

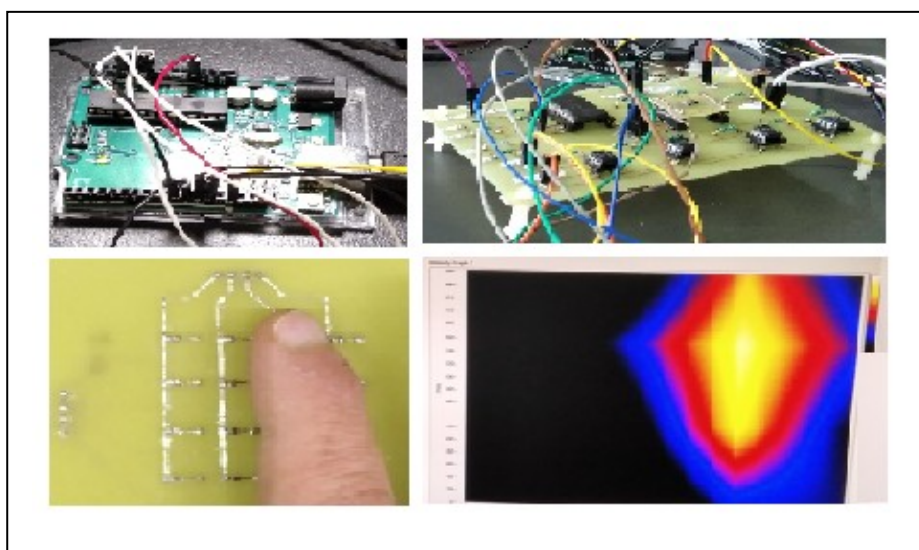
**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΥΦΥΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ»**

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

**Ανάπτυξη συστήματος δισδιάστατου αισθητήρα αφής**



---

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Νικήτας Σουβατζής, msciot18006

Επιβλέπων: Γρηγόριος Καλτσάς, Καθηγητής

**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2022**

---



# UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

---

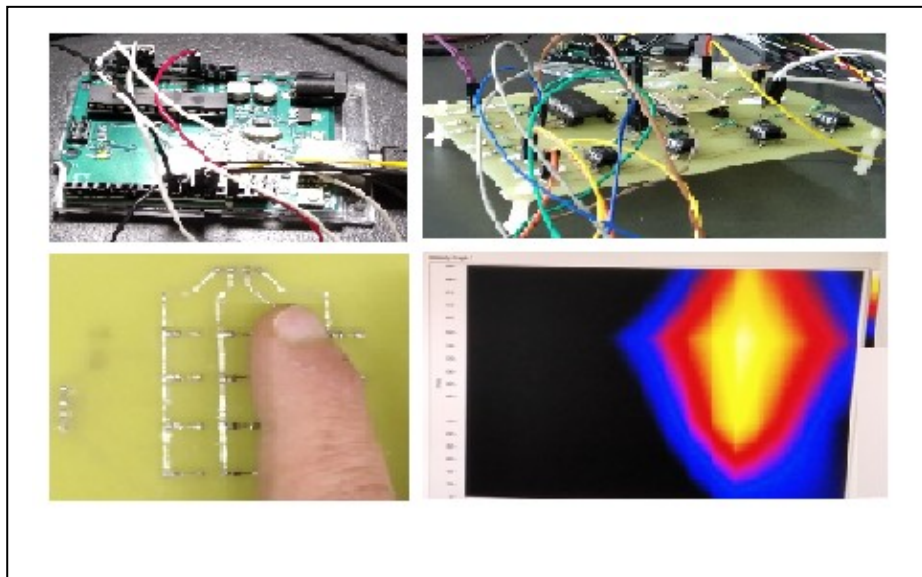
## Master of Science in “INTERNET of THINGS AND INTELLIGENT ENVIRONMENTS”

---

### MSc Thesis

---

#### Development of a two-dimensional tactile sensor



---

Student: Souvatzis Nikitas, msciot 18006

MSc Thesis Supervisor: Kaltsas Grigorios, Professor

**ATHENS-EGALEO, NOVEMBER 2022**

---

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Καλτσάς Γρηγόρης Καθηγητής (Επιβλέπων)	Κανