



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΙΝΤΟΥΜΠ ΠΑΥΛΟΣ

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΙΝΤΟΥΜΠ ΠΑΥΛΟΣ

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2022:

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ιωάννης Γκόνος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ευστάθιος Συκάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2022



ΠΑΥΛΟΣ ΤΡΙΝΤΟΥΜΠ

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

Copyright © Παύλος Τριντούμπ, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη αισθητήρα για την ανίχνευση υγρασίας. Η λειτουργία του εν λόγω αισθητήρα έγκειται στο γεγονός της ανίχνευσης υγρασίας μέσω της αλλαγής στη χωρητικότητα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων όταν έρθει σε επαφή με τους υδρατμούς που βρίσκονται στο περιβάλλον.

Στο πρώτο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους της εργασίας, πραγματοποιήθηκε συνοπτική περιγραφή των αισθητήρων και των χαρακτηριστικών τους. Ενώ στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μελέτη για τον όρο υγρασία καθώς και για τις υγρομετρικές παραμέτρους της, όπως η σχετική και απόλυτη υγρασία, όπου η μελέτη επεκτάθηκε στην περιγραφή των συγκεκριμένων αισθητήρων υγρασίας, δηλαδή με μέτρηση χωρητικότητας ή ωμικής αντίστασης. Αφού, λοιπόν, ολοκληρώθηκε η θεωρητική μελέτη των αισθητήρων, το τελευταίο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους αφιερώνεται στην περιγραφή του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων και στους τρόπους υπολογισμού της χωρητικότητας.

Στο πειραματικό μέρος πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός και η κατασκευή πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με το οποίο στη συνέχεια, μελετήθηκε η συμπεριφορά της χωρητικότητας του πυκνωτή σε συνάρτηση με την μεταβολή της υγρασίας καθώς και την μεταβολή της αντίστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και διεξάγονται συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία.

**Λέξεις-κλειδιά:** Υγρασία, ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια, χωρητικοί αισθητήρες, μεταβολή χωρητικότητας, μεταβολή αντίστασης

## **Abstract**

The purpose of this thesis is to develop a sensor for moisture detection. The function of said sensor lies in detecting moisture through the change in the capacitance of the interdigitated electrode capacitor when it comes into contact with the water vapor that is found in the environment.

In the theoretical part of the work of the first chapter, a brief description of the sensors and their characteristics was carried out. While in the second chapter a study was carried out on the term humidity and its hygrometric parameters, such as relative and absolute humidity, where the study was extended to the description of specific humidity sensors, such as capacitive and resistive. So, after the theoretical study of the sensors has been completed, the last chapter of the theoretical part is dedicated to the description of the interdigitated electrode capacitor and the ways of calculating the capacitance.

In the experimental part, the design and construction of an interdigitated capacitor were carried out, and then, through measurements, the behavior of the capacitor's capacity was studied concerning the change in humidity as well as the change in resistance concerning time.

Finally, the results of the experiments are listed and conclusions are drawn from the experimental process.

**Keywords:** Humidity, Interdigitated electrode capacitor, Capacitive Sensors, Capacitance Change, Resistance Change





## Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά, να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα, κύριο Χριστοφόρου, για την δυνατότητα που έδωσε αλλά και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Αντώνη Γεωργά για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου , τους παιδικούς αλλά και όσους απέκτησα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου για την στήριξη και τις χαρές που μου προσέφεραν τόσο εντός όσο και εκτός της σχολής.



# Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων	11
Ευρετήριο Σχημάτων	14
Ευρετήριο Πινάκων	16
1 Εισαγωγή	18
1.1 Αισθητήρες	18
1.2 Κατηγορίες αισθητήρων	19
1.3 Παθητικοί και ενεργοί αισθητήρες	19
1.4 Αναλογικοί και ψηφιακοί αισθητήρες	20
1.5 Αισθητήρας ωμικής αντίστασης - χωρητικός αισθητήρας	21
1.6 Χαρακτηριστικά αισθητήρων	23
2 Υγρασία	26
2.1 Θεωρία	26
2.2 Απόλυτη υγρασία	27
2.3 Σχετική υγρασία (RH)	27
2.4 Ειδική υγρασία και σημείο δρόσου	29
3 Αισθητήρες υγρασίας	30
3.1 Βασικά στοιχεία αισθητήρα υγρασίας	30
3.2 Αισθητήρας ωμικής αντίστασης	31
3.3 Χωρητικός αισθητήρας υγρασίας	35
4 Πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	38
4.1 Εισαγωγή	38
4.2 Υπολογισμός χωρητικότητας	39
4.3 Μέτρηση χωρητικότητας	42
Β πειραματικό μέρος	48
5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΥΚΝΩΤΗ	48
5.1 Στάδια σχεδίασης και κατασκευής του πυκνωτή	48
5.1.1 Βήμα 1 <sup>ο</sup> – Σχεδίαση κυκλώματος και εκτύπωση σε διαφάνεια	49
5.1.2 Βήμα 2 <sup>ο</sup> – Έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία	50
5.1.3 Βήμα 3 <sup>ο</sup> – Εμφάνιση	52

5.1.4	<i>Βήμα 4<sup>ο</sup> – Αποχάλκωση</i> .....	53
5.1.5	<i>Βήμα 5<sup>ο</sup> – Καθαρισμός</i> .....	54
5.2	Πειραματική διάταξη και εκτέλεση του πειράματος.....	56
5.3	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	60
5.3.1	<i>Μέτρηση χωρητικότητας</i> .....	60
5.3.2	<i>Μέτρηση αντίστασης</i> .....	62
5.4	Εκτίμηση αβεβαιότητας μετρήσεων .....	64
5.4.1	<i>Εκτίμηση μετρήσεων χωρητικότητας</i> .....	65
5.4.2	<i>Εκτίμηση μετρήσεων αντίστασης</i> .....	66
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	68
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69



# Ευρετήριο Σχημάτων

- Εικόνα 1 : Αρχή λειτουργίας αισθητήρα (αριστερά) και μετατροπέα (δεξιά)[1]. (σελ 18)
- Εικόνα 2 : Παράδειγμα λειτουργίας ενός παθητικού και ενεργού αισθητήρα [2]. (σελ. 20)
- Εικόνα 3 : Αρχή λειτουργίας αναλογικού και ψηφιακού αισθητήρα (αριστερό μέρος) και οι διαφορές τους ( δεξί μέρος) [3], [4]. (σελ. 21)
- Εικόνα 4 : Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ενός χωρητικού αισθητήρα [5]. (σελ. 22)
- Εικόνα 5 : Υστέρηση ενός αισθητήρα υγρασίας [6]. (σελ. 24)
- Εικόνα 6 : Σχηματική αναπαράσταση της μη γραμμικότητας ενός αισθητήρα. [6] (σελ. 25)
- Εικόνα 7 : Σχηματική αναπαράσταση που δείχνει την αύξηση των υδρατμών όσο αυξάνεται η θερμοκρασία [7]. (σελ. 26)
- Εικόνα 8 : Η εκθετική απόκριση του αισθητήρα μεταβλητής αντίστασης (στους 25°C)[7]. (σελ. 31)
- Εικόνα 9 : Σχηματική αναπαράσταση της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων [14]. (σελ. 33)
- Εικόνα 10 : Μέθοδος CVD και PVD (αριστερά) και μέθοδος inkjet printing [17], [18]. (σελ. 34)
- Εικόνα 11 : Ολοκληρωμένος αισθητήρας αντίστασης [19]. (σελ. 34)
- Εικόνα 12 : Σχηματική αναπαράσταση χωρητικού αισθητήρα υγρασίας με δομή παράλληλης πλάκας.[20], [21] (σελ. 35)
- Εικόνα 13 : Σχηματική αναπαράσταση χωρητικού αισθητήρα ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. [22] (σελ. 36)
- Εικόνα 14 : Η επιφάνεια της άνω πλάκας η οποία είναι διάτρητη με οπές [22]. (σελ. 37)
- Εικόνα 15 : Η δομή ενός πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων.[24] (σελ. 39)
- Εικόνα 16 : Στο πεδίο  $E_1$  δημιουργείται η χωρητικότητα μεταξύ των άκρων και τοιχωμάτων των κτενιών (συνήθως ορίζεται ως  $C_f$ ). Ενώ, στο πεδίο  $E_2$  δημιουργείται η χωρητικότητα των κτενιών μεταξύ τους [25]. (σελ. 40)
- Εικόνα 17 : Η χωρητικότητα αυξάνεται με την αύξηση ηλεκτροδίων [26] (σελ. 43)
- Εικόνα 18 : Η τιμή της χωρητικότητας είναι μεγαλύτερη στα ηλεκτρόδια με μεγαλύτερο πλάτος [26]. (σελ.44)
- Εικόνα 19 : Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της χωρητικότητας [26]. (σελ. 45)
- Εικόνα 20 : Οι τρεις διαφορετικές διατάξεις [27] (σελ.46)
- Εικόνα 21 : Διάγραμμα μεταβολής χωρητικότητας για τις τρεις διατάξεις συναρτήσει της απόστασης μεταξύ ηλεκτροδίων [27]. (σελ.46)

- Εικόνα 22 : Διαφάνεια στην οποία είναι τυπωμένο το σχέδιο (σελ. 49)
- Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση φωτοευαίσθητης πλακέτας. (σελ. 50)
- Εικόνα 24 : Τοποθέτηση της διαφάνειας πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα. (σελ.50)
- Εικόνα 25 : Μηχάνημα έκθεσης UV ακτινοβολίας, Kerpro BTX-200AE. (σελ. 51)
- Εικόνα 26 : Η φωτοευαίσθητη πλακέτα κατά την έκθεση της σε UV ακτινοβολία. (σελ. 52)
- Εικόνα 27 : Τοποθέτηση καυστικής σόδας ( NaOH). (σελ. 52)
- Εικόνα 28 : Εμφάνιση σχεδίου πάνω στην πλακέτα. (σελ. 53)
- Εικόνα 29 : Τοποθέτηση διαλύματος του τριχλωριούχου σιδήρου πάνω στον αναδευτήρα (Orbital shaker PSU – 10i Grand – bio). (σελ. 54)
- Εικόνα 30 : Πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων μετά την ολοκλήρωση όλων των βημάτων κατασκευής. (σελ. 54)
- Εικόνα 31 : Προσθήκη καλωδίων στα δύο άκρα του πυκνωτή. (σελ. 55)
- Εικόνα 32 : Μέτρηση χωρητικότητας εν κενώ. (σελ. 56)
- Εικόνα 33 : DHT11 αισθητήρας υγρασίας-θερμοκρασίας. (σελ. 57)
- Εικόνα 34 : Η διάταξη του Arduino μαζί με τον DHT11 (αντί για τη χρήση breadboard η σύνδεση έγινε απευθείας στους ακροδέκτες μέσω των jump wires). (σελ. 58)
- Εικόνα 35 : Η πειραματική διάταξη. (σελ. 60)
- Εικόνα 36 : Διάγραμμα χωρητικότητας σε συνάρτηση με την υγρασία. (σελ. 62)
- Εικόνα 37 : Διάγραμμα αντίστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο. (σελ. 64)

# Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά των πυκνωτών που κατασκευάστηκαν. (σελ. 48)

Πίνακας 2 : Βήματα κατασκευής του πυκνωτή. (σελ. 49)

Πίνακας 3 : Τιμές χωρητικότητας σε συνάρτηση με την υγρασία. (σελ. 61)

Πίνακας 4 : Τιμές αντίστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο (σελ. 64)

Πίνακας 5 : Υπολογισμός του  $\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2$  (σελ. 66)

Πίνακας 6 : Υπολογισμός του  $\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2$  (σελ. 67)





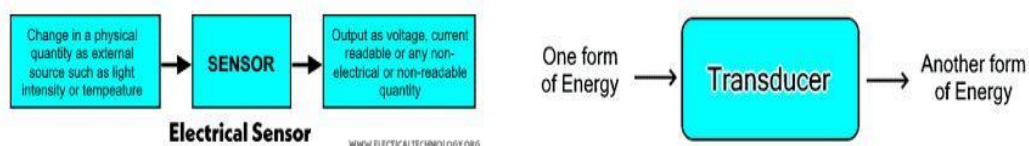
# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Αισθητήρες

Αισθητήρες ονομάζονται οι συσκευές που μετρούν μια φυσική ποσότητα και τη μετατρέπουν σε πληροφορία ηλεκτρικού μεγέθους (σήμα) που μπορεί να τη διαβάσει ο παρατηρητής.

Το πρωτογενές φυσικό μέγεθος εκείνο που δέχεται ο αισθητήρας κατά τη μέτρηση ορίζεται ως ερέθισμα (stimulus), μία φυσική ποσότητα η οποία προκαλεί διέγερση ενός αισθητήρα. Κατά τη λειτουργία του αισθητήρα, λαμβάνει χώρα τόσο η μεταφορά ενέργειας από το αντικείμενο μέτρησης προς τη συσκευή, όσο και η μετατροπή της ενέργειας αυτής σε διαφορετική μορφή. Η μεταφορά της ενέργειας είναι συνυφασμένη με την μεταφορά πληροφορίας που πραγματοποιείται κατά τη διαδικασία της μέτρησης μέσω ενός αισθητήρα. Αντίστοιχα, η μετατροπή ενέργειας αφορά την μετατροπή του ερεθίσματος όπως για παράδειγμα πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία και χημική σύσταση σε ηλεκτρικό σήμα. Η γενικότερη κατηγορία συσκευών που ασχολείται με την μετατροπή ενός είδους ενέργειας σε οποιοδήποτε άλλη ονομάζεται μορφομετατροπέας (transducer), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.

Έτσι, οι αισθητήρες είναι στην πραγματικότητα, ένας τύπος μορφομετατροπέα. Ωστόσο, οι μορφομετατροπείς συνίστανται επίσης από συσκευές που μετατρέπουν την ενέργεια σε άλλες μορφές, όπως ενεργοποιητές. Ένας ενεργοποιητής (actuator) είναι ένα εξάρτημα που χρησιμοποιεί μία μορφή ισχύος, ώστε να μετατρέψει μια διαφορετική μορφή ενέργειας σε κίνηση.



Εικόνα 1 : Αρχή λειτουργίας αισθητήρα (αριστερά) και μορφομετατροπέα (δεξιά)[1]

## 1.2 Κατηγορίες αισθητήρων

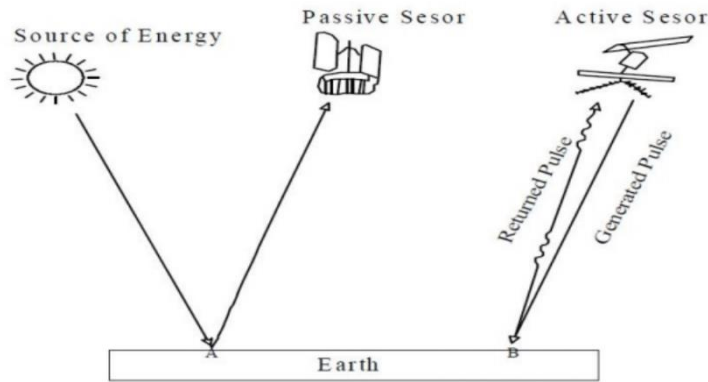
Οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με πολλούς τρόπους. Κάποιες κατηγοριοποιήσεις που ενδιαφέρουν στην συγκεκριμένη εργασία είναι ως :

- ❖ Παθητικοί (passive) και ενεργοί (active) αισθητήρες.
- ❖ Αναλογικοί και ψηφιακοί αισθητήρες.
- ❖ Χωρητικοί και αντίστασης.
- ❖ Αισθητήρες φυσικών μεγεθών ανάλογα με το είδος των περιβαλλοντικών παραγόντων που παρακολουθούν (θέσης, θερμοκρασίας, πίεσης, ροπής, μαγνητικών πεδίων, υγρασίας κ.λ.π).

## 1.3 Παθητικοί και ενεργοί αισθητήρες

Ενεργός αισθητήρας είναι αυτός που απαιτεί μια εξωτερική πηγή ενέργειας για να μπορεί να ανταποκρίνεται στην είσοδο του περιβάλλοντος και να παράγει έξοδο (Εικόνα 2). Για παράδειγμα, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε δορυφόρους καιρού συχνά απαιτούν κάποια πηγή ενέργειας για την παροχή μετεωρολογικών δεδομένων σχετικά με την ατμόσφαιρα της Γης.

Ένας παθητικός αισθητήρας, από την άλλη πλευρά, δεν απαιτεί εξωτερική πηγή ενέργειας για να ανιχνεύσει την είσοδο του από το περιβάλλον. Βασίζεται στο ίδιο το περιβάλλον για τη λειτουργία του, χρησιμοποιώντας πηγές όπως το φως ή τη θερμική ενέργεια (Εικόνα 2). Ένα καλό παράδειγμα είναι το γυάλινο θερμομέτρο υδραργύρου. Ο υδράργυρος διαστέλλεται και συστέλλεται ως απόκριση στις κυμαινόμενες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα το επίπεδο να είναι υψηλότερο ή χαμηλότερο στον γυάλινο σωλήνα. Οι εξωτερικές σημάνσεις παρέχουν ένα αναγνώσιμο από τον άνθρωπο μετρητή για την προβολή της θερμοκρασίας.



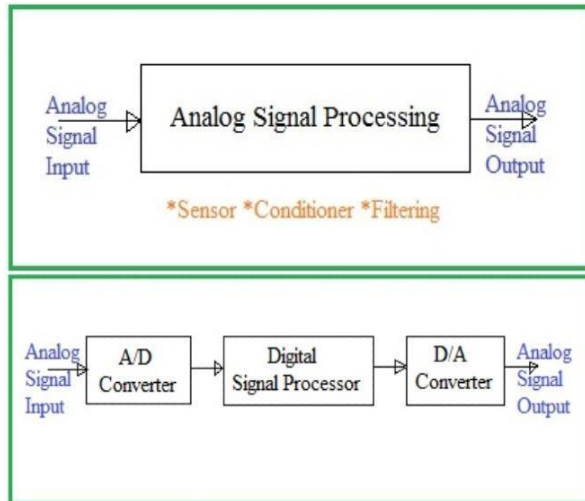
Εικόνα 2 : Παράδειγμα λειτουργίας ενός παθητικού και ενεργού αισθητήρα. [2]

## 1.4 Αναλογικοί και ψηφιακοί αισθητήρες

Οι αναλογικοί αισθητήρες όταν μετρούν εξωτερικές παραμέτρους δίνουν μια αναλογική τάση ως έξοδο (Εικόνα 3). Παράγουν δηλαδή ένα συνεχές σήμα εξόδου που είναι ανάλογο της ποσότητας που μετράται. Η τάση εξόδου κυμαίνεται από 0 έως 5 V. Οι αναλογικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για την παρακολούθηση των συνεχώς μεταβαλλόμενων φυσικών τιμών, όπως για παράδειγμα ένας αισθητήρας θερμοκρασίας (thermistor). Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ όταν μειωθεί τότε η τιμή αντίστασης μειώνεται. Επίσης, λόγω χαμηλής ισχύος αυτών των αναλογικών αισθητήρων θερμοκρασίας μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος.

Οι ψηφιακοί αισθητήρες λειτουργούν ως αισθητήρες όπου τα δεδομένα μετατρέπονται και μεταδίδονται ψηφιακά, παράγουν δηλαδή διακριτές τιμές (0 και 1). Οι ψηφιακοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως στα συστήματα επικοινωνίας, επειδή τα σήματα εξόδου τους αναπαράγονται εύκολα στον επαναλήπτη. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι σε θέση να επεξεργάζονται δεδομένα σε megabit και gigabit, αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν τη μέτρηση των ψηφιακών ηλεκτρονικών συσκευών, επίσης ο λόγος που τα ψηφιακά σήματα και οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως είναι λόγω της ανοσίας τους στο θόρυβο και των γρήγορων ρυθμών δεδομένων. Στην παρακάτω Εικόνα 3, παρουσιάζονται επίσης οι διαφορές του.

## Analog vs Digital Sensors

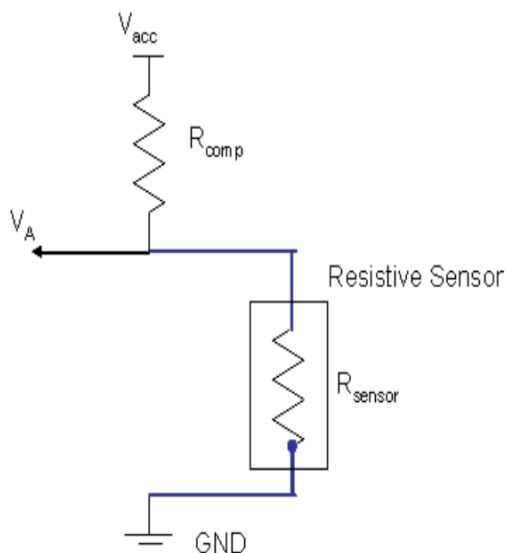


Factors	Analog Sensors	Digital Sensors
Data Transmission	Deterioration by noise	Noise immune without deterioration
Signal	Continuous Signal is representing physical measurements	Digital signal representing discrete-time signals generated by digital modulation
Bandwidth	Lower Bandwidth	Higher Bandwidth
Power	Takes large power	Negligible Power
Waves	Represented by Sine Waves	Denoted by Square Waves
Impedance	Impedance is Low	High Impedance of order 100 megaohm
Errors	Observational error occurs	Free from Observational error

Εικόνα 3 : Αρχή λειτουργίας αναλογικού και ψηφιακού αισθητήρα (αριστερό μέρος) και οι διαφορές τους ( δεξι μέρος) [3], [4]

## 1.5 Αισθητήρας ωμικής αντίστασης - χωρητικός αισθητήρας

Οι αισθητήρες αντίστασης λειτουργούν σαν αντιστάτες, είναι αντιστάσεις που αντιστέκονται στις αλλαγές σύμφωνα με κάποια περιβαλλοντική επίδραση. Για να γίνει κατανοητό καλύτερα το πως λειτουργεί ένας αισθητήρας ωμικής αντίστασης, παρουσιάζεται παρακάτω ένα κύκλωμα με αισθητήρα αντίστασης μαζί με τον τύπο υπολογισμού.

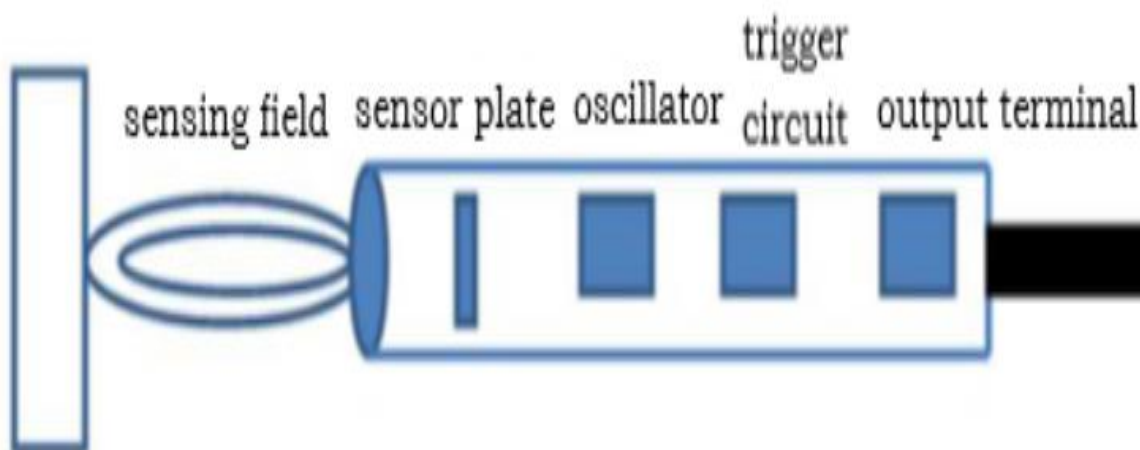


$$V_A = V_{acc} * \frac{R_{sensor}}{R_{sensor} + R_{comp}} \quad (1.1)$$

Επειδή δεν γίνεται να υπολογιστεί άμεσα η αντίσταση, υπολογίζεται μέσω υπολογισμού της τάσης, το παραπάνω κύκλωμα, ουσιαστικά είναι ένας διαιρέτης τάσης, όπου η πάνω αντίσταση παραμένει σταθερή ενώ στο κάτω μέρος βρίσκεται ο αισθητήρας, σε αυτό το μέρος θα μπορούσε να βρίσκεται οποιοσδήποτε γνωστός αισθητήρας που λειτουργεί ως αντιστάτης, για παράδειγμα ένας thermistor ή photoresistor. Εφόσον αλλάξει η αντίσταση  $R_{\text{sensor}}$ , η τιμή της τάσης εξόδου θα ανέβει ή θα πέσει, έτσι γίνεται η ανίχνευση της αλλαγής στην αντίσταση και μεταδίδεται η πληροφορία.

Οι χωρητικοί αισθητήρες λειτουργούν σαν απλοί πυκνωτές, όταν υπάρχει επαφή ή ακόμα και προσέγγιση προς τον αισθητήρα, μπορεί να ανιχνευθεί η επαφή μέσω της αλλαγής στην χωρητικότητα του. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται κυρίως σε τέσσερα υλικά ( Εικόνα 4) :

- Μία πλάκα 2 ηλεκτροδίων.
- Έναν ταλαντωτή.
- Κύκλωμα ενεργοποίησης.
- Έναν ακροδέκτη για την έξοδο.



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ενός χωρητικού αισθητήρα. [5]

Η μεταλλική πλάκα συνδέεται ηλεκτρικά με τον ταλαντωτή, λόγω των δύο ηλεκτροδίων που περιέχει η πλάκα, υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο έξω από την αριστερή πλευρά του

εικονιζόμενου αισθητήρα, έτσι σε περίπτωση προσέγγισης ή επαφής ενός αντικειμένου με την επιφάνεια του ηλεκτρικού πεδίου που παρουσιάζεται, η χωρητικότητα του ταλαντωτή αμέσως αλλάζει και παράλληλα το κύκλωμα ενεργοποίησης αλλάζει την τιμή της εξόδου.

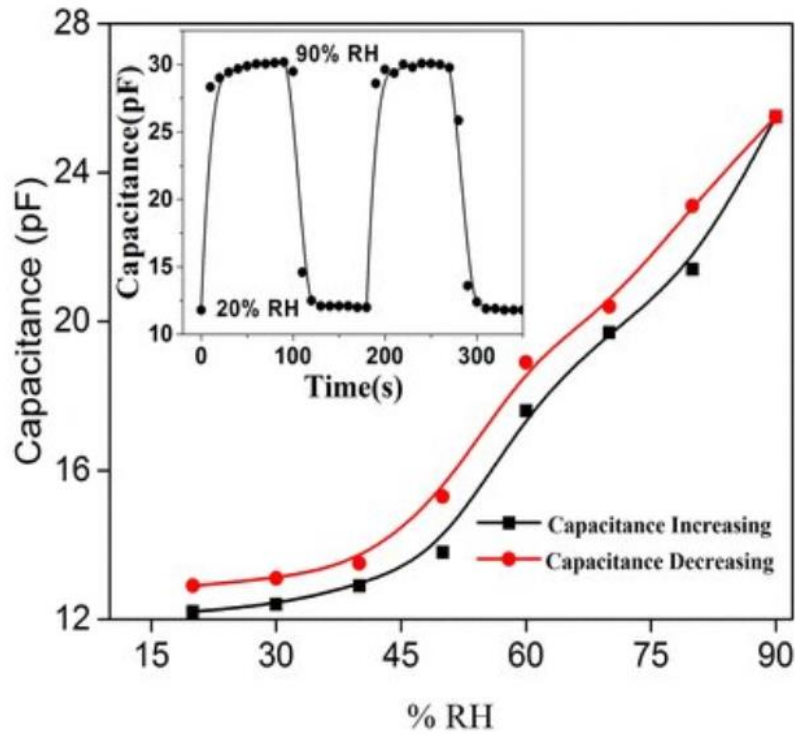
Λόγω της συγκεκριμένης λειτουργίας του χωρητικού αισθητήρα, χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανίχνευση :

- Ροής
- Πίεσης
- Υγρασίας
- Πάχους

## 1.6 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα για την υλοποίηση και κατασκευή του είναι :

- Συνάρτηση μεταφοράς : Η συνάρτηση μεταφοράς, συνήθως μέσω μιας γραφικής παράστασης, δείχνει την λειτουργική σχέση μεταξύ μιας φυσικής εισόδου σήματος και του ηλεκτρικού σήματος εξόδου.
- Υστέρηση : Η υστέρηση αφορά το φαινόμενο όταν παρουσιάζονται διαφορετικές τιμές του σήματος στην έξοδο για τις ίδιες τιμές ερεθίσματος εισόδου . Ως παράδειγμα παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα υστέρησης ενός αισθητήρα υγρασίας (Εικόνα 5).

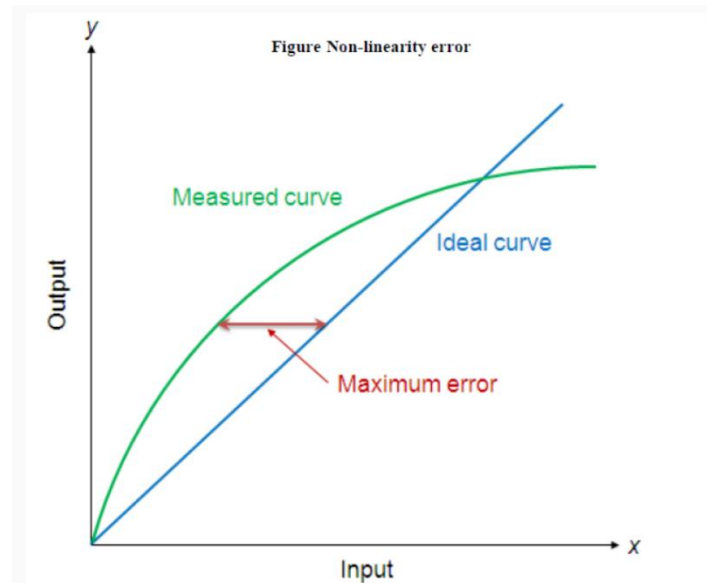


Εικόνα 5 : Υστέρηση ενός αισθητήρα υγρασίας [6].

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, παρατηρούνται διαφορετικές τιμές πλάτους εξόδου για τα ίδια ερεθίσματα εισόδου.

- Θόρυβος : Είναι κοινό για όλους τους αισθητήρες να παράγουν θόρυβο, προκύπτει συνήθως από τις θερμικές κινήσεις φορτίων που βρίσκονται μέσα στον αισθητήρα, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επίσης θερμικός θόρυβος.
- Μη γραμμικότητα : Όταν υπάρχει αναφορά για την μη γραμμικότητα του αισθητήρα, αναφέρεται για το σφάλμα μη γραμμικότητας που είναι η μέγιστη γραμμική απόκλιση μεταξύ της τιμής εξόδου του αισθητήρα και της εισόδου έναντι μιας ιδανικής ευθείας γραμμής, που συνδέει το σημείο μηδέν μιας κλίμακας περιοχής μέτρησης, με το τερματικό σημείο της (Εικόνα 6).





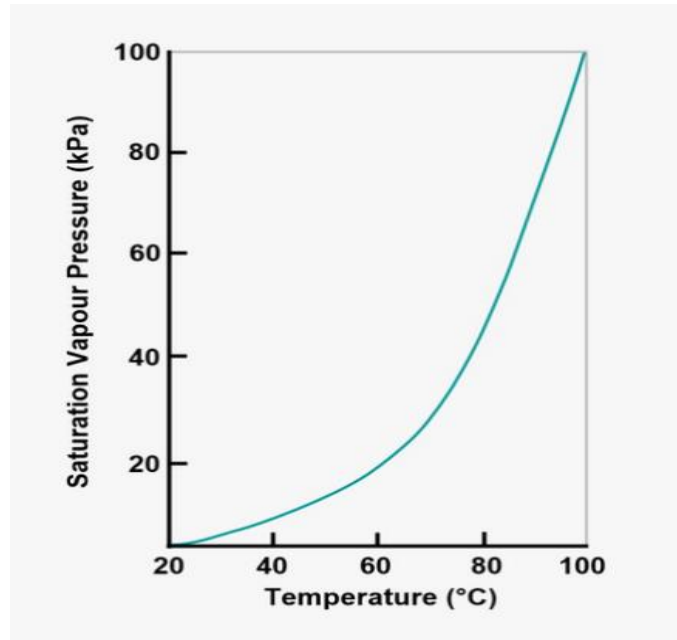
Εικόνα 6 : Σχηματική αναπαράσταση της μη γραμμικότητας ενός αισθητήρα. [6]

- Διακριτική ικανότητα ( resolution) : Αφορά την ελάχιστη αλλαγή στην τιμή της εισόδου που είναι απαραίτητη για την δυνατότητα ανίχνευσης και της παραμικρής μεταβολής στην τιμή εξόδου.
- Ακρίβεια : Η ακρίβεια του αισθητήρα είναι η μέγιστη διαφορά που υπάρχει μεταξύ της πραγματικής τιμής και της υποδεικνυόμενης τιμής της εξόδου του αισθητήρα.
- Ευαισθησία : Ορίζεται ως προς τη σχέση μεταξύ ενός φυσικού σήματος εισόδου και του ηλεκτρικού σήματος εξόδου, δηλαδή η παραμικρή αλλαγή του ηλεκτρικού σήματος προκαλεί την ανάλογη αλλαγή φυσικού σήματος.

# 2 Υγρασία

## 2.1 Θεωρία

Η υγρασία είναι η παρουσία υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Όσο περισσότερο νερό εξατμίζεται σε μια δεδομένη περιοχή, τόσο περισσότεροι υδρατμοί ανεβαίνουν στον αέρα και τόσο μεγαλύτερη είναι η υγρασία αυτής της περιοχής. Οι υδρατμοί εισέρχονται στην ατμόσφαιρα από την εξάτμιση υγρών επιφανειών, όπως των θαλασσών και των λιμνών. Η υγρασία επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος που μετράται. Μια σταθερή ποσότητα υδρατμών θα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη υγρασία στον ψυχρό αέρα από ότι στον ζεστό αέρα. Επιπλέον, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και η ποσότητα των υδρατμών που απαιτείται για να επιτευχθεί ο κορεσμός (Εικόνα 7). Έτσι ο όρος υγρασία αναφέρεται κυρίως στην υγρασία του αέρα όπου περιγράφει την ποσότητα των υδρατμών που υπάρχουν για μία ορισμένη χρονική στιγμή στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 7 : Σχηματική αναπαράσταση που δείχνει την αύξηση των υδρατμών όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. [7]

Οι μετρήσεις υγρασίας εκφράζονται μέσω παραμέτρων που αφορούν την ποσότητα υδρατμών στον αέρα και ονομάζονται υγρομετρικές παράμετροι :

- Η απόλυτη υγρασία (Absolute humidity).
- Η σχετική υγρασία (Relative humidity ή ως συντομογραφία RH).
- Η ειδική υγρασία (Specific humidity).
- Σημείο δρόσου (dew point).

## 2.2 Απόλυτη υγρασία

Η απόλυτη υγρασία αναφέρεται στη συγκέντρωση των υδρατμών στον αέρα, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία μετριέται ως ο λόγος της μάζας των υδρατμών προς τον όγκο του αέρα μέσα στον οποίο περιέχονται οι υδρατμοί αυτοί [8].

$$\rho_v = \frac{m_v}{v}, \left( \frac{gr}{m^3} \right) (2.1)$$

Όπου :

$\rho_v$  : Απόλυτη υγρασία.

$m_v$  : Μάζα υδρατμών.

$V$  : Όγκος αέρα.

## 2.3 Σχετική υγρασία (RH)

Η σχετική υγρασία εκφράζει το πηλίκιο των υδρατμών που υπάρχουν σε μια δεδομένη στιγμή στην ατμόσφαιρα, ως προς το μέγιστο ποσό που θα μπορούσε να συγκρατήσει ο αέρας κάτω από τις ίδιες συνθήκες, δηλαδή με το σημείο κορεσμού στην ίδια θερμοκρασία . Η σχετική υγρασία εκφράζεται γενικά με ποσοστά π.χ 10%, 40% κ.λπ. και είναι απολύτως ανάλογη της θερμοκρασίας, όπου παρουσιάζει πολύ μεγάλη ευαισθησία στις αλλαγές της θερμοκρασίας.

Αυτό σημαίνει ότι εάν υπάρχει σταθερή θερμοκρασία στο περιβάλλον, η σχετική υγρασία θα είναι επίσης σταθερή.

Για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας, δίνεται ο παρακάτω τύπος :

$$\text{Relative Humidity} = \frac{\text{actual vapor density}}{\text{saturation vapor density}} \times 100\%$$

(2.2)

Οι τιμές που προκύπτουν εκφράζουν το πόσο επί τοις εκατό, η εκάστοτε υγρομετρική κατάσταση του αέρα απέχει από την κατάσταση κορεσμού [9].

Η σχετική υγρασία επίσης μπορεί να εκφραστεί ισοδύναμα ως προς την τάση ή πίεση υδρατμών στον αέρα σε σύγκριση με την τάση ή πίεση ατμών κορεσμού μέσα. Η πίεση των υδρατμών ορίζεται ως τάση των ατμών και συμβολίζεται συνήθως με το γράμμα  $e$ . Από την άλλη η πίεση ατμών κορεσμού ορίζεται ως ο κορεσμός υδρατμών ( μέγιστη τάση ) και συμβολίζεται με το γράμμα  $e_s$ .

Η παραπάνω περιγραφή δίνει τον εξής τύπο :

$$RH = \left( \frac{e}{e_s} \right) * 100 \% \quad (2.3)$$

## 2.4 Ειδική υγρασία και σημείο δρόσου

Η ειδική υγρασία ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας των υδρατμών στον αέρα προς την ποσότητα του υγρού αέρα. Μπορεί να υπολογιστεί εφόσον είναι γνωστή η σχετική υγρασία, η πυκνότητα των υδρατμών και η πυκνότητα του αέρα.

Σημείο δρόσου χαρακτηρίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία ο ατμοσφαιρικός αέρας, υπό σταθερή πίεση, πρέπει να ψυχθεί ώστε να προκύψει ο κορεσμός προς τους υδρατμούς, δηλαδή αρχίζουν να υγροποιούνται. Η ποσότητα του υγρού αέρα εξαρτάται από το σημείο δρόσου, όσο πιο ψηλό είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του. Όταν το σημείο δρόσου και η θερμοκρασία αέρος έχουν την ίδια τιμή, τότε ο αέρας έχει κορεστεί πλήρως, άρα η σχετική υγρασία είναι 100%.

# 3 Αισθητήρες υγρασίας

## 3.1 Βασικά στοιχεία αισθητήρα υγρασίας

Η λειτουργία του αισθητήρα υγρασίας αφορά την μέτρηση της υγρασίας στο περιβάλλον της και την μετατροπή των μετρήσεων σε αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα.

Οι αισθητήρες υγρασίας διαφέρουν πολύ σε μέγεθος και λειτουργικότητα, μπορούν να βρεθούν σε φορητές συσκευές ή να είναι ενσωματωμένα μέσα σε διάφορα συστήματα, χρησιμοποιούνται συνήθως στη μετεωρολογία, την ιατρική, και την αυτοκινητοβιομηχανία. Το βασικό στοιχείο του αισθητήρα είναι το υλικό που χρησιμοποιείται και κατά πόσο αυτό είναι ευαίσθητο στην υγρασία, όταν το υλικό αλληλεπιδρά με την υγρασία, (χημική αντίδραση), μπορεί να αλλάξει την ποιότητα, το πάχος και τα μηχανικά και ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά του.

Η απόλυτη υγρασία και η σχετική υγρασία είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μονάδες για την μέτρηση της υγρασίας. Με βάση τις μονάδες μέτρησης, οι αισθητήρες υγρασίας υπάγονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους αισθητήρες σχετικής υγρασίας και απόλυτης υγρασίας. Οι μετρήσεις σχετικής υγρασίας προτιμώνται από τις μετρήσεις απόλυτης υγρασίας στην πλειονότητα των εφαρμογών. Επειδή είναι συνήθως απλούστερο και επομένως λιγότερο ακριβό, οι αισθητήρες σχετικής υγρασίας χρησιμοποιούνται συχνότερα σε εφαρμογές που αφορούν την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Για τη δημιουργία αισθητήρων υγρασίας, χρησιμοποιούνται συχνότερα οξείδια μετάλλων, πολυμερή υλικά και ενώσεις που βασίζονται στον άνθρακα.[10]

Οι απαιτήσεις για την σχεδίαση σωστού αισθητήρα υγρασίας πρέπει να έχει, τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Υψηλή ευαισθησία σε ένα ευρύ φάσμα της περιεκτικότητας σε νερό και θερμοκρασία.
- Γρήγορος χρόνος απόκρισης.
- Αμελητέα εξάρτηση από την θερμοκρασία

- Μικρή υστέρηση.
- Γραμμική απόκριση.

Πολλά από τα ζητήματα που αφορούν τον σχεδιασμό των αισθητήρων υγρασίας οφείλονται στους περιορισμούς για τις επιλογές των υλικών των αισθητήρων και την καταλληλότητά τους για διάφορες τεχνολογίες κατασκευής. Υπάρχουν δύο τρόποι για την δημιουργία ενός ανώτερου υλικού ανίχνευσης υγρασίας, δημιουργώντας ένα νέο υλικό και ενισχύοντας μια γενική ιδιότητα υλικού.

Οι ισχυρές χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του υλικού ανίχνευσης και της αναλυόμενης ουσίας εξασφαλίζουν υψηλή ευαισθησία, ενώ οι γρήγοροι χρόνοι απόκρισης ευνοούνται από (φυσικές ή χημικές) ασθενείς αλληλεπιδράσεις. Μέχρι τώρα δεν υπήρχε ιδανικό υλικό για το αισθητήριο στοιχείο που θα μπορούσε να καλύψει ταυτόχρονα όλες αυτές τις ανάγκες και οι επιστημονικοί ερευνητές πρέπει επειγόντως να εξερευνήσουν νέα υλικά ανίχνευσης υγρασίας με εξαιρετική απόδοση. Πολυάριθμες ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των κεραμικών, των ηλεκτρολυτών, των οργανικών πολυμερών και των σύνθετων υλικών, έχουν χρησιμοποιηθεί ως ουσίες για την ανίχνευση υγρασίας τα τελευταία χρόνια. [11]

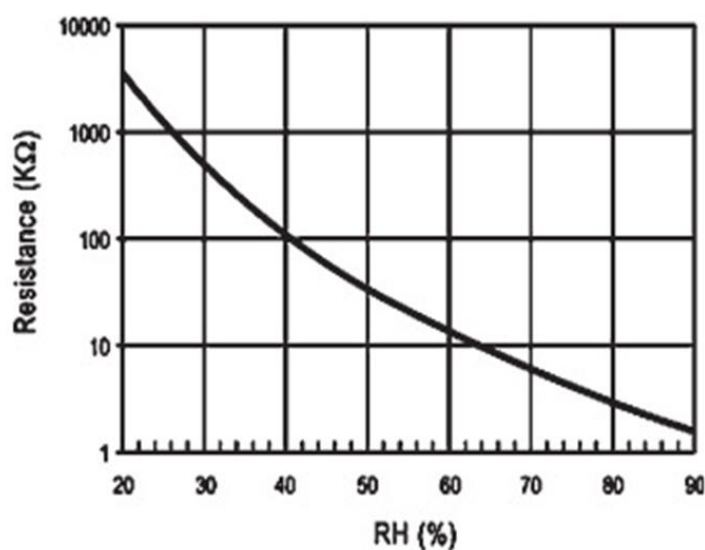
Μερικές από τις πιο χρησιμοποιούμενες μεθόδους μέτρησης υγρασίας με βάση τα αισθητήρια υλικά είναι :

- Οι χωρητικοί αισθητήρες (capacitive type sensors)
- Οι αισθητήρες αντίστασης (resistive type sensors)

## 3.2 Αισθητήρας ωμικής αντίστασης

Οι αισθητήρες υγρασίας ωμικής αντίστασης μετρούν την αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υγροσκοπικού μέσου, όπως ένα αγώγιμο πολυμερές, αλάτι ή ένα επεξεργασμένο υπόστρωμα, όπου η αλλαγή της σύνθετης αντίστασης είναι συνήθως εκθετικά αντίστροφη σε σχέση με την σχετική υγρασία, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 8 [12].

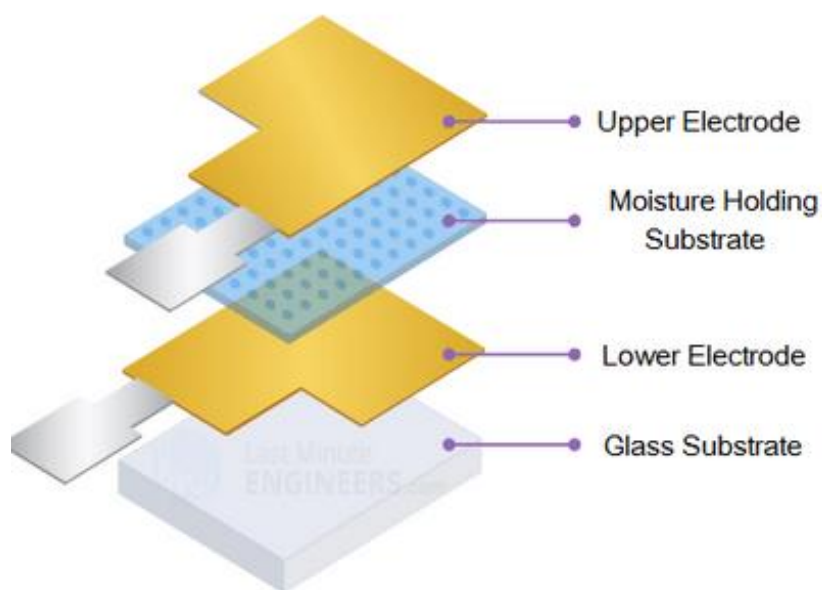
Τα ιόντα ή τα ηλεκτρόνια, είναι φορείς αγωγιμότητας για τους αισθητήρες υγρασίας αντίστασης, κατά την απορρόφηση των υδρατμών από το περιβάλλον, τα μόρια των υδρατμών διασπώνται σε ιοντικές ομάδες υδροξυλίου με αποτέλεσμα, την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας [13]. Όσο είναι μεγαλύτερη η απορρόφηση των υδρατμών, τόσο το αγώγιμο υλικό αυξάνει την αγωγιμότητα και επομένως μειώνεται η αντίσταση, άρα η αντίσταση του αγώγιμου υλικού είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ποσότητα της υγρασίας που απορροφάται. Η αλλαγή της αντίστασης μπορεί να υπολογιστεί μέσω ενός απλού ηλεκτρικού κυκλώματος, ενώ το εύρος της σύνθετης αντίστασης συνήθως κυμαίνεται από 1 ΚΩ έως 100 ΜΩ.



Εικόνα 8 : Η εκθετική απόκριση του αισθητήρα μεταβλητής αντίστασης (στους 25°C)[12].

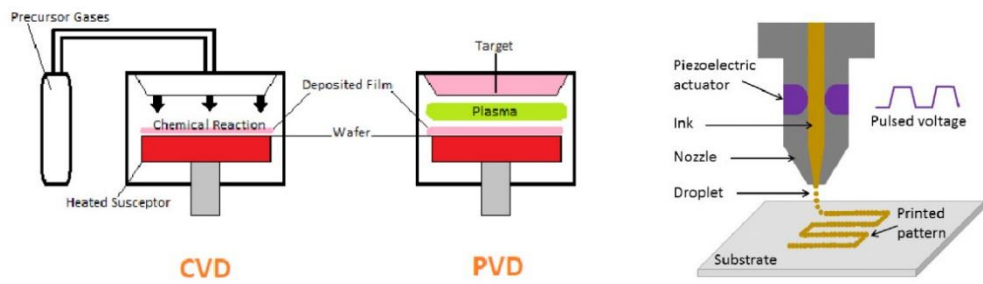
Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες, χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια ευγενών πολύτιμων μετάλλων, όπως χρυσός και οξείδιο ρουθηνίου ( $\text{RuO}_2$ ), που έχουν τοποθετηθεί σε μία λεπτή ή πυκνή γυάλινη επιφάνεια ή σε κεραμικό υπόστρωμα (Εικόνα 9). Ευαίσθητες στην υγρασία μεμβράνες, τοποθετούνται ανάμεσα σε ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια έτσι ώστε να αγγίζουν τα δύο ηλεκτρόδια (Εικόνα 11). Το υπόστρωμα μπορεί να καλυφθεί είτε με λεπτά κεραμικά αισθητήρια φιλμ είτε με ηλεκτρολυτικά αγώγιμα πολυμερή όπως τα άλατα και οξέα.





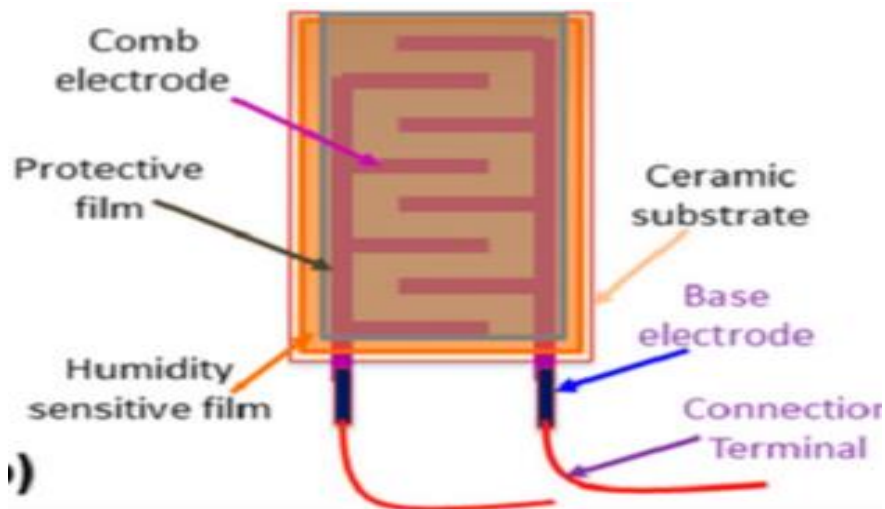
Εικόνα 9 : Σχηματική αναπαράσταση της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων [14].

Πολλοί τέτοιοι αισθητήρες, σχηματίζονται με την εφαρμογή των δύο τεχνικών εκτύπωσης, inkjet εκτύπωση, και τεχνικών επικάλυψης, π.χ. μεθόδων χημικής εναπόθεσης (CVD) και φυσική εναπόθεση ατμού υπό κενό ( PVD) (Εικόνα 10). Η CVD είναι μια τεχνική όπου ένα στερεό υλικό εναποτίθεται από έναν υδρατμό ή αέριο, μέσω κάποιας χημικής αντίδρασης που συμβαίνει πάνω ή κοντά σε μια κανονικά θερμαινόμενη επιφάνεια υποστρώματος [15], ενώ η μέθοδος φυσικής PVD που λαμβάνει χώρα σε συνθήκες κενού, χρησιμοποιείται για την εναπόθεση οποιουδήποτε τύπου ανόργανων υλικών όπως μέταλλα, κράματα και οργανικά υλικά [16].



Εικόνα 10 : Μέθοδος CVD και PVD (αριστερά) και μέθοδος inkjet printing [17], [18]

Το μικρό μέγεθος, το χαμηλό κόστος, και η μακροπρόθεσμη σταθερότητα καθιστούν τους αισθητήρες ωμικής αντίστασης αντί κατάλληλους για χρήση σε προϊόντα ελέγχου και παρακολούθησης για βιομηχανικές, εμπορικές και οικιακές εφαρμογές.

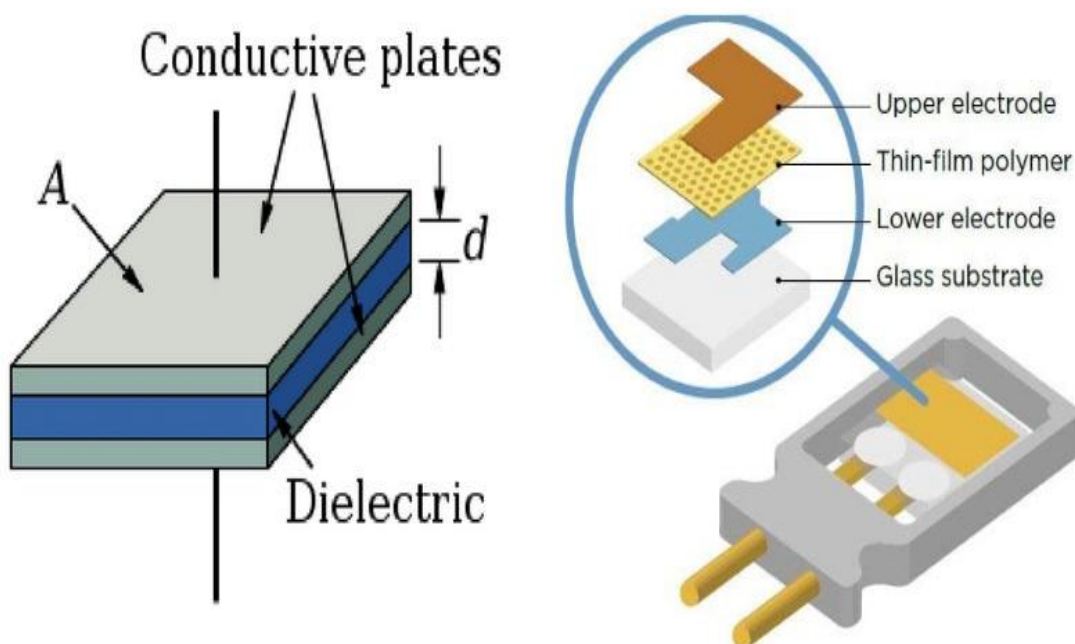


Εικόνα 11 : Ολοκληρωμένος αισθητήρας αντίστασης [19].

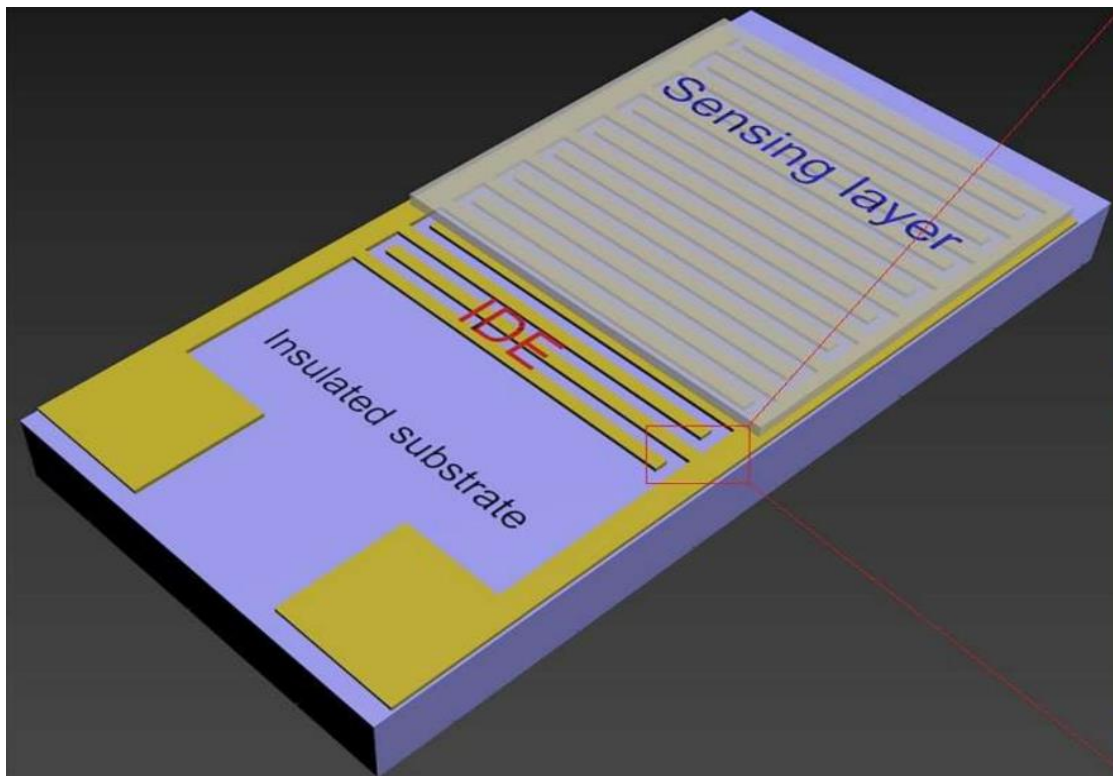
### 3.3 Χωρητικός αισθητήρας υγρασίας

Ο χωρητικός αισθητήρας υγρασίας βασίζεται στην αλλαγή της διηλεκτρικής σταθεράς του πυκνωτή λόγω της απορρόφησης νερού στην ατμόσφαιρα, συνήθως κατασκευάζεται με δύο μεθόδους, είτε με δομή παράλληλης πλάκας (PP), είτε με ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια (IDE). Σε αντίθεση με τους αισθητήρες υγρασίας, οι χωρητικοί αισθητήρες ανταποκρίνονται γραμμικά με την σχετική υγρασία.

Η τυπική δομή της παράλληλης πλάκας αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια (πάνω και κάτω) με ένα ευαίσθητο στην υγρασία διηλεκτρικό υλικό ενδιάμεσα (Εικόνα 12). Σε αυτή τη διαμόρφωση, το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και το εναλλασσόμενο ρεύμα μπορούν και τα δύο να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της χωρητικότητας του διηλεκτρικού υλικού. Ενώ στην περίπτωση των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων τα οποία σχηματίζονται σε σχήμα χτένας, δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο και επομένως μετριέται η χωρητικότητα του διηλεκτρικού υλικού που τοποθετείται, είτε πάνω, είτε κάτω από τα ηλεκτρόδια (Εικόνα 13).

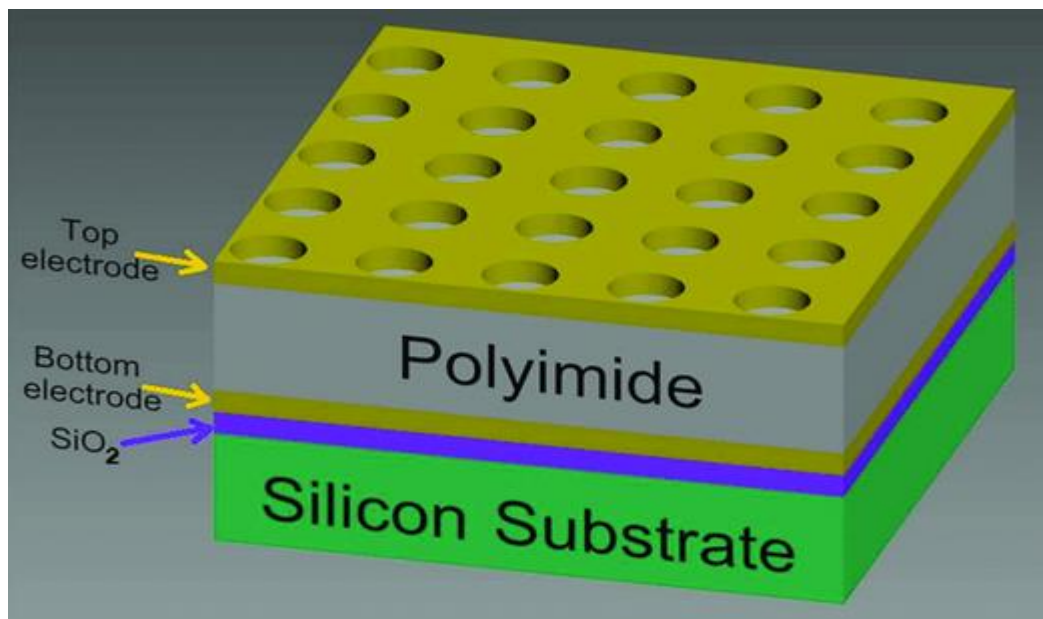


Εικόνα 12 : Σχηματική αναπαράσταση χωρητικού αισθητήρα υγρασίας με δομή παράλληλης πλάκας [20], [21].



Εικόνα 13 : Σχηματική αναπαράσταση χωρητικού αισθητήρα ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. [22]

Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η επαφή των μορίων νερού με το ευαίσθητο υλικό, στους PP αισθητήρες, η επιφάνεια της κατασκευάζεται έτσι ώστε η άνω πλάκα να είναι διάτρητη με οπές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14, και εφόσον το διηλεκτρικό υλικό βρίσκεται ανάμεσα, η αλλαγή της διηλεκτρικής σταθεράς επηρεάζει τη συνολική χωρητικότητα, ενώ στους IDE αισθητήρες η χωρητικότητα επηρεάζεται μόνο στο πάνω μέρος τους.[22]



Εικόνα 14 : Η επιφάνεια της άνω πλάκας η οποία είναι διάτρητη με οπές [22]

Οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες, όπου η ονομασία εξαρτάται από τα ευαίσθητα διηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες κεραμικού τύπου (Ceramic-Type capacitive humidity sensor), με υλικό όπως το οξείδιο του αργιλίου ή αλλιώς αλουμίνα ( $Al_2O_3$ ) ή υλικά βασισμένα πάνω στα οξείδια μέταλλα περοβσκίτη, όπως το τιτανικό στρόντιο ( $TiO_3$ ) το οποίο τοποθετείται πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου (Si)[23]. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκει ο αισθητήρας πολυμερούς τύπου (Polymer-Type capacitive humidity sensor), με πολυμερή υλικά, όπως το πολυϊμίδιο (Pi) το οποίο τοποθετείται πάνω σε υπόστρωμα πολυπυριτίου (poly-Si). Το πολυϊμίδιο είναι ένα πορώδες υλικό, το οποίο κατά την απορρόφηση της υγρασίας, προκαλεί ισχυρό δεσμό μεταξύ των ιμιδικών ομάδων του και των μορίων νερού, με αποτέλεσμα να το κάνει πολύ ευαίσθητο στην υγρασία και για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται περισσότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά. Τέλος το υπόστρωμα των συγκεκριμένων αισθητήρων αποτελείται συνήθως από γυαλί, κεραμικό υλικό ή σιλικόνη, ενώ

τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα συνήθως από χρυσό υλικό και η διαδικασία κατασκευής και εκτύπωσης είναι παρόμοια με αυτή του αισθητήρα ωμικής αντίστασης.

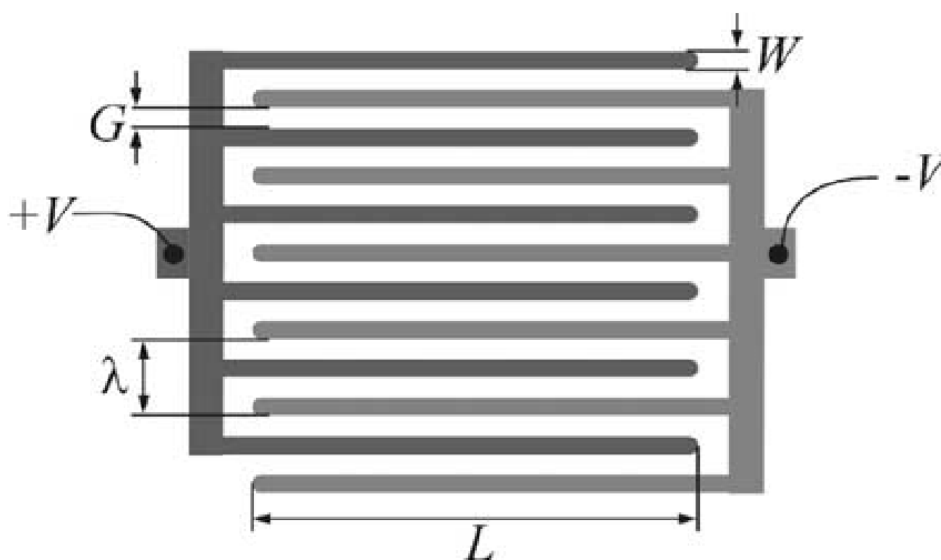
Ένα σημαντικό φαινόμενο, το οποίο προκαλεί μεταβολή της χωρητικότητας ενός χωρητικού αισθητήρα υγρασίας, είναι η φυσική προσρόφηση. Καθώς τα επίπεδα υγρασίας αυξάνονται σταθερά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φυσικής προσρόφησης, σχηματίζονται πολλές στρώσεις μορίων νερού στην επιφάνεια του ευαίσθητου υλικού που χρησιμοποιείται για την υγρασία, γεγονός που προκαλεί την εκθετική αύξηση της χωρητικότητας του αισθητήρα υγρασίας. Επειδή τα μόρια του νερού στη φυσική προσρόφηση συνδέονται μεμονωμένα, πολώνονται εύκολα, γεγονός που αυξάνει την χωρητικότητα. Καθώς τα μόρια του νερού παραμένουν ώστε να συμπυκνωθούν στην επιφάνεια του αισθητήριου στρώματος, σχηματίζεται ένα επιπλέον στρώμα μορίων νερού στην κορυφή του πρωτογενούς προσροφημένου στρώματος νερού [13]

## 4 Πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

### 4.1 Εισαγωγή

Οι πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται συχνά στους χημικούς αισθητήρες, βιοαισθητήρες, και τελευταία χρόνια όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, στους αισθητήρες υγρασίας. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η μέτρηση της απόκρισης στην αλληλεπίδραση μεταξύ της αναλυόμενης ουσίας και του ευαίσθητου υλικού στρώματος, όταν υπάρχει αλλαγή στην χωρητικότητα ή αντίσταση. [24]

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15, η δομή των συγκεκριμένων πυκνωτών αποτελείται από μία ομοεπίπεδη διάταξη, όπου ένα σύνολο από ηλεκτρόδια (αγωγικές πλάκες) είναι παράλληλα μεταξύ τους και ενδοδιαπλεκόμενα. Τα ηλεκτρόδια λόγω του σχηματισμού τους, ονομάζονται επίσης ως κτένια. Το θετικό δυναμικό του κτενιού με μήκος  $L$  και πάχος  $w$ , αλληλεπικαλύπτεται με το αρνητικό δυναμικό του κτενιού, σε απόσταση  $G$  μεταξύ τους, όπου, για να υπάρχει διαφορά δυναμικού, η απόσταση δεν πρέπει να είναι σε καμία περίπτωση τέτοια ώστε τα κτένια να ακουμπάνε μεταξύ τους.



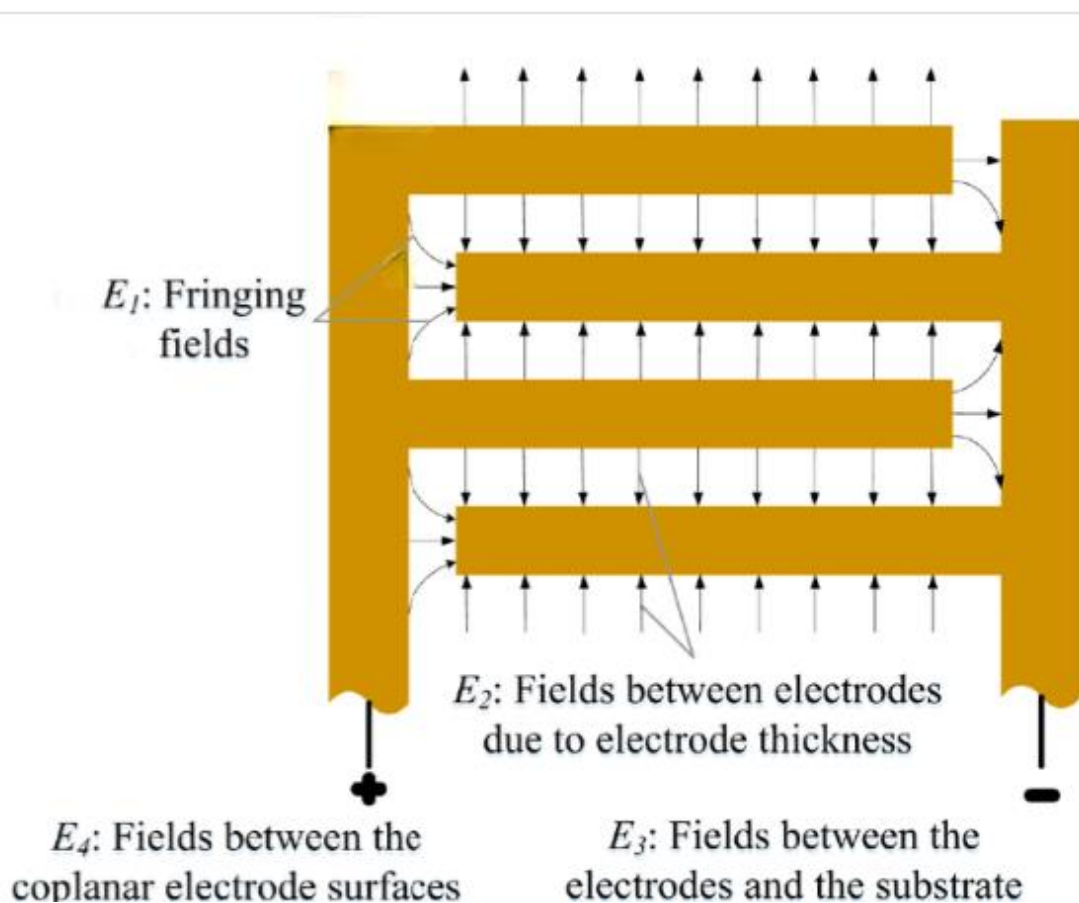
Εικόνα 15 : Η δομή ενός πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. [24]

## 4.2 Υπολογισμός χωρητικότητας

Η συνολική χωρητικότητα του συγκεκριμένου πυκνωτή εξαρτάται από τις παραπάνω παραμέτρους και από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος στο οποίο είναι τοποθετημένα τα κτένια. Το πάχος του κτενιού ( $W$ ), ο αριθμός των κτενιών, η απόσταση μεταξύ τους ( $G$ )

και η διηλεκτρική σταθερά του υλικού που εναποτίθεται στην επιφάνεια, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την μεταβολή της χωρητικότητας. Η συνολική χωρητικότητα υπολογίζεται από το άθροισμα της χωρητικότητας μεταξύ των κτενιών και την χωρητικότητα που δημιουργείται μεταξύ της άκρης του κτενιού με το τοίχωμα του ηλεκτροδίου.

