



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΥ ΚΑΝΕΛΛΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΥ ΚΑΝΕΛΛΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Οκτωβρίου 2024 :

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΚΑΝΕΛΛΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΥ

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

Copyright © Κανέλλα Κωνσταντίνα Λαμπροπούλου, 2024.

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

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκε ένας αισθητήρας μέτρησης υγρασίας με σκοπό τη σύνδεση της υγρασίας με τα διηλεκτρικά υλικά. Η παρούσα διπλωματική εργασία εμπεριέχει δύο μεγάλα μέρη: ένα καθαρά θεωρητικό κομμάτι όπου γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση όλων των βασικών μαθηματικών-τεχνικών γνώσεων που χρειάζονται για την προσομοίωση του αισθητήρα και ένα πειραματικό κομμάτι που διεξάγεται στο περιβάλλον COMSOL.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι αισθητήρες όπως μελετήθηκαν σε αντίστοιχα μαθήματα του προγράμματος σπουδών της σχολής. Έτσι, έχουμε τις κατηγορίες των αισθητήρων, τα χαρακτηριστικά τους και δίνεται έμφαση στον αισθητήρα ωμικής αντίστασης-χωρητικότητας. Παράλληλα, γίνεται εκτενής αναφορά στο φαινόμενο της υγρασίας για να είναι εφικτή η κατανόηση των αισθητήρων υγρασίας.

Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή στο λογισμικό COMSOL, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως το κύριο εργαλείο προσομοίωσης. Πέρα από τα βασικά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα του λογισμικού, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση του για την προσομοίωση φαινομένων υγρασίας και στην ικανότητά του να προσομοιώσει έναν αισθητήρα υγρασίας. Επίσης, παρουσιάζονται οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο του COMSOL, με έμφαση στους νόμους της Ηλεκτροστατικής που σχετίζονται με τα διηλεκτρικά υλικά. Δεδομένου ότι οι μέθοδοι επίλυσης στο COMSOL είναι αριθμητικές, γίνεται αναφορά στη διαδικασία διακριτοποίησης και ιδιαίτερα στη δημιουργία πλέγματος (mesh), το οποίο είναι απαραίτητο για την επίλυση προβλημάτων υγρασίας.

Τέλος, αναφέρονται οι λόγοι που χρησιμοποιήθηκαν τα συγκεκριμένα υλικά στη δημιουργία του αισθητήρα και παρουσιάζεται η προσομοίωση που έλαβε χώρο στο COMSOL για τη μοντελοποίηση του αισθητήρα. Αναλύονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα καθώς και παρατίθεται μία σειρά από συμπεράσματα της μελέτης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Αισθητήρας Υγρασίας, Μοντελοποίηση, COMSOL, Διηλεκτρικά Υλικά, Πλέγμα

ABSTRACT

In this thesis, a humidity sensor is presented with the aim of correlating humidity with dielectric materials. The thesis consists of two main parts: a purely theoretical section, where a literature review of all the fundamental mathematical and technical knowledge required for the sensor simulation is conducted, and an experimental section, carried out in the COMSOL environment.

Initially, the sensors are presented as studied in relevant courses of the academic curriculum. Specifically, the categories of sensors and their characteristics are explained, with a particular focus on the resistive-capacitive sensor. Additionally, an extensive reference is made to the phenomenon of humidity to facilitate the understanding of humidity sensors.

Subsequently, an introduction is provided to the COMSOL software, which was used as the primary simulation tool. Apart from the basic features and advantages of the software, special attention is given to its application in the simulation of humidity phenomena and its ability to model a humidity sensor. Furthermore, the equations governing the COMSOL model are presented, with emphasis on the laws of electrostatics related to dielectric materials. Given that the methods of solution in COMSOL are numerical, a reference is made to the discretization process, particularly to the creation of the mesh, which is essential for solving humidity-related problems.

Finally, the reasons for selecting the specific materials for the sensor's design are discussed, and the simulation carried out in COMSOL for the modeling of the sensor is presented. The measurements and results are analyzed, and a series of conclusions from the study is provided.

KEYWORDS:

Humidity Sensor, Modelling, COMSOL, Dielectric Materials, Mesh

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, Καθηγητή του Ε.Μ.Π, για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και για τις πολύ εύστοχες παρατηρήσεις και προτάσεις του.

Ακόμη, ευχαριστώ θερμά τον Διδάκτορα του Ε.Μ.Π κ. Αντώνη Γεωργά για τη στήριξη, την καθοδήγηση και τον πολύτιμο προσωπικό χρόνο που μου αφιέρωσε σε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για το άριστο κλίμα συνεργασίας που υπήρχε μεταξύ μας.

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	7
Κατάλογος εικόνων	9
Κατάλογος πινάκων.....	10
1. Θεωρία	11
1.1 Αισθητήρες	11
1.2 Κατηγορίες αισθητήρων	12
1.2.1 Παθητικοί και ενεργοί αισθητήρες	12
1.2.2 Αναλογικοί και ψηφιακοί αισθητήρες	13
1.2.3 Αισθητήρας ωμικής αντίστασης – χωρητικότητας.....	14
1.2.4 Χαρακτηριστικά αισθητήρων	15
2. Υγρασία	16
2.1 Θεωρία.....	16
2.1.1 Απόλυτη Υγρασία	17
2.1.2 Σχετική Υγρασία.....	17
2.1.3 Ειδική υγρασία και σημείο δρόσου	18
2.2 Αισθητήρες υγρασίας	19
2.2.1 Βασικά στοιχεία αισθητήρα υγρασίας	20
2.2.2 Χωρητικός αισθητήρας υγρασίας	21
2.2.3 Αισθητήρας ωμικής αντίστασης	24
2.2.4 Σύγκριση αισθητήρων υγρασίας.....	26
3. Το Λογισμικό Comsol	27
3.1 Εισαγωγή-Γενικά Στοιχεία.....	27
3.2 Χρήση του COMSOL σε μοντέλα προσομοίωσης υγρασίας	29
3.2.1 Γενική Μεθοδολογία	29
3.3 Εξισώσεις του μοντέλου στο COMSOL-Θεωρητικό Υπόβαθρο	30
3.3.1 Εισαγωγή-Γενικά Στοιχεία	30
3.3.2 Ηλεκτροστατικά Πεδία στον Ελεύθερο Χώρο	31
3.3.3 Ηλεκτροστατική σε Διηλεκτρικά Υλικά.....	32
3.4 Το πλέγμα (mesh) του Comsol.....	36
3.4.1 Η έννοια της διακριτοποίησης	36
3.4.2 Διακριτοποίηση σε Προβλήματα Υγρασίας	37
3.4.3 Το Comsol Mesh	38

3.4.4	Δημιουργία Πλέγματος στο Comsol.....	40
3.5	Σχέση διηλεκτρικών με την υγρασία	41
3.6	Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων.....	43
3.6.1	Εισαγωγή.....	43
3.6.2	Τα ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια	44
3.6.3	Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	45
3.6.4	Η δομή του πυκνωτή που αναπτύχθηκε στο COMSOL.....	47
3.7	Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο COMSOL	49
3.7.1	Ρόλος του Πολυϊμιδίου (Polyimide)	51
3.7.2	Επίδραση του PTFE στην Ανίχνευση Υγρασίας	53
4.	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....	54
4.1	Απεικόνιση επιφανειών σε διαφορετικά στρώματα υγρού αέρα	63
4.1.1	Επιφάνεια 1.....	64
4.1.2	Επιφάνεια 2.....	67
4.1.3	Επιφάνεια 3.....	70
4.1.4	Επιφάνεια 4.....	72
4.1.5	Επιφάνεια 5.....	74
4.1.6	Σύγκριση Επιφανειών.....	75
5.	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	77
6.	Βιβλιογραφία	80

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 - Απλοποιημένο διάγραμμα δομής αισθητήρα [1]	11
Εικόνα 2 - Παθητικός και ενεργός αισθητήρας [3]	13
Εικόνα 3 - Αρχή λειτουργίας αναλογικού και ψηφιακού αισθητήρα και οι διαφορές τους [5] [6]...	14
Εικόνα 4 - Κύκλωμα με αισθητήρα αντίστασης μαζί με τον τύπο υπολογισμού [7]	14
Εικόνα 5 - Σύγκριση δομής των αισθητήρων σχετικής και απόλυτης υγρασίας [15]	21
Εικόνα 6 - Χωρητικός αισθητήρα υγρασίας με δομή παράλληλης πλάκας [16]	22
Εικόνα 7 - Χωρητικός αισθητήρα ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων [16]	22
Εικόνα 8 - Ολοκληρωμένος αισθητήρας αντίστασης [17]	24
Εικόνα 9 - Η εκθετική απόκριση του αισθητήρα μεταβλητής αντίστασης (στους 25°C) [18]	25
Εικόνα 10: Το στατικό ηλεκτρικό πεδίο που περιβάλλει δύο πλάκες πυκνωτή είναι ένα παράδειγμα αστροβίλου ηλεκτροστατικού διανυσματικού πεδίου [46].	31
Εικόνα 11: Το πεδίο ηλεκτρικού δυναμικού που περιβάλλει δύο πλάκες πυκνωτή [46]	32
Εικόνα 12: Το πεδίο γύρω από ένα αντικείμενο με μεγαλύτερη διαπερατότητα από το περιβάλλον του [46].	35
Εικόνα 13: Το πεδίο γύρω από ένα αντικείμενο με χαμηλότερη διαπερατότητα από το περιβάλλον του [46].	36
Εικόνα 14: Κάτοψη και τομή διάταξης ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων (IDE) [48]	45
Εικόνα 15: Το ηλεκτρόδιο της ανόδου από το περιβάλλον του COMSOL	47
Εικόνα 16: Το ηλεκτρόδιο της καθόδου (γείωση) από το περιβάλλον του COMSOL	48
Εικόνα 17: Το Model Builder του COMSOL	51
Εικόνα 18: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού (V) κατά μήκος του αισθητήρα με ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια (IDE). Το ηλεκτρικό πεδίο εμφανίζεται ισχυρό κοντά στα ηλεκτρόδια και μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή του δυναμικού	54
Εικόνα 19: Τομή πολλαπλών επιπέδων (multislice) κατανομής ηλεκτρικού δυναμικού (V) γύρω από τον αισθητήρα. Το χρωματικό διάγραμμα απεικονίζει την ένταση του δυναμικού σε διαφορετικά επίπεδα του χώρου.	55
Εικόνα 20: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού και ισοδυναμικών γραμμών γύρω από τα ηλεκτρόδια. Οι ισοδυναμικές γραμμές δείχνουν περιοχές με σταθερό δυναμικό, υποδεικνύοντας την κατανομή του πεδίου στον χώρο.	56
Εικόνα 21: 2D κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας	60
Εικόνα 22: Το πλέγμα (mesh) για την αριθμητική επίλυση του ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας	61
Εικόνα 23: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας με ισοδυναμικές γραμμές για την επιφάνεια 1	64
Εικόνα 24: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 1	65
Εικόνα 25: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 1 του αισθητήρα υγρασίας	66
Εικόνα 26: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας με ισοδυναμικές γραμμές για την επιφάνεια 2	67
Εικόνα 27: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 2	68
Εικόνα 28: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 2 του αισθητήρα υγρασίας	69
Εικόνα 29: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 3	70
Εικόνα 30: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 3 του αισθητήρα υγρασίας	71
Εικόνα 31: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 4	72
Εικόνα 32: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 4 του αισθητήρα υγρασίας	73
Εικόνα 33: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 5	74

Εικόνα 34: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 5 του αισθητήρα υγρασίας 75

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 - Σύγκριση μεταξύ δυο τύπων αισθητήρων υγρασίας..... 26

1. Θεωρία

1.1 Αισθητήρες

Αισθητήρας είναι μια διάταξη που χρησιμοποιείται για την μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους, όπως φως, ήχο, θερμοκρασία, μετατρέποντας το σε ηλεκτρικό σήμα (Εικόνα 1). Το σήμα εξόδου ενός αισθητήρα είναι είτε τάση, είτε ρεύμα, είτε με την μορφή ψηφιακού σήματος και δεν είναι πάντοτε σε αναγνώσιμη μορφή. Περαιτέρω επεξεργασία, με την χρήση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, μετατρέπει το ηλεκτρικό σε αναγνώσιμο σήμα, ώστε να γίνεται κατανοητό στον παραλήπτη.

Το πρωτογενές φυσικό χαρακτηριστικό που αντιλαμβάνεται από τον αισθητήρα κατά την διαδικασία μέτρησης είναι γνωστό ως "ερέθισμα" (stimulus) και πρόκειται για μια φυσική ποσότητα που επιφέρει διέγερση στον αισθητήρα. Κατά την λειτουργία του αισθητήρα, παρατηρείται τόσο η μεταφορά ενέργειας από το αντικείμενο που μετριέται προς τη συσκευή όσο και η μετατροπή αυτής της ενέργειας σε διαφορετική μορφή. Η μεταφορά ενέργειας συνδέεται με τη μετάδοση πληροφορίας κατά την διαδικασία της μέτρησης μέσω ενός αισθητήρα. Επιπλέον, η μετατροπή ενέργειας αφορά στον μετασχηματισμό του ερεθίσματος, παραδείγματος χάριν της πίεσης, της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και της χημικής σύνθεσης, σε ηλεκτρικό σήμα.



Εικόνα 1 - Απλοποιημένο διάγραμμα δομής αισθητήρα [1]

Οι περισσότεροι αισθητήρες ανήκουν στην κατηγορία των μετατροπέων (transducer). Μετατροπέας είναι μια διάταξη που απορροφά ενέργεια και τη μετατρέπει σε ενέργεια άλλης μορφής. Ωστόσο, δεν είναι όλοι οι μετατροπείς αισθητήρες. Άλλοι γνωστοί τύποι μετατροπέων είναι οι ενεργοποιητές (actuators) που χρησιμοποιούν μία μορφή ισχύος, ώστε να μετατρέψουν μια διαφορετική μορφή ενέργειας σε κίνηση.

1.2 Κατηγορίες αισθητήρων

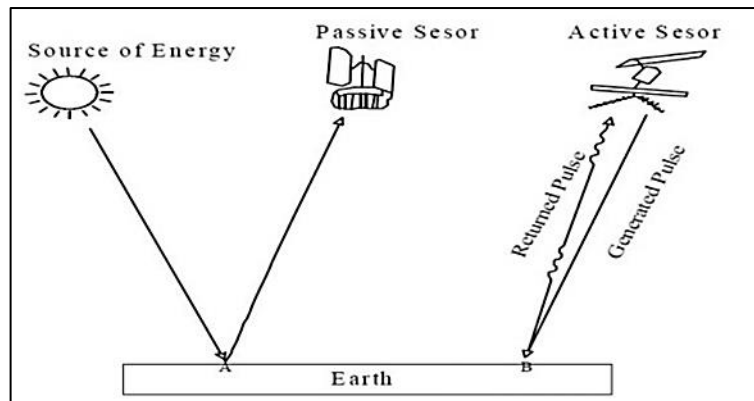
Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται με διάφορους τρόπους, ωστόσο στη παρούσα εργασία θα αναλύσουμε τη κάτωθι κατηγοριοποίηση.

- Παθητικοί (passive) και ενεργοί (active) αισθητήρες.
- Αναλογικοί και ψηφιακοί αισθητήρες.
- Χωρητικοί και αντίστασης.
- Αισθητήρες φυσικών μεγεθών (θέσης, θερμοκρασίας, πίεσης, ροπής, μαγνητικών πεδίων, υγρασίας κ.λπ.).

1.2.1 Παθητικοί και ενεργοί αισθητήρες

Ένα ενεργός αισθητήρας είναι ένας τύπος αισθητήρα που εκπέμπει ενέργεια, όπως φως ή ήχο, και στη συνέχεια μετρά την αντίδραση ή την ανακλαστικότητα από το περιβάλλον ή τα αντικείμενα. Χρησιμοποιεί εξωτερική πηγή ενέργειας για να λειτουργήσει και να αλληλοεπιδράσει με το περιβάλλον του. Αντίθετα οι παθητικοί αισθητήρες απλά ανιχνεύουν και μετρούν υφιστάμενες πηγές ενέργειας, όπως θερμική ακτινοβολία ή ραδιοκύματα [2]. Οι ενεργοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων του απομακρυσμένου εντοπισμού, δορυφόρους καιρού, συστημάτων ραντάρ, lidar (ανίχνευση με φως και απόσταση) και ορισμένων τύπων ηχοβολίας (sonar). Οι παθητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται επίσης σε πολλές εφαρμογές. Ορισμένα παραδείγματα περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία (μέτρηση της θερμοκρασίας σε κλιματισμό, αυτοκίνητα και ηλεκτρονικές συσκευές), κίνηση (ανιχνεύουν την παρουσία ή την κίνηση ανθρώπων ή αντικειμένων), υγρασία (μέτρηση της υγρασίας σε περιβάλλοντα όπως κλιματισμός, αποθήκες, και γεωργία), αερίων (ανιχνευτές διοξειδίου του άνθρακα και προειδοποιητικά συστήματα).

Ο τρόπος λειτουργίας των ενεργών και παθητικών αισθητήρων παρουσιάζεται παρακάτω στην εικόνα 2.



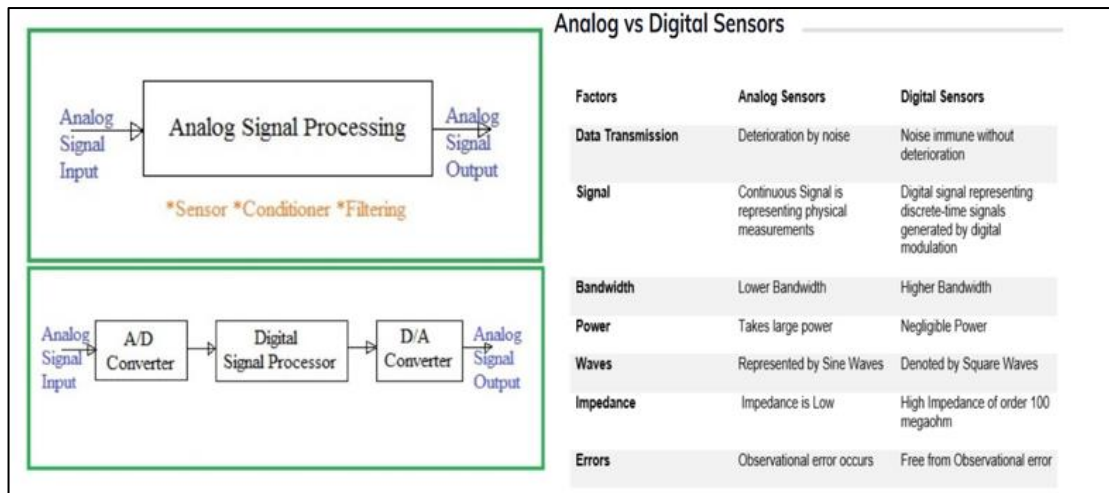
Εικόνα 2 - Παθητικός και ενεργός αισθητήρας [3]

1.2.2 Αναλογικοί και ψηφιακοί αισθητήρες

Οι αναλογικοί αισθητήρες παρέχουν μια συνεχή αναλογική έξοδο που αλλάζει ανάλογα με την μεταβολή της μετρούμενης ποσότητας. Η έξοδος τους παρουσιάζεται συνήθως ως ηλεκτρική τάση (0 έως 5 V) ή ρεύμα που αλλάζει συνεχώς σε αντίστοιχη σχέση με την ποσότητα που μετράνε. Οι αναλογικοί αισθητήρες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου απαιτείται ακρίβεια στην μέτρηση και η συνεχής αλλαγή της ποσότητας είναι σημαντική. Ένα παράδειγμα αναλογικού αισθητήρα είναι ο αισθητήρας θερμοκρασίας (thermistor). Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ όταν μειωθεί τότε η τιμή αντίστασης μειώνεται [4].

Οι ψηφιακοί αισθητήρες παρέχουν μια διακριτική ή ψηφιακή έξοδο, συχνά εκφρασμένη σε μορφή ψηφιακού σήματος (συνήθως 0 και 1). Η έξοδός τους αλλάζει στάδια ή διακριτικά βήματα, αντί να ακολουθεί μια συνεχή μεταβολή. Οι ψηφιακοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως στα συστήματα επικοινωνίας, επειδή τα σήματα εξόδου τους αναπαράγονται εύκολα στον επαναλήπτη (repeater) και επειδή συνήθως είναι πιο απλοί στη χρήση και στον προγραμματισμό, και μπορούν να είναι πιο ανθεκτικοί στον θόρυβο και στις διαταραχές του ρυθμού δεδομένων [4].

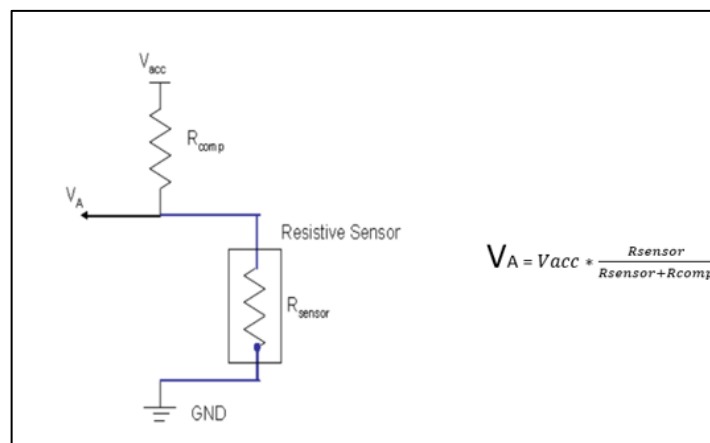
Η Εικόνα 3, παρουσιάζει τον τρόπο λειτουργίας των αναλογικών και ψηφιακών αισθητήρων και τις μεταξύ τους διαφορές.



Εικόνα 3 - Αρχή λειτουργίας αναλογικού και ψηφιακού αισθητήρα και οι διαφορές τους [5] [6]

1.2.3 Αισθητήρας ωμικής αντίστασης – χωρητικότητας

Οι αισθητήρες αντίστασης λειτουργούν σαν αντιστάτες, δηλαδή είναι αντιστάσεις που αντιστέκονται στις αλλαγές ανάλογα με τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Στη παρακάτω Εικόνα 4 παρουσιάζεται ένα κύκλωμα με αισθητήρα αντίστασης μαζί με τον τύπο υπολογισμού που εξηγεί τον τρόπο λειτουργίας των αισθητήρων αντίστασης.



Εικόνα 4 - Κύκλωμα με αισθητήρα αντίστασης μαζί με τον τύπο υπολογισμού [7]

Ο υπολογισμός της αντίστασης δεν είναι άμεσα εφικτός και πραγματοποιείται έμμεσα μέσω υπολογισμού της τάσης. Στο κύκλωμα που παρουσιάζεται στη παραπάνω εικόνα, που αποτελεί έναν διαιρέτη τάσης, η πάνω αντίσταση (R_{comp}) παραμένει σταθερή ενώ στο κάτω μέρος βρίσκεται ένας αισθητήρας που λειτουργεί ως αντιστάτης (π.χ. thermistor ή photoresistor).

Όταν αλλάζει η αντίσταση R_{sensor} αλλάζει και η τιμή της τάσης εξόδου και γίνεται η ανίχνευση της αλλαγής στην αντίσταση και μεταδίδεται η πληροφορία [8].

Οι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της χωρητικότητας, δηλαδή της ικανότητας ενός αντικειμένου να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο. Συνήθως, αυτοί οι αισθητήρες αποτελούνται από δύο ηλεκτρικούς αγωγούς (συνήθως πλάκες) που τοποθετούνται κοντά μεταξύ τους, και η χωρητικότητα μεταξύ αυτών των αγωγών μπορεί να αλλάξει όταν ένα διηλεκτρικό υλικό τοποθετείται κοντά στον αισθητήρα. Η ικανότητά τους να ανιχνεύουν την παρουσία ή την κίνηση αντικειμένων, χωρίς να χρειάζονται φυσική επαφή με τα αντικείμενα αυτά, αξιοποιείται από διάφορες εφαρμογές και σε διάφορους κλάδους για την ανίχνευση, εκτός της κίνησης και της ροής, της πίεσης, της υγρασίας ή του πάχους [9].

1.2.4 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων περιλαμβάνουν το είδος μέτρησης (θερμοκρασία, πίεση, φωτεινότητα, κίνηση), το εύρος μέτρησης (εύρος των τιμών), την ακρίβεια (ακριβείς μετρήσεις σε σχέση με την πραγματική τιμή της ποσότητας), την ανάλυση, την απόκριση στο χρόνο, την σταθερότητα στη πάροδο του χρόνου, την επαναληψιμότητα και την ευαισθησία στο περιβάλλον [10].

Οι αισθητήρες παρουσιάζουν επίσης σφάλματα. Σφάλμα (error) ενός αισθητήρα είναι η διαφορά ανάμεσα στην έξοδο του αισθητήρα και την μετρούμενη (actual) τιμή. Τα σφάλματα των αισθητήρων χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα συστηματικά σφάλματα και τα τυχαία σφάλματα. Τα συστηματικά σφάλματα επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιεί ο αισθητήρας, ενώ τα τυχαία σφάλματα επηρεάζουν τυχαία τις μετρήσεις του αισθητήρα.

Η αξιολόγηση και η κατηγοριοποίηση ενός αισθητήρα εξαρτάται από παράγοντες όπως το κόστος και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Κύρια χαρακτηριστικά ενός καλού αισθητήρα αποτελεί η ευαισθησία στο μετρούμενο μέγεθος, δηλαδή η μη ευαισθησία σε όλα τα υπόλοιπα μεγέθη ή φαινόμενα [10].

2. Υγρασία

2.1 Θεωρία

Η υγρασία του αέρα είναι η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς και εκφράζεται με διάφορους τρόπους. Πρέπει να σημειώσουμε πρώτα ότι μία δεδομένη μάζα αέρα μπορεί να περιέχει μέχρι ένα ορισμένο ποσό μάζας υδρατμών χωρίς να αρχίζει η επιπρόσθετη μάζα υδρατμών να συμπυκνώνεται σε σταγόνες. Το όριο αυτό εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα (αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ή μειώνεται η πίεση του αέρα), ονομάζεται σημείο δρόσου και είναι το φαινόμενο του κορεσμού.

