	0.12	8.55
17	11.5	0	0.12	8.62
18	12	0	0.12	8.66
19	12.5	0	0.12	8.66
20	13	0	0.12	8.66
21	13.5	0	0.12	8.72
22	14	0	0.12	8.72
23	14.5	0	0.12	8.76
24	15	0	0.14	8.72
25	15.5	0	0.14	8.79
26	16	0	0.14	8.86
27	16.5	0	0.14	8.9
28	17	0	0.14	8.93
29	17.5	0	0.14	8.86
30	18	0	0.14	8.83
31	18.5	0	0.14	8.9
32	19	0	0.17	8.9
33	19.5	0	0.17	8.93
34	20	0	0.17	8.9
35	20.5	0	0.14	8.97
36	21	0	0.13	8.93
37	21.5	0	0.16	8.93

38	22	0	0.16	9
39	22.5	0	0.16	8.93
40	23	0	0.15	9
41	23.5	0	0.15	9
42	24	0	0.15	8.97
43	24.5	0	0.15	9
44	25	0	0.15	8.97
45	25.5	0	0.15	8.97
46	26	0	0.15	9
47	26.5	0	0.14	8.97
48	27	0	0.14	8.97
49	27.5	0	0.17	9.03
50	28	0	0.17	9
51	28.5	0	0.17	9.03
52	29	0	0.17	9.03
53	29.5	0	0.16	8.97
54	30	0	0.16	9
55	30.5	355.7	0.16	9.14
56	31	355.7	0.16	9.07
57	31.5	355.7	0.16	9.03
58	32	355.7	0.16	9.03
59	32.5	355.7	0.16	9.03
60	33	355.7	0.18	9.07
61	33.5	355.7	0.18	9.1
62	34	355.7	0.18	9.14
63	34.5	355.7	0.18	9.17
64	35	355.7	0.18	9.17
65	35.5	355.7	0.17	9.17
66	36	689	0.17	9.17
67	36.5	689	0.17	9.17
68	37	689	0.17	9.17
69	37.5	689	0.17	9.21
70	38	689	0.17	9.21
71	38.5	689	0.19	9.24
72	39	689	0.19	9.31
73	39.5	689	0.19	9.31
74	40	689	0.19	9.28
75	40.5	689	0.19	9.24
76	41	689	0.18	9.31
77	41.5	689	0.18	9.14
478	42	999.89	0.18	9.14
79	42.5	999.89	0.18	9.1
80	42.5	999.89	0.18	8.93
81	42	999.89	0.16	8.86
82	41.5	999.89	0.16	8.66
83	41	999.89	0.16	8.62
84	40.5	999.89	0.16	8.59
85	40	999.89	0.16	8.55
86	39.5	999.89	0.14	8.52
87	39	689	0.14	8.48

88	38.5	689	0.14	8.45
89	38	689	0.12	8.45
90	37.5	689	0.15	8.45
91	37	689	0.12	8.41
92	36.5	689	0.12	8.38
93	36	689	0.12	8.38
94	35.5	689	0.12	8.38
95	35	689	0.13	8.34
96	34.5	689	0.13	8.34
97	34	689	0.13	8.34
98	33.5	355.7	0.13	8.31
99	33	355.7	0.13	8.31
100	32.5	355.7	0.13	8.28
101	32	355.7	0.11	8.28
102	31.5	355.7	0.11	8.28
103	31	355.7	0.11	8.24
104	30.5	355.7	0.11	8.24
105	30	355.7	0.14	8.21
106	29.5	355.7	0.11	8.24
107	29	0	0.11	8.24
108	28.5	0	0.08	8.24
109	28	0	0.11	8.21
110	27.5	0	0.11	8.21
111	27	0	0.09	8.21
112	26.5	0	0.12	8.17
113	26	0	0.09	8.21
114	25.5	0	0.12	8.17
115	25	0	0.09	8.17

7.2 Συνολικός κώδικας συστήματος μέτρησης ποιότητας νερού

```

#include "DFRobot_EC.h"
#include "DFRobot_PH.h"
#include <EEPROM.h>
#include <OneWire.h>

int TURB_PIN = A0;
float volt, ntu;
#define EC_PIN A2
float voltage_ec, ecValue, temperature;
DFRobot_EC ec;
#define PH_PIN A5
float voltage_ph, pHValue;
DFRobot_PH ph;
int DS18S20_Pin = 2; //DS18S20 Signal pin on digital 2
int k;

```

```

//Temperature chip i/o
OneWire ds(DS18S20_Pin); // on digital pin 2

void setup(){
  Serial.begin(115200);
  ec.begin();
  ph.begin();

  Serial.println("CLEARDATA");

  // define 5 columns named "Date", "Time", "Timer", "Counter", "Turbidity
  voltage", "Turbidity", "temperature", "EC" and "pH"
  Serial.println("LABEL, Date, Time, Timer, Counter, Turb. Voltage (V), Turbidity
  (NTU), Temperature (^C), EC (mS/cm), pH");
}

void loop()
{
  //---for turbidity
  volt = 0;
  for(int i=0; i<800; i++)
  {
    volt += ((float)analogRead(TURB_PIN)/1023)*5;
  }
  volt = volt/800;
  volt = round_to_dp(volt,1);
  if(volt < 2.5){
    ntu = 3000;
  }else{
    ntu = -1120.4*square(volt)+5742.3*volt-4353.8;
  }

  //---for temperature, electrical conductivity and pH
  static unsigned long timepoint = millis();
  if(millis()-timepoint>1000U) //time interval: 1s
  {
    timepoint = millis();
    voltage_ec = analogRead(EC_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage_ec
    voltage_ph = analogRead(PH_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage_ph
    temperature = getTemp(); // read your temperature sensor to execute
    temperature compensation
    ecValue = ec.readEC(voltage_ec,temperature); // convert voltage_ec to EC
    with temperature compensation
    phValue = ph.readPH(voltage_ph,temperature); // convert voltage_ph to pH
    with temperature compensation

    Serial.println( (String) "DATA, DATE, TIME, TIMER," +k++ + "," + volt + ","
+ ntu + "," + temperature + "," + ecValue + "," + phValue + "," + ",AUTOSCROLL_40"
);

  }
  ec.calibration(voltage_ec,temperature); // calibration process by Serial CMD
  ph.calibration(voltage_ph,temperature); // calibration process by Serial CMD
}

float round_to_dp( float in_value, int decimal_place )

```

```

{
  float multiplier = powf( 10.0f, decimal_place );
  in_value = roundf( in_value * multiplier ) / multiplier;
  return in_value;
}

float getTemp(){
  //returns the temperature from one DS18S20 in DEG Celsius

  byte data[12];
  byte addr[8];

  if ( !ds.search(addr)) {
    //no more sensors on chain, reset search
    ds.reset_search();
    return -1000;
  }

  if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) {
    Serial.println("CRC is not valid!");
    return -1000;
  }

  if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
    Serial.print("Device is not recognized");
    return -1000;
  }

  ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0x44,1); // start conversion, with parasite power on at the end

  byte present = ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0xBE); // Read Scratchpad

  for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
    data[i] = ds.read();
  }

  ds.reset_search();

  byte MSB = data[1];
  byte LSB = data[0];

  float tempRead = ((MSB << 8) | LSB); //using two's compliment
  float TemperatureSum = tempRead / 16;

  return TemperatureSum;
}

```