Για την καλύτερη κατανόηση, παρουσιάζεται η παρακάτω Εικόνα 16, στην οποία φαίνονται τα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται και με βάση αυτά δημιουργούνται οι δύο χωρητικότητες που αναφέρθηκαν .



Εικόνα 16 : Στο πεδίο  $E_1$  δημιουργείται η χωρητικότητα μεταξύ των άκρων και τοιχωμάτων των κτενιών (συνήθως ορίζεται ως  $C_f$ ). Ενώ, στο πεδίο  $E_2$  δημιουργείται η χωρητικότητα των κτενιών μεταξύ τους [25].



Άρα, η χωρητικότητα εκφράζεται από την παρακάτω σχέση :

$$C_{\text{total}} = C + C_f \quad (4.1)$$

Όπου C, είναι ο γενικός τύπος της χωρητικότητας ενός πυκνωτή και δίνεται από την γνωστή σχέση :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (4.2)$$

Όπου,

$\epsilon_0$  η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού και έχει τιμή  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$  στο S.I.

$\epsilon_r$  η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού που συνδέει τα ηλεκτρόδια.

A το εμβαδόν της επιφάνειας της πλάκας του ηλεκτροδίου

d Η απόσταση της πλάκας

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και πριν, η χωρητικότητα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, άρα η παραπάνω σχέση της χωρητικότητας, με βάση την παραπάνω Εικόνα 16, δίνεται ως :

$$C = \eta \epsilon \frac{LW}{G} \quad (4.3)$$

Όπου,

$\eta$  ο αριθμός των ηλεκτροδίων

$\epsilon$  η διηλεκτρική σταθερά του υλικού

L το μήκος των ηλεκτροδίων

W το πάχος των ηλεκτροδίων

G η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων

Σημειώνεται, πως για κάθε διαφορετικό είδος πυκνωτή, υπάρχει και διαφορετικός τύπος για την χωρητικότητα.

Για αυτό, στην συνέχεια θα παρουσιαστούν από δημοσιεύματα, μερικοί υπολογισμοί της χωρητικότητας καθώς και την μεταβολή της χωρητικότητας με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή.

### 4.3 Μέτρηση χωρητικότητας

Υπάρχουν αρκετά μοντέλα για την μέτρηση της χωρητικότητας του συγκεκριμένου πυκνωτή, ωστόσο πάντα λαμβάνονται υπόψη, η διηλεκτρική σταθερά του, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι φυσικοί παράμετροι, αφού επηρεάζουν σημαντικά την μεταβολή της χωρητικότητας. Αυτό φαίνεται και στις παρακάτω δημοσιεύσεις.

Στην δημοσίευση DESIGN AND OPTIMIZATION OF INTERDIGITAL CAPACITOR, Beerasha R S, A M Khan, Manjunath Reddy [26], κατασκευάστηκε πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμεων ηλεκτροδίων, πάνω σε υπόστρωμα με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon = 3.66$  και ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από χαλκό με πάχος 0.032 mm.

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της χωρητικότητας είναι :

$$C = (\epsilon r + 1)l[(N - 3)A1 + A2 ](\text{pF}) \quad (4.4)$$

Όπου,

$\epsilon r$  η διηλεκτρική σταθερά του υλικού υποστρώματος

$l$  το μήκος των ηλεκτροδίων

$N$  ο αριθμός των ηλεκτροδίων

$A1, A2$  η συνεισφορά των εσωτερικών και εξωτερικών ηλεκτροδίων αντίστοιχα, με

$$A1 = 4.409 \tanh \left[ 0.55 \left( \frac{h}{W} \right)^{-0.45} \right] \cdot 10^{-6} (\text{pF}/\mu\text{m}) \quad (4.5)$$

$$A2 = 9.92 \tanh \left[ 0.52 \left( \frac{h}{W} \right)^{-0.5} \right] \cdot 10^{-6} \text{ (pF/}\mu\text{m)} \quad (4.6)$$

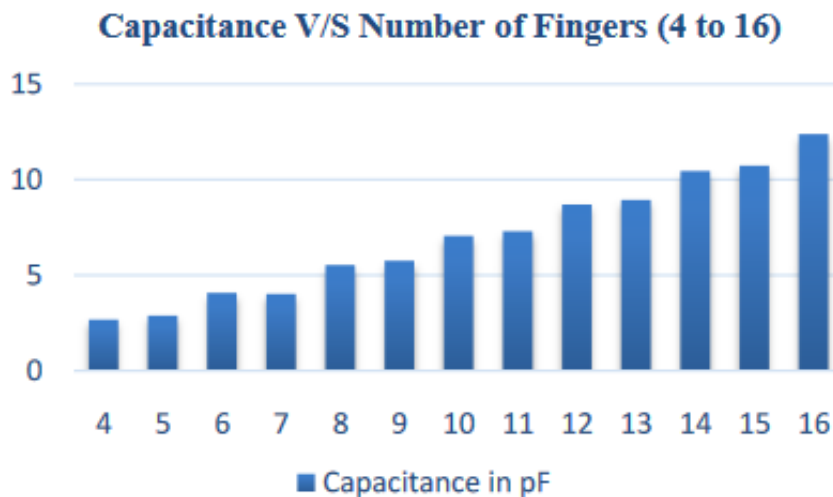
Όπου,

$h$  το ύψος του υποστρώματος

$W$  το πλάτος του αγώγιμου υλικού

Στην συγκεκριμένη δημοσίευση μετρήθηκαν οι χωρητικότητες συναρτήσει του πλάτους ηλεκτροδίου, τον αριθμό ηλεκτροδίων και της απόστασης μεταξύ ηλεκτροδίων.

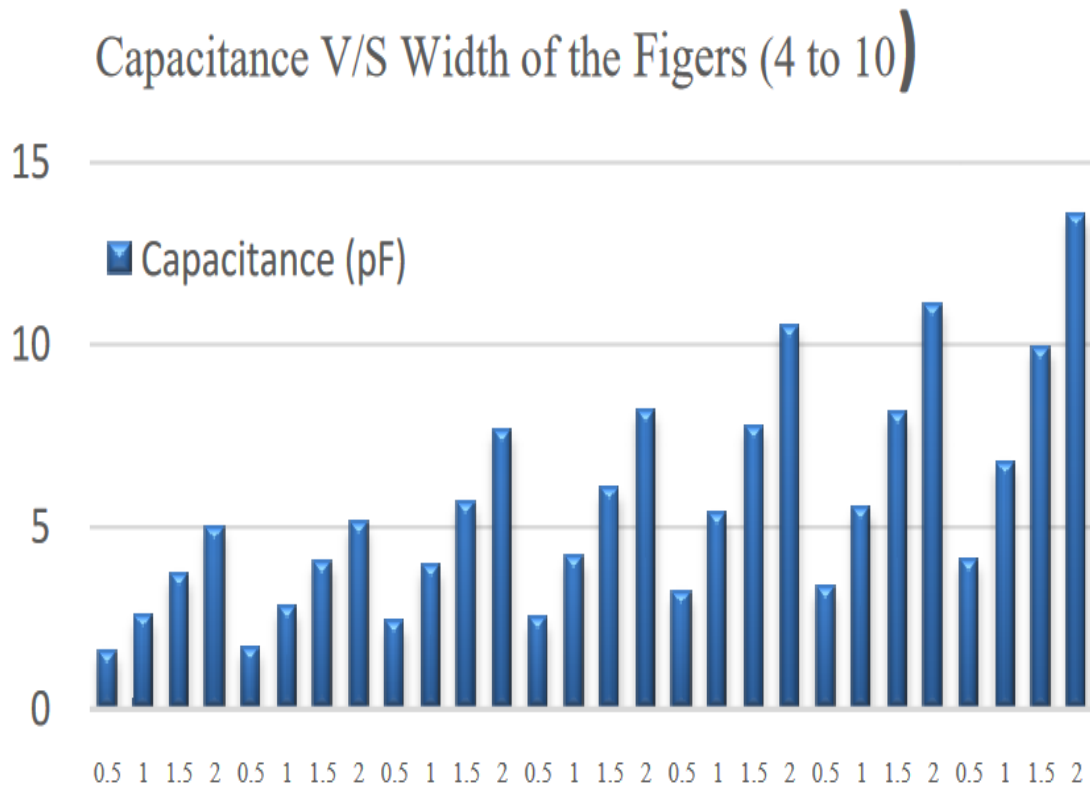
Όσο αφορά των αριθμό ηλεκτροδίων, παρατηρήθηκε πως όσο πιο πολλά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται, τόσο πιο μεγάλη θα είναι και η αύξηση της χωρητικότητας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 17.



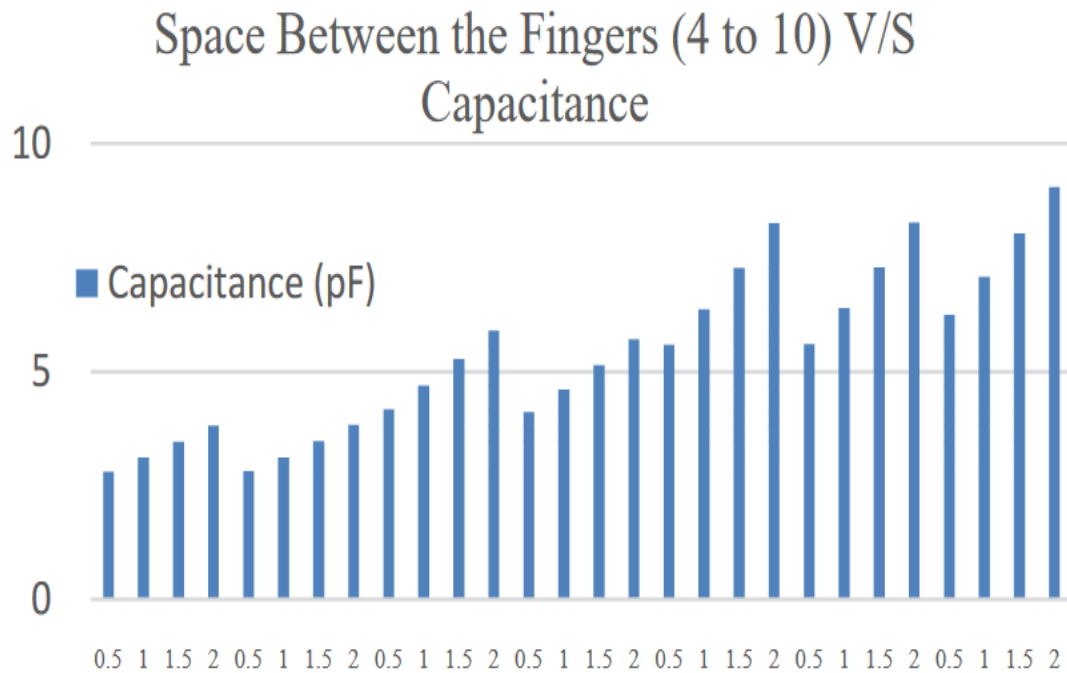
Εικόνα 17: Η χωρητικότητα αυξάνεται με την αύξηση ηλεκτροδίων [26]

Το ίδιο, παρατηρήθηκε και για τις δύο υπόλοιπες παραμέτρους, κατά την αύξηση του πλάτους ηλεκτροδίου η αγώγιμη περιοχή μεγαλώνει άρα και η χωρητικότητα θα αυξηθεί αντίστοιχα (Εικόνα 18). Για τις μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα πλάτη ηλεκτροδίων, από 0.5mm έως 2mm, με αριθμό ηλεκτροδίων από 4 μέχρι 10. Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων προκαλεί επίσης αύξηση χωρητικότητας, αφού μεγαλώνει και το

κατακόρυφο μήκος του πυκνωτή, με αποτέλεσμα και σε αυτήν την περίπτωση να μεγαλώνει η περιοχή αγωγιμότητας (Εικόνα 19).



Εικόνα 18 : Η τιμή της χωρητικότητας είναι μεγαλύτερη στα ηλεκτρόδια με μεγαλύτερο πλάτος [26]



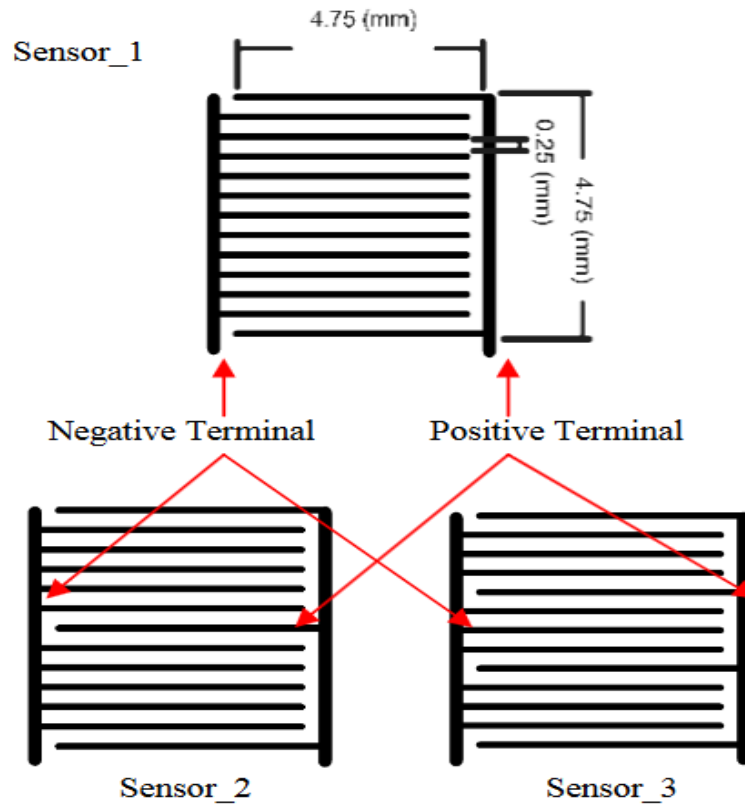
Εικόνα 19 : Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της χωρητικότητας [26]

Από τις παραπάνω μετρήσεις, φαίνεται πως η αύξηση της χωρητικότητας προκαλείται από την αύξηση σε αριθμό και μέγεθος των παραπάνω παραμέτρων, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν ισχύει πάντα, η τελική τιμή της χωρητικότητας καθορίζεται από πολλούς παραμέτρους και μπορεί να μην έχει την ίδια συμπεριφορά.

Στη συνέχεια της σύγκρισης, στην δημοσίευση A NOVEL PLANAR INTERDIGITAL SENSOR FOR ENVIRONMENTAL MONITORING, A.R. Mohd Syaifudin, M. A. Yunus, and S. C. Mukhopadhyay, School of Engineering and advanced Technology Massey University [27], χρησιμοποιείται πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με μία διαφορετική διάταξη μεταξύ των αρνητικών και θετικών ηλεκτροδίων, συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές διατάξεις με ακριβώς ίδιο αριθμό ηλεκτροδίων (συνολικά 13):

- Sensor\_1 με δύο θετικά ηλεκτρόδια στο τέλος της άκρης και έντεκα αρνητικά στην άλλη άκρη.
- Sensor\_2 με πέντε αρνητικά ηλεκτρόδια μεταξύ άνα δύο θετικών ηλεκτροδίων.
- Sensor\_3 με τρία αρνητικά ηλεκτρόδια μεταξύ άνα δύο θετικών ηλεκτροδίων.

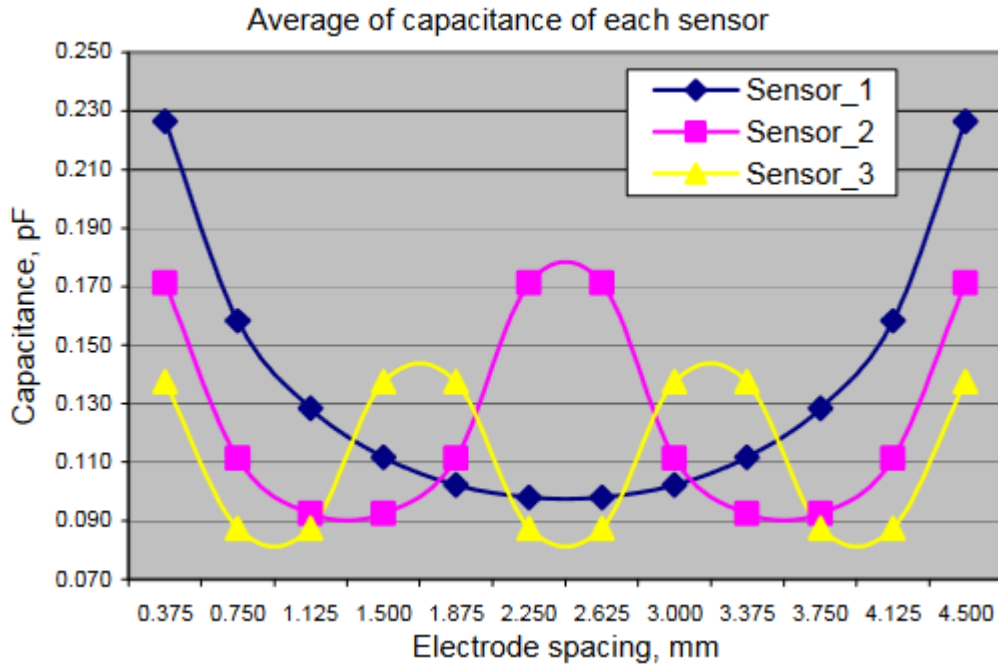
Η απόσταση μεταξύ θετικών και αρνητικών ηλεκτροδίων ήταν η μόνη παράμετρος που άλλαξε κατά τις μετρήσεις (0.375mm-4.5mm), το μήκος και πλάτος είναι ίδιο για όλα τα ηλεκτρόδια (4.75mm και 0.125mm αντίστοιχα) ενώ το κάθετο μήκος μεταξύ ηλεκτροδίων είναι επίσης ίδιο (0.25mm), οι διατάξεις απεικονίζονται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20 : Οι τρεις διαφορετικές διατάξεις [27].

Ο τύπος για τον υπολογισμό χωρητικότητας που χρησιμοποιήθηκε είναι :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (4.7)$$



Εικόνα 21 : Διάγραμμα μεταβολής χωρητικότητας για τις τρεις διατάξεις συναρτήσει της απόστασης μεταξύ ηλεκτροδίων [27].

Από την Εικόνα 21 φαίνεται ότι οι μετρήσεις που έγιναν, έδειξαν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με την πρώτη δημοσίευση, με την χωρητικότητα να αυξομειώνεται. Η πρώτη διάταξη παρουσιάζει μια πιο ομοιόμορφη απόκριση σε σχέση με τις άλλες δύο διατάξεις ενώ και η χωρητικότητα σε ορισμένα σημεία είναι αρκετά μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μεγαλύτερη ευαισθησία. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι για την κατασκευή του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων πρέπει να ληφθούν υπόψη, ανάλογα με την εφαρμογή του αισθητήρα, όλοι οι παράμετροι που μπορούν να καθορίσουν την τιμή της χωρητικότητας.

# B πειραματικό μέρος

## 5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΥΚΝΩΤΗ

### 5.1 Στάδια σχεδίασης και κατασκευής του πυκνωτή

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν δύο πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ίδιο αριθμό ηλεκτροδίων. Ο συγκεκριμένος πυκνωτής κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με την επίβλεψη του υποψηφίου διδάκτορα Αντώνη Γεωργά.

Τα χαρακτηριστικά των δύο πυκνωτών που κατασκευάστηκαν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα :

Αριθμός ηλεκτροδίων	41
Μήκος ηλεκτροδίων	3.9 cm
Πλάτος	0.1 cm
Διάκενο ηλεκτροδίων	0.1 cm
Υλικό ηλεκτροδίων	Χαλκός
Πλάτος πυκνωτή	4 cm

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά των πυκνωτών που κατασκευάστηκαν.

Η κατασκευή έγινε με χρήση φωτοευαίσθητης πλακέτας με κάποια συγκεκριμένα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν για την σχεδίαση και κατασκευή του πυκνωτή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2:

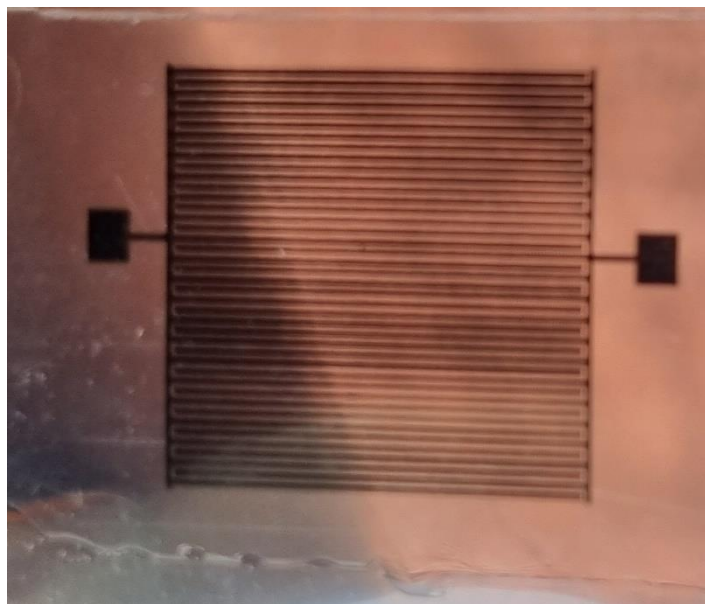


Βήμα 1 <sup>ο</sup>	Σχεδίαση κυκλώματος και εκτύπωση σε διαφάνεια
Βήμα 2 <sup>ο</sup>	Έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία
Βήμα 3 <sup>ο</sup>	Εμφάνιση
Βήμα 4 <sup>ο</sup>	Αποχάλκωση
Βήμα 5 <sup>ο</sup>	Καθαρισμός

Πίνακας 2 : Βήματα κατασκευής του πυκνωτή.

### 5.1.1 Βήμα 1<sup>ο</sup> – Σχεδίαση κυκλώματος και εκτύπωση σε διαφάνεια

Όπως έχει αναφερθεί σχεδιάστηκε πυκνωτής με πλάτος και μήκος 4 cm (4 επί 4), για την σχεδίαση χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα Autodesk Eagle και στην συνέχεια μέσω εκτυπωτή λέιζερ τυπώθηκε πάνω σε μια διαφάνεια (Εικόνα 22 ).



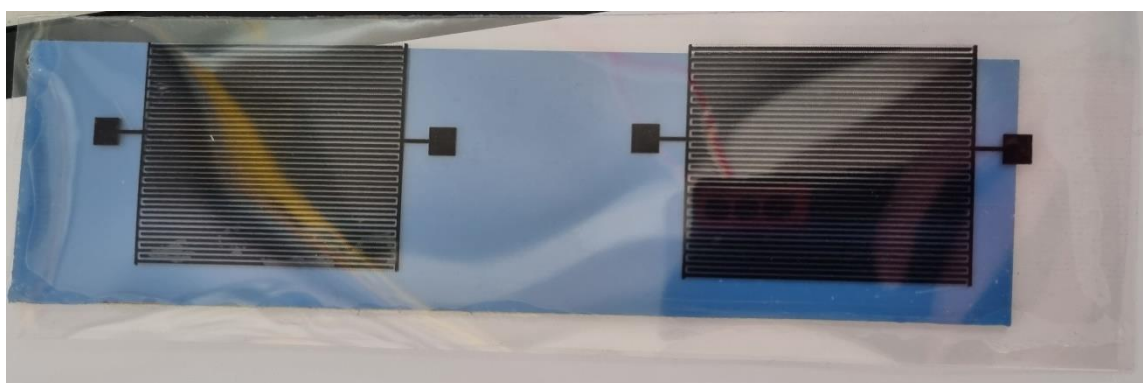
Εικόνα 22 : Διαφάνεια στην οποία είναι τυπωμένο το σχέδιο.

### 5.1.2 Βήμα 2<sup>ο</sup> – Έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία

Στο 2<sup>ο</sup> βήμα, η διαφάνεια τοποθετήθηκε πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα η οποία κόπηκε στις ζητούμενες διαστάσεις (Εικόνα 24). Η συγκεκριμένη διαφάνεια επιτρέπει ή μπλοκάρει τη διέλευση της υπεριώδους ακτινοβολίας, κατά την έκθεσή της.



Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση φωτοευαίσθητης πλακέτας.



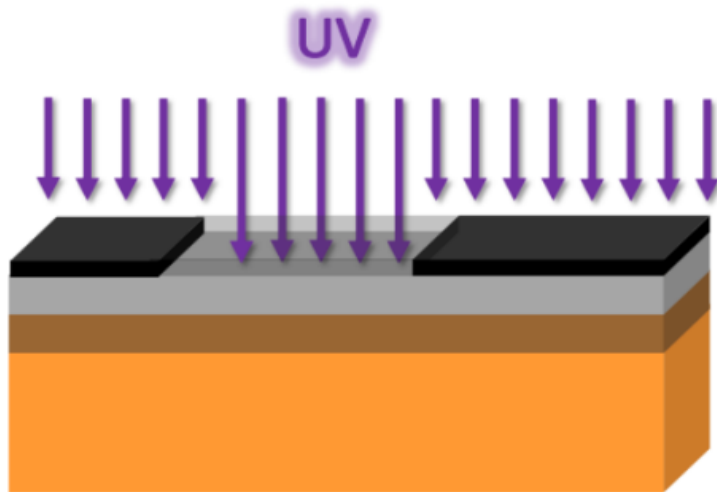
Εικόνα 24 : Τοποθέτηση της διαφάνειας πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα .

Στην Εικόνα 23, το μαύρο χρώμα απεικονίζει την τοποθετημένη διαφάνεια ενώ το γκρι χρώμα είναι ένα φωτοευαίσθητο υπόστρωμα το οποίο προστατεύει τον χαλκό (καφέ χρώμα ) κατά το στάδιο της αποχάλκωσης που θα περιγραφθεί αργότερα. Στο χαμηλότερο μέρος ( πορτοκαλί χρώμα ) βρίσκεται το υπόστρωμα (FR-4) το οποίο λειτουργεί ως μονωτής μεταξύ των αγώγιμων δρόμων.

Στη συνέχεια το προστατευτικό αυτοκόλλητο που βρίσκεται πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα (το μπλε χρώμα στην Εικόνα 24) αφαιρείται και μαζί με την διαφάνεια, η συγκεκριμένη πλακέτα τοποθετείται μέσα σε μηχανήμα έκθεσης UV ακτινοβολίας (Kepro BTX-200 AE, Εικόνα 25) και εκτίθεται για περίπου πέντε λεπτά, έτσι με αποτέλεσμα οι μαύρες περιοχές της διαφάνειας εκτίθενται στην UV ακτινοβολία (Εικόνα 26) .



*Εικόνα 25 : Μηχάνημα έκθεσης UV ακτινοβολίας, Kepro BTX-200AE.*



Εικόνα 26 : Η φωτοευαίσθητη πλακέτα κατά την έκθεση της σε UV ακτινοβολία.

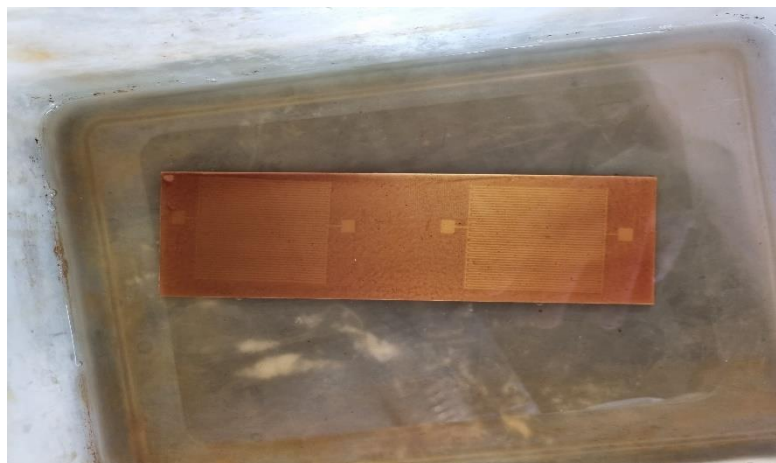
### 5.1.3 Βήμα 3<sup>ο</sup> – Εμφάνιση

Μετά την ολοκλήρωση της έκθεσής της σε UV ακτινοβολία, η πλακέτα τοποθετείται σε διάλυμα καυστικής σόδας ( $\text{NaOH}$ ), όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Ο χρόνος παραμονής εξαρτάται από τη περιεκτικότητά της δοσολογίας και η διαφορά στο χρόνο συνήθως κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως και 20 λεπτά. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 5g καυστικής σόδας ενώ ο χρόνος παραμονής ήταν περίπου 5 λεπτά.



Εικόνα 27 : Τοποθέτηση καυστικής σόδας ( $\text{NaOH}$ ).

Μετά την πάροδο των πέντε λεπτών, όσες περιοχές του φωτοευαίσθητου στρώματος επηρεάστηκαν από την UV ακτινοβολία, απομακρύνθηκαν από την πλακέτα, ενώ όσες δεν επηρεάστηκαν παρέμειναν πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί το σχέδιο που είχε τυπωθεί προηγουμένως πάνω στην διαφάνεια, αυτό φαίνεται καθαρά στη Εικόνα 28.



Εικόνα 28 : Εμφάνιση σχεδίου πάνω στην πλακέτα.

#### 5.1.4 Βήμα 4<sup>ο</sup> – Αποχάλκωση

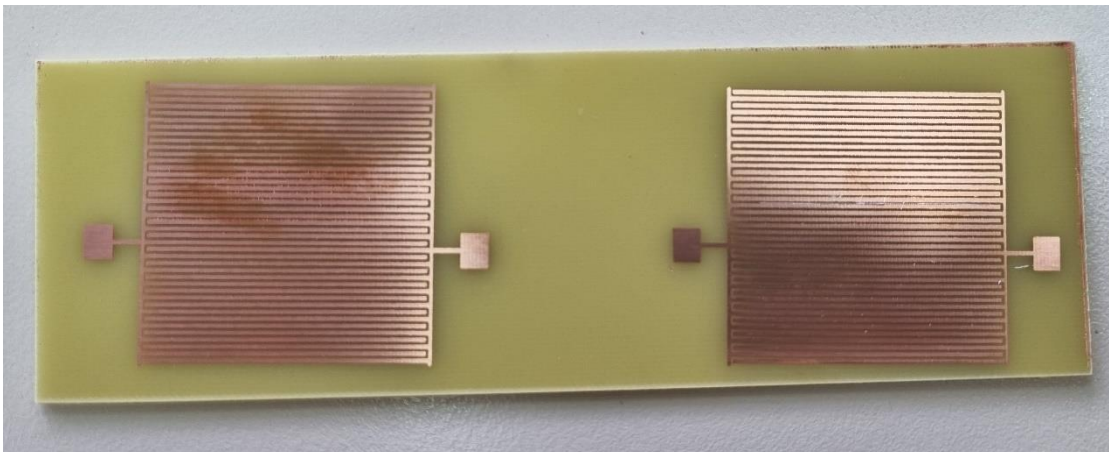
Στο 4<sup>ο</sup> βήμα η πλακέτα αφαιρείται από την καυστική σόδα και καθαρίζεται με νερό, όπου στη συνέχεια τοποθετείται σε ισχυρό διαβρωτικό διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου ( $FeCl_3$ ), έτσι ο χαλκός κάτω από το ευαίσθητο στρώμα παραμένει άθικτος, ενώ το ακάλυπτο μέρος του χαλκού διαλύθηκε. Ο χρόνος αποχάλκωσης ήταν περίπου 30 λεπτά, ωστόσο ανάλογα με την θερμοκρασία και την διάταξη του υλικού, ο χρόνος μπορεί να είναι διαφορετικός και μπορεί να διαρκέσει αρκετή ώρα. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία αποχάλκωσης απαιτείται συνεχής ανάδευση, για αυτό χρησιμοποιήθηκε ειδικός αναδευτήρας Orbital Shaker PSU – 10i Grand – bio με συχνότητα 80 rpm (Εικόνα 29), πάνω στο οποίο τοποθετήθηκε το διάλυμα.



Εικόνα 29 : Τοποθέτηση διαλύματος του τριχλωριούχου σιδήρου πάνω στον αναδευτήρα (Orbital shaker PSU – 10i Grand – bio) .

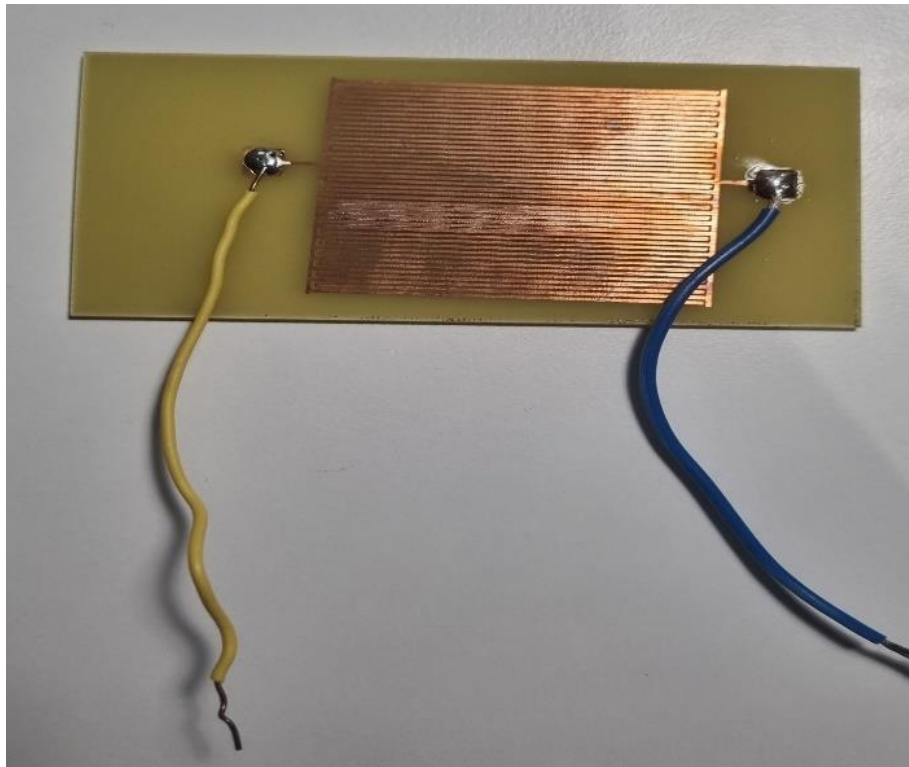
### 5.1.5 Βήμα 5<sup>ο</sup> – Καθαρισμός

Στο τελευταίο βήμα η πλακέτα μετά την εμφάνιση του σχεδίου, αφαιρείται από το διάλυμα όπου καθαρίζεται με ακετόνη και στη συνέχεια με άφθονο νερό. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 30.



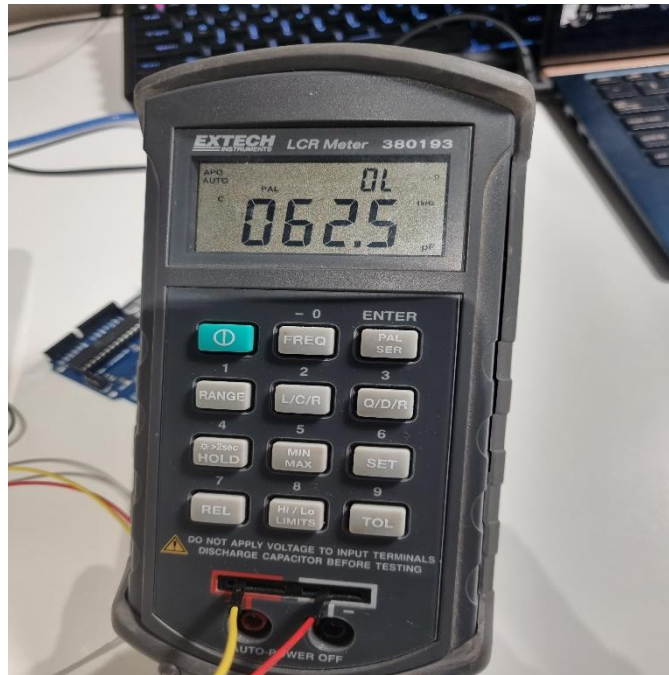
Εικόνα 30 : Πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων μετά την ολοκλήρωση όλων των βημάτων κατασκευής

Στη συνέχεια με την βοήθεια ενός πολύμετρου πραγματοποιείται ο έλεγχος της αγωγιμότητας μεταξύ διαφόρων σημείων, ενώ για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις της χωρητικότητας και αντίστασης, προστέθηκαν στα δύο άκρα του πυκνωτή καλώδια (Εικόνα 31).



*Εικόνα 31 : Προσθήκη καλωδίων στα δύο άκρα του πυκνωτή.*

Τέλος, μετρήθηκε με χρήση του μετρήτη EXTECH LCR Meter 380193 (Εικόνα 32) η χωρητικότητα του πυκνωτή εν κενώ, με την τιμή να είναι ίση με 62,5 pF



Εικόνα 32 : Μέτρηση χωρητικότητας εν κενώ.

## 5.2 Πειραματική διάταξη και εκτέλεση του πειράματος

Το ηλεκτρονικό μέρος του αισθητήρα πρόκειται ουσιαστικά για ένα κύκλωμα μέτρησης της χωρητικότητας βασισμένο στον πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων που κατασκευάστηκε προηγουμένως. Συγκεκριμένα ο σκοπός είναι η μέτρηση της χωρητικότητας συναρτήσει της μεταβολής της υγρασίας, δηλαδή, κατά πόσο μετά την επαφή του πυκνωτή με τους υδρατμούς που βρίσκονται στον αέρα, επηρεάζεται η χωρητικότητά του.

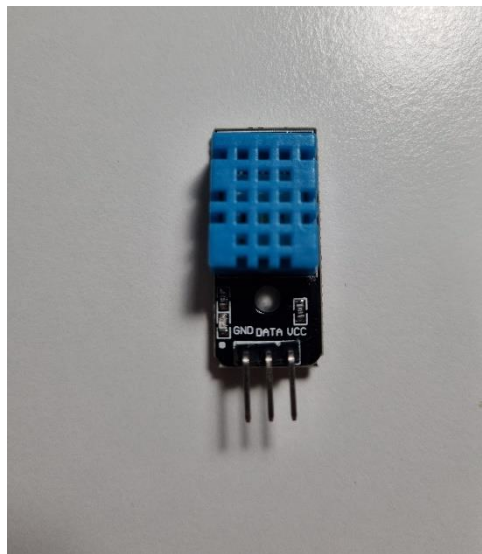
Για την μέτρηση της υγρασίας κατά την εκτέλεση του πειράματος αλλά και για το καλιμπράρισμα του αισθητήρα που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, μέσω της συσχέτισης των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας υγρασίας (μετράει την σχετική υγρασία) DHT11 που είναι βασισμένος σε πλακέτα Arduino Uno R3 . Η πλακέτα Arduino είναι πλακέτα ανοικτού κώδικα με τη γλώσσα Wiring που είναι υλοποιημένη στην C++ , αποτελείται από μικροελεγκτή Atmel AVR, τον ATmega328P και μπορεί να συνδεθεί με τον υπολογιστή μέσω θύρας USB.

Ο DHT11 πρόκειται για αισθητήρα που μετράει υγρασία ( σχετική υγρασία) και θερμοκρασία, λειτουργεί όπως είχε περιγραφθεί στα προηγούμενα κεφάλαια ως αισθητήρας ωμικής

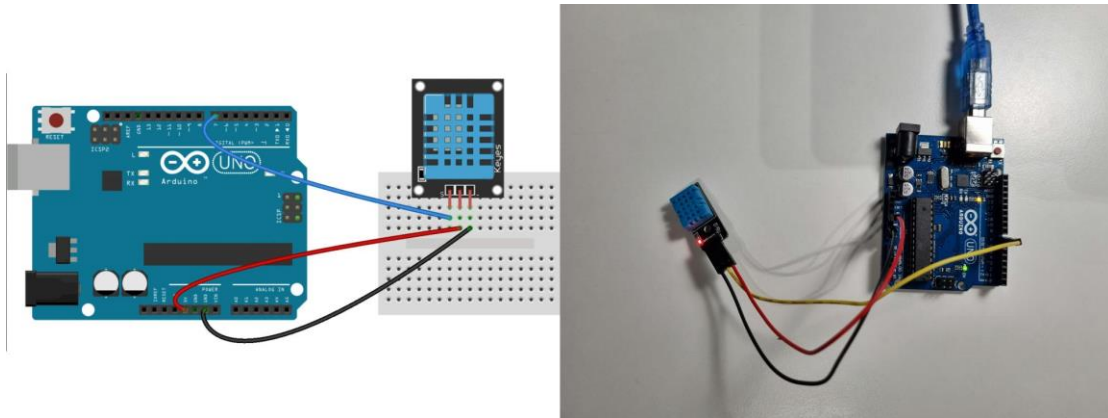


αντίστασης. Όταν οι υδρατμοί απορροφώνται από το υπόστρωμα του, απελευθερώνονται ιόντα και αυξάνεται η αγωγιμότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η μεταβολή της αντίστασης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι ανάλογη της σχετικής υγρασίας. Η υψηλότερη σχετική υγρασία μειώνει την αντίσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, ενώ η χαμηλότερη σχετική υγρασία αυξάνει την αντίσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας συνδέεται με την πλακέτα Arduino μέσω καλωδίων (Jumper Wires) και στην συνέχεια μέσω USB συνδέεται με τον υπολογιστή για την εμφάνιση των μετρήσεων. Για να εμφανίσει τις μετρήσεις στον υπολογιστή, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας συγκεκριμένος κώδικας στο λογισμικό του Arduino. Ο δεξί ακροδέκτης του DHT11 συνδέθηκε με την τροφοδοσία (5V), ο αριστερός ακροδέκτης συνδέθηκε στην γείωση ενώ ο μεσαίος συνδέθηκε με τη θύρα 7 για την παροχή πληροφορίας.

Στις παρακάτω εικόνες (33 και 34) φαίνεται ο συγκεκριμένος αισθητήρας καθώς και η διάταξη της πλακέτας Arduino, μαζί με τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για το λογισμικό.



*Εικόνα 33 : DHT11 αισθητήρας υγρασίας-θερμοκρασίας.*



Εικόνα 34 : Η διάταξη του Arduino μαζί με τον DHT11 (αντί για τη χρήση breadboard η σύνδεση έγινε απευθείας στους ακροδέκτες μέσω των jump wires).

## Κώδικας

```
#include <SimpleDHT.h>

// for DHT11,
//   VCC: 5V or 3V
//   GND: GND
//   DATA: 7

int pinDHT11 = 7;

SimpleDHT11 dht11(pinDHT11);

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

void loop()
  // start working...

  Serial.println("=====");

  Serial.println("Sample DHT11...");

  // read without samples.

  byte temperature = 0;

  byte humidity = 0;
```

```

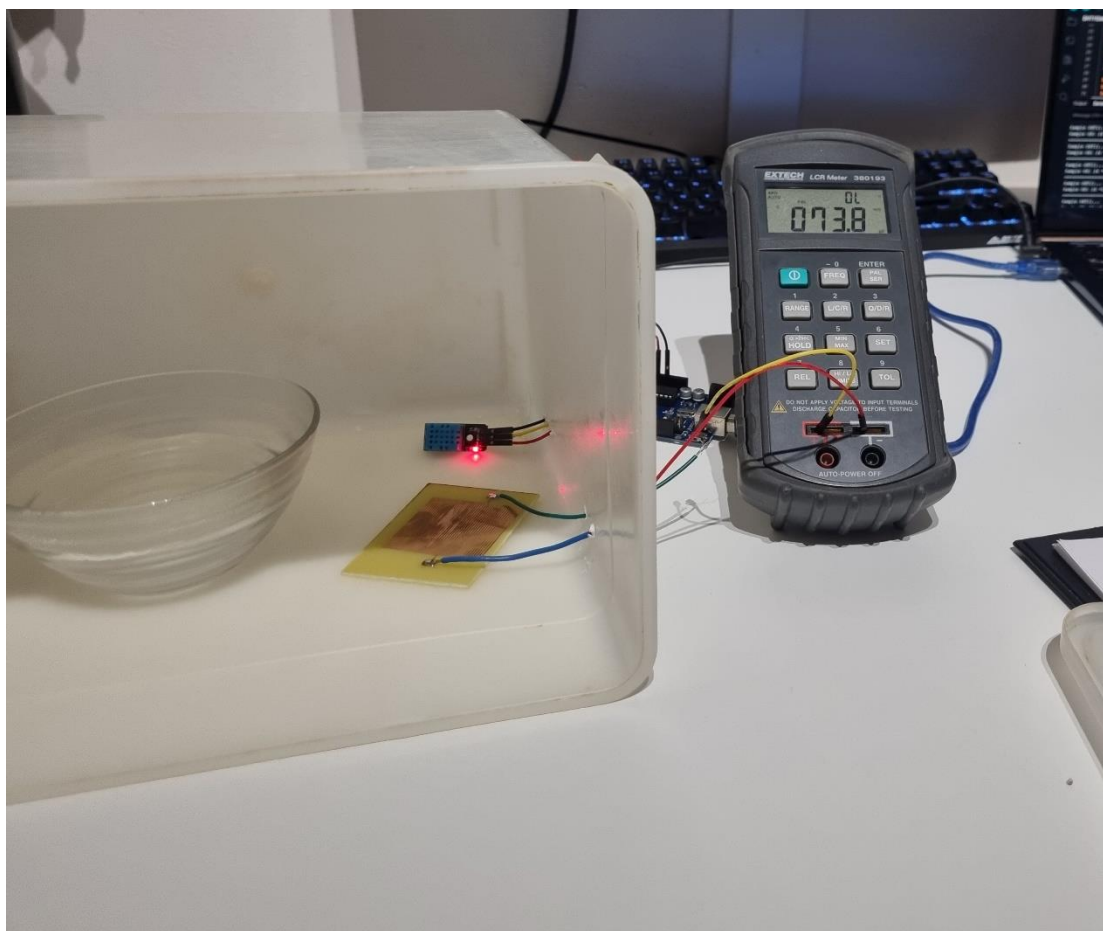
int err = SimpleDHTErrSuccess;
if ((err = dht11.read(&temperature, &humidity, NULL))!=SimpleDHTErrSuccess){
    Serial.print("Read DHT11 failed, err=");
    Serial.print(SimpleDHTErrCode(err));
    Serial.print(","); Serial.println(SimpleDHTErrDuration(err)); delay(1000);
    return;
}
Serial.print("Sample OK: ");
Serial.print((int)temperature); Serial.print(" *C, ");
Serial.print((int)humidity); Serial.println(" H");
// DHT11 sampling rate is 1HZ.
delay(1500);
}

```

Στη συνέχεια για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένα πλαστικό κουτί, ώστε κατά την τοποθέτηση βρασμένου νερού μέσα, οι υδρατμοί που εξατμίζονται να μην διοχετεύονται από το περιβάλλον έξω από το κουτί, με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται πιο γρήγορη αύξηση θερμοκρασίας και υγρασίας. Το αποτέλεσμα είναι πως ο απαιτούμενος χρόνος για την αύξηση υγρασίας να μειώνεται σημαντικά, ενώ βελτιώνεται σημαντικά και απόκριση του πυκνωτή. Έτσι, μαζί με το βρασμένο νερό, τοποθετείται μέσα ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων και ο αισθητήρας DHT11.

Ο πυκνωτής συνδέεται με τον μετρητή LCR για την μέτρηση της χωρητικότητας και αντίστασης, ενώ παράλληλα ο αισθητήρας DHT11 μαζί με την πλακέτα Arduino συνδέεται στον υπολογιστή για την καταγραφή της υγρασίας ώστε να γίνει αργότερα η αντιστοίχιση των μετρήσεων.

Η τελική διάταξη φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 35 :



Εικόνα 35 : Η πειραματική διάταξη.

## 5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

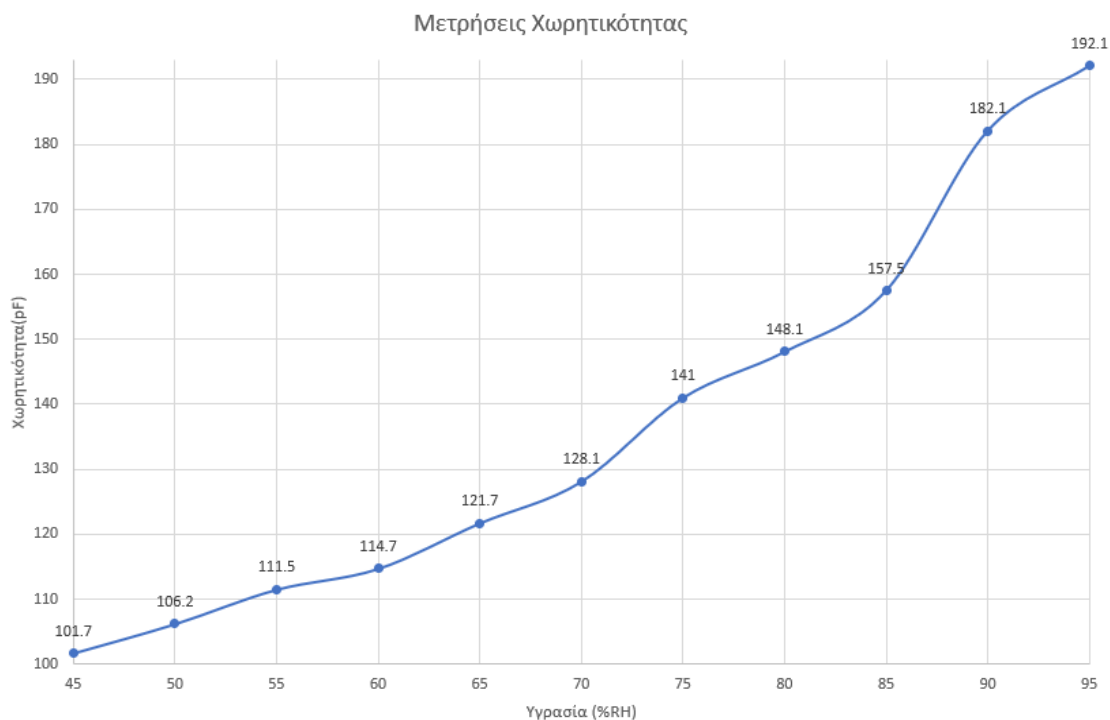
### 5.3.1 Μέτρηση χωρητικότητας

Η μέτρηση της χωρητικότητας έγινε σε συνάρτηση με την μεταβολή της υγρασίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, η αύξηση των υδρατμών προκαλεί και την αύξηση της υγρασίας αντίστοιχα, ενώ η χωρητικότητα είναι ευθέως ανάλογη με την υγρασία όπου με την αύξησή της, η τιμή της χωρητικότητας πρέπει να αυξάνεται αντίστοιχα. Άρα κατά την διάρκεια της μέτρησης, λόγω της επαφής του πυκνωτή με τους υδρατμούς, η διηλεκτρική σταθερά του υλικού αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η χωρητικότητα του πυκνωτή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 36.

Πρίν την μέτρηση, μετρήθηκε πρώτα η θερμοκρασία δωματίου η οποία ήταν στους 24°C καθώς και η υγρασία μέσα στο κουτί πριν την τοποθέτηση του βρασμένου νερού, όπου έδειξε 40% RH. Το εύρος της υγρασίας που μετρήθηκε ήταν από 45% μέχρι 95 % και ήταν η μέγιστη τιμή που μπορούσε να καταγράψει ο DHT11 αισθητήρας, όμως η χωρητικότητα συνέχισε να αυξάνεται και μετά από 95% RH λόγω της επιπλέον αύξησης των υδρατμών πάνω στην επιφάνεια του πυκνωτή, ωστόσο στις μετρήσεις δεν συμπεριλαμβάνεται προς αποφυγή λάθους λόγω αδυναμίας, της ακριβής μέτρησης των υδρατμών.

<b>Υγρασία (%RH)</b>	<b>Χωρητικότητα (pF)</b>
<b>45</b>	<b>101.7</b>
<b>50</b>	<b>106.2</b>
<b>55</b>	<b>111.5</b>
<b>60</b>	<b>114.7</b>
<b>65</b>	<b>121.7</b>
<b>70</b>	<b>128.1</b>
<b>75</b>	<b>141</b>
<b>80</b>	<b>148.1</b>
<b>85</b>	<b>157.5</b>
<b>90</b>	<b>182.1</b>
<b>95</b>	<b>192.1</b>

*Πίνακας 3 : Τιμές χωρητικότητας σε συνάρτηση με την υγρασία.*



Εικόνα 36 : Διάγραμμα χωρητικότητας σε συνάρτηση με την υγρασία.