Μπορούμε να βρούμε υγρασία παντού στη γη, ακόμη και σε εξαιρετικά ξηρές περιοχές, αλλά υπάρχουν περιπτώσεις όπου ίχνη υδρατμών θα μπορούσαν να προκαλέσουν προβλήματα σε ορισμένες εφαρμογές. Η μέτρησή της είναι σημαντική σε βιομηχανικές, εργαστηριακές εφαρμογές και εφαρμογές ελέγχου διεργασιών, επιτρέποντας βελτιώσεις στην ποιότητα προϊόντων, μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας την ανθρώπινη άνεση. Στη βιομηχανία καπνού, για παράδειγμα, ο σωστός έλεγχος του επιπέδου υγρασίας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα των προϊόντων καπνού. Υπάρχουν, επίσης, παραδείγματα σημείου δρόσου που σχετίζονται με την ανθρώπινη άνεση, όπως χειρουργικές αίθουσες ελεγχόμενης υγρασίας, θερμοκοιτίδες, κλιματισμός και πολλές άλλες περιπτώσεις. Η μέτρηση της υγρασίας είναι πιο δύσκολη από αυτή των περισσότερων άλλων ιδιοτήτων όπως η πίεση, η θερμοκρασία και η ροή. Ένας από τους λόγους είναι ότι καλύπτει ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος μετρήσεων [11].

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).

2.1.1 Απόλυτη Υγρασία

Η απόλυτη υγρασία ορίζεται ως πυκνότητα υδρατμών και εκφράζεται ως μάζα νερού ανά μονάδα όγκου ξηρού αέρα ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία και μπορεί να εκφραστεί ως [12]:

$$\rho_v = \frac{m_v}{v} \quad (2.1)$$

Όπου :

ρ_v : Απόλυτη υγρασία (gr/m^3)

m_v : Μάζα υδρατμών (gr)

V : Όγκος αέρα (m^3)

2.1.2 Σχετική Υγρασία

Οι περισσότεροι άνθρωποι είναι εξοικειωμένοι με τη σχετική υγρασία, γιατί την ακούν συνεχώς στην πρόγνωση του καιρού. Η σχετική υγρασία, είναι η αναλογία της ποσότητας υγρασίας στον αέρα σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία προς τη μέγιστη ποσότητα που θα μπορούσε να συγκρατήσει ο αέρας σε αυτή τη θερμοκρασία, εκφρασμένη ως ποσοστό. Άρα η σχετική υγρασία εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Ο ακριβέστερος ορισμός της σχετικής υγρασίας είναι ότι είναι ο λόγος της πραγματικής μερικής τάσης ατμών προς την τάση κορεσμού των ατμών του αερίου, πολλαπλασιαζόμενη με 100%, στην επικρατούσα θερμοκρασία περιβάλλοντος [11].

$$RH = \frac{m_v}{m_{vs}} \times 100\% = \frac{e}{e_s} \times 100\% \quad (2.2)$$

Όπου :

RH : Σχετική υγρασία

m_v : Μάζα υδρατμών

m_{vs} : Μέγιστη μάζα υδρατμών για την συγκεκριμένη θερμοκρασία (κορεσμός υδρατμών)

e : Τάση υδρατμών

e_s : Μέγιστη τάση υδρατμών για την συγκεκριμένη θερμοκρασία (κορεσμός υδρατμών)

2.1.3 Ειδική υγρασία και σημείο δρόσου

Η ειδική υγρασία εκφράζει το πηλίκο της μάζας υδρατμών προς το άθροισμα της μάζας υδρατμών και ξηρού αέρα.

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a} \quad (2.3)$$

Όπου :

q : ειδική υγρασία

m_v : Μάζα υδρατμών

m_a : Μάζα του ξηρού αέρα

Η ειδική υγρασία είναι μια εξαιρετική χρήσιμη ποσότητα. Για παράδειγμα, η ταχύτητα εξάτμισης του νερού από οποιαδήποτε επιφάνεια είναι ευθέως ανάλογη με τη συγκεκριμένη διαφορά υγρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του αέρα.

Ένας άλλος σημαντικός τρόπος ένδειξης της υγρασίας είναι το σημείο δρόσου. Είναι η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να ψυχθεί ένας όγκος αερίου έτσι ώστε να κορεσθεί σε σχέση με το υγρό νερό. Αυτή είναι η θερμοκρασία της παραπάνω εξίσωσης σε μια συγκεκριμένη τάση ατμών όταν $e=e_s$ (2.2) σε ολική πίεση P (πρότυπη πίεση). Από τον ορισμό τους, γνωρίζουμε ότι η μονάδα μέτρησης για το σημείο δρόσου είναι ίδια με τη θερμοκρασία, άρα η σχετική υγρασία δεν έχει μονάδες μέτρησης και είναι απλώς ένα ποσοστό. Στην πραγματικότητα, η σχετική υγρασία υποδεικνύει μόνο πόσο γεμάτος είναι ο αέρας με υγρασία, δεν υποδεικνύει πόση υγρασία υπάρχει στον αέρα, ούτε εάν υπάρχει μεγάλη ποσότητα υγρασίας. Το σημείο δρόσου είναι μια πολύ σημαντική μεταβλητή και είναι ο δείκτης για το πόση υγρασία υπάρχει στον αέρα. Έτσι, σε ένα πολύ χαμηλό σημείο δρόσου, ακόμα κι αν η σχετική υγρασία είναι σχεδόν 100%, οι άνθρωποι εξακολουθούν να αισθάνονται πολύ ξηροί, αυτές οι έννοιες είναι αρκετά μπερδεμένες. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι το τρέχον σημείο δρόσου δεν θα είναι ποτέ υψηλότερο από την τρέχουσα θερμοκρασία και εάν η θερμοκρασία είναι στο σημείο δρόσου και η θερμοκρασία μειωθεί, το σημείο δρόσου πρέπει να ακολουθήσει όπως φαίνεται και στην παρακάτω απλουστευμένη εξίσωση από τον Mark G. Lawrence [11].

$$T_d = T - \frac{100 - RH}{5} \quad (2.4)$$

Όπου :

T_d : Θερμοκρασία δρόσου (°C)

T : Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

RH : Σχετική υγρασία (%)

2.2 Αισθητήρες υγρασίας

Το 1450, ένα υγρόμετρο μαλλιών κατασκευάστηκε από Γερμανούς επιστήμονες ως ο πρώτος αισθητήρας υγρασίας στην ανθρώπινη ιστορία, και ένα σχέδιο του έγινε από τον Λεονάρντο ντα Βίντσι το 1480. Το 1973, η φινλανδική εταιρεία Vaisala παρήγαγε το «Humicap», έναν αισθητήρα υγρασίας που χρησιμοποιεί μια λεπτή μεμβράνη από ευαίσθητο σε υδρατμούς πολυμερές, που μπορεί να ανταποκριθεί στην υγρασία της ατμόσφαιρας αλλάζοντας την ηλεκτρική του χωρητικότητα. Μέσω της τεχνολογικής προόδου, πολλοί διαφορετικοί αισθητήρες υγρασίας έχουν εμφανιστεί, συμπεριλαμβανομένου ενός αισθητήρα κορεσμένου χλωριούχου λιθίου και ενός αισθητήρα αλλαγής χρώματος [13].

Οι αισθητήρες υγρασίας μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- αισθητήρες που μετρούν τη σχετική υγρασία, και
- αισθητήρες που μετρούν την απόλυτη υγρασία

Διαφορετικά είδη αισθητήρων υγρασίας χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας που παίζει κρίσιμο ρόλο κατά την κατασκευή ημιαγωγών, για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής υγρασίας στα κτίρια ή για να βοηθήσουν στο μαγείρεμα σε φούρνο μικροκυμάτων στην καθημερινή μας ζωή [13].

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν έναν σωστό αισθητήρα υγρασίας είναι:

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

- Αμελητέα εξάρτηση από την θερμοκρασία
- Μικρή υστέρηση
- Γραμμική απόκριση

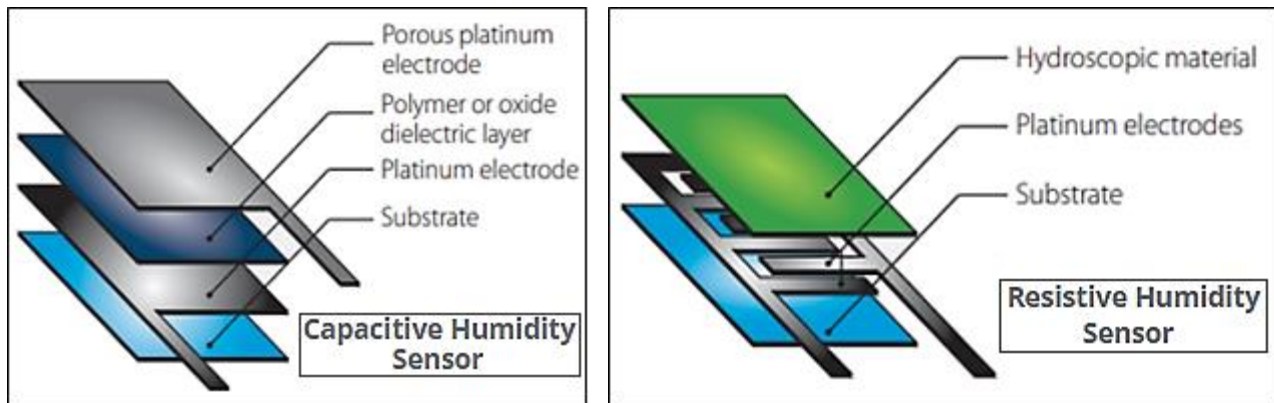
2.2.1 Βασικά στοιχεία αισθητήρα υγρασίας

Στην πλειονότητα των εφαρμογών μέτρησης υγρασίας, οι μετρήσεις σχετικής υγρασίας είναι προτιμότερες από αυτές της απόλυτης υγρασίας. Το RH% χρησιμοποιείται πιο συχνά επειδή είναι γενικά απλούστερο στον υπολογισμό και εφαρμόζεται εκτενώς σε εφαρμογές που αφορούν θέματα ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου και ανθρώπινης άνεσης. Αντίστοιχα, σε ερευνητικά εργαστήρια και δημόσιες εφαρμογές, η RH εφαρμόζεται παντού για να απλοποιήσει τη διαδικασία σχεδιασμού. Η μέτρηση της απόλυτης υγρασίας αλλάζει σε συνάρτηση της πίεσης του αέρα με αποτέλεσμα ο υπολογισμός της να είναι πιο περίπλοκος. [14].

Οι αισθητήρες σχετικής υγρασίας έχουν σαν βασικό στοιχείο του κυκλώματός τους μια μεταβλητή αντίσταση που μεταβάλλει την ωμική της τιμή ανάλογα με το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του αέρα, ή έναν μεταβλητό πυκνωτή που μεταβάλλει την χωρητικότητά του ανάλογα με τη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα. Η λειτουργία, των αισθητήρων σχετικής υγρασίας, συνεπώς, στηρίζεται είτε στη μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός υλικού, είτε στην απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα μόρια του νερού. Συνήθης διαχωρισμοί αυτών των αισθητήρων είναι με βάση τον τύπο του υλικού και ανάλογα την αρχή λειτουργίας τους.

Μερικές από τις πιο χρησιμοποιούμενες μεθόδους μέτρησης υγρασίας με βάση τα αισθητήρια υλικά είναι (Εικόνα 5):

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



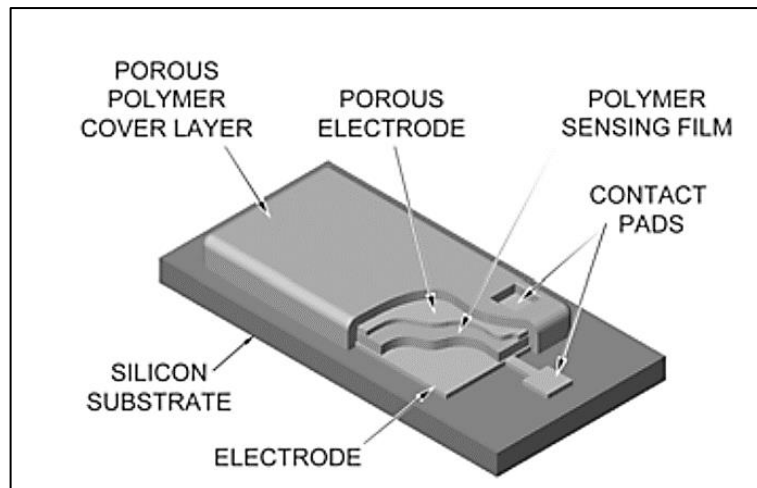
Εικόνα 5 - Σύγκριση δομής των αισθητήρων σχετικής και απόλυτης υγρασίας [15]

Ο αισθητήρας σχετικής υγρασίας (0-100%RH) έχει στο εσωτερικό του έναν πυκνωτή του οποίου η χωρητικότητα μεταβάλλεται με την αλλαγή της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος. Ο πυκνωτής αποτελεί μέρος ενός ταλαντωτή με αποτέλεσμα η συχνότητα ταλάντωσης να μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η τιμή της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος. Η συχνότητα ταλάντωσης μετατρέπεται σε τάση, η οποία στη συνέχεια προσαρμόζεται στο εύρος 0 – 5 V.

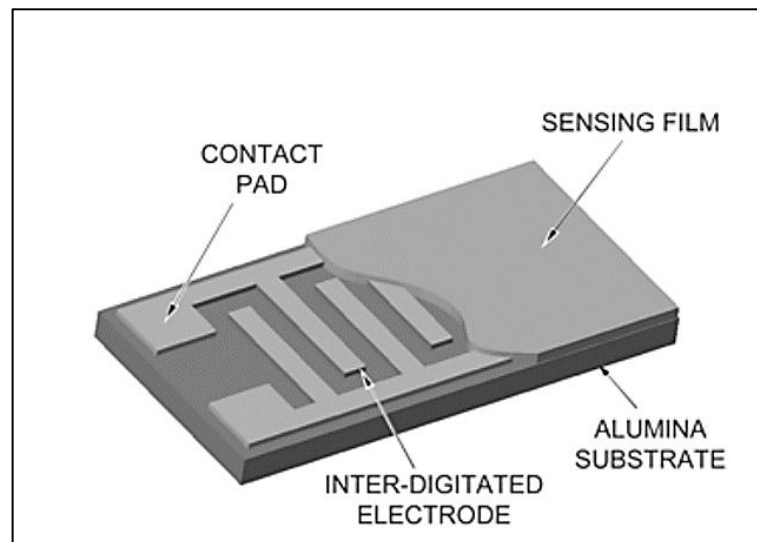
2.2.2 Χωρητικός αισθητήρας υγρασίας

Η τυπική διαμόρφωση των χωρητικών αισθητήρων υγρασίας μπορεί να είναι είτε μια δομή τύπου σάντουιτς με δύο επιφάνειες ηλεκτροδίων σε κάθε πλευρά (PP), είτε μια συμπλεγμένη δομή με ηλεκτρόδια με μορφή χτένας (IDE), όπως οι αισθητήρες αντίστασης RH, έτσι ώστε το διηλεκτρικό πολυμερές φιλμ να εναποτίθεται ανάμεσα [14].

Η δομή της παράλληλης πλάκας (PP) τυπικά περιλαμβάνει δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια τα οποία εναποτίθενται στο υπόστρωμα και επικαλύπτονται με μια λεπτή στρώση μεμβράνης ενός διηλεκτρικού πολυμερούς ή ενός πορώδους κεραμικού οξειδίου μετάλλου (Εικόνα 6). Ως άνω ηλεκτρόδιο, το πάνω μέρος της επιφάνειας ανίχνευσης είναι επικαλυμμένο με ένα λεπτό στρώμα χρυσού για να το προστατεύει από τη μόλυνση του περιβάλλοντος ή τη σκόνη και να διασφαλίζει καλύτερη συμπίκνωση. Στην περίπτωση των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων (IDE), δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο και επομένως μετρίεται η χωρητικότητα του διηλεκτρικού υλικού που τοποθετείται, είτε πάνω, είτε κάτω από τα ηλεκτρόδια (Εικόνα 7).



Εικόνα 6 - Χωρητικός αισθητήρα υγρασίας με δομή παράλληλης πλάκας [16]



Εικόνα 7 - Χωρητικός αισθητήρα ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων [16]

Οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες, όπου η ονομασία εξαρτάται από τα ευαίσθητα διηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται.

- χωρητικοί αισθητήρες κεραμικού τύπου (Ceramic-Type capacitive humidity sensor),
- χωρητικοί αισθητήρες πολυμερούς τύπου (Polymer-Type capacitive humidity sensor)

Το πιο διαδεδομένο υλικό που συναντάται στους χωρητικούς αισθητήρες κεραμικού τύπου είναι το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) με πορώδη δομή. Σύμφωνα με το φαινόμενο του μηχανισμού σήραγγας ηλεκτρονίων μέσα στα συμπυκνωμένα ακίνητα στρώματα νερού, το Al_2O_3 με μικρή ακτίνα πόρων είναι πολύ ευαίσθητο σε πολύ χαμηλά επίπεδα υγρασίας. [14].

Οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας που βασίζονται σε οργανικά πολυμερή είναι βασικά κατασκευασμένοι από υδρόφοβα υλικά που είναι εν μέρει υγροσκοπικά. Ως αρχή για τα πολυμερή διηλεκτρικά, οι απορροφούμενοι υδρατμοί καταλαμβάνουν τον ελεύθερο χώρο μεταξύ των μορίων του πολυμερούς, επομένως η διηλεκτρική διαπερατότητα του υγροσκοπικού πολυμερούς μεταβάλλεται γραμμικά αναλογικά με την ποσότητα του απορροφούμενου νερού. Οι χωρητικοί αισθητήρες RH παρουσιάζουν συνήθως πολλά βασικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους αισθητήρες υγρασίας τύπου αντίστασης. Ένα χαρακτηριστικό είναι η γρήγορη και γραμμική απόκρισή τους στην υγρασία μαζί με τη χαμηλή υστέρηση. Η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και η λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα σχετικής υγρασίας είναι μεταξύ των άλλων σημαντικών χαρακτηριστικών αυτού του τύπου. Τα πολυμερή διηλεκτρικά είναι μια κατηγορία πολυμερών, των οποίων οι φυσικές ιδιότητες όπως η διαπερατότητα αλλάζουν αναλογικά με τις υψηλές διπολικές ροπές των μορίων του νερού, επομένως αυτή η αλλαγή υγρασίας ανιχνεύεται άμεσα με τη μέτρηση των αλλαγών της χωρητικότητας [11]. Τα πολυϊμίδια (PI) και τα οξικά άλατα κυτταρίνης είναι γνωστό ότι είναι κατάλληλα υποψήφια πολυμερή για χωρητικούς αισθητήρες υγρασίας.

Η χωρητικότητα του αισθητήρα είναι άμεσα συσχετισμένη με την σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) του μονωτικού υλικού, η οποία αυξάνεται ανάλογα με την σχετική υγρασία (RH%) και μειώνεται όσο η συχνότητα (f) αυξάνεται:

$$\epsilon_r = F(\epsilon_{o,r}, RH, f) \quad (2.5)$$

Όπου :

ϵ_r : σχετική διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού

$\epsilon_{o,r}$: σταθερά του πολυμερούς υποστρώματος

RH : σχετική υγρασία

f : συχνότητα

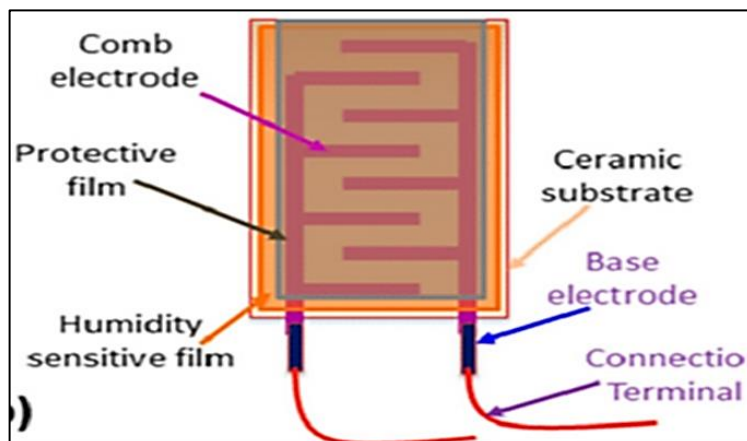
Επιπλέον, παρόλο που οι επίπεδοι πυκνωτές έχουν χαμηλότερη απόδοση από αυτούς με τις παράλληλες πλάκες, το ενδιαφέρον για τις επίπεδες δομές IDE έγκειται στη συμπαγή τους μορφή και το χαμηλό πάχος τους, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν ο αισθητήρας χρησιμοποιείται ως λεπτό επίθεμα.

2.2.3 Αισθητήρας ωμικής αντίστασης

Οι αισθητήρες υγρασίας ωμικής αντίστασης, επίσης γνωστοί ως αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας, μετρούν την αλλαγή της αντίστασης μεταξύ δυο ηλεκτροδίων μέσα σε ένα αισθητήρα υγρασίας για να καθορίσουν την σχετική υγρασία.

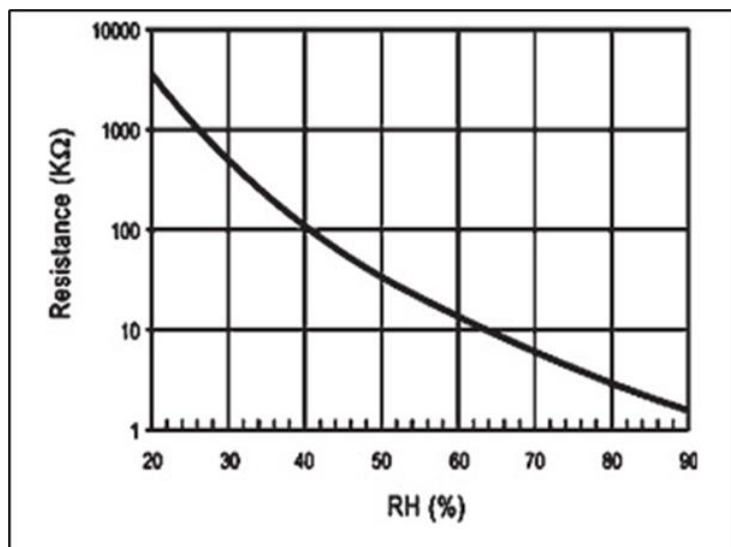
Λειτουργούν με βάση παρόμοιες αρχές με τους χωρητικούς αισθητήρες, ότι μια ηλεκτρική μεταβολή παράγει μια τιμή σχετικής υγρασίας. Ωστόσο, οι αισθητήρες υγρασίας με αντίσταση χρησιμοποιούν υλικό που απορροφά την υγρασία (υγροσκοπικό), επομένως η αρχή λειτουργίας είναι ελαφρώς διαφορετική.

Μέσα σε έναν αισθητήρα υγρασίας με αντίσταση, το υγροσκοπικό αγωγίμο στρώμα λειτουργεί ως φιλμ ανίχνευσης υγρασίας πολυμερούς, το οποίο περιέχει ηλεκτρόδια που μοιάζουν με χτένα (Εικόνα 8). Τα ηλεκτρόδια τυπικά προέρχονται από ευγενή μέταλλα όπως ο χρυσός, το ασήμι ή η πλατίνα, και είναι διατεταγμένα σε αλληλοκατευθυνόμενα μοτίβα για να αυξήσουν την επιφάνεια επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων και του υγροσκοπικού στρώματος. Η τάση εξόδου έχει αντίστροφη εκθετική σχέση με το RH (Εικόνα 9). Καθώς απορροφάται περισσότερος υδρατμός, η ειδική αντίσταση μειώνεται λόγω της αύξησης της αγωγιμότητας του υλικού μη μεταλλικής αγωγιμότητας.



Εικόνα 8 - Ολοκληρωμένος αισθητήρας αντίστασης [17]

Οι σύγχρονοι αισθητήρες υγρασίας με αντίσταση περιέχουν μια κεραμική ουσία, η οποία παρέχει στον αισθητήρα επιπλέον προστασία. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την προστασία των αισθητήριων στοιχείων από ρύπους.



Εικόνα 9 - Η εκθετική απόκριση του αισθητήρα μεταβλητής αντίστασης (στους 25°C) [18]

Όπως ακριβώς και με τους χωρητικούς αισθητήρες, οι αισθητήρες αντίστασης διακρίνονται σε πολυμερούς και κεραμικού τύπου. Οι αισθητήρες πολυμερούς τύπου θεωρούνται λιγότερο αποτελεσματικοί καθιστώντας τους λιγότερο διαδεδομένους σε σχέση με του κεραμικού τύπου.

Οι πορώδεις κεραμικοί μπορούν να πραγματοποιηθούν και να σχηματιστούν μέσω διαφορών τεχνικών, για παράδειγμα:

- η εκτύπωση σε παχύ φιλμ όπου αγώγιμες και μη αγώγιμες πάστες εναποτίθενται σε ένα μονωτικό υπόστρωμα,
- λεπτές μεμβράνες πλάσματος ή ατμού κενού που εναποτίθενται με βάση ημιαγωγό,
- τα οξείδια μετάλλων και οι μεμβράνες σχηματίζονται με ανοδίωση, κυρίως για το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3).

Σε τέτοια προϊόντα παχύρρευστης μεμβράνης, το πάχος του φιλμ είναι συνήθως μεγαλύτερο από 10 μm και μπορούν να προστεθούν πρόσμικτες ουσίες σε προ-αντιδραστήσες σκόνες ως καταλύτες αντίδρασης για την προώθηση της διάσπασης των μορίων του νερού σε λειτουργικές ομάδες που περιέχουν ιόντα υδρογόνου και υδροξυλίου. Λεπτές μεμβράνες ατμού κενού ή εναπόθεσης πλάσματος σε διάφορα υποστρώματα όπως το πυρίτιο λειτουργούν επίσης ως συσκευές αντίστασης και χρησιμοποιούν κυρίως ιοντική-ηλεκτρονική αγωγιμότητα λόγω της ημιαγώγιμης φύσης τους. Τα επιφανειακά ιόντα υδροξυλίου μειώνουν την ειδική αντίσταση του φιλμ και κατά συνέπεια αλλάζουν την αντίσταση [14].

Το πλεονέκτημα ενός αισθητήρα αντίστασης είναι η υψηλή αναλογία επιφάνειας-όγκου, η οποία του επιτρέπει να μετράει τις αλλαγές υγρασίας στο περιβάλλον έως και 90% σχετική υγρασία σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτά τα συστήματα έχουν περιορισμούς και ως εκ τούτου δεν είναι βέλτιστα για τη μέτρηση τιμών κάτω από 5% RH. Οι εφαρμογές που ευνοούν έναν αισθητήρα αντίστασης περιλαμβάνουν αυτοκίνητα, έξυπνες συσκευασίες τροφίμων και δίκτυα αισθητήρων σχετικής υγρασίας. Για πολύ χαμηλή λειτουργία ελέγχου RH στο εύρος RH 1%-2%, μπορούν να επιτευχθούν ακρίβειες 0,1%. Οι αισθητήρες αντίστασης χρησιμοποιούνται ευρέως σε ελέγχους κλιματισμού ακριβείας για τη διατήρηση του περιβάλλοντος των αιθουσών υπολογιστών και ως οθόνες για γραμμές μετάδοσης υπό πίεση, κεραίες και κυματοδηγούς που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες [19].

2.2.4 Σύγκριση αισθητήρων υγρασίας

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει μια σύγκριση των δυο βασικών τύπων αισθητήρων υγρασίας σε σχέση με τα βασικά χαρακτηριστικά τους [20]:

Πίνακας 1 - Σύγκριση μεταξύ δυο τύπων αισθητήρων υγρασίας

Parameters	Capacitive	Resistive
RH range	0-100%	Only at higher RH range
Sensitivity	High even at low RH	Moderate at low
Temperature range	Up to 200°C	-40°C to 100°C
Response time	Fast	Moderate
Resistivity to contamination	High due to film coating	Low
Accuracy	±2%	±2%
Hysteresis	Minimum	Comparatively low

3. Το Λογισμικό Comsol

3.1 Εισαγωγή-Γενικά Στοιχεία

Το Comsol, συντομογραφία των COMputational SOLutions, είναι ένα ισχυρό πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιείται ευρέως στους τομείς της μηχανικής και της επιστήμης. Αναπτυγμένο από τη σουηδική εταιρεία Comsol AB, αυτό το λογισμικό πολυφυσικής προσομοίωσης επιτρέπει στους χρήστες να μοντελοποιούν και να προσομοιώνουν πολύπλοκα φυσικά συστήματα, καθιστώντας το ένα ανεκτίμητο εργαλείο για ερευνητές, μηχανικούς και φοιτητές.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του Comsol είναι η ικανότητά του να χειρίζεται προβλήματα πολυφυσικής. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να προσομοιώνει φαινόμενα που περιλαμβάνουν πολλαπλούς φυσικούς κλάδους, όπως ροή ρευστών, μεταφορά θερμότητας και δομική μηχανική, όλα μέσα σε ένα μόνο μοντέλο. Αυτή η ευελιξία καθιστά το Comsol απαραίτητο εργαλείο για την αντιμετώπιση προβλημάτων του πραγματικού κόσμου που απαιτούν μια ολοκληρωμένη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών φυσικών φαινομένων [21].

Το περιβάλλον εργασίας του Comsol είναι φιλικό προς το χρήστη, επιτρέποντας ακόμη και σε όσους έχουν ελάχιστη εμπειρία στον προγραμματισμό να δημιουργούν και να επιλύουν σύνθετες προσομοιώσεις. Επιπλέον, το Comsol προσφέρει μια τεράστια βιβλιοθήκη προκαθορισμένων φυσικών μοντέλων και υλικών, απλοποιώντας περαιτέρω τη διαδικασία ρύθμισης της προσομοίωσης. Περιλαμβάνει επίσης μια ισχυρή μηχανή επίλυσης που εκτελεί τους αριθμητικούς υπολογισμούς που απαιτούνται για την επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων που διέπουν την το μοντέλο. Αυτή η μηχανή χρησιμοποιεί προηγμένους αλγορίθμους και υπολογιστικές τεχνικές για την επίτευξη ακριβών και αποτελεσματικών λύσεων.

Οι δυνατότητες μετα-επεξεργασίας του Comsol επιτρέπουν στους χρήστες να αναλύουν και να απεικονίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ολοκληρωμένα. Προσφέρει μια σειρά εργαλείων για τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων, γραφημάτων και κινούμενων εικόνων, βοηθώντας στην ερμηνεία των δεδομένων που παράγονται από τις προσομοιώσεις.

Η δημοτικότητα του Comsol σε ακαδημαϊκά και ερευνητικά περιβάλλοντα μπορεί να αποδοθεί στην εκτεταμένη βιβλιοθήκη των ενότητων πολυφυσικής προσομοίωσης που διαθέτει. Οι ενότητες αυτές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών κλάδων, όπως ηλεκτρομαγνητική, ακουστική, χημικές αντιδράσεις και ανίχνευση σωματιδίων. Με αυτές τις ενότητες, οι ερευνητές και οι φοιτητές μπορούν να εξερευνήσουν και να προσομοιώσουν φαινόμενα ειδικά για τους τομείς ενδιαφέροντος τους, ενισχύοντας την κατανόησή τους και δίνοντάς τους τη δυνατότητα να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [22].

Επιπλέον, το Comsol επιτρέπει την προσαρμογή και τη δημιουργία προσομοιώσεων, επιτρέποντας στους χρήστες να επεκτείνουν τις λειτουργίες του ώστε να ανταποκρίνονται στις συγκεκριμένες ανάγκες τους. Μπορεί κανείς να δημιουργήσει προσαρμοσμένα μοντέλα φυσικής, να ενσωματώσει εξισώσεις που ορίζονται από τον χρήστη ή ακόμη και να αναπτύξει νέες ενότητες προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τον Comsol Application Builder. Αυτή η ευελιξία διασφαλίζει ότι το Comsol παραμένει προσαρμόσιμο στις εξελισσόμενες ερευνητικές απαιτήσεις και ενθαρρύνει την καινοτομία.

Η εκτεταμένη κοινότητα χρηστών του Comsol είναι ένα ακόμη πλεονέκτημα. Οι χρήστες μπορούν να μοιράζονται τα μοντέλα τους, τις τεχνικές προσομοίωσης και την τεχνογνωσία τους μέσω διαδικτυακών φόρουμ, επιτρέποντας τη συνεργασία και την ανταλλαγή γνώσεων. Επιπλέον, η Comsol διοργανώνει διαδικτυακά σεμινάρια και εργαστήρια για την προώθηση της χρήσης του λογισμικού της, παρέχοντας πολύτιμες ευκαιρίες μάθησης τόσο για αρχάριους όσο και για προχωρημένους χρήστες.

Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των προσομοιώσεων του Comsol έχουν επικυρωθεί μέσω πολυάριθμων μελετών συγκριτικής αξιολόγησης. Ερευνητές και μηχανικοί έχουν χρησιμοποιήσει με επιτυχία το Comsol για την αναπαραγωγή και την πρόβλεψη πειραματικών αποτελεσμάτων, συμβάλλοντας στη μείωση του κόστους και των κινδύνων που συνδέονται με την κατασκευή φυσικών πρωτοτύπων. Η δυνατότητα προσομοίωσης και βελτιστοποίησης σχεδίων εικονικά συμβάλλει στην αύξηση της αποδοτικότητας και της καινοτομίας σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και η ενέργεια.

3.2 Χρήση του COMSOL σε μοντέλα προσομοίωσης υγρασίας

3.2.1 Γενική Μεθοδολογία

Το COMSOL Multiphysics μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση φαινομένων υγρασίας (υδροδυναμικής) σε ποικίλους τομείς, όπως η μηχανική, η βιομηχανία, η ιατρική και πολλοί άλλοι. Εδώ είναι τα βασικά βήματα για τη χρήση του COMSOL για προσομοίωση φαινομένων υγρασίας [23]:

- **Δημιουργία Μοντέλου:** Αυτό περιλαμβάνει τον ορισμό της γεωμετρίας του συστήματος, τον καθορισμό των υλικών και των φυσικών παραμέτρων του υγρού που πρόκειται να προσομοιωθούν.
- **Ορισμός Φυσικών Εξισώσεων:** Επιλέγονται οι φυσικές εξισώσεις που περιγράφουν την ηλεκτροστατική.
- **Διακριτοποίηση (Meshing):** Οι συνεχείς εξισώσεις διακριτοποιούνται, δηλαδή σπάνε σε μικρότερα, πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ένα "δίκτυο" (mesh) που καλύπτει τη γεωμετρία του μοντέλου, επιτρέποντας την προσέγγιση της λύσης σε κάθε στοιχείο.
- **Επίλυση:** Αφορά την επιλογή και εφαρμογή των κατάλληλων αριθμητικών μεθόδων για την εξαγωγή της λύσης στο προσομοιωμένο φυσικό πρόβλημα..
- **Ανάλυση και Οπτικοποίηση:** Μετά την επίλυση, αναλύονται και οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα. Το COMSOL παρέχει εργαλεία για τη δημιουργία γραφικών αναπαραστάσεων όπως ισοδύναμες επιφάνειες, πεδία ταχύτητας και πίεσης, και πολλά άλλα.
- **Ανάλυση Αποτελεσμάτων:** Αξιολογούνται τα αποτελέσματα για την κατανόηση της υγρασίας, τις ταχύτητες, την πίεση, και άλλες σημαντικές πληροφορίες.

3.3 Εξισώσεις του μοντέλου στο COMSOL-Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.3.1 Εισαγωγή-Γενικά Στοιχεία

Τα ηλεκτροστατικά πεδία στον ελεύθερο χώρο αναφέρονται σε εκείνα τα ηλεκτρικά πεδία που υπάρχουν σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν φορτία ή ρεύματα. Αυτές οι περιοχές είναι γνωστές ως ελεύθερος χώρος ή απαλλαγμένος χώρος. Τα βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροστατικών πεδίων στον ελεύθερο χώρο είναι τα εξής [30]:

1. Οι εξισώσεις του Maxwell για την ηλεκτροστατική περίπτωση:
 - Η πρώτη εξίσωση του Maxwell (η εξίσωση του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο) δηλώνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο σε μια περιοχή ελεύθερου χώρου είναι απαλλαγμένο από ρεύματα ή ρευστά.
 - Η δεύτερη εξίσωση του Maxwell (η εξίσωση του Gauss για το μαγνητικό πεδίο) δηλώνει ότι το μαγνητικό πεδίο στον ελεύθερο χώρο είναι επίσης απαλλαγμένο από μοναδικά μαγνητικά φορτία.
2. Στον ελεύθερο χώρο, το ηλεκτρικό πεδίο περιγράφεται είτε από την εξίσωση του Poisson είτε από την εξίσωση του Laplace, ανάλογα με την παρουσία ή απουσία ηλεκτρικών φορτίων.
3. Το ηλεκτρικό πεδίο στον ελεύθερο χώρο διαδίδεται σε ευθύγραμμες γραμμές πεδίου από έναν φορτισμένο αντικείμενο προς όλες τις κατευθύνσεις.
4. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στον ελεύθερο χώρο μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από το φορτισμένο αντικείμενο σύμφωνα με τον νόμο του αντιστρόφου τετραγωνικού.

Τα ηλεκτροστατικά πεδία στον ελεύθερο χώρο έχουν σημαντικές εφαρμογές στη φυσική, τη μηχανική και την ηλεκτρολογία, καθώς αφορούν τη συμπεριφορά των φορτισμένων αντικειμένων και τον τρόπο που αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρικά πεδία στον χώρο τους. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

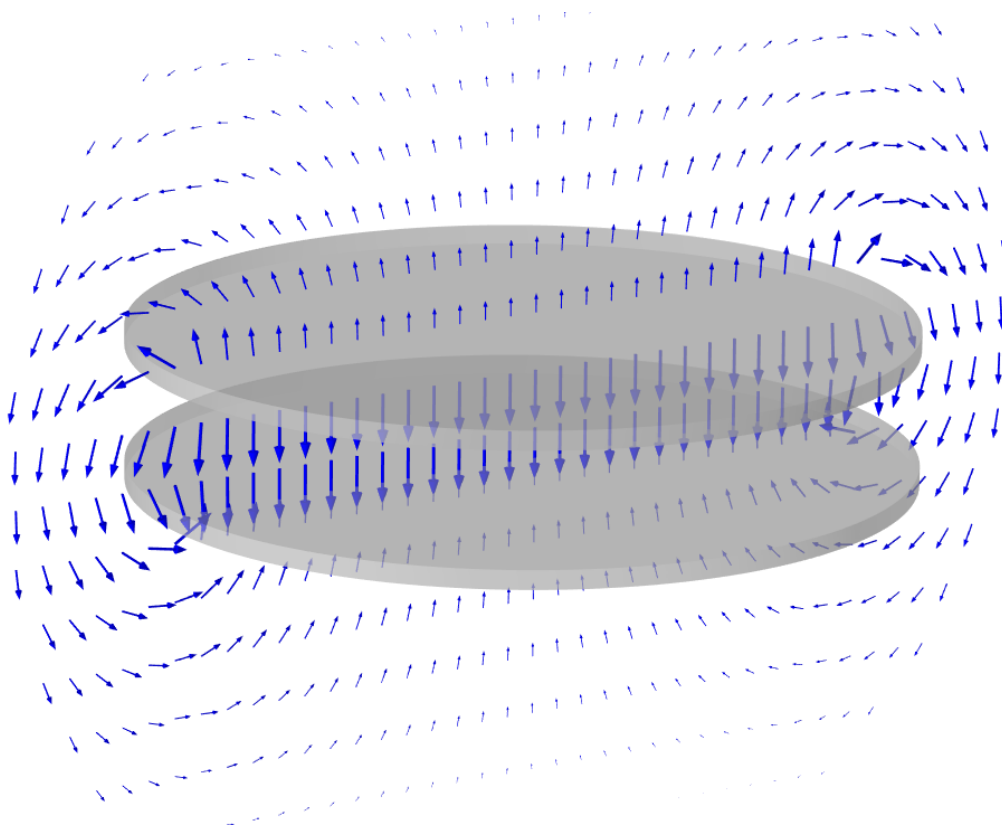
3.3.2 Ηλεκτροστατικά Πεδία στον Ελεύθερο Χώρο

Η ηλεκτροστατική είναι το υποπεδίο του ηλεκτρομαγνητισμού που περιγράφει το ηλεκτρικό πεδίο που προκαλείται από στατικά (μη κινούμενα) φορτία. Ξεκινώντας από τον ελεύθερο χώρο, υποθέτοντας μια χωρική πυκνότητα φορτίου χώρου ρ , η σχέση με το ηλεκτρικό πεδίο E είναι [25]:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.1)$$

όπου ε_0 είναι διηλεκτρική σταθερά ή ηλεκτρική επιτρεπτότητα του κενού. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το ηλεκτρικό πεδίο να είναι συντηρητικό (αστρόβιλο):

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (3.2)$$

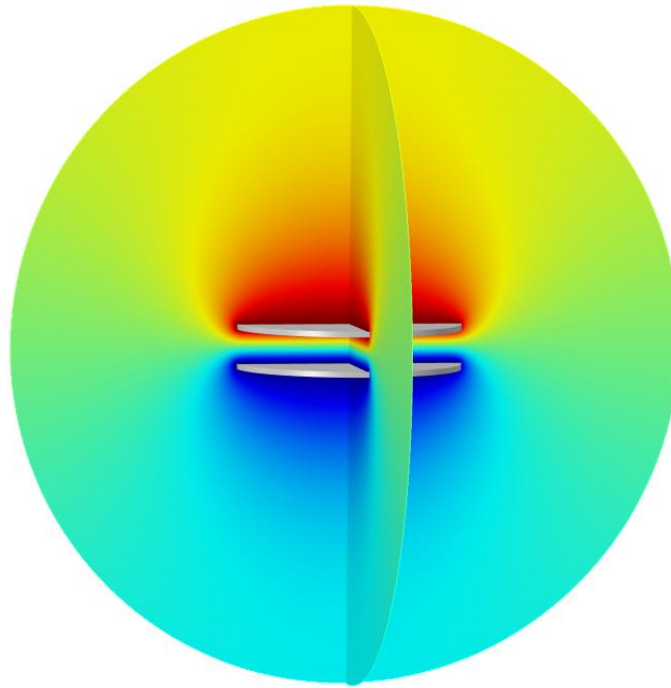


Εικόνα 10: Το στατικό ηλεκτρικό πεδίο που περιβάλλει δύο πλάκες πυκνωτή είναι ένα παράδειγμα αστρόβιλου ηλεκτροστατικού διανυσματικού πεδίου [46].

Για ένα αστρόβιλο πεδίο, υπάρχει ένα κλιμακωτό δυναμικό, το οποίο οδηγεί στον ορισμό του ηλεκτρικού δυναμικού:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (3.3)$$

Η προηγούμενη σχέση είναι χρήσιμη εάν έχουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου $\mathbf{E}$ ως διάνυσμα και θέλουμε να βρούμε το δυναμικό το οποίο είναι βαθμωτό μέγεθος.



Εικόνα 11: Το πεδίο ηλεκτρικού δυναμικού που περιβάλλει δύο πλάκες πυκνωτή [46].

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, η πληροφορία που περιέχεται στις εξισώσεις του Maxwell για την ηλεκτροστατική μπορεί να κωδικοποιηθεί σε μία μόνο εξίσωση, τη διαφορική εξίσωση του Poisson [26]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.4)$$

3.3.3 Ηλεκτροστατική σε Διηλεκτρικά Υλικά

Ένα ιδανικό διηλεκτρικό υλικό χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει ελεύθερα φορτία, αλλά έχει δεσμευμένα φορτία. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, αυτά τα δεσμευμένα φορτία μπορούν να μετατοπιστούν από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο και να οδηγήσουν σε επαγόμενα ηλεκτρικά δίπολα. Αυτά τα επαγόμενα ηλεκτρικά δίπολα είναι ζεύγη θετικών και αρνητικών φορτίων που ευθυγραμμίζονται κατά κάποιο τρόπο με το ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό ενός διηλεκτρικού υλικού που είναι διαφορετικό

από εκείνο του ελεύθερου χώρου. Για να έχουμε μια μακροσκοπική περιγραφή αυτού του φαινομένου, είναι βολικό να εισάγουμε ένα διανυσματικό πεδίο πόλωσης $\mathbf{P}$ και μια πυκνότητα φορτίου πόλωσης ρ_P . Σχετίζονται με [27]:

$$\rho_P = -\nabla \cdot \mathbf{P} \quad (3.5)$$

Τα φαινόμενα πόλωσης τροποποιούν τοπικά το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό ενός υλικού σύμφωνα με:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho + \rho_P}{\epsilon_0} \quad (3.6)$$

ή ισοδύναμα:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho \quad (3.7)$$

Με βάση αυτό, μπορεί να εισαχθεί ένα νέο θεμελιώδες μέγεθος: το ηλεκτρικό πεδίο μετατόπισης $\mathbf{D}$ που ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (3.8)$$

Χρησιμοποιώντας αυτόν τον ορισμό, η εξίσωση της ηλεκτροστατικής, γνωστή και ως νόμος του Gauss, γίνεται:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.9)$$

Για να περιγραφούν πλήρως τα φαινόμενα ηλεκτροστατικής, πρέπει να εξακολουθεί να ισχύει η συνθήκη ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι αστρόβιλο (νόμος του Faraday). Εφόσον η συνθήκη αυτή είναι κωδικοποιημένη στο ηλεκτρικό δυναμικό, οι εξισώσεις της ηλεκτροστατικής μπορούν να συνδυαστούν σε μια ενιαία εξίσωση:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \cdot V - \mathbf{P}) = -\rho \quad (3.10)$$

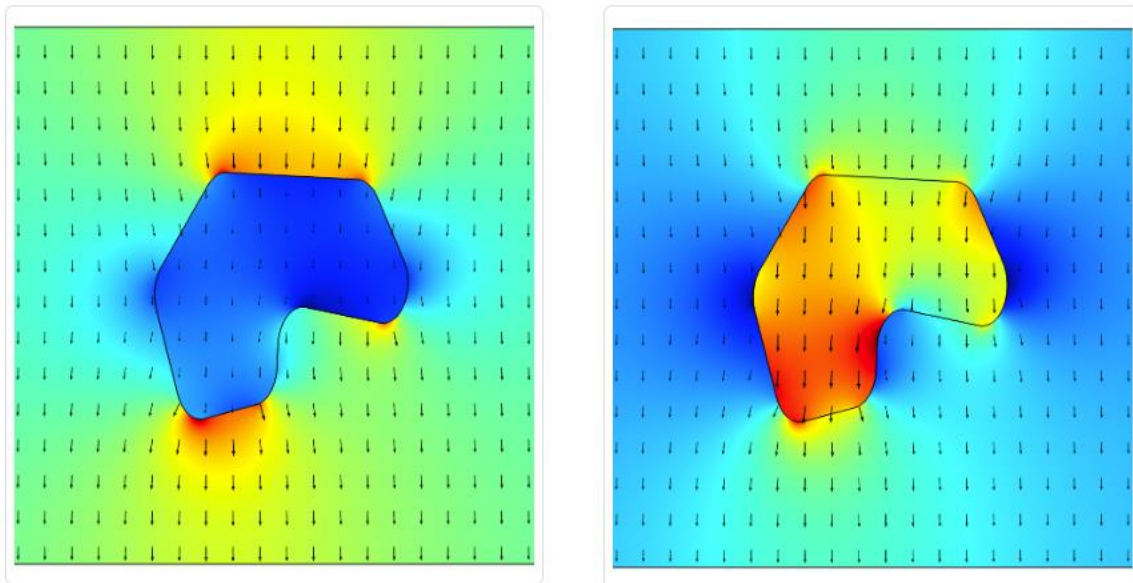
Η πόλωση υλικού αναφέρεται στη δημιουργία ή την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου σε ένα υλικό, προκαλώντας τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων ή των ατόμων του υλικού, προκειμένου να δημιουργηθεί μια περιοχή με περισσότερα θετικά ή αρνητικά ηλεκτρικά φορτία, γνωστή ως πολικότητα.

Ο τρόπος με τον οποίο η πόλωση λαμβάνει χώρα εξαρτάται από τον τύπο του υλικού. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πόλωσης [33]:

1. **Πόλωση Διανυσματικών Υλικών (Dielectric Polarization):** Αυτή η πόλωση συνήθως συμβαίνει σε μη αγώγιμα υλικά, όπως τα διανυσματικά υλικά (ή διηλεκτρικά). Κατά την πόλωση, τα ηλεκτρόνια μετακινούνται μια μικρή απόσταση από τις θέσεις τους, δημιουργώντας αντίθετα φορτία πόλωσης. Αυτό αυξάνει την αλληλεπίδραση με το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Τα υλικά που υπόκεινται σε πόλωση διανυσματικών υλικών χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές, όπως σε καλωδιακά μόνωση, κεραμικά, και πολυμερή υλικά.
2. **Πόλωση Φερροηλεκτρικών Υλικών (Ferroelectric Polarization):** Τα φερροηλεκτρικά υλικά είναι υλικά που διαθέτουν σταθερή πόλωση, αλλά μπορούν επίσης να αντιστρέψουν την πολικότητα τους με την εφαρμογή ενός εξωτερικού πεδίου. Αυτά τα υλικά έχουν πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των κεραμικών πινάκων για πυροηλεκτρικούς ανιχνευτές, μνημονικά υλικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

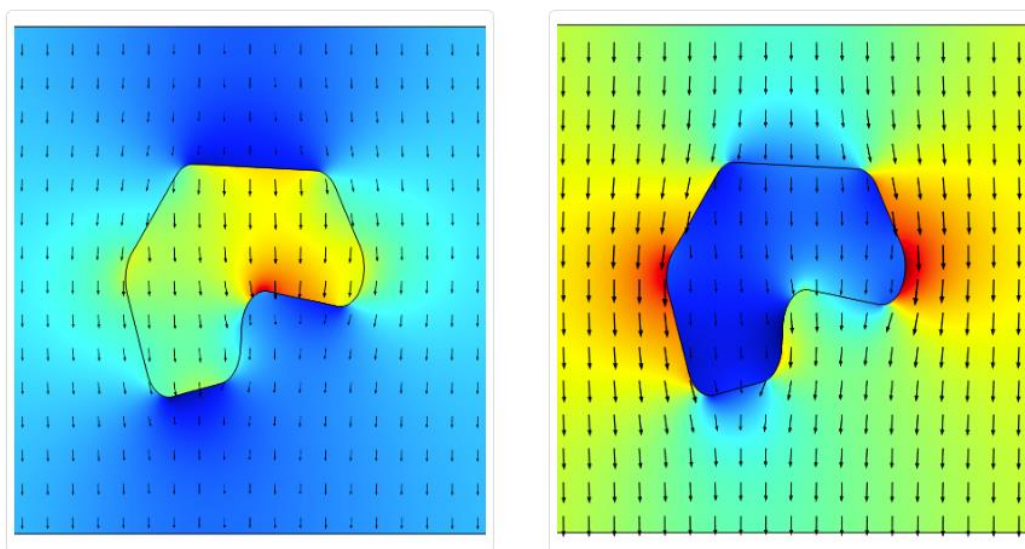
Η πόλωση υλικών είναι σημαντική σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές, καθώς επηρεάζει τις ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές και οπτικές ιδιότητες των υλικών και επιτρέπει την κατασκευή πολλών διαφορετικών ειδών συσκευών και συστημάτων.

Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει ένα διηλεκτρικό αντικείμενο με σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα $\epsilon_r = 2$ που περιβάλλεται από αέρα με $\epsilon_r = 1$ μεταξύ δύο πλακών πυκνωτή. Το πάνω και το κάτω ηλεκτρόδιο έχουν θετικό και αρνητικό ηλεκτρικό δυναμικό, αντίστοιχα. Η εικόνα στα αριστερά δείχνει το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου $|E|$ με χρώμα και την κατεύθυνσή του με βέλη. Η εικόνα στα δεξιά δείχνει το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου μετατόπισης $|D|$ με χρώμα και την κατεύθυνσή του με βέλη. Το κόκκινο και το μπλε αντιπροσωπεύουν υψηλή και χαμηλή τιμή μεγέθους, αντίστοιχα.



Εικόνα 12: Το πεδίο γύρω από ένα αντικείμενο με μεγαλύτερη διαπερατότητα από το περιβάλλον του [46].

Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει μία κοιλότητα με αέρα ($\epsilon_r = 1$) που περιβάλλεται από ένα διηλεκτρικό υλικό με σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα $\epsilon_r = 2$ μεταξύ δύο πλακών πυκνωτή. Το πάνω και το κάτω ηλεκτρόδιο έχουν θετικό και αρνητικό ηλεκτρικό δυναμικό, αντίστοιχα. Η εικόνα στα αριστερά δείχνει το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου $|E|$ με χρώμα και την κατεύθυνσή του με βέλη. Η εικόνα στα δεξιά δείχνει το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου μετατόπισης $|D|$ με χρώμα και την κατεύθυνσή του με βέλη. Το κόκκινο και το μπλε αντιπροσωπεύουν υψηλή και χαμηλή τιμή μεγέθους, αντίστοιχα.



Εικόνα 13: Το πεδίο γύρω από ένα αντικείμενο με χαμηλότερη διαπερατότητα από το περιβάλλον του [46].

Η πόλωση σε έναν χωρητικό αισθητήρα αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο τα ηλεκτρικά φορτία κατανέμονται στα διάφορα μέρη του αισθητήρα. Η πόλωση μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του αισθητήρα και την ευαισθησία του σε διάφορα περιβαλλοντικά παράγοντες. Ένα παράδειγμα πόλωσης σε έναν χωρητικό αισθητήρα μπορεί να είναι η πόλωση ενός αισθητήρα αφής, όπως η οθόνη αφής ενός smartphone [32].

Κατά την αφή της οθόνης, η επιφάνεια του αισθητήρα αλλάζει τον τρόπο με τον οποίο τα ηλεκτρικά φορτία κατανέμονται. Συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην επιφάνεια του αισθητήρα μεταβάλλουν την κατανομή της πόλωσή τους ανάλογα με τη θέση της αφής. Αυτή η αλλαγή στην πόλωση επιτρέπει στον αισθητήρα να ανιχνεύει τη θέση της αφής και να μεταφράζει την κίνηση ή την πίεση σε είσοδο για τη συσκευή.

Η πόλωση σε αισθητήρες χωρητικής τεχνολογίας χρησιμοποιείται επίσης σε πολλές άλλες εφαρμογές, όπως τα πληκτρολόγια αφής, τα ποντίκια και σε πολλά άλλα προϊόντα που απαιτούν ανίχνευση αφής.

3.4 Το πλέγμα (mesh) του Comsol

3.4.1 Η έννοια της διακριτοποίησης

Η διακριτοποίηση αναφέρεται στη διαδικασία κατακερματισμού ενός συνόλου ή μιας συνεχούς ποσότητας σε μικρότερα, διακριτά τμήματα ή στοιχεία. Στην ουσία, αυτή η διαδικασία μετατρέπει ένα συνεχές ή ασυνέχεια σύνολο σε ένα διακριτό σύνολο.

Η διακριτοποίηση είναι σημαντική σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της μηχανικής. Ακολουθούν ορισμένα παραδείγματα [37]:

1. **Υπολογιστές και Προγραμματισμός:** Στην πληροφορική, η διακριτοποίηση είναι ουσιώδης. Οι ψηφιακοί υπολογιστές λειτουργούν με βάση το δυαδικό σύστημα, όπου τα δεδομένα διακριτοποιούνται σε δυο καταστάσεις: 0 και 1. Ο προγραμματισμός επίσης βασίζεται στη διακριτοποίηση των εντολών και των δεδομένων.

2. **Μαθηματικά:** Στα μαθηματικά, η διακριτοποίηση μετατρέπει συνεχείς συναρτήσεις σε διακριτές ακολουθίες ή σειρές. Αυτή η διαδικασία είναι βασική στον αριθμητικό υπολογισμό και την ανάλυση δεδομένων.
3. **Στατιστική:** Στη στατιστική, τα δεδομένα συχνά διακριτοποιούνται για να δημιουργηθεί ένα ιστόγραμμα ή έναν πίνακα συχνοτήτων. Αυτό επιτρέπει την ανάλυση και την ερμηνεία των δεδομένων.
4. **Συστήματα ελέγχου:** Στην αυτοματισμό και τον έλεγχο, η διακριτοποίηση των σημάτων είναι κρίσιμη. Οι αναλογικές τιμές μετατρέπονται σε ψηφιακά δείγματα για επεξεργασία από ψηφιακούς ελεγκτές.
5. **Φυσικές Επιστήμες:** Στη φυσική, η διακριτοποίηση χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς φυσικών φαινομένων, όπως η διακριτοποίηση του χρόνου σε διακριτά βήματα για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης.

Σε κάθε περίπτωση, η διακριτοποίηση επιτρέπει την ανάλυση και την επεξεργασία προβλημάτων που δεν θα μπορούσαν να λυθούν αποτελεσματικά με συνεχείς μεθόδους.

3.4.2 Διακριτοποίηση σε Προβλήματα Υγρασίας

Η διακριτοποίηση σε προβλήματα υγρασίας αναφέρεται στη διαδικασία με την οποία ένα πρόβλημα υγρασίας μετατρέπεται από ένα συνεχές χωροχρονικό πρόβλημα σε ένα πρόβλημα που λύνεται σε διακριτά χρονικά βήματα και διακριτούς χώρους. Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική για την προσομοίωση και την ανάλυση φαινομένων υγρασίας, κυρίως σε περιπτώσεις όπου οι μαθηματικές εξισώσεις της υγρασίας δεν μπορούν να λυθούν αναλυτικά.

Η διακριτοποίηση σε προβλήματα υγρασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [38]:

1. **Διακριτοποίηση του Χρόνου:** Σε πρώτο στάδιο, ο χρόνος διακριτοποιείται σε μικρά χρονικά βήματα. Αυτά τα χρονικά βήματα επιλέγονται με βάση τη φύση του προβλήματος και την ακρίβεια που απαιτείται.
2. **Διακριτοποίηση του Χώρου:** Ο χώρος διακριτοποιείται σε μικρά χωρικά κελιά ή στοιχεία. Αυτά τα κελιά μπορούν να είναι ομογενή (ίδια υγρασία σε κάθε κελί) ή ανομογενή (διαφορετική υγρασία σε κάθε κελί) ανάλογα με την ανάγκη της προσομοίωσης.

3. **Υπολογισμός της Υγρασίας:** Σε κάθε χρονικό βήμα και για κάθε κελί, υπολογίζεται η τιμή της υγρασίας με βάση τις εξισώσεις της υγρασίας. Αυτό συμπεριλαμβάνει την εξέταση της ροής της υγρασίας, την απορρόφηση, την εκπομπή, και άλλες διαδικασίες που μπορεί να επηρεάσουν την υγρασία.
4. **Επανάληψη:** Οι διαδικασίες αυτές επαναλαμβάνονται για κάθε χρονικό βήμα μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια ή να ολοκληρωθεί η προσομοίωση.

Η διακριτοποίηση είναι απαραίτητη για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων υγρασίας, καθώς οι αναλυτικές λύσεις είναι συχνά αδύνατες ή πολύπλοκες. Ανάλογα με την ακρίβεια που απαιτείται και τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ, μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι διακριτοποίησης, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method) ή η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (finite volume method).

3.4.3 To Comsol Mesh

Το Comsol Mesh είναι ένα ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις μηχανικής, προσφέροντας στους χρήστες τη δυνατότητα να ορίζουν πολύπλοκες γεωμετρίες και να βελτιώνουν το πλέγμα τους για να αποτυπώνουν με ακρίβεια τη φυσική που τους ενδιαφέρει. Το παρόν κεφάλαιο έχει ως στόχο να εξηγήσει τη σημασία του Comsol Mesh στον κόσμο της προσομοίωσης, ρίχνοντας φως στη λειτουργικότητα, τα πλεονεκτήματα και τις εφαρμογές του. Το πλέγμα είναι η διακριτοποίηση του χώρου σε μικρά στοιχεία, ώστε να είμαστε σε θέση να επιλύσουμε το πρόβλημά αριθμητικά [36].

Στον πυρήνα κάθε αριθμητικής προσομοίωσης βρίσκεται το πλέγμα ή το υπολογιστικό πλέγμα που αντιπροσωπεύει το φυσικό πεδίο που προσομοιώνεται. Το Comsol Mesh παρέχει τα μέσα για τη δημιουργία πλεγμάτων υψηλής ποιότητας ειδικά προσαρμοσμένων για διάφορες εφαρμογές μηχανικής. Χρησιμοποιεί αποδοτικούς αλγορίθμους πλέγματος που προσαρμόζονται σε περίπλοκες γεωμετρίες, επιτρέποντας στους μηχανικούς να προσομοιώνουν με ακρίβεια πολύπλοκα συστήματα.

Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου πλέγματος. Το Comsol Mesh, με την ικανότητά του να δημιουργεί προσαρμοστικά πλέγματα, διασφαλίζει ότι η προσομοίωση αποτυπώνει με

ακρίβεια τη φυσική κατάσταση που επικρατεί. Βελτιώνοντας το πλέγμα σε περιοχές ενδιαφέροντος και χονδροποιώντας το σε περιοχές μικρότερης σημασίας, το Comsol Mesh επιτυγχάνει μια ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής απόδοσης και ακρίβειας, παρέχοντας στους μηχανικούς πλήρη έλεγχο των προσομοιώσεών τους.

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα του Comsol Mesh είναι η ικανότητά του να διακρίτοποιεί με ακρίβεια πολύπλοκους φυσικούς τομείς. Είτε πρόκειται για αιχμηρές ακμές, λεπτά στρώματα ή ακανόνιστα σχήματα, το Comsol Mesh υπερέχει στην αναπαράσταση αυτών των περιπλοκών. Αυτή η ιδιότητα, σε συνδυασμό με τη φιλική προς το χρήστη διεπαφή του Comsol, επιτρέπει στους φοιτητές να κατανοήσουν τη θεμελιώδη σημασία της βελτίωσης και της προσαρμοστικότητας του πλέγματος στο χειρισμό των πραγματικών πολυπλοκότητας της μηχανικής.

Το Comsol Mesh μειώνει τον υπολογιστικό φόρτο που συνδέεται με τις προσομοιώσεις, προσαρμόζοντας την ανάλυση του πλέγματος στη χωρικά μεταβαλλόμενη φυσική. Με τη χρήση λεπτότερων πλεγμάτων μόνο όπου χρειάζεται, οι υπολογιστικοί πόροι εστιάζονται, αποτρέποντας τη σπατάλη. Μια τέτοια βελτιστοποίηση των πόρων είναι ζωτικής σημασίας για τους φοιτητές που εργάζονται σε έργα υψηλής υπολογιστικής έντασης, όπου τόσο η ακρίβεια όσο και η αποδοτικότητα είναι ζωτικής σημασίας.

Οι εφαρμογές του Comsol Mesh καλύπτουν διάφορους τομείς της μηχανικής, όπως η δυναμική ρευστών, η ηλεκτρομαγνητική, η μεταφορά θερμότητας και η δομική ανάλυση. Βρίσκει χρήση στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων όπως ηλεκτρικοί κινητήρες, ακόμη και καινοτόμες βιοϊατρικές συσκευές. Η κατανόηση του Comsol Mesh επιτρέπει στους φοιτητές να αξιοποιήσουν τη δύναμή του και να εξερευνήσουν τις ποικίλες εφαρμογές του.

Το Comsol Mesh προσφέρει ευελιξία κατά τον ορισμό των οριακών συνθηκών, επιτρέποντας στους χρήστες να καθορίζουν ταυτόχρονα διάφορες φυσικές διεπαφές. Η ικανότητά του να χειρίζεται πολυφυσικές προσομοιώσεις ενισχύει την κατανόηση των φοιτητών, αναδεικνύοντας τη διασύνδεση διαφορετικών φαινομένων μηχανικής. Αυτό το χαρακτηριστικό συμβάλλει στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των θεωρητικών γνώσεων που διδάσκονται στις αίθουσες διδασκαλίας και των πρακτικών προκλήσεων της μηχανικής που αντιμετωπίζονται στο πεδίο.

Με το Comsol Mesh, η προσαρμοστική βελτίωση πλέγματος είναι ένα πρωτοποριακό χαρακτηριστικό που επιτρέπει στους μελετητές να αποτυπώνουν με ακρίβεια κρίσιμες συμπεριφορές. Με τη βελτίωση του πλέγματος μόνο σε περιοχές ενδιαφέροντος, όπως κοντά σε απότομες κλίσεις ή σε περιοχές που προορίζονται για περαιτέρω ανάλυση, μπορεί κανείς να λάβει εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα χωρίς να διακυβεύεται η υπολογιστική αποδοτικότητα. Αυτή η δυνατότητα δείχνει πώς το Comsol Mesh εμπνέει συνεχώς τους μηχανικούς να διευρύνουν τα όρια της ακρίβειας της προσομοίωσης.

Μια ουσιαστική πτυχή του Comsol Mesh είναι η ανατροφοδότηση που παρέχει κατά τη διαδικασία δημιουργίας πλέγματος. Οι φοιτητές μπορούν να παρατηρήσουν πώς εξελίσσεται το πλέγμα, πού συγκεντρώνονται τα λεπτότερα πλέγματα και πώς η προσομοίωση αξιολογεί τη φυσική σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η άμεση ανατροφοδότηση προάγει τη βαθύτερη κατανόηση της ποιότητας του πλέγματος και βοηθά στην αντιμετώπιση προβλημάτων όταν προκύπτουν απροσδόκητα αποτελέσματα.

Συμπερασματικά, το Comsol Mesh αποτελεί ένα δυναμικό και ισχυρό εργαλείο στο πεδίο των αριθμητικών προσομοιώσεων. Οι περίπλοκες δυνατότητες δημιουργίας πλέγματος, οι αποτελεσματικοί αλγόριθμοι προσαρμοστικότητας και ο ευέλικτος χειρισμός των οριακών συνθηκών το καθιστούν απαραίτητο εργαλείο για τους φοιτητές που σπουδάζουν κλάδους μηχανικής. Το ξεκλείδωμα των δυνατοτήτων του Comsol Mesh ενισχύει την κατανόηση, επιτρέποντας στους ερευνητές να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ θεωρητικών εννοιών και πρακτικής εφαρμογής της μηχανικής, ενισχύοντας τελικά τις δεξιότητές τους για τις προκλήσεις που θα αντιμετωπίσουν στο μέλλον [37].

3.4.4 Δημιουργία Πλέγματος στο Comsol

Η δημιουργία ενός πλέγματος (mesh) στο COMSOL Multiphysics είναι απαραίτητη για την προσομοίωση και την επίλυση προβλημάτων. Το πλέγμα διακριτοποιεί τον χώρο σε μικρά στοιχεία, επιτρέποντας την ακριβή προσομοίωση των φυσικών φαινομένων. Ακολουθούν τα βήματα για τη δημιουργία ενός πλέγματος στο COMSOL [40]:

1. **Ανοίγουμε το μοντέλο:** Ανοίγουμε-Δημιουργούμε το μοντέλο στο περιβάλλον του Comsol και ορίζουμε τη γεωμετρία μας.

2. **Επιλέγουμε την καρτέλα "Πλέγμα" (Mesh):** Από το μενού στο επάνω μέρος του παραθύρου COMSOL, επιλέγουμε την καρτέλα "Πλέγμα" (Mesh).
3. **Ορίζουμε τις Ρυθμίσεις Πλέγματος:** Στο παράθυρο των ρυθμίσεων πλέγματος, μπορούμε να καθορίσουμε τις διάφορες ρυθμίσεις που επηρεάζουν το πλέγμα. Ορίζουμε τον τύπο του πλέγματος, την ακρίβεια, το μέγεθος του πλέγματος, τις περιοχές με ειδικές ρυθμίσεις κ.λπ.
4. **Δημιουργία του Πλέγματος:** Με τη "Δημιουργία" ή "Ανανέωση" (Generate or Refine) δημιουργούμε το πλέγμα σύμφωνα με τις επιλεγμένες ρυθμίσεις. Το COMSOL θα εκτελέσει τη διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος.
5. **Επαλήθευση Πλέγματος:** Μετά τη δημιουργία του πλέγματος, είναι σημαντικό να ελέγξουμε αν το πλέγμα είναι εντάξει και αν αντιπροσωπεύει καλά τη γεωμετρία του προβλήματός σας. Μπορούμε να δούμε το πλέγμα στο γραφικό παράθυρο του COMSOL.
6. **Επίλυση του Προβλήματος:** Μόλις έχουμε το επιθυμητό πλέγμα, μπορούμε να επιστρέψουμε στο παράθυρο "Φυσική" και να επιλύσουμε το πρόβλημά μας.

Η δημιουργία ενός καλού πλέγματος είναι σημαντική για την ακρίβεια των αριθμητικών προσομοιώσεων. Πολύ πυκνά πλέγματα μπορεί να αυξήσουν την ακρίβεια αλλά να αυξήσουν και τον υπολογιστικό χρόνο, ενώ πολύ αραιά πλέγματα μπορεί να οδηγήσουν σε μη ακριβείς υπολογισμούς. Η επιλογή των κατάλληλων ρυθμίσεων πλέγματος εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος που προσπαθούμε να μοντελοποιήσουμε.

3.5 Σχέση διηλεκτρικών με την υγρασία

Τα διηλεκτρικά και η υγρασία παίζουν σημαντικό ρόλο σε διάφορες ηλεκτρικές εφαρμογές, από μονωτικά υλικά έως ηλεκτρονικές συσκευές. Η σχέση μεταξύ αυτών των δύο παραγόντων είναι ενδιαφέρουσα, καθώς οι αλλαγές στην υγρασία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες των διηλεκτρικών υλικών. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να εμβαθύνει στη φύση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς σε διαφορετικές συνθήκες υγρασίας και να διερευνήσει τους υποκείμενους μηχανισμούς που καθορίζουν την αλληλεπίδρασή τους.

Τα διηλεκτρικά είναι μη αγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για το διαχωρισμό αγώγιμων στοιχείων σε ηλεκτρικά συστήματα. Διαθέτουν μοναδικές ιδιότητες, όπως

υψηλή ειδική αντίσταση, χαμηλή αγωγιμότητα και την ικανότητα πόλωσης υπό ηλεκτρικά πεδία χωρίς να προκαλούν μόνιμα φορτία. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τα διηλεκτρικά ιδανικά για μονωτικές εφαρμογές [41].

Η υγρασία αναφέρεται στην ποσότητα των υδρατμών που υπάρχουν στον αέρα. Παίζει κρίσιμο ρόλο στην ηλεκτρική συμπεριφορά των διηλεκτρικών υλικών. Η υγρασία στο περιβάλλον επηρεάζει τις διηλεκτρικές ιδιότητες εισάγοντας πρόσθετα φορτία, μεταβάλλοντας τη συμπεριφορά πόλωσης του υλικού και τροποποιώντας τη χωρητικότητά του. Η διηλεκτρική σταθερά, που συμβολίζεται ως ϵ , αντιπροσωπεύει την ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια. Τα διαφορετικά επίπεδα υγρασίας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά αυτή την ιδιότητα. Η αυξημένη υγρασία οδηγεί γενικά σε υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά λόγω της παρουσίας μορίων νερού που αυξάνουν τη συνολική πόλωση του υλικού. Η διηλεκτρική αντοχή αναφέρεται στο μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο που μπορεί να αντέξει ένα υλικό πριν καταρρεύσει και επιτρέψει τη ροή ρεύματος. Η υγρασία επηρεάζει τη διηλεκτρική αντοχή, με υψηλότερα επίπεδα υγρασίας να μειώνουν ενδεχομένως την τιμή. Αυτό συμβαίνει επειδή τα μόρια νερού δημιουργούν αγωγίμες διαδρομές, οδηγώντας σε ηλεκτρική διαρροή και μειωμένη απόδοση μόνωσης [42].

Η υγρασία επηρεάζει τη συμπεριφορά πόλωσης των διηλεκτρικών υλικών. Τα μόρια του νερού διαθέτουν διπολικά χαρακτηριστικά, ευθυγραμμιζόμενα σε απόκριση σε ηλεκτρικά πεδία. Σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, αυτά τα δίπολα ευθυγραμμίζονται ευκολότερα, ενισχύοντας τη συνολική πόλωση του διηλεκτρικού υλικού. Επιπλέον, τα φαινόμενα διηλεκτρικής απορρόφησης μπορούν επίσης να επηρεαστούν από την υγρασία. Η εφαπτομένη των διηλεκτρικών απωλειών αντιπροσωπεύει την απώλεια ισχύος σε ένα διηλεκτρικό υλικό όταν υποβάλλεται σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η υγρασία μπορεί να επηρεάσει την εφαπτομένη απωλειών λόγω της ικανότητας των μορίων νερού να απορροφούν ενέργεια από το ηλεκτρικό πεδίο, με αποτέλεσμα αυξημένες απώλειες ενέργειας και μειωμένη απόδοση. Η χωρητικότητα αναφέρεται στην ικανότητα ενός διηλεκτρικού υλικού να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια. Οι μεταβολές της διηλεκτρικής σταθεράς που προκαλούνται από την υγρασία επηρεάζουν τη χωρητικότητα του υλικού. Τα υψηλότερα επίπεδα υγρασίας οδηγούν γενικά σε αυξημένη χωρητικότητα λόγω αυξημένης πόλωσης του διηλεκτρικού υλικού [43].

Τα διηλεκτρικά υλικά είναι επιρρεπή στην απορρόφηση υγρασίας, ιδίως σε περιβάλλοντα υψηλής υγρασίας. Η απορρόφηση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε επιφανειακά ρεύματα διαρροής, υποβαθμίζοντας τις ιδιότητες μόνωσης και θέτοντας σε κίνδυνο την απόδοση των ηλεκτρικών συστημάτων. Η υγρασία μπορεί να επηρεάσει την τάση διηλεκτρικής διάσπασης, η οποία αντιπροσωπεύει το ελάχιστο ηλεκτρικό πεδίο που απαιτείται για να προκαλέσει την αστοχία ενός διηλεκτρικού υλικού. Τα αυξημένα επίπεδα υγρασίας μπορούν να οδηγήσουν σε χαμηλότερες τάσεις διάσπασης, μειώνοντας τα περιθώρια ασφαλείας στα ηλεκτρικά συστήματα [44].

Συνοπτικά, η σχέση μεταξύ διηλεκτρικών και υγρασίας είναι πολύπλοκη και πολύπλευρη. Οι αλλαγές στην υγρασία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες των διηλεκτρικών υλικών, συμπεριλαμβανομένης της διηλεκτρικής σταθεράς, της διηλεκτρικής αντοχής, της συμπεριφοράς πόλωσης, της χωρητικότητας, της εφαπτομένης διηλεκτρικών απωλειών και της επιφανειακής διαρροής. Η κατανόηση αυτής της αλληλεπίδρασης είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό αξιόπιστων ηλεκτρικών συστημάτων και τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας τους, ιδίως σε περιβάλλοντα με ποικίλα επίπεδα υγρασίας. Η μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτό θα συνεχίσει να ρίχνει φως στην περίπλοκη φύση της σχέσης διηλεκτρικού και υγρασίας [45].

3.6 Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

3.6.1 Εισαγωγή

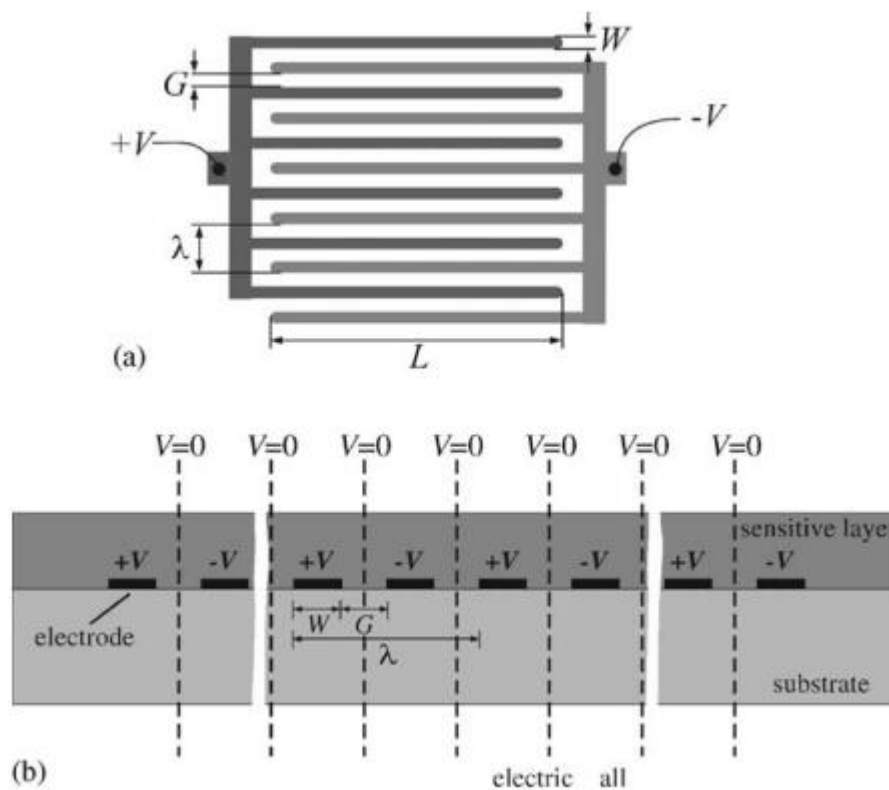
Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων είναι ένα είδος πυκνωτή που αποτελείται από δύο ή περισσότερα ηλεκτρόδια που τοποθετούνται κοντά η μεταξύ τους με μια μόνωση ανάμεσα. Αυτό δημιουργεί μια περιοχή μεταξύ των ηλεκτροδίων όπου μπορεί να αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια.

Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων χρησιμοποιείται συνήθως στην ηλεκτρονική, στα κυκλώματα ελέγχου και σε άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται αποθήκευση ενέργειας ή φιλτράρισμα σήματος.

3.6.2 Τα ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια

Τα ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια (Interdigitated electrodes, IDE) αποτελούνται συνήθως από μια σειρά παράλληλων, στενά διατεταγμένων μεταξύ τους μεταλλικών ράβδων, που είναι διατεταγμένα σε εναλλασσόμενο μοτίβο. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως από αγωγίμο μέταλλο, όπως αλουμίνιο ή χαλκό, σε ορθογώνιο ή τετράγωνο μοτίβο, είναι λεπτά και επιμήκη σε σχήμα και απέχουν μεταξύ τους μικρή απόσταση, ώστε να δημιουργείται κενό ή διηλεκτρικό στρώμα μεταξύ τους. Το μέγεθος και η απόσταση των ηλεκτροδίων μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή [46]. Τα IDE είναι ένας από τους πιο δημοφιλής σχεδιασμούς, που χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες τεχνολογικές και αναλυτικές εφαρμογές, ιδίως στον τομέα των βιολογικών και χημικών αισθητήρων, λόγω του χαμηλού κόστους, της ευκολίας κατασκευής και της εξαιρετικής ευαισθησίας τους. Ενδεικτικές εφαρμογές είναι οι διατάξεις επιφανειακών ακουστικών κυμάτων, η χημική και βιολογική ανίχνευση και ο διηλεκτρικός χαρακτηρισμός υλικών.

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η κάτοψη και η εγκάρσια τομή μιας τυπικής διάταξης IDE, αποτελούμενης από δυο σύνολα ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. Κάθε ξεχωριστό ηλεκτρόδιο περιλαμβάνει έναν αριθμό μεταλλικών διαδρόμων N , μήκους L , που ονομάζονται «δάχτυλα» (fingers) και είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω μίας κάθετης σε αυτά αγωγίμης προέκτασης, που ονομάζεται τοίχωμα. Ως W ορίζεται το πλάτος των επιμήκη μεταλλικών διαδρόμων, ενώ το διάκενο μεταξύ δυο «δαχτύλων», ορίζεται ως G και τυπικά είναι ίσο με το κενό στα άκρα των δαχτύλων. Τα μεγέθη L , W και G δεν είναι προκαθορισμένα αλλά σχεδιάζονται βάση των απαιτήσεων χρήσης των IDE.



Εικόνα 14: Κάτοψη και τομή διάταξης ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων (IDE) [48]

Οι διατάξεις IDE, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές εφαρμογές, εναποτίθενται μέσω ειδικών διαδικασιών εναπόθεσης ηλεκτροδίων, σε υπόστρωμα, τα χαρακτηριστικά του οποίου επηρεάζουν επίσης την απόδοσή τους. Ιδιαίτερη σημασία έχουν το ύψος του υποστρώματος (h) και η διηλεκτρική του σταθερά (ϵ_r).

3.6.3 Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία της ηλεκτρονικής, ως πυκνωτής ορίζεται ένα σύστημα δύο αγωγών, που ονομάζονται οπλισμοί, φορτισμένοι με φορτία $+Q$ και $-Q$ και χωρίζονται μεταξύ τους από κάποιο μονωτικό υλικό. Κατά αντιστοιχία με την διάταξη των IDE, καθώς υπάρχει προκαθορισμένο δυναμικό $+V$ και $-V$, η πλέξη ανάμεσα στα «δάχτυλα» των δύο αντίθετα φορτισμένων συνόλων, δημιουργεί μια εναλλαγή θετικού και αρνητικού δυναμικού, μεταξύ των διαδοχικών μεταλλικών διαδρομών. Συνεπώς, κάθε ζευγάρι ηλεκτροδίων από την θετικά και την αρνητικά φορτισμένη πλευρά της διάταξης, αποτελεί έναν πυκνωτή, εμφανίζοντας διαφορά δυναμικού V , μεταξύ των οπλισμών. Ανάγοντας την βασική θεωρία των πυκνωτών παράλληλων πλακών στις διατάξεις IDE, οι μαθηματικοί τύποι που περιγράφουν έναν πυκνωτή, ανάγονται σε

πιο σύνθετες μορφές καθώς παράμετροι όπως το πλήθος των δαχτύλων, το πάχος τους (W), η απόσταση (G) και η διηλεκτρικά σταθερά του υλικού πάνω στο οποίο εναποτίθενται, επηρεάζουν καθοριστικά την μελέτη τους.

Η συνολική χωρητικότητα του συγκεκριμένου πυκνωτή εξαρτάται από τις παραπάνω παραμέτρους και από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος στο οποίο είναι τοποθετημένα τα κτενία. Το πάχος του κτενίου (W), ο αριθμός των κτενίων, 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 κτενίων και την χωρητικότητα που δημιουργείται μεταξύ της άκρης του κτενίου με το τοίχωμα του ηλεκτροδίου.

Άρα, η χωρητικότητα εκφράζεται από την παρακάτω σχέση [48]:

$$C_{\text{total}} = C + C_f \quad (3.11)$$

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

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (3.12)$$

Όπου,

ϵ_0 η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού και έχει τιμή $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ στο S.I.

ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού που συνδέει τα ηλεκτρόδια.

A το εμβαδόν της επιφάνειας της πλάκας του ηλεκτροδίου

d η απόσταση μεταξύ των παραλλήλων πλακών

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και πριν, η χωρητικότητα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, άρα η παραπάνω σχέση της χωρητικότητας γίνεται:

$$C = \eta \epsilon \frac{LW}{G} \quad (3.13)$$

Όπου,

n ο αριθμός των ηλεκτροδίων

ϵ η διηλεκτρική σταθερά του υλικού

L το μήκος των ηλεκτροδίων

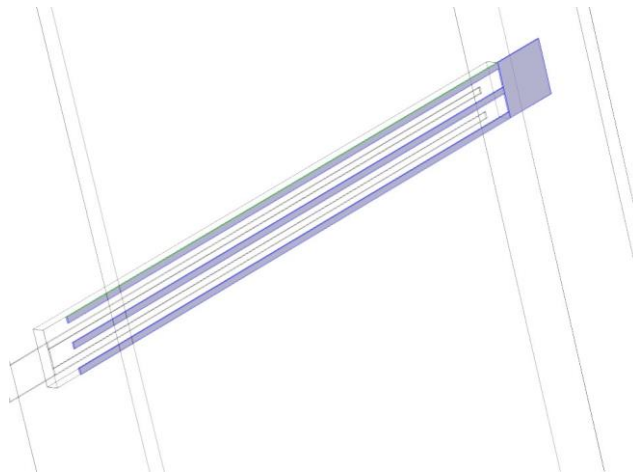
W το πάχος των ηλεκτροδίων

G η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων

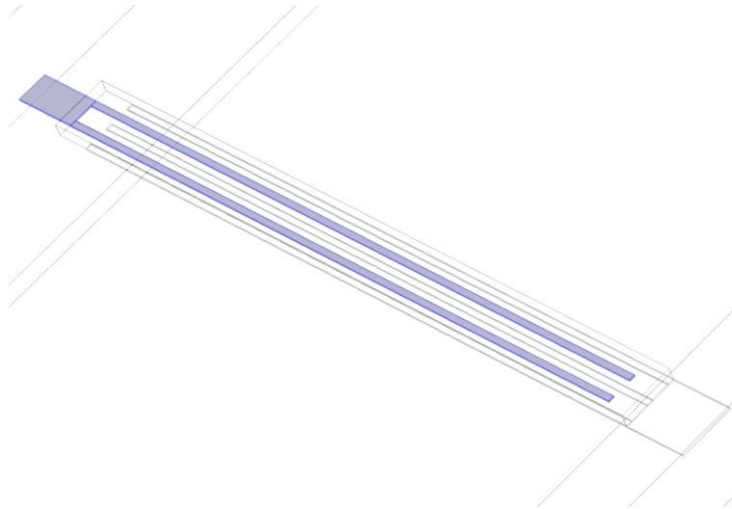
Σημειώνεται, πως για κάθε διαφορετικό είδος πυκνωτή, υπάρχει και διαφορετικός τύπος για την χωρητικότητα.

3.6.4 Η δομή του πυκνωτή που αναπτύχθηκε στο COMSOL

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται το μοντέλο του πυκνωτή που αναπτύχθηκε στο COMSOL έτσι ώστε να γίνουν οι επιθυμητές μετρήσεις. Στο πρώτο σχήμα φαίνεται η άνοδος και στο δεύτερο σχήμα το ηλεκτρόδιο της γείωσης.



Εικόνα 15: Το ηλεκτρόδιο της ανόδου από το περιβάλλον του COMSOL



Εικόνα 16: Το ηλεκτρόδιο της καθόδου (γείωση) από το περιβάλλον του COMSOL

Η πρώτη εικόνα (Εικόνα 15) αναπαριστά την άνοδο του αισθητήρα, που είναι το ηλεκτρόδιο στο οποίο εφαρμόζεται το θετικό δυναμικό. Διακρίνεται ως μια δομή με πολλαπλές γραμμές, οι οποίες είναι παράλληλες και βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη. Η γεωμετρία αυτή διασφαλίζει τη συγκέντρωση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από την άνοδο, αυξάνοντας την ευαισθησία του αισθητήρα στην παρουσία υγρασίας. Ο ρόλος της είναι:

- **Διασπορά Ηλεκτρικού Πεδίου:** Η άνοδος έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να δημιουργεί ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο γύρω από τα ηλεκτρόδια. Οι γραμμές του πεδίου θα διασπείρονται από την άνοδο προς την κάθοδο και θα αλληλοεπιδρούν με τους υδρατμούς που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια.
- **Ανίχνευση Υγρασίας:** Λόγω της τοποθέτησης της ανόδου, η ανίχνευση υγρασίας θα γίνεται κυρίως στις περιοχές γύρω από τις γραμμές αυτές, όπου το πεδίο είναι ισχυρότερο.

Η δεύτερη εικόνα (Εικόνα 16) δείχνει την κάθοδο του αισθητήρα, το ηλεκτρόδιο στο οποίο εφαρμόζεται το αρνητικό δυναμικό. Η κάθοδος έχει παρόμοια γεωμετρική δομή με την άνοδο, με τις γραμμές του ηλεκτροδίου να βρίσκονται σε παράλληλη διάταξη. Ο ρόλος της είναι:

- **Ισορροπία Ηλεκτρικού Πεδίου:** Η γεωμετρία της καθόδου είναι κρίσιμη για τη δημιουργία συμμετρικού πεδίου με την άνοδο. Αυτό διασφαλίζει ότι το ηλεκτρικό πεδίο θα είναι ομοιόμορφο και σταθερό στις περιοχές μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, επιτρέποντας ακριβείς μετρήσεις.
- **Ακρίβεια Μετρήσεων:** Οι περιοχές κοντά στην κάθοδο έχουν υψηλή συγκέντρωση γραμμών πεδίου, γεγονός που καθιστά την περιοχή αυτή ιδιαίτερα ευαίσθητη στις αλλαγές που προκαλούνται από την υγρασία.
- **Ευαισθησία στην Ανίχνευση Υγρασίας:** Όπως και με την άνοδο, η κάθοδος συνεισφέρει στη δημιουργία ενός ευρέος ηλεκτρικού πεδίου, που διασφαλίζει ότι η ευαισθησία του αισθητήρα είναι υψηλή σε όλη την περιοχή ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια.

Έτσι συμπερασματικά καταλήγουμε στο ότι:

- Η διάταξη της ανόδου και της καθόδου είναι συμμετρική και προσεκτικά τοποθετημένη για να εξασφαλίσει ομοιόμορφο και σταθερό ηλεκτρικό πεδίο.
- Το πεδίο που δημιουργείται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια είναι το κύριο σημείο όπου θα ανιχνεύεται η μεταβολή στην υγρασία, καθώς οι υδρατμοί θα αλληλοεπιδρούν με το δυναμικό σε αυτή την περιοχή.
- Η γεωμετρία της διάταξης υποδηλώνει ότι ο αισθητήρας έχει σχεδιαστεί για να επιτυγχάνει υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία στην ανίχνευση υγρασίας, με το ηλεκτρικό πεδίο να είναι έντονο κοντά στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων και να μειώνεται σταδιακά προς τα έξω.

3.7 Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο COMSOL

Το παράθυρο Model Builder (Εικόνα 17) αποτελείται από ένα «δέντρο» με κλάδους που περιέχουν όλα τα απαραίτητα εργαλεία και τις λειτουργίες για τη σχεδίαση και επίλυση των μοντέλων. Οι τέσσερις βασικοί κλάδοι του Model Builder είναι οι εξής [47]:

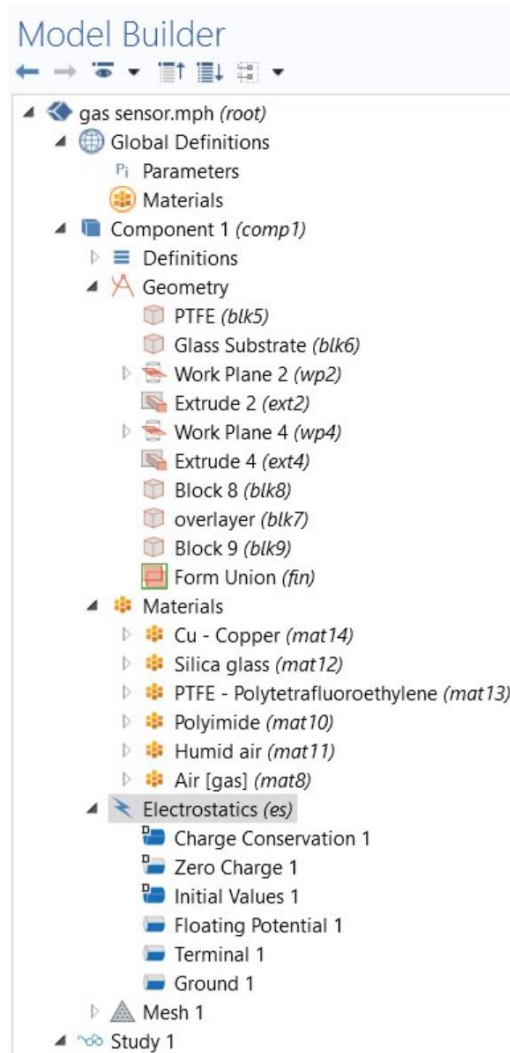
- Global Definitions (ορισμός καθολικών παραμέτρων, μεταβλητών κλπ.)
- Component (ορισμός γεωμετρίας, υλικών, πακέτων φυσικής και πλέγματος)
- Study (επιλογή τρόπου επίλυσης)
- Results (Επεξεργασία και εμφάνιση αποτελεσμάτων)

Κάθε βασικός κλάδος (branch) έχει υποκλάδους (subbranches), μέσω των οποίων γίνεται πιο στοχευμένος έλεγχος του μοντέλου. Επίσης, κάθε υποκλάδος μπορεί να έχει επιπλέον κόμβους και έτσι δημιουργείται μια δενδροειδής δομή που διευκολύνει τη σχεδίαση [47].

Παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία που χρειάστηκαν στο συγκεκριμένο Model Builder του COMSOL. Όπως μπορούμε να δούμε το Component1 έχει 4 υποκατηγορίες στοιχείων:

- Γεωμετρία (Geometry): είναι ουσιαστικά η εικόνα του προηγούμενου υποκεφαλαίου όπου φαίνονται σε μορφή μηχανολογικού τρισδιάστατου σχεδίου οι όψεις του μοντέλου.

- Υλικά (Materials): χρειάζεται ένα αγώγιμο υλικό (χαλκός στην προσομοίωσή μας) για τα ηλεκτρόδια, ένας ημιαγωγός (γυαλί πυριτίου) και στη συνέχεια τα υλικά πλήρωσης (διηλεκτρικά) του πυκνωτή. Αυτά είναι:
 1. Το πολυτετραφθοροαιθυλενίο (συντομογραφικά PTFE) (polytetrafluoroethylene) είναι ένα οργανικό πολυμερές που χρησιμοποιείται κυρίως ως επικάλυψη αντικειμένων και συστατικό πλαστικών αντικειμένων, ενώ έχει και πολλές άλλες εφαρμογές. Το πιο γνωστό εμπορικό όνομα φόρμουλας με βάση το PTFE-based είναι το Τεφλόν (Teflon). Το τεφλόν είναι χημικά αδρανές, αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες είναι ολισθηρό και άκαυστο. Εκλύει τοξικές ουσίες κυρίως όταν θερμαίνεται, ενώ το ίδιο το υλικό δεν είναι τοξικό. Επιπλέον, το πολυτετραφθοροαιθυλενίο έχει πολύ καλές διηλεκτρικές ιδιότητες και προτιμάται στην κατασκευή ηλεκτρικών κυκλωμάτων γιατί ταυτόχρονα έχει υψηλή θερμοκρασιακή αντοχή.
 2. Ένα συνθετικό πολυμερές (polyimide): : Το πολυϊμίδιο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία προστατευτικών στρωμάτων.
 3. Αέρας ο οποίος έχει αυξημένο ποσοστό υγρασίας (Humid Air) : Το βασικό υλικό που επιτρέπει την ανίχνευση της υγρασίας.
 4. Αέρας χωρίς υγρασία
- Ηλεκτροστατικά στοιχεία που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο μας: μία πηγή δυναμικού (floating potential) που αποτελεί την τροφοδοσία ενός ακροδέκτη του πυκνωτή, ένα τερματικό στοιχείο (terminal) και μία γείωση για τον άλλο ακροδέκτη του πυκνωτή (ground).
- Το πλέγμα υπολογισμού (mesh) όπου εφαρμόζεται η αριθμητική-επαναληπτική μέθοδος υπολογισμού



Εικόνα 17: Το Model Builder του COMSOL

3.7.1 Ρόλος του Πολυϊμιδίου (Polyimide)

Το πολυϊμίδιο είναι ένα υλικό που προσφέρει πολλαπλά επίπεδα προστασίας στον αισθητήρα μέτρησης υγρασίας, κάνοντας το ιδανικό για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του σε διάφορα περιβάλλοντα. Ας αναλύσουμε τους βασικούς τρόπους με τους οποίους το πολυϊμίδιο προστατεύει τον αισθητήρα:

1. Θερμική Αντοχή

Το πολυϊμίδιο αντέχει σε ακραίες θερμοκρασίες, τόσο υψηλές όσο και χαμηλές, χωρίς να υποστεί ζημιά ή να αλλοιώσει τις ιδιότητές του. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό για τους αισθητήρες, οι οποίοι συχνά λειτουργούν σε περιβάλλοντα με μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές. Το πολυϊμίδιο μπορεί να αντέξει θερμοκρασίες από -200°C

έως +300°C, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε ακραίες συνθήκες χωρίς να μειώνεται η απόδοση ή η διάρκεια ζωής του αισθητήρα.

2. Χημική Αντοχή

Το πολυϊμίδιο είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε χημικές αντιδράσεις και διάβρωση από επιθετικά χημικά. Αυτό το χαρακτηριστικό προστατεύει τον αισθητήρα από τυχόν βλαβερές επιδράσεις που μπορεί να προκαλέσουν τα χημικά του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται ή απελευθερώνονται διαβρωτικά χημικά, το πολυϊμίδιο λειτουργεί ως φράγμα που αποτρέπει τη φθορά των ευαίσθητων εξαρτημάτων του αισθητήρα, διατηρώντας τη λειτουργικότητά του.

3. Μηχανική Προστασία

Το πολυϊμίδιο διαθέτει εξαιρετική μηχανική αντοχή, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για την προστασία του αισθητήρα από μηχανικές καταπονήσεις, όπως κραδασμούς, χτυπήματα ή τριβές. Σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει συνεχής κίνηση ή δόνηση, το πολυϊμίδιο λειτουργεί ως προστατευτικό κάλυμμα που διατηρεί τη δομική ακεραιότητα του αισθητήρα.

4. Διηλεκτρικές Ιδιότητες

Το πολυϊμίδιο έχει χαμηλή διηλεκτρική σταθερά, γεγονός που το καθιστά εξαιρετικό μονωτικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι παρέχει ηλεκτρική μόνωση στον αισθητήρα, προστατεύοντας τον από ηλεκτρικές παρεμβολές ή βραχυκυκλώματα. Χάρη σε αυτή την ιδιότητα, το πολυϊμίδιο βοηθά στη σταθερή λειτουργία του αισθητήρα, εξασφαλίζοντας ότι το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται για την ανίχνευση υγρασίας δεν διαταράσσεται από εξωτερικούς ηλεκτρικούς παράγοντες.

5. Υδροφοβικές Ιδιότητες

Αν και το πολυϊμίδιο δεν είναι απόλυτα υδρόφοβο όπως το PTFE, έχει καλή αντοχή στην απορρόφηση νερού, γεγονός που μειώνει τη δυνατότητα βλάβης του αισθητήρα από υγρασία ή υγρές συνθήκες. Αυτό είναι κρίσιμο σε περιβάλλοντα υψηλής υγρασίας, όπου η εισροή νερού θα μπορούσε να αλλοιώσει την απόδοση του αισθητήρα ή να προκαλέσει ηλεκτρικές παρεμβολές.

6. Διατήρηση των Ιδιοτήτων του σε Μακροχρόνια Χρήση

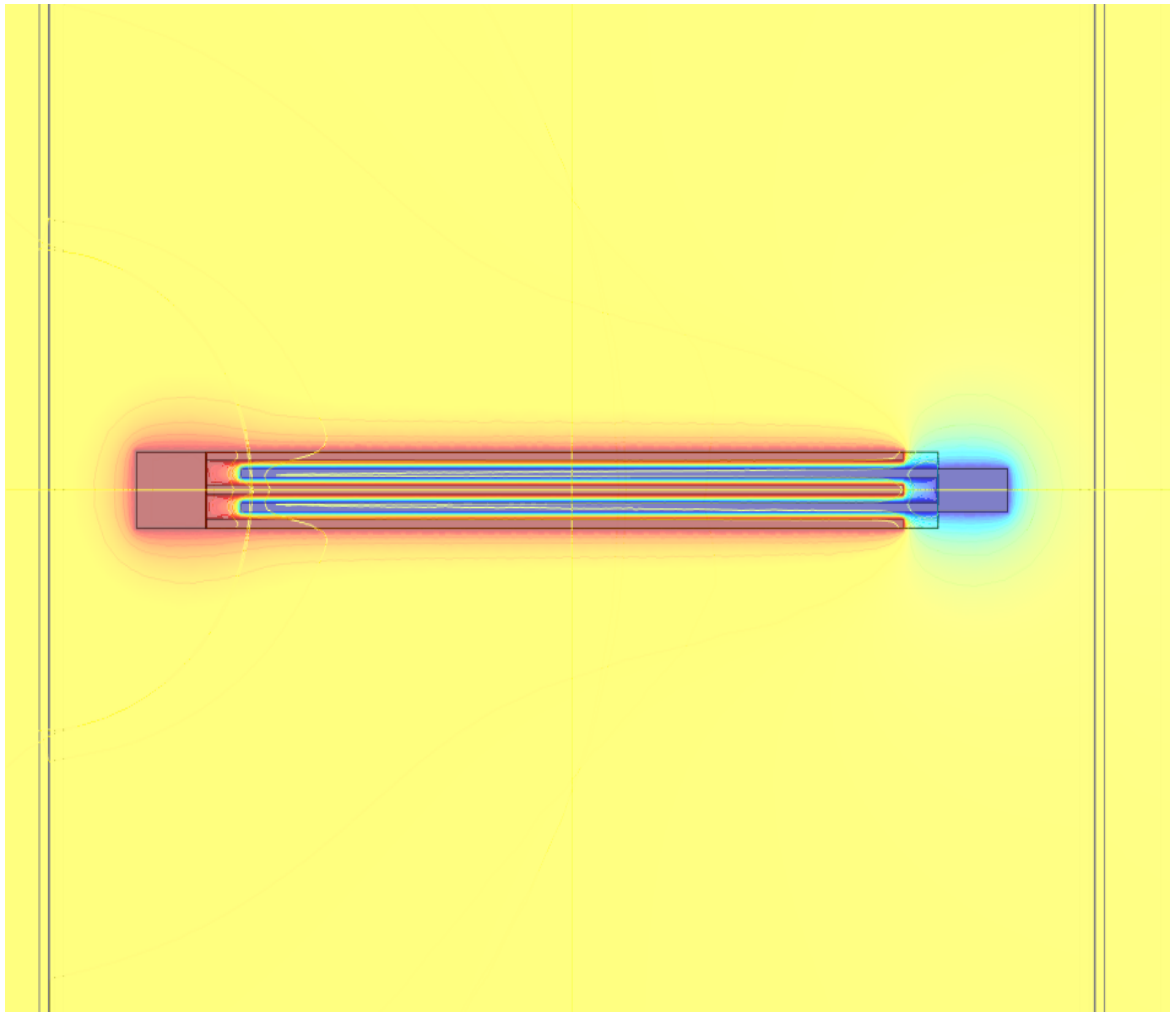
Το πολυϊμίδιο έχει εξαιρετική μακροχρόνια σταθερότητα. Δεν φθείρεται εύκολα με την πάροδο του χρόνου, ακόμα και σε σκληρά περιβάλλοντα. Αυτή η σταθερότητα είναι κρίσιμη για την διασφάλιση ότι ο αισθητήρας θα λειτουργεί με ακρίβεια και αξιοπιστία για μεγάλα χρονικά διαστήματα, χωρίς την ανάγκη συχνής συντήρησης ή αντικατάστασης.

3.7.2 Επίδραση του PTFE στην Ανίχνευση Υγρασίας

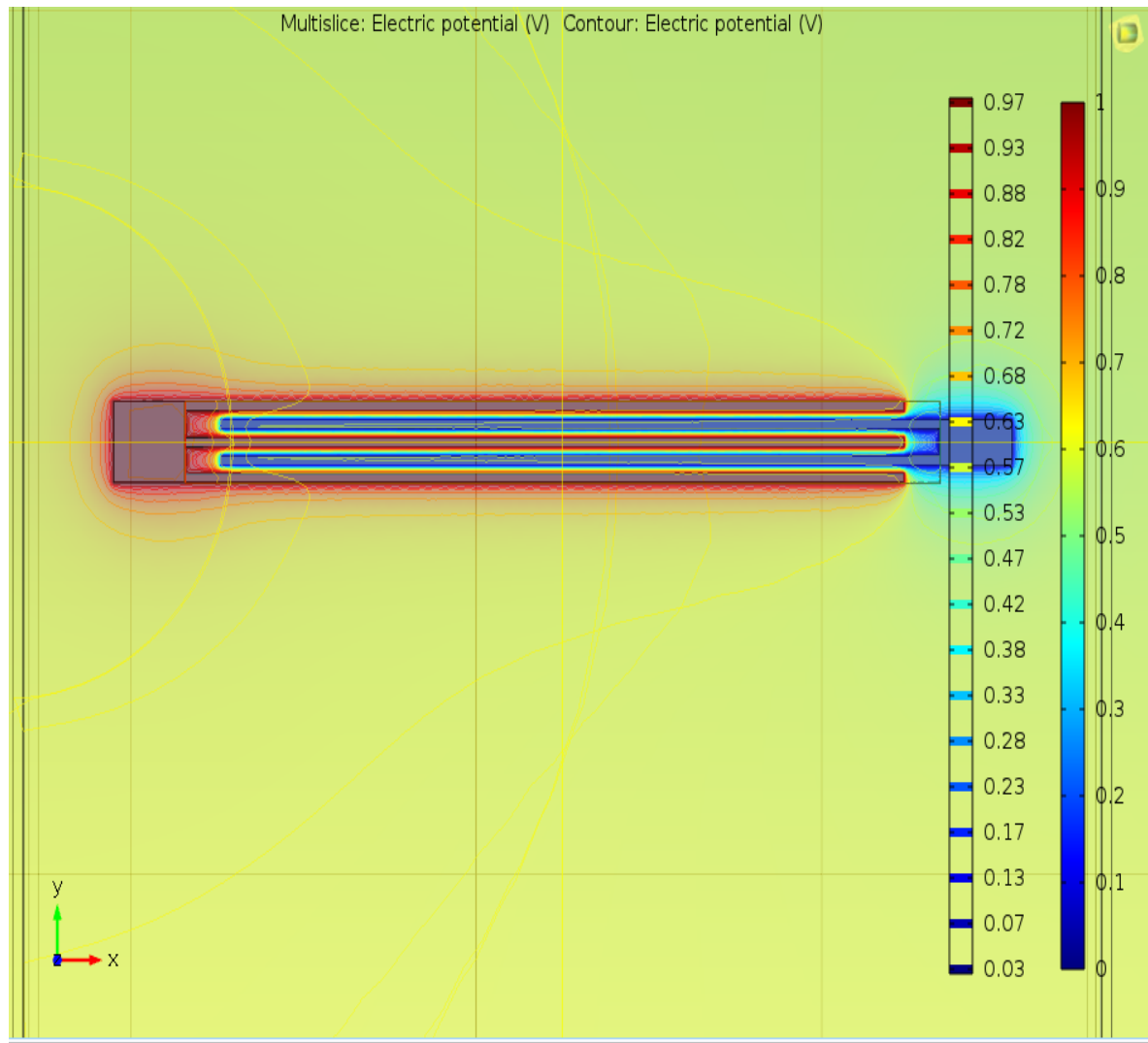
Το PTFE (Polytetrafluoroethylene), γνωστό στα ελληνικά ως πολυτετραφθοροαιθυλένιο, είναι ένα πολυμερές με εξαιρετικές διηλεκτρικές ιδιότητες και αντοχή σε χημικά, και έχει αρκετούς σημαντικούς ρόλους στην ανίχνευση υγρασίας:

- **Χαμηλή Διηλεκτρική Σταθερά:** Το PTFE έχει πολύ χαμηλή διηλεκτρική σταθερά, γεγονός που σημαίνει ότι δεν επηρεάζει σημαντικά το ηλεκτρικό πεδίο του αισθητήρα. Αυτό είναι κρίσιμο, καθώς το πεδίο πρέπει να αλληλεπιδράσει κυρίως με τους υδρατμούς για την ανίχνευση της υγρασίας και όχι με το υλικό της επιφάνειας. Το PTFE, με τις μονωτικές του ιδιότητες, διασφαλίζει ότι το ηλεκτρικό πεδίο δεν χάνει την έντασή του μέσα στο σύστημα.
- **Αντίσταση σε Υγρασία:** Το PTFE είναι υδρόφοβο, δηλαδή δεν απορροφά νερό. Αυτό το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές ανίχνευσης υγρασίας, καθώς επιτρέπει στους υδρατμούς να επηρεάσουν το ηλεκτρικό πεδίο χωρίς να προκαλούνται επιπλέον αλλαγές λόγω απορρόφησης νερού από την επιφάνεια του αισθητήρα.
- **Χημική Αδράνεια:** Το PTFE είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε χημικά και ακραίες θερμοκρασίες, κάτι που επιτρέπει στον αισθητήρα να λειτουργεί αξιόπιστα σε δύσκολα περιβάλλοντα. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι μετρήσεις υγρασίας είναι ακριβείς και ανεπηρέαστες από άλλους χημικούς παράγοντες του περιβάλλοντος.
- **Επίδραση στη Μονωτική Ικανότητα:** Το PTFE λειτουργεί ως μονωτικό στρώμα, το οποίο διασφαλίζει ότι οι φορτίσεις στο ηλεκτρικό πεδίο παραμένουν σταθερές και δεν διαχέονται εκτός του συστήματος. Αυτή η μονωτική του ιδιότητα είναι σημαντική για την ακρίβεια του αισθητήρα, καθώς αποτρέπει απώλειες ενέργειας και εξασφαλίζει την ορθή αλληλεπίδραση του πεδίου με τους υδρατμούς.

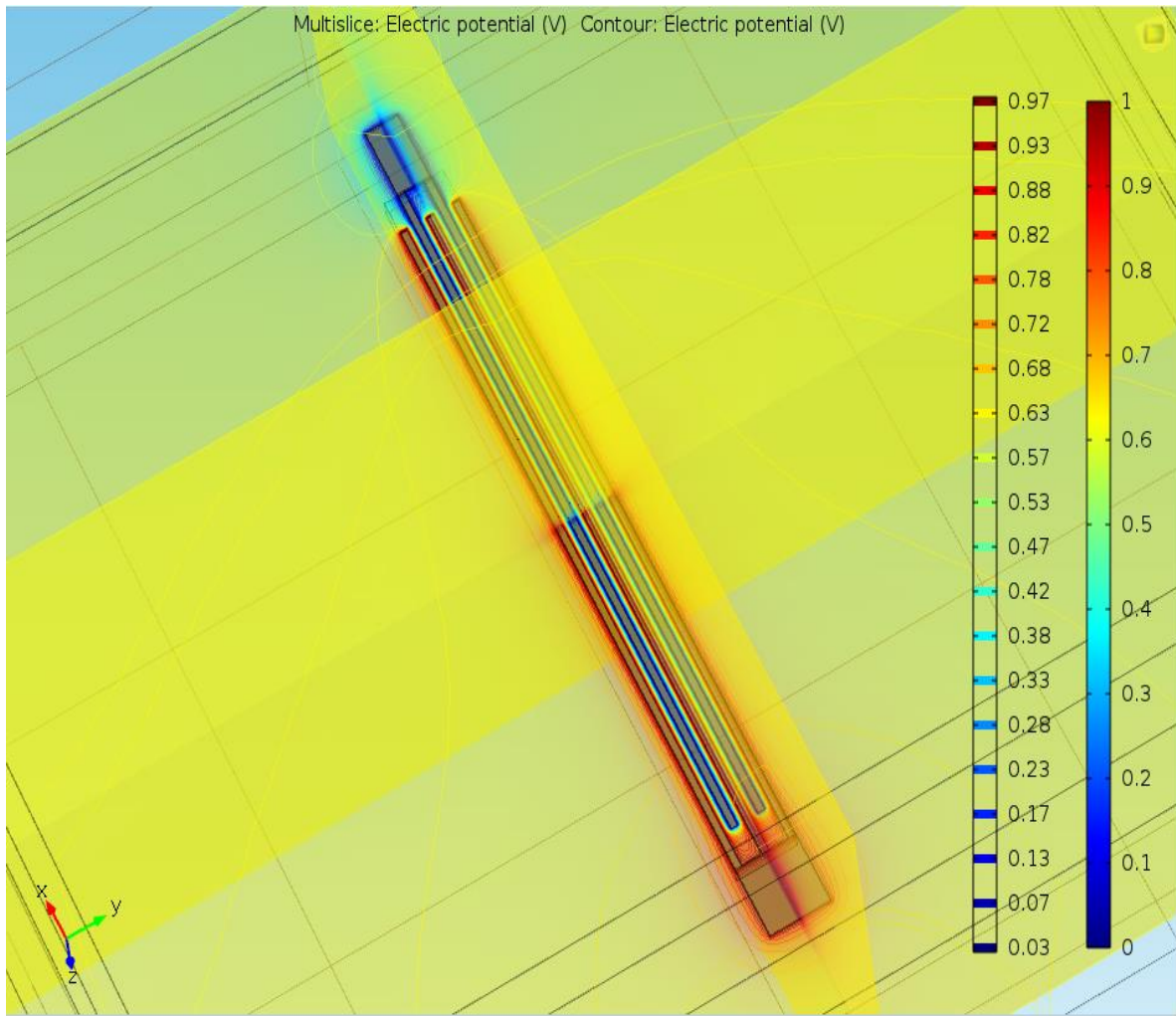
4. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων



Εικόνα 18: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού (V) κατά μήκος του αισθητήρα με ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια (IDE). Το ηλεκτρικό πεδίο εμφανίζεται ισχυρό κοντά στα ηλεκτρόδια και μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή του δυναμικού



Εικόνα 19: Τομή πολλαπλών επιπέδων (multislice) κατανομής ηλεκτρικού δυναμικού (V) γύρω από τον αισθητήρα. Το χρωματικό διάγραμμα απεικονίζει την ένταση του δυναμικού σε διαφορετικά επίπεδα του χώρου.



Εικόνα 20: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού και ισοδυναμικών γραμμών γύρω από τα ηλεκτρόδια. Οι ισοδυναμικές γραμμές δείχνουν περιοχές με σταθερό δυναμικό, υποδεικνύοντας την κατανομή του πεδίου στον χώρο.

Η πρώτη εικόνα (Εικόνα 18) παρουσιάζει την κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος του αισθητήρα με ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια (IDE). Το ηλεκτρικό δυναμικό αποτυπώνεται σε μορφή χρωματικής κλίμακας, όπου τα χρώματα υποδηλώνουν διαφορετικές τιμές δυναμικού. Συγκεκριμένα, το **κόκκινο** χρώμα αντιπροσωπεύει υψηλές τιμές δυναμικού, ενώ το **μπλε** χρώμα δείχνει χαμηλές τιμές. Η σταδιακή μετάβαση από το κόκκινο στο μπλε δείχνει την πτώση του δυναμικού από το θετικό ηλεκτρόδιο (άνω τιμές) προς το αρνητικό ή γειωμένο ηλεκτρόδιο (χαμηλές τιμές).

Οι διαπλεκόμενες διατάξεις των ηλεκτροδίων δημιουργούν ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που εκτείνεται στο περιβάλλον γύρω από τον αισθητήρα. Το πεδίο αυτό είναι ευαίσθητο σε αλλαγές στη διηλεκτρική σταθερά του περιβάλλοντος, όπως συμβαίνει όταν

αυξάνεται η υγρασία. Η αυξημένη υγρασία προκαλεί αλλαγές στο πεδίο, οι οποίες ανιχνεύονται μέσω της μεταβολής του δυναμικού. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουν μια συνεχή κατανομή του δυναμικού σε όλο το μήκος του αισθητήρα.

Ακολουθεί μια αναλυτική χρωματική επεξήγηση:

- **Κόκκινο:** Υψηλό ηλεκτρικό δυναμικό (πλησίον του θετικού ηλεκτροδίου).
- **Πορτοκαλί - Κίτρινο:** Ενδιάμεσες τιμές δυναμικού καθώς απομακρυνόμαστε από το θετικό ηλεκτρόδιο.
- **Μπλε:** Χαμηλό δυναμικό (πλησίον του αρνητικού ή γειωμένου ηλεκτροδίου).

Αυτή η εικόνα απεικονίζει τη συνολική διαμόρφωση του ηλεκτρικού δυναμικού, παρέχοντας πληροφορίες για το πώς το δυναμικό πέφτει κατά μήκος του αισθητήρα. Η παρακολούθηση των χρωματικών αλλαγών είναι σημαντική για την κατανόηση της κατανομής του δυναμικού και της απόκρισης του αισθητήρα σε περιβαλλοντικές μεταβολές, όπως η υγρασία.

Η δεύτερη εικόνα (Εικόνα 19) είναι μια τομή πολλαπλών επιπέδων (multislice) της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού στον χώρο γύρω από τον αισθητήρα. Η εικόνα παρέχει μια τρισδιάστατη αναπαράσταση, επιτρέποντας την παρατήρηση της κατανομής του δυναμικού σε διάφορα ύψη και βάθη του περιβάλλοντος.

Το **κόκκινο** χρώμα και πάλι αντιπροσωπεύει περιοχές με υψηλό δυναμικό, ενώ το **μπλε** περιοχές με χαμηλό. Οι τομές αποκαλύπτουν την επέκταση του ηλεκτρικού πεδίου σε όλο το περιβάλλον του αισθητήρα, και κυρίως πώς το πεδίο επηρεάζει τον περιβάλλοντα χώρο πάνω και κάτω από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Αυτή η πολυεπίπεδη προσέγγιση επιτρέπει την παρακολούθηση των μεταβολών του δυναμικού σε διάφορα επίπεδα.

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν εξετάζεται η αλληλεπίδραση της υγρασίας με το ηλεκτρικό πεδίο, καθώς οι υδρατμοί μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία στον χώρο και το πεδίο μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση τους. Παρέχει μια τρισδιάστατη κατανόηση της κατανομής του δυναμικού, απεικονίζοντας πώς το πεδίο μεταβάλλεται σε

διάφορα επίπεδα του χώρου. Είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση του πώς η παρουσία υδρατμών σε διαφορετικά σημεία μπορεί να επηρεάσει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και, κατ' επέκταση, την απόκριση του αισθητήρα. Η τρίτη εικόνα (Εικόνα 20) παρουσιάζει την κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού μέσω ισοδυναμικών γραμμών (contour lines). Οι ισοδυναμικές γραμμές είναι καμπύλες που συνδέουν σημεία με το ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό. Αυτό δίνει μια πιο λεπτομερή οπτική της μεταβολής του δυναμικού στον χώρο γύρω από τα ηλεκτρόδια. Η πυκνότητα αυτών των γραμμών κοντά στα ηλεκτρόδια δείχνει την περιοχή με το πιο έντονο πεδίο, όπου η αλλαγή στο δυναμικό είναι μεγαλύτερη.

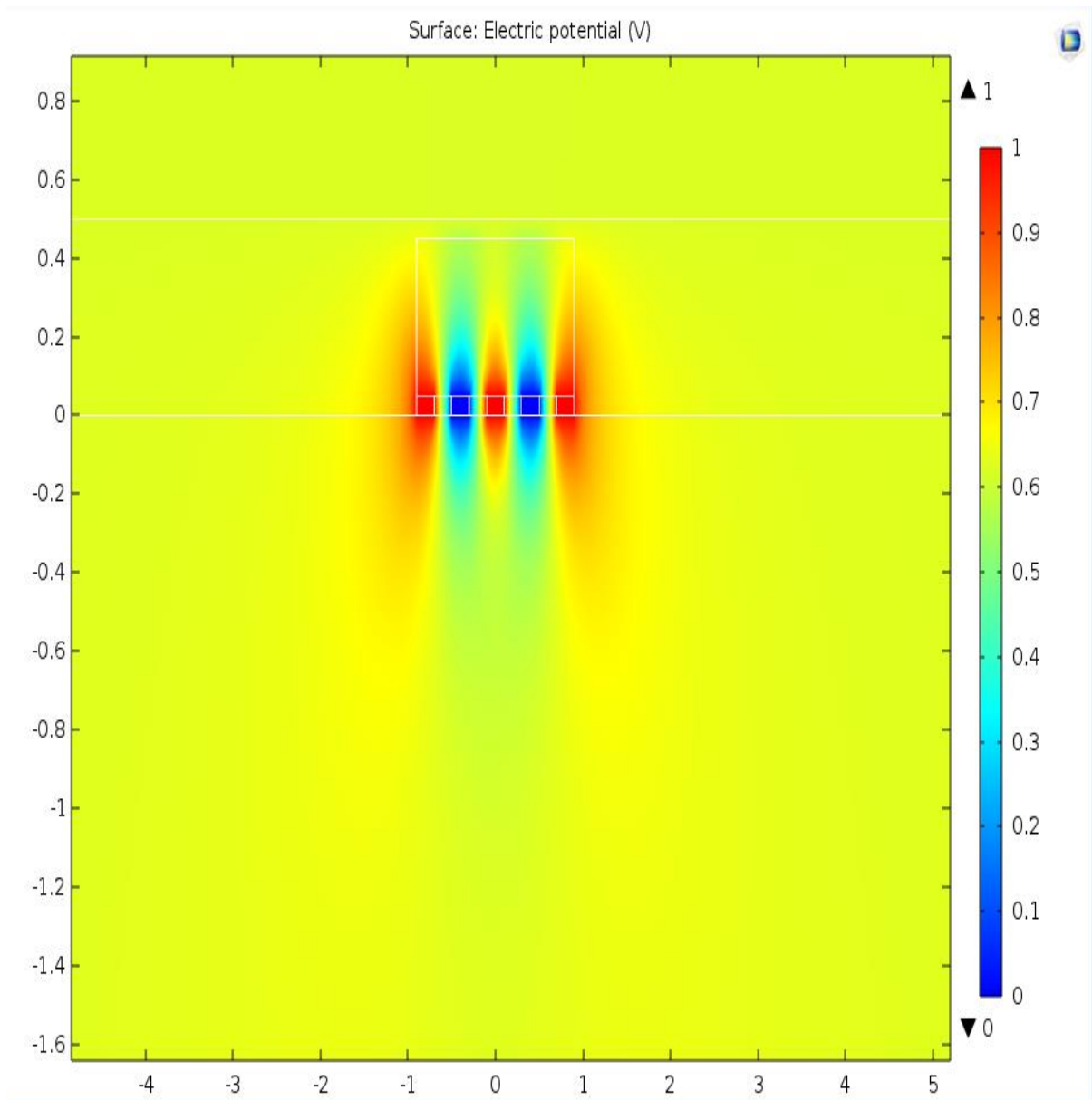
Οι χρωματισμοί ακολουθούν την ίδια λογική όπως στις προηγούμενες εικόνες, με το **κόκκινο** να αντιπροσωπεύει υψηλό δυναμικό και το **μπλε** χαμηλό. Το ενδιαφέρον σημείο εδώ είναι η ακριβής απεικόνιση του τρόπου που το δυναμικό "απλώνεται" στον χώρο γύρω από τα ηλεκτρόδια, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στην ένταση του πεδίου μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Οι ισοδυναμικές γραμμές επιτρέπουν μια λεπτομερή κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το δυναμικό μεταβάλλεται στον χώρο. Η πυκνότητα των γραμμών κοντά στα ηλεκτρόδια δείχνει τις περιοχές με την υψηλότερη ένταση πεδίου, οι οποίες είναι πιο ευαίσθητες σε μεταβολές στη διηλεκτρική σταθερά που προκαλούνται από την υγρασία. Αυτή η εικόνα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατανόηση της λεπτομερούς κατανομής του πεδίου και της επίδρασής του στην απόδοση του αισθητήρα.

Έτσι καταλήγουμε στο γεγονός ότι και οι τρεις εικόνες παρουσιάζουν διαφορετικές πτυχές της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τις τιμές του δυναμικού, ενώ οι ισοδυναμικές γραμμές απεικονίζουν πώς το δυναμικό κατανέμεται στον χώρο. Η αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού πεδίου με την υγρασία είναι το κλειδί για την ανίχνευση της μεταβολής στη διηλεκτρική σταθερά, και αυτές οι οπτικές αναπαραστάσεις παρέχουν μια ξεκάθαρη εικόνα του πώς ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει αυτές τις μεταβολές.

Σύμφωνα με την σχέση 3.12 που έχει αναφερθεί παραπάνω γνωρίζουμε ότι η χωρητικότητα είναι ανάλογη της επιφάνειας των ηλεκτροδίων (A), δηλαδή μεγαλύτερη επιφάνεια ηλεκτροδίων αυξάνει τη χωρητικότητα του αισθητήρα, επιτρέποντας

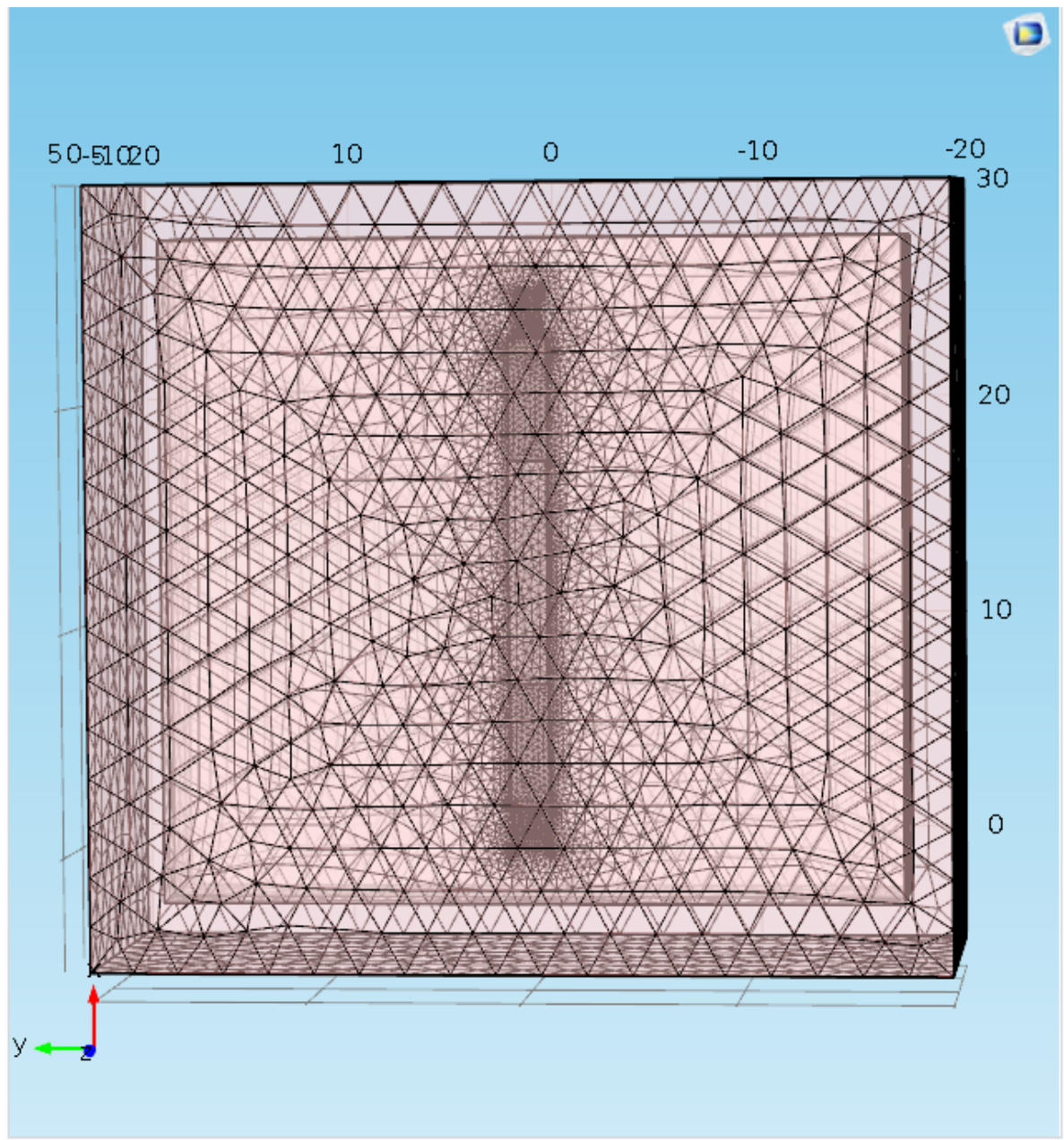
μεγαλύτερη ευαισθησία στις μεταβολές της υγρασίας και ανάλογη της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού (ϵ_r), δηλαδή όσο μεγαλύτερη η διηλεκτρική σταθερά του υλικού (π.χ., όταν αυξάνεται η υγρασία στον αέρα), τόσο μεγαλύτερη γίνεται η χωρητικότητα, και αυτός είναι ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της υγρασίας. Αντίθετα, είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης των ηλεκτροδίων (d), δηλαδή μικρότερη απόσταση σημαίνει μεγαλύτερη χωρητικότητα και συνεπώς μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές της υγρασίας. Η υγρασία αυξάνει τη σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) του περιβάλλοντος υλικού (αέρα), καθώς το νερό έχει πολύ υψηλή διηλεκτρική σταθερά (περίπου 80). Έτσι, η χωρητικότητα του αισθητήρα αυξάνεται σημαντικά με την παρουσία υγρασίας. Αυτή η αλλαγή στη χωρητικότητα χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η υγρασία στο περιβάλλον.



Εικόνα 21: 2D κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 21) παρατίθεται μια 2D απεικόνιση του ηλεκτρικού δυναμικού πάνω σε μια επιφάνεια του αισθητήρα. Αυτή η απεικόνιση επικεντρώνεται στο ηλεκτρικό πεδίο γύρω από τις περιοχές των ηλεκτροδίων, απεικονίζοντας πώς το δυναμικό μεταβάλλεται γύρω από τα ηλεκτρόδια. Τα χρώματα υποδεικνύουν το επίπεδο του δυναμικού, με το κόκκινο να αντιστοιχεί σε υψηλότερες τιμές (κοντά στο θετικό ηλεκτρόδιο) και το μπλε σε χαμηλότερες (κοντά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο). Η πυκνότητα των γραμμών σε αυτές τις περιοχές δείχνει το πώς συγκεντρώνεται το πεδίο. Η εικόνα αυτή είναι πιο απλή και κατάλληλη για την ανάλυση του πεδίου σε μια μόνο επιφάνεια,

ενώ παραπάνω παρατέθηκε η τρισδιάστατη απεικόνιση του ηλεκτρικού δυναμικού που δίνει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της κατανομής του πεδίου μέσα στον όγκο του αισθητήρα, επιτρέποντας την ανάλυση και της κατανομής σε βάθος.



Εικόνα 22: Το πλέγμα (mesh) για την αριθμητική επίλυση του ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας

Η συγκεκριμένη εικόνα (Εικόνα 22) παρουσιάζει το πλέγμα (mesh) που έχει δημιουργηθεί στο COMSOL για την αριθμητική επίλυση του ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας. Το πλέγμα είναι ένα από τα βασικά εργαλεία της

μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), το οποίο επιτρέπει τη διάσπαση της γεωμετρίας του μοντέλου σε μικρότερα τμήματα (στοιχεία). Αυτά τα στοιχεία μπορούν να έχουν διάφορες μορφές, όπως τριγωνικά ή τετραεδρικά, ανάλογα με την περιοχή και τις ανάγκες ακρίβειας.

Ανάλυση του πλέγματος:

1. Πυκνότητα πλέγματος: Η πυκνότητα του πλέγματος είναι υψηλότερη γύρω από τα ηλεκτρόδια και τις περιοχές ενδιαφέροντος, όπου η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη. Αυτό βοηθά στην επίτευξη καλύτερης ακρίβειας στις περιοχές αυτές, όπου οι ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις είναι πιο σύνθετες. Στις περιοχές όπου το πεδίο είναι πιο ομαλό και οι αλλαγές λιγότερο απότομες, το πλέγμα είναι πιο αραιό, προκειμένου να εξοικονομηθούν υπολογιστικοί πόροι χωρίς να θυσιαστεί η ακρίβεια.

2. Σχήμα στοιχείων: Το πλέγμα αποτελείται από τριγωνικά και τετραεδρικά στοιχεία, τα οποία είναι κοινά στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιούνται στις επιφάνειες και τα τετραεδρικά στοιχεία στο εσωτερικό του όγκου. Αυτό επιτρέπει στο COMSOL να προσεγγίσει με ακρίβεια την κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού, ειδικά σε περιοχές με απότομες μεταβολές.

3. Πλεονεκτήματα του πλέγματος: Η ποιότητα του πλέγματος έχει άμεση επίδραση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ένα πυκνό πλέγμα σε κρίσιμες περιοχές μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια της προσομοίωσης, ενώ ένα αραιό πλέγμα στις λιγότερο κρίσιμες περιοχές βοηθά στην ταχύτερη εκτέλεση του μοντέλου χωρίς σημαντική απώλεια ακρίβειας. Το πλέγμα πρέπει να ισορροπεί ανάμεσα στην ακρίβεια και την αποδοτικότητα της προσομοίωσης.

4. Ηλεκτροστατικές επιλύσεις: Σε αυτό το μοντέλο, το πλέγμα είναι σχεδιασμένο για την επίλυση του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού που δημιουργείται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του αισθητήρα υγρασίας. Το προσεκτικό μοίρασμα της γεωμετρίας του αισθητήρα σε μικρά στοιχεία επιτρέπει την ακριβή καταγραφή του τρόπου με τον οποίο το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται σε κάθε περιοχή,

παρέχοντας πιο ακριβείς προβλέψεις για την αλληλεπίδραση του αισθητήρα με τους υδρατμούς.

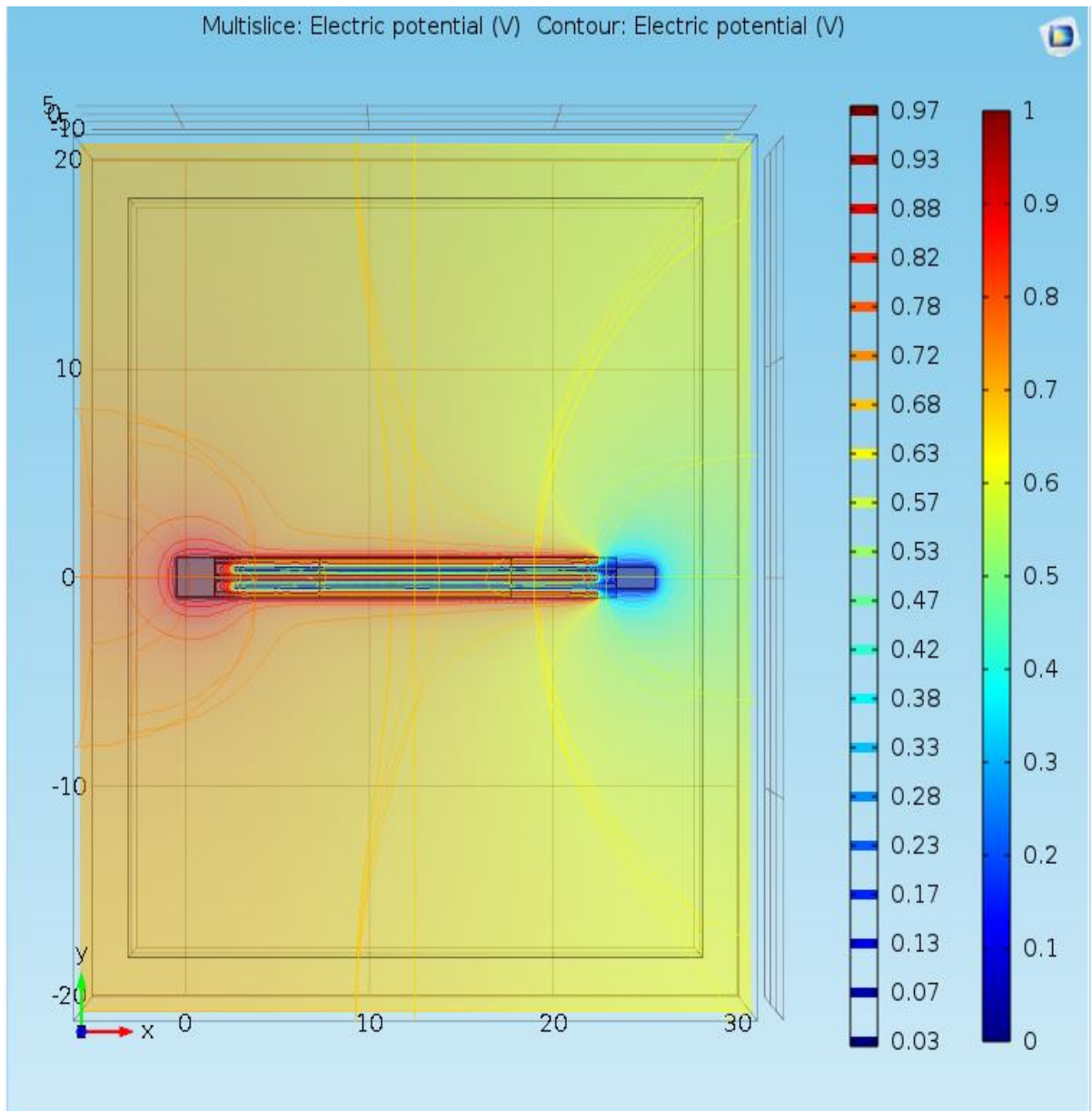
5. Σχέση με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων: Η σωστή προσαρμογή του πλέγματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Σε περιοχές με έντονες μεταβολές, όπως γύρω από τις αιχμές των ηλεκτροδίων, απαιτείται μεγαλύτερη πυκνότητα στοιχείων, ενώ σε πιο ομαλές περιοχές το πλέγμα μπορεί να είναι πιο αραιό. Αυτό βοηθά στη διαχείριση της υπολογιστικής ισχύος χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η ποιότητα της ανάλυσης.

4.1 Απεικόνιση επιφανειών σε διαφορετικά στρώματα υγρού αέρα

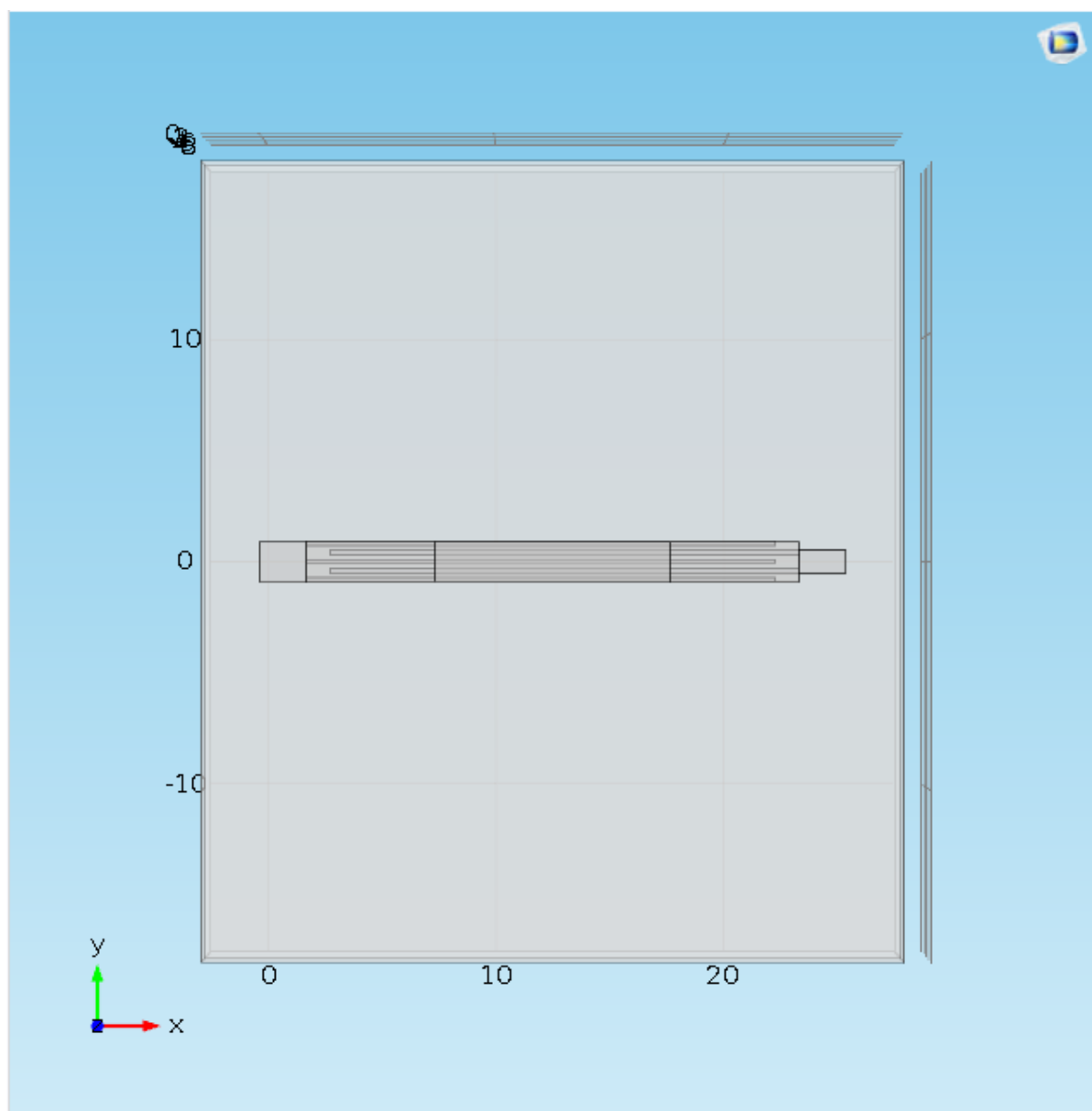
Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, εξετάζεται η επίδραση της διαμόρφωσης διαφορετικών επιφανειών υγρού αέρα στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στον αισθητήρα υγρασίας. Η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω της προσομοίωσης πολλαπλών στρωμάτων (layers) υγρού αέρα πάνω από τον αισθητήρα, με σκοπό την αξιολόγηση των μεταβολών του ηλεκτρικού δυναμικού σε κάθε περίπτωση.

Οι εικόνες που ακολουθούν απεικονίζουν την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία αναπαριστάται με χρήση χρωματικών κλιμάκων, όπου το κόκκινο αντιστοιχεί σε υψηλότερο δυναμικό και το μπλε σε χαμηλότερο. Η ανάλυση αυτή είναι κρίσιμη για την κατανόηση της συμπεριφοράς του αισθητήρα υπό διαφορετικές συνθήκες και για την αξιολόγηση της απόδοσής του στη μέτρηση της υγρασίας. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι απεικονίσεις του ηλεκτρικού πεδίου για κάθε περίπτωση, ακολουθούμενες από σχετική ανάλυση και συγκρίσεις.

4.1.1 Επιφάνεια 1



Εικόνα 23: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας με ισοδυναμικές γραμμές για την επιφάνεια 1

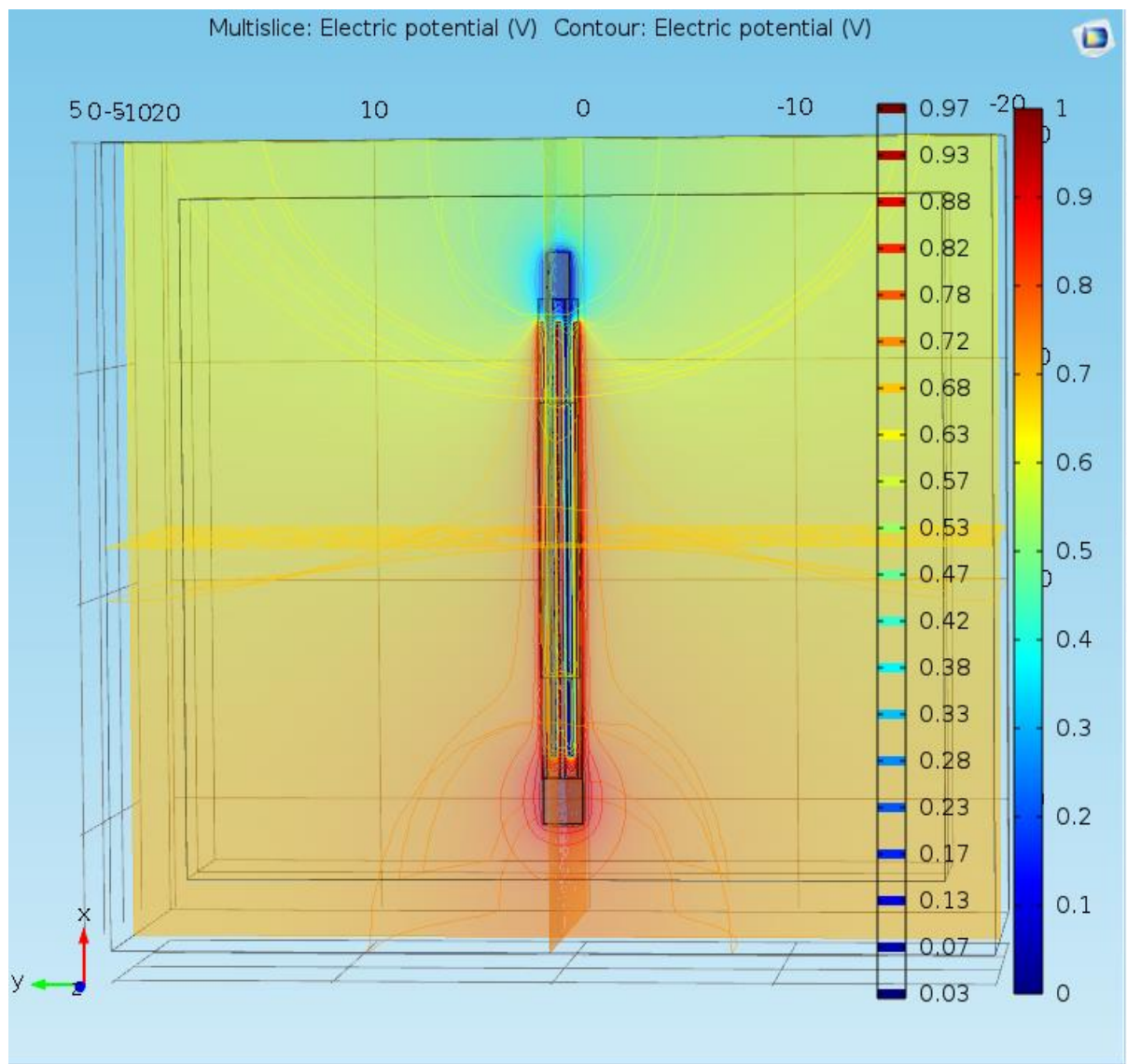


Εικόνα 24: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 1

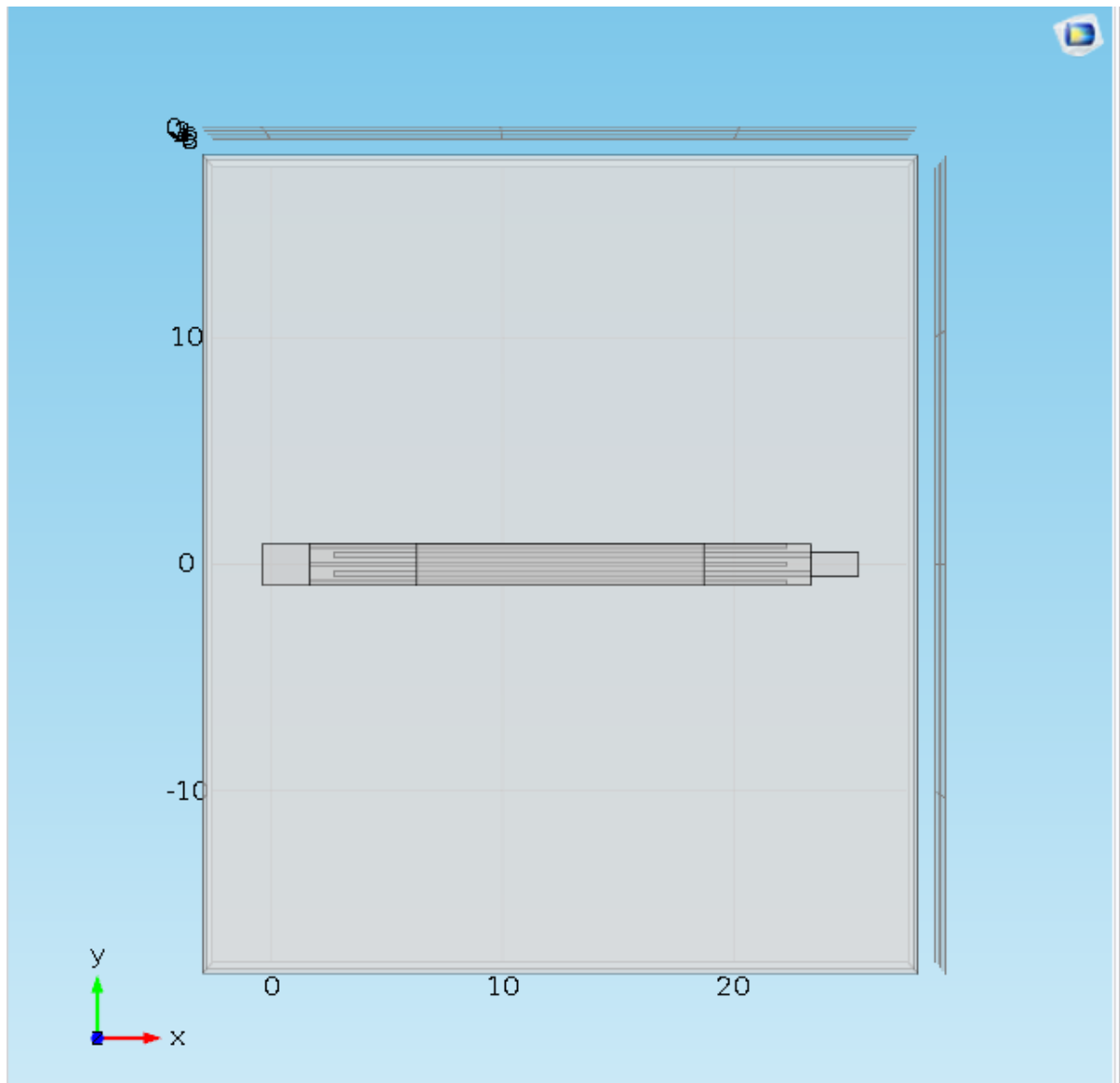
▼ Size	
Width:	10
Depth:	1.8
Height:	0.4
▼ Position	
Base:	Corner
x:	7.5
y:	-0.9
z:	0.45

Εικόνα 25: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 1 του αισθητήρα υγρασίας

4.1.2 Επιφάνεια 2



Εικόνα 26: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στον αισθητήρα υγρασίας με ισοδυναμικές γραμμές για την επιφάνεια 2

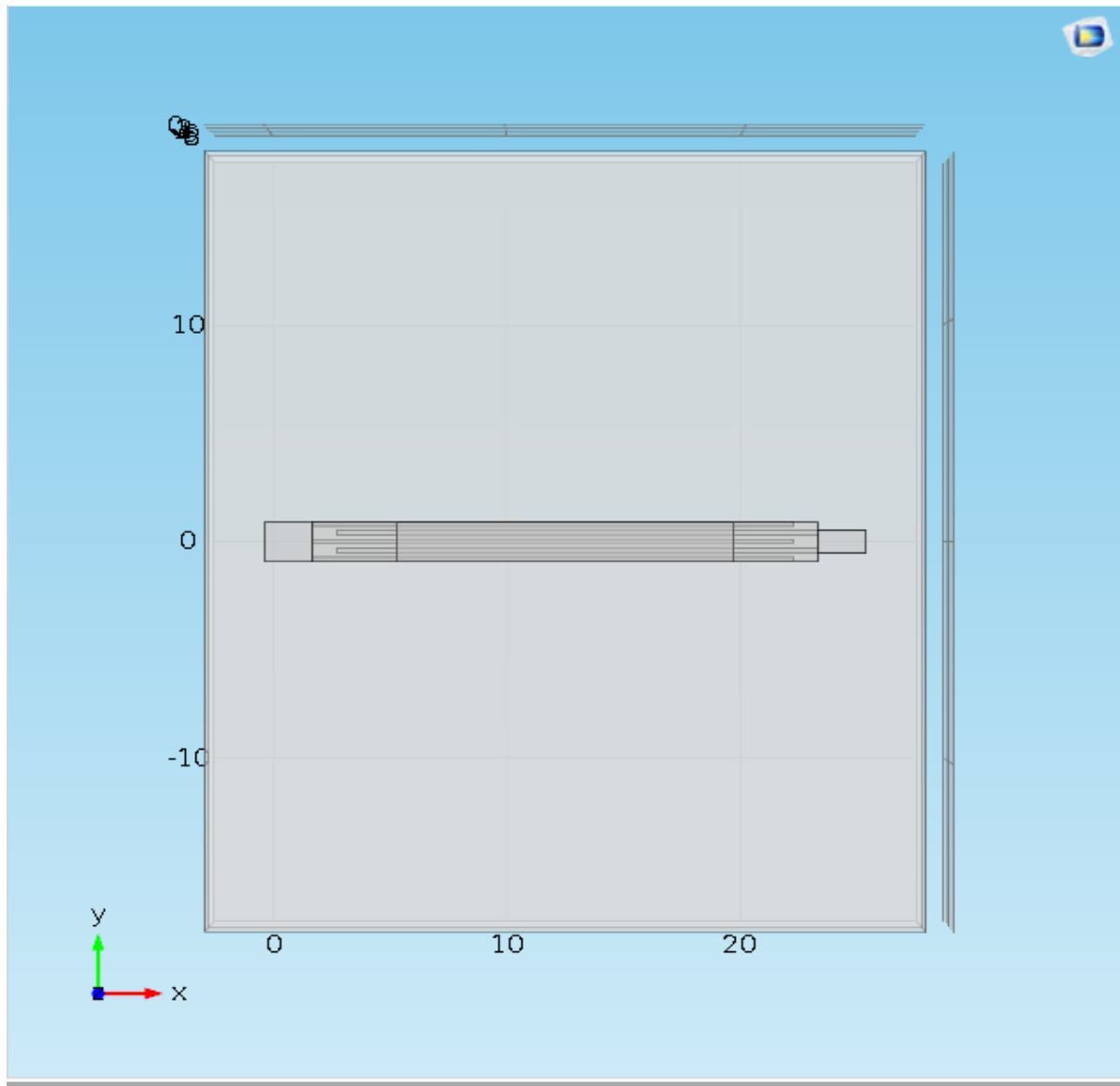


Εικόνα 27: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 2

▼	Size
Width:	12
Depth:	1.8
Height:	0.4
▼	Position
Base:	Corner
x:	6.5
y:	-0.9
z:	0.45
▼	Axis

Εικόνα 28: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 2 του αισθητήρα υγρασίας

4.1.3 Επιφάνεια 3

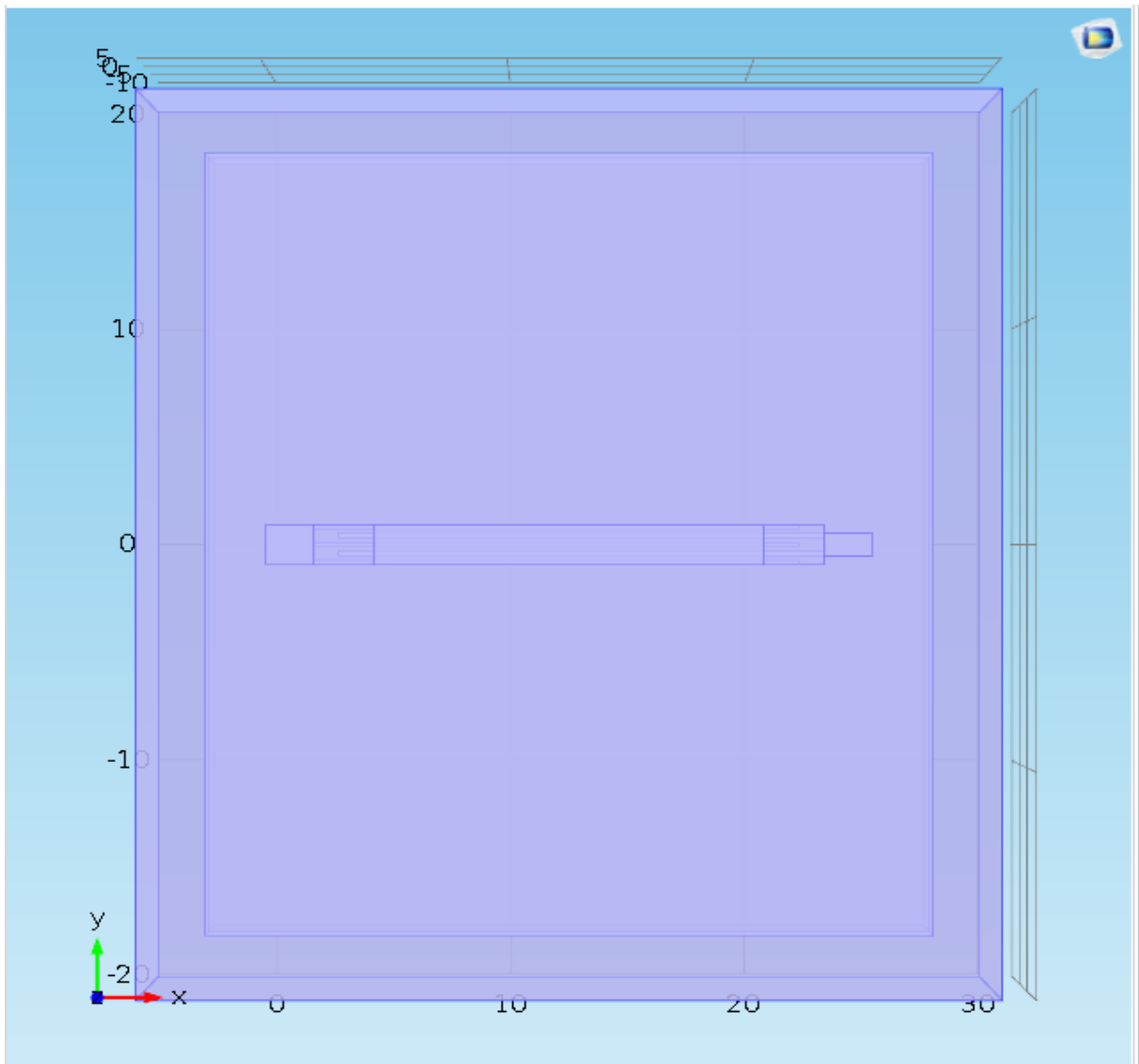


Εικόνα 29: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 3

Width:	14
Depth:	1.8
Height:	0.4
▼ Position	
Base:	Corner
x:	5.5
y:	-0.9
z:	0.45

Εικόνα 30: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 3 του αισθητήρα υγρασίας

4.1.4 Επιφάνεια 4

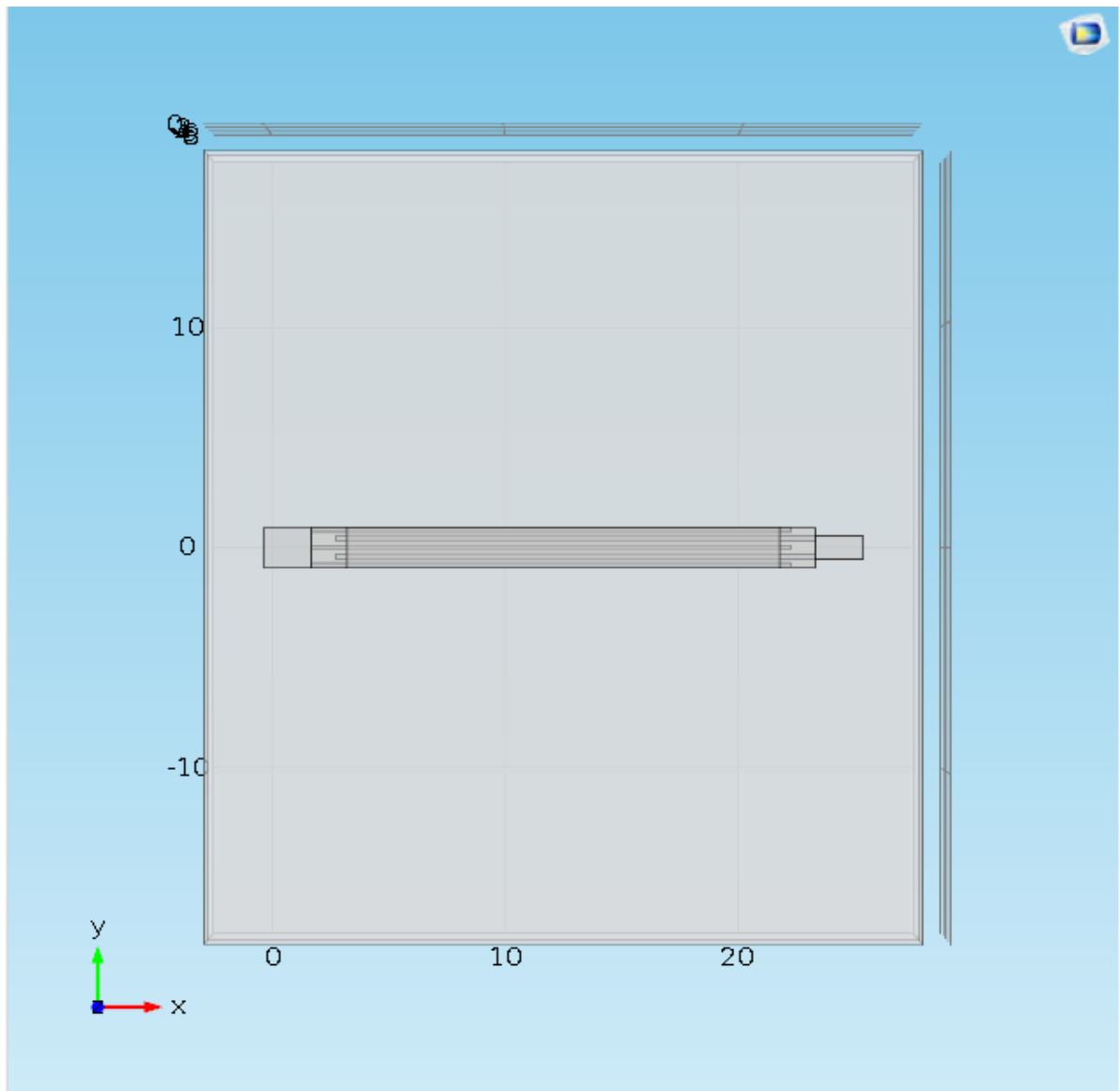


Εικόνα 31: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 4

▼	Size
Width:	16
Depth:	1.8
Height:	0.4
▼	Position
Base:	Corner
x:	4.5
y:	-0.9
z:	0.45

Εικόνα 32: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 4 του αισθητήρα υγρασίας

4.1.5 Επιφάνεια 5



Εικόνα 33: Γεωμετρικός σχεδιασμός του αισθητήρα υγρασίας για την επιφάνεια 5

Width:	18
Depth:	1.8
Height:	0.4
▼ Position	
Base:	Corner
x:	3.5
y:	-0.9
z:	0.45

Εικόνα 34: Διαστάσεις και θέσεις στρωμάτων για την επιφάνεια 5 του αισθητήρα υγρασίας

4.1.6 Σύγκριση Επιφανειών

Συγκρίνονται οι διαφορετικές επιφάνειες του αισθητήρα με βάση τις διαστάσεις. Κάθε μία από αυτές τις επιφάνειες αντιπροσωπεύει διαφορετικά επίπεδα υγρού αέρα (humid air), και η σταδιακή τους ανάλυση θα μας βοηθήσει για την κατανόηση των διαφορών στη διάδοση του ηλεκτρικού πεδίου και στη διανομή του δυναμικού σε σχέση με τις αυξανόμενες διαστάσεις.

1. Πρώτη Επιφάνεια (Surface 1):

- Διαστάσεις: Πλάτος 10 mm, βάθος 1.8 mm, ύψος 0.4 mm.
- Ανάλυση: Η πρώτη επιφάνεια αντιπροσωπεύει μια μικρή περιοχή humid air που περιβάλλει τον αισθητήρα. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι σχετικά συμπυκνωμένο, όπως φαίνεται από τις γραμμές δυναμικού, με το κέντρο του αισθητήρα να έχει υψηλότερη συγκέντρωση ηλεκτρικού δυναμικού. Τα χρώματα απεικονίζουν το δυναμικό, με το κόκκινο να αναπαριστά υψηλότερα επίπεδα, και το μπλε χαμηλότερα. Οι ηλεκτρικές γραμμές δείχνουν την κατεύθυνση του πεδίου, και παρατηρείται μια εντονότερη συγκέντρωση γύρω από τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα.

2. Δεύτερη Επιφάνεια (Surface 2):

- Διαστάσεις: Πλάτος 12 mm, βάθος 1.8 mm, ύψος 0.4 mm.

- Σύγκριση με την πρώτη: Καθώς αυξάνεται το πλάτος της humid air, το ηλεκτρικό πεδίο διασπείρεται περισσότερο στην περιοχή. Οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού εμφανίζονται πιο ευρέως και οι περιοχές κόκκινου χρώματος εξαπλώνονται, υποδηλώνοντας μεγαλύτερη περιοχή υψηλού δυναμικού. Αυτό δείχνει ότι με μεγαλύτερη επιφάνεια humid air, το πεδίο μπορεί να διαχυθεί πιο ομοιόμορφα και να καλύψει μεγαλύτερη περιοχή.

3. Τρίτη Επιφάνεια (Surface 3):

- Διαστάσεις: Πλάτος 14 mm, βάθος 1.8 mm, ύψος 0.4 mm.
- Σύγκριση με τη δεύτερη: Η αύξηση του πλάτους συνεχίζει να επιτρέπει στο ηλεκτρικό πεδίο να επεκτείνεται περισσότερο. Η κατανομή του δυναμικού παραμένει συγκεντρωμένη κοντά στον αισθητήρα, αλλά παρατηρούμε αύξηση της περιοχής μεσαίου δυναμικού. Το μπλε χρώμα στα άκρα δείχνει πτώση του δυναμικού καθώς απομακρυνόμαστε από τον αισθητήρα.

4. Τέταρτη Επιφάνεια (Surface 4):

- Διαστάσεις: Πλάτος 16 mm, βάθος 1.8 mm, ύψος 0.4 mm.
- Σύγκριση με την τρίτη: Η αύξηση του πλάτους συνεχίζει να επηρεάζει τη διασπορά του ηλεκτρικού πεδίου. Η διαφορά είναι εμφανής, με τις ισοδυναμικές γραμμές να εκτείνονται ακόμα περισσότερο από την επιφάνεια του αισθητήρα. Οι περιοχές χαμηλού δυναμικού επεκτείνονται περαιτέρω προς τα άκρα, ενώ οι περιοχές υψηλού δυναμικού παραμένουν κοντά στον αισθητήρα.

5. Πέμπτη Επιφάνεια (Surface 5):

- Διαστάσεις: Πλάτος 18 mm, βάθος 1.8 mm, ύψος 0.4 mm.
- Σύγκριση με την τέταρτη: Στην πέμπτη επιφάνεια παρατηρείται η μεγαλύτερη διασπορά του πεδίου. Οι περιοχές υψηλού δυναμικού (κόκκινο χρώμα) παραμένουν συγκεντρωμένες κοντά στον αισθητήρα, αλλά η περιοχή χαμηλού δυναμικού (μπλε χρώμα) επεκτείνεται ακόμα περισσότερο. Αυτή η επέκταση του πεδίου είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του αισθητήρα, καθώς το humid air παίζει σημαντικό ρόλο στην αλληλεπίδραση με το πεδίο.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι η σύγκριση των διαφορετικών επιφανειών υγρού αέρα (humid air) αποκαλύπτει πως με την αύξηση των διαστάσεων, το ηλεκτρικό πεδίο διαχέεται περισσότερο και καλύπτει μεγαλύτερη περιοχή. Οι διαφορές στο δυναμικό και στη διασπορά του πεδίου είναι σαφείς και δείχνουν πώς η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλεται σε σχέση με την επιφάνεια, επηρεάζοντας την απόκριση του αισθητήρα σε υδρατμούς.

Τα διαφορετικά στρώματα υγρού αέρα (humid air) δημιουργούν ένα περιβάλλον στο οποίο το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από την παρουσία των υδρατμών. Όπως παρατηρείται στις εικόνες των κατανομών του ηλεκτρικού δυναμικού, το ηλεκτρικό πεδίο αλλάζει καθώς επεκτείνεται το στρώμα του υγρού αέρα:

- Σε μικρότερες επιφάνειες, το πεδίο είναι πιο έντονο και οι γραμμές του πεδίου είναι πιο συγκεντρωμένες, διότι η αλληλεπίδραση με τους υδρατμούς είναι πιο τοπική. Αυτό μπορεί να αυξήσει την ευαισθησία του αισθητήρα για μικρές αλλαγές.
- Σε μεγαλύτερες επιφάνειες, το πεδίο είναι πιο διαχυμένο και οι γραμμές του πεδίου καλύπτουν μεγαλύτερη περιοχή. Αυτό οδηγεί σε πιο ομαλή απόκριση του αισθητήρα, ιδανική για πιο σταθερές και ομοιόμορφες μετρήσεις.

Αυτό που είναι ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι το στρώμα του υγρού αέρα είναι το βασικό μέσο με το οποίο ανιχνεύονται οι μεταβολές στην υγρασία. Το πώς καταλαμβάνει το χώρο πάνω από τον αισθητήρα και πώς αλληλοεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο καθορίζει την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του αισθητήρα.

5. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιχειρήθηκε ο σχεδιασμός και η ανάλυση ενός αισθητήρα για την ανίχνευση της υγρασίας, βασισμένου στη χωρητική τεχνολογία ανίχνευσης. Ο αισθητήρας αυτός, ο οποίος λειτουργεί με βάση έναν πυκνωτή τύπου ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, αξιοποιεί την αλλαγή στη χωρητικότητα όταν οι υδρατμοί έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια του. Αυτή η μεταβολή στη χωρητικότητα οφείλεται στην αλλαγή της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού της επιφάνειας του πυκνωτή, καθώς αυξάνεται η ποσότητα των υδρατμών που απορροφά το

διηλεκτρικό υλικό. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση των υδρατμών από το υλικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της χωρητικότητας του αισθητήρα.

Τα αποτελέσματα τόσο του θεωρητικού όσο και του πειραματικού μέρους της εργασίας καταδεικνύουν ότι διάφοροι παράγοντες που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό του αισθητήρα επηρεάζουν καθοριστικά τη λειτουργία του πυκνωτή. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων, τα υλικά που χρησιμοποιούνται τόσο για τα ηλεκτρόδια όσο και για το διηλεκτρικό, καθώς και την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η ακριβής διαμόρφωση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου, όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις, αποδεικνύει ότι οι μεταβολές στις διαστάσεις και τα υλικά του αισθητήρα επηρεάζουν άμεσα την απόδοση ανίχνευσης. Επιπλέον, η γεωμετρία των ηλεκτροδίων αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντική για τη βέλτιστη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, και συνεπώς, για την ευαισθησία του αισθητήρα στη μέτρηση της υγρασίας.

Επιπλέον, οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι επιφάνειες που περιβάλλουν τα ηλεκτρόδια, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ευαισθησία του αισθητήρα και στην ακρίβεια των μετρήσεων. Η επιλογή του PTFE και του πολυϊμιδίου ως υλικά κατασκευής προσέφερε υψηλή ανθεκτικότητα στην υγρασία και προστασία από εξωτερικούς παράγοντες. Οι αναλύσεις των κατανομών του ηλεκτρικού πεδίου μέσω των προσομοιώσεων επιβεβαίωσαν τη σημασία της επιλογής υλικών για τη βελτιστοποίηση της απόκρισης του αισθητήρα.

Υπάρχουν αρκετές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις που θα μπορούσαν να επεκτείνουν τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και να ενισχύσουν την αποδοτικότητα του αισθητήρα υγρασίας:

1. Μελέτη διαφορετικών γεωμετριών ηλεκτροδίων: Η προσομοίωση έδειξε ότι η γεωμετρία των ηλεκτροδίων και η απόσταση μεταξύ τους παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του αισθητήρα. Μελλοντικές εργασίες μπορούν να εστιάσουν στη διερεύνηση της λειτουργίας του αισθητήρα με διαφορετικές γεωμετρίες και διαστάσεις ηλεκτροδίων, καθώς και στον αριθμό των ηλεκτροδίων για βελτιστοποίηση της ευαισθησίας και της ακρίβειας.

2. Μελέτη της απόδοσης με την πάροδο του χρόνου: Ένα ακόμα κρίσιμο πεδίο για μελλοντική εργασία είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο επηρεάζεται η απόδοση του αισθητήρα με την πάροδο του χρόνου, υπό σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η επίδραση της φθοράς των υλικών, καθώς και η μακροχρόνια σταθερότητα των μετρήσεων, είναι σημαντικοί παράγοντες που απαιτούν περαιτέρω μελέτη.

3. Διερεύνηση εναλλακτικών υλικών ηλεκτροδίων: Αν και στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο χαλκός για τα ηλεκτρόδια, είναι πιθανό ότι η χρήση άλλων υλικών, όπως αγωγίμα πολυμερή ή άλλες μεταλλικές επικαλύψεις, μπορεί να βελτιώσει τις επιδόσεις του αισθητήρα. Μια μελέτη για τη χρήση εναλλακτικών υλικών ηλεκτροδίων θα μπορούσε να προσφέρει νέα δεδομένα για την απόκριση του αισθητήρα σε διαφορετικά περιβάλλοντα και συνθήκες.

4. Ανάλυση επιρροής διαφορετικών διηλεκτρικών υλικών: Η διερεύνηση του ρόλου άλλων διηλεκτρικών υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της απορρόφησης των υδρατμών είναι επίσης ένα σημαντικό πεδίο για μελλοντική έρευνα. Η βελτιστοποίηση της διηλεκτρικής σταθεράς και της διαπερατότητας του υλικού μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτικούς και ευαίσθητους αισθητήρες.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Unknown, “Sensors and actuators,” THE INSTRUMENT GURU, <https://theinstrumentguru.com/sensors-and-actuators/> (accessed Oct. 2, 2023).
- [2] J. Vetelino and A. Reghu, Introduction to Sensors. Boca Raton (Fla.): New York (N.Y.), 2017.
- [3] “Passive and active sensors,” BrainKart, https://www.brainkart.com/article/Passive-and-Active-Sensors_4474/ (accessed Oct. 2, 2023).
- [4] H. Bernstein and H. Bernstein, Measuring Electronics and Sensors Basics of Measurement Technology, Sensors, Analog and Digital Signal Processing. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.
- [5] “Difference between Analog sensor and Digital sensor”, RF Wireless World, <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Analog-sensor-vs-Digital-sensor.html> (accessed Oct. 2, 2023).
- [6] “Analog vs Digital sensors,” Coding Ninjas CodeStudio, <https://www.codingninjas.com/codestudio/library/analog-vs-digital-sensors> (accessed Oct. 02, 2023).
- [7] “ADC drivers” Wireless Embedded Internetworking Short Course, <http://people.eecs.berkeley.edu/~culler/WEI/labs/lab7-sensing/sensing.htm> (accessed Oct. 2, 2023).
- [8] W. Du, Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [9] R. Puers, “Capacitive sensors: When and how to use them,” Sensors and Actuators A: Physical, vol. 37–38, pp. 93–105, 1993. doi:10.1016/0924-4247(93)80019-d
- [10] K. Kalantar-Zadeh, Sensors: An introductory course, New York: Springer, 2013. doi:10.1007/978-1-4614-5052-8
- [11] J. Tong, Z. D. Chen, and Y. Liao, “Measurement and modeling of humidity sensors,” dissertation, University of Kentucky, 2014
- [12] C.-Y. Lee and G.-B. Lee, “Humidity sensors: A Review,” Sensor Letters, vol. 3, no. 1, pp. 1–15, 2005. doi:10.1166/sl.2005.001.

- [13] J. Bao, “Graphene humidity sensor with gold nanoparticles,” thesis, Iowa State University, 2019.
- [14] H. Farahani, R. Wagiran, and M. Hamidon, “Humidity sensors principle, mechanism, and Fabrication Technologies: A comprehensive review,” *Sensors*, vol. 14, no. 5, pp. 7881–7939, 2014. doi:10.3390/s140507881.
- [15] “Humidity sensor what type should you choose?” ANDIVI, <https://www.andivi.com/humidity-sensor-what-type-should-you-choose/> (accessed Oct. 2, 2023).
- [16] “A Comparison of Relative Humidity Sensing Technologies HYGROMETRIX Applications Note 2004-2.”, 2004.
- [17] A. Tripathy, S. Pramanik, J. Cho, J. Santhosh, and N. Abu Osman, “Role of morphological structure, doping, and coating of different materials in the sensing characteristics of humidity sensors,” *Sensors*, vol. 14, no. 9, pp. 16343–16422, 2014. doi:10.3390/s140916343.
- [18] J. Fontes, “Humidity sensors,” *Sensor Technology Handbook*, pp. 271–284, 2005. doi:10.1016/b978-075067729-5/50052-5.
- [19] A. Salamat, Comparative study of resistive and capacitive humidity sensor, Jamia Milia Islamia, New Delhi, 2015.
- [20] R. Karthick, Dr. S. Babu, AR. Abirami, and S. K. Kalainila, Design of high sensitivity and fast response MEMS capacitive Humidity Sensor using COMSOL Multiphysics, 2011.
- [21] Andre, P., Kelly, N., Boreux, J., Lacote, P. & Adam, C., Different approaches for the simulation of an experimental building hosting a climate chamber devoted to artificial fog production, 8TH IBPSA Conference Eindhoven, pp47-54, 2003.
- [22] Brocken, H., Moisture Transport in brick masonry, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 1998.
- [23] Djunaedy E., External coupling between building energy simulation and computational fluid dynamics, PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, 2005.
- [24] Felsmann, C., Knabe, G. & Werdin, Simulation of domestic heating systems by integration of tansy in a MATLAB/Simulink model, 6TH Conference System Simulation in Buildings Liege, pp79-96,2003.

- [25] Houri Johari "Development of MEMS sensors for measurements of pressure, relative humidity, and temperature" master's Thesis, NEST – Nano Engineering, Science, and Technology, CHSLT- Center for Holographic Studies and Laser micro-mechatronics, Mechanical Engineering Department, Worcester Polytechnic Institute, 2003.
- [26] Jan Korvink, Oliver Paul" MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications " William Andrew publications, United Kingdom, 2005.
- [27] Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan and Osama O. Awadelkarim " Microsensors, MEMS and Smart Devices " Wiley, one edition, 2001.
- [28] Ji-song Han, Zhi-yong Tan, K. Sato, and M. Shikida, J. Micromechanics and Microengineering, vol. 14, "Three-Dimensional Interconnect Technology on a Flexible Polyimide Film", pp. 38-48, 2004.
- [29] K. Govardhan and Z.C. Alex "MEMS based Humidity Sensor" International conference on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, 2005.
- [30] A. Tetelin, C. Pellet, M. de Matos, and V. Conedera, "Computer-aided response time
- [31] optimization of capacitive humidity sensor," in *Proc. 3rd IEEE Sensor Conf.*, Vienna, Austria, pp. 111-114, Oct. 24-27, 2004.
- [32] A. Tetelin and C. Pellet, "Accurate model of the dynamic response of a capacitive humidity sensor," in *Proc. 2nd IEEE Sensors Conf.*, Toronto, ON, Canada, pp. 378-383, Oct.21-24, 2003.
- [33] Z. M. Rittersma, "Recent achievements in miniaturized humidity sensors-a review of transduction techniques," in *Sensors and Actuators*, pp. 196-210, 2002.
- [34] Burak Okcan and Tayfun Akin, A Low-Power Robust Humidity Sensor in a Standard CMOS Process" *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, VOL. 54, NO. 11, pp 3071-3079, NOVEMBER 2007.
- [35] Lazarus, N.; Bedair, S.S.; Lo, C.-C.; Fedder, G.K.; "CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Volume: 19 Issue: 1, pp 183 - 191, 2010.
- [36] COMSOL Multiphysics MEMS Module <http://www.comsol.com/products/mems/> accessed on 29.09.2011.
- [37] U. Kang and K. D. Wise, "High-speed capacitive humidity sensor with on-chip thermal reset," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 47, no. 4, pp. 702-710, 2000.

- [38] Georgi Dobrev Kolev, Krassimir Hristov Denishev, Georgi Hrostov Dobrikov, Velichka Jordanova Strijkova and Erintche Michailova Spassova, “Humidity Microsensor with Polyamide Sensitive Layer,” in Sozoplo, BULGARIA, 2008.
- [39] J. Crank, *The mathematics of diffusion*, Oxford University Press, Cambridge, 1975.
- [40] T. Kuroiwa, T. Miyagishi, A. Ito, M. Matsugushi, and Y. Sakai, “Thin-film Polysulfide-based Capacitive-type relative-humidity sensor,” *Sens. Actuators B*, Vol. B25, no. 1-3, pt. 2, pp. 692-695, 1995.
- [41] Wexler, A.(ed), “*Humidity and Moisture*,” in Reinhold, New York, 1965.
- [42] W. R. Vieth, *Diffusion in and through polymers*. Munich, Germany: Carl Hanser, 1991.
- [43] D. D. Denton, J. B. Camou, and S. D. Santeria, “Effects of the moisture uptake on the dielectric permittivity of polyamide films,” *Proc. 4th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*. Philadelphia, PA, Jun. 1985.
- [44] H. Pranjoto and D. D. Denton, “Moisture uptake of BisBenzcyclobutene (BCB) films for electronic packaging applications,” in *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 203, pp. 295-302, 1991.
- [45] IEEE Malaysia Section. Electron Devices Chapter, University Kembangan Malaysia. Institute of Microengineering and Nanoelectronics, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE): proceedings: 27-29 August 2014.
- [46] 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.
- [47] COMSOL. *COMSOL Multiphysics Reference Manual* [Online], https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf. [accessed: 21 September 2021].