Ενώ η χωρητικότητα εν κενώ ήταν 62.5 pF με 40% RH, η αμέσως επόμενη μεταβολή της κατά 5%, δηλαδή για 45% RH, παρουσιάζει αρκετά μεγάλη αύξηση σε χωρητικότητα συγκριτικά με τις επόμενες μεταβολές υγρασίας μεταξύ τους, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την μέτρηση εν κενώ, η επιφάνεια του πυκνωτή δεν έχει έρθει ακόμα σε επαφή με την μεγάλη περιεκτικότητα υδρατμών από την εξάτμιση του νερού, με αποτέλεσμα να έχει μικρότερη αγωγιμότητα. Επίσης παρατηρείται ότι για υγρασία 85% RH και πάνω, η ευαισθησία του πυκνωτή στην μεταβολή της υγρασίας αυξάνεται επειδή η επιφάνεια του πυκνωτή που καλύπτεται από υδρατμούς, μεγαλώνει.

### 5.3.2 Μέτρηση αντίστασης

Μετά την μέτρηση της χωρητικότητας, μετρήθηκε με τον LCR μετρητή και η συμπεριφορά της αντίστασης σε συνάρτηση με το χρόνο. Επειδή η μεταβολή της υγρασίας στην περίπτωση του συγκεκριμένου πειράματος αυξάνεται σε μικρή χρονική στιγμή, η αντίσταση μετριέται για σταθερή και μια συγκεκριμένη τιμή υγρασίας, άρα επιλέχθηκε για υγρασία 95% αφού η περιεκτικότητα σε υδρατμούς πάνω στην επιφάνεια του πυκνωτή θα είναι μεγαλύτερη, με

αποτέλεσμα, όπως παρατηρήθηκε από την προηγούμενη μέτρηση, να υπάρχει και μεγαλύτερη ευαισθησία.

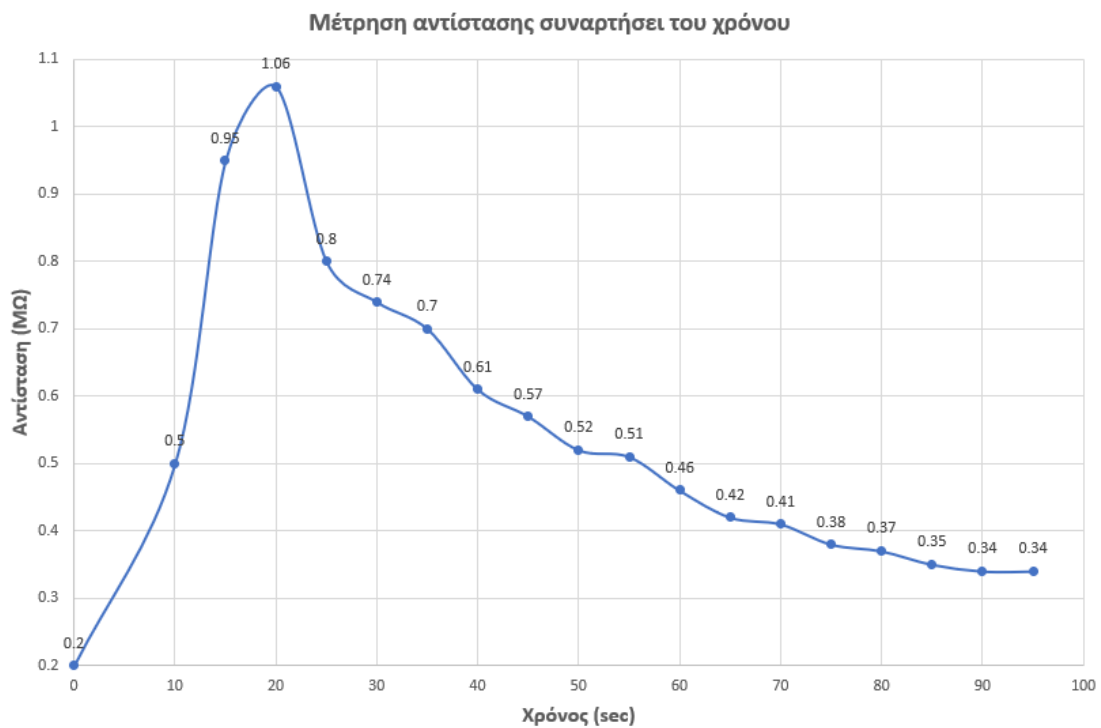
Οι μετρήσεις δείξαν (Πίνακας 4) πώς με την πάροδο του χρόνου η αντίσταση μειώνεται, το οποίο είναι επιθυμητό, αφού ο πυκνωτής όσο περνάει ο χρόνος απορροφά περισσότερους υδρατμούς και κατά συνέπεια αυξάνεται η αγωγιμότητα, άρα θα μειώνεται και αντίστοιχα η αντίσταση.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν με το αντίστοιχο διάγραμμα. Ο χρόνος μέτρησης ήταν 95 δευτερόλεπτα με λήψη μετρήσεων ανά 5 δευτερόλεπτα.

<b>Χρόνος (sec)</b>	<b>Αντίσταση (ΜΩ)</b>
<b>0</b>	<b>0.2</b>
<b>10</b>	<b>0.5</b>
<b>15</b>	<b>0.95</b>
<b>20</b>	<b>1.06</b>
<b>25</b>	<b>0.8</b>
<b>30</b>	<b>0.74</b>
<b>35</b>	<b>0.7</b>
<b>40</b>	<b>0.61</b>
<b>45</b>	<b>0.57</b>
<b>50</b>	<b>0.52</b>
<b>55</b>	<b>0.61</b>
<b>60</b>	<b>0.46</b>
<b>65</b>	<b>0.42</b>
<b>70</b>	<b>0.41</b>
<b>75</b>	<b>0.38</b>

<b>80</b>	<b>0.37</b>
<b>85</b>	<b>0.35</b>
<b>90</b>	<b>0.34</b>
<b>95</b>	<b>0.34</b>

Πίνακας 4 : Τιμές αντίστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 37 : Διάγραμμα αντίστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο.

## 5.4 Εκτίμηση αβεβαιότητας μετρήσεων

Στη συνέχεια έγινε η εκτίμηση της αβεβαιότητας τύπου A (Uncertainty type A) των μετρήσεων της χωρητικότητας και της αντίστασης που μετρήθηκαν προηγουμένως.

Η αβεβαιότητα γενικά πρόκειται για μια παράμετρο, η οποία συσχετίζεται με το αποτέλεσμα της μέτρησης μιας φυσικής ποσότητας, και η οποία χαρακτηρίζει την διασπορά των τιμών που μπορούν λογικά να αποδοθούν στην φυσική ποσότητα. Είναι δηλαδή ένα μέτρο της αξιοπιστίας της μέτρησης. Υπάρχουν δύο τύποι αβεβαιότητας, τύπου A και τύπου B. Η τύπου



A οφείλεται σε τυχαία μεταβολή παραγόντων και υπολογίζεται με στατιστικές μεθόδους, ενώ η τύπου B βασίζεται σε άλλους παράγοντες, όπως συστηματικά σφάλματα και αβεβαιότητα έμμεσης μέτρησης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίστηκε η τύπου A.

Για την αξιολόγηση των δεδομένων της αβεβαιότητας A χρειάζεται να υπολογιστούν τα παρακάτω μεγέθη :

- Μέση τιμή :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

Όπου

$x_i$  το αποτέλεσμα της κάθε μέτρησης

$n$  το πλήθος των μετρήσεων

- Τυπική απόκλιση (Standard Deviation) της μέσης τιμής :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

- Τυπική απόκλιση του μέσου όρου:

$$\sigma_x = \sigma / \sqrt{n} \quad (5.33)$$

#### 5.4.1 Εκτίμηση μετρήσεων χωρητικότητας

Με βάση των παραπάνω σχέσεων και των μετρήσεων που έγιναν (Πίνακας 3) υπολογίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη :

$$\bar{x} = 137 \text{ pF} , \text{ με σύνολο μετρήσεων } n = 11$$

Άρα :

$(\bar{x} - x_i)$	$(\bar{x} - x_i)^2$
35.3	1246
30.8	948
25.5	650
22.3	497
15.3	234
8.9	79.2
-4	16
-11.1	123
-20.5	420
-45.1	2025
-55.1	3036
	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 9275$

Πίνακας 5 : Υπολογισμός του  $\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2$ .

Έτσι, από τις σχέσεις (5.2), (5.3) και τον Πίνακα 5, υπολογίζεται εύκολα η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής και του μέσου όρου :

$$\sigma = 30.45 \text{ pF}$$

$$\sigma_x = 9.045 \text{ pF}$$

#### 5.4.2 Εκτίμηση μετρήσεων αντίστασης

Με τον ίδιο τρόπο έγινε και η εκτίμηση των μετρήσεων αντίστασης :

$$\bar{x} = 0.54 \text{ M}\Omega$$

Με σύνολο μετρήσεων  $n = 19$ .

$(\bar{x} - x_i)$	$(\bar{x} - x_i)^2$
0.34	0.12
0.04	0.016
-0.41	0.17
-0.52	0.27
-0.26	0.07
-0.2	0.04
0.16	0.025
-0.07	0.005
-0.03	0.0009
0.02	0.0004
0.03	0.0009
0.08	0.006
0.12	0.014
0.13	0.017
0.16	0.026
0.17	0.029
0.19	0.036
0.2	0.04
0.2	0.04
	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 10.23$

Πίνακας 6: Υπολογισμός του  $\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2$ .

Έτσι, η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής και του μέσου όρου είναι :

$$\sigma = 0.22 \text{ ΜΩ και } \sigma_x = 0.05 \text{ ΜΩ}$$

# 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ

## ΕΡΓΑΣΙΑ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε μια προσπάθεια σχεδιασμού και κατασκευής ενός αισθητήρα για την ανίχνευση της υγρασίας, που βασίζεται στην τεχνική χωρητικής ανίχνευσης του πυκνωτή. Ο πυκνωτής είναι τύπου ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων και συνδέεται με την αλλαγή της χωρητικότητάς του όταν έρθει σε επαφή με τους υδρατμούς που εξατμίζονται, η αλλαγή αυτή, οφείλεται στην μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού που χρησιμοποιείται πάνω στην επιφάνεια του πυκνωτή, όσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση των υδρατμών, τόσο πιο μεγάλη θα είναι και η τιμή της χωρητικότητας.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν, έδειξαν πως η διάταξη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, λειτούργησε σωστά, αφού κατά την επαφή του πυκνωτή με τους υδρατμούς, η χωρητικότητα άρχισε να αυξάνεται όσο μεγάλωνε η τιμή της υγρασίας, ενώ ταυτόχρονα υπήρξε μείωση της αντίστασης λόγω της αύξησης αγωγιμότητας.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις χωρητικότητας, τόσο από το θεωρητικό κομμάτι όσο και από το πειραματικό, συμπεραίνεται πως οι διάφοροι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την λειτουργία του πυκνωτή. Για αυτό, επόμενες εργασίες πάνω στο αντικείμενο μπορούν :

- Να εξετάσουν την λειτουργία του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, διαφορετικών διαστάσεων και αριθμό ηλεκτροδίων.
- Να εξετάσουν πώς επηρεάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την πάροδο του χρόνου για τις ίδιες συνθήκες.
- Να εξετάσουν την συμπεριφορά του πυκνωτή με χρήση άλλου υλικού ηλεκτροδίων αντί του χάλκινου.
- Να κατασκευάσουν ειδικό κύκλωμα υπολογισμού της υγρασίας μέσω των μετρήσεων του πυκνωτή.

# 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Main Difference between Sensor and Transducer.” <https://www.electricaltechnology.org/2021/12/difference-between-sensor-transducer.html> (accessed Oct. 03, 2022).
- [2] “Passive and Active Sensors.” [https://www.brainkart.com/article/Passive-and-Active-Sensors\\_4474/](https://www.brainkart.com/article/Passive-and-Active-Sensors_4474/) (accessed Oct. 04, 2022).
- [3] “Difference between Analog sensor and Digital sensor.” <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Analog-sensor-vs-Digital-sensor.html> (accessed Oct. 04, 2022).
- [4] “Analog vs Digital sensors - Coding Ninjas CodeStudio.” <https://www.codingninjas.com/codestudio/library/analog-vs-digital-sensors> (accessed Oct. 04, 2022).
- [5] “Capacitive Sensor: A Full Understanding of It | Easybom.” <https://www.easybom.com/blog/a/capacitive-sensor-a-full-understanding-of-it> (accessed Oct. 06, 2022).
- [6] F. Ubaid, Z. Ahmad, R. A. Shakoob, and A. M. A. Mohamed, “Surface engineering of the PLA films for fabricating dexterous humidity sensors,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, no. 10, pp. 8135–8141, May 2018, doi: 10.1007/S10854-018-8818-5.
- [7] “Humidity and its Measurements - J D UltraSonics.” <https://www.jdultrasonics.co.uk/blog/what-is-humidity> (accessed Oct. 09, 2022).
- [8] B. Shaoxian and W. Shizhu, “Properties of gases,” in *Gas Thermohydrodynamic Lubrication and Seals*, Elsevier, 2019, pp. 1–14. doi: 10.1016/b978-0-12-816716-8.00001-2.
- [9] “Relative Humidity.” <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/relhum.html> (accessed Oct. 07, 2022).

- [10] T. Delipinar, A. Shafique, M. S. Gohar, and M. K. Yapici, "Fabrication and Materials Integration of Flexible Humidity Sensors for Emerging Applications," *ACS Omega*, vol. 6, no. 13, pp. 8744–8753, Apr. 2021, doi: 10.1021/ACSOMEGA.0C06106/ASSET/IMAGES/LARGE/AO0C06106\_0004.JPEG.
- [11] T. A. Blank, L. P. Eksperiandova, and K. N. Belikov, "Recent trends of ceramic humidity sensors development: A review," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 228. Elsevier, pp. 416–442, Jun. 02, 2016. doi: 10.1016/j.snb.2016.01.015.
- [12] J. Fontes, "Humidity Sensors," in *Sensor Technology Handbook*, Elsevier, 2005, pp. 271–284. doi: 10.1016/B978-075067729-5/50052-5.
- [13] M. A. Najeeb, Z. Ahmad, and R. A. Shakoor, "Organic Thin-Film Capacitive and Resistive Humidity Sensors: A Focus Review," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 5, no. 21. Wiley-VCH Verlag, Nov. 09, 2018. doi: 10.1002/admi.201800969.
- [14] "Arduino compatible coding 15: Reading sensor data from DHT-11 without using a library." <https://www.engineersgarage.com/articles-arduino-dht11-humidity-temperature-sensor-interfacing/> (accessed Oct. 14, 2022).
- [15] M. B. Tahir, M. Rafique, M. S. Rafique, T. Nawaz, M. Rizwan, and M. Tanveer, "Photocatalytic nanomaterials for degradation of organic pollutants and heavy metals," in *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*, Elsevier, 2020, pp. 119–138. doi: 10.1016/b978-0-12-821192-2.00008-5.
- [16] G. Faraji, H. S. Kim, and H. T. Kashi, "Severe Plastic Deformation," in *Severe Plastic Deformation*, Elsevier, 2018, pp. 1–17. doi: 10.1016/b978-0-12-813518-1.00020-5.
- [17] E. Jabari, F. Liravi, and E. Toyserkani, "Additive Manufacturing of Silicone Structures View project Material Jetting of Ceramic Slurries View project," 2019, doi: 10.1088/2053-1583/ab29b2/meta.
- [18] D. K. Shinde, N. Ayrilmis, D. Sontakke, A. D. Kamble, and N. Ayrilmis, "Synthesis and Characterization of PAN/TiO<sub>2</sub> Based Carbon Nanofibers for Energy Application Additive Manufacturing and 3D Printing nanomaterials Development View project Molecular Dynamic Simulation and FEM of Nanocomposites View project Divyanka Sontakke Synthesis and Characterization of PAN/TiO<sub>2</sub> Based Carbon Nanofibers for Energy Application", doi: 10.37896/JXAT13.7/31321.

- [19] A. Tripathy, S. Pramanik, J. Cho, J. Santhosh, and N. A. A. Osman, "Role of morphological structure, doping, and coating of different materials in the sensing characteristics of humidity sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 9. MDPI AG, pp. 16343–16422, Sep. 03, 2014. doi: 10.3390/s140916343.
- [20] O. K. Oyeniran and H. Pretoria, "Synthesis and characterization of carbon-based nanostructured material electrodes for designing novel hybrid supercapacitors," 2018. [Online]. Available: <https://repository.up.ac.za/handle/2263/67866> .
- [21] W. R. W. Ahmad, M. H. Mamat, A. S. Zoolfakar, Z. Khusaimi, and M. Rusop, "A review on hematite  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> focusing on nanostructures, synthesis methods and applications," in *Proceedings - 14th IEEE Student Conference on Research and Development: Advancing Technology for Humanity, SCOReD 2016*, Jan. 2017. doi: 10.1109/SCOReD.2016.7810090.
- [22] H. Liu *et al.*, "Humidity sensors with shielding electrode under interdigitated electrode," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 3, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19030659.
- [23] H. Farahani, R. Wagiran, and M. N. Hamidon, "Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: A comprehensive review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 5. MDPI AG, pp. 7881–7939, Apr. 30, 2014. doi: 10.3390/s140507881.
- [24] R. Igreja and C. J. Dias, "Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure," *Sens Actuators A Phys*, vol. 112, no. 2–3, pp. 291–301, May 2004, doi: 10.1016/j.sna.2004.01.040.
- [25] J. Guo, T. Bamber, M. Chamberlain, L. Justham, and M. Jackson, "Optimization and experimental verification of coplanar interdigital electroadhesives," *J Phys D Appl Phys*, vol. 49, no. 41, Sep. 2016, doi: 10.1088/0022-3727/49/41/415304.
- [26] B. R. S, A. M. Khan, and M. H. Reddy V, "DESIGN AND OPTIMIZATION OF INTERDIGITAL CAPACITOR." doi: 10.15623/ijret.2016.0533016.
- [27] Institute of Electrical and Electronics Engineers., *A Novel Planar Interdigital Sensor for Environmental Monitoring*. IEEE, 2009. doi: 10.1109/ICSNENS.2009.539827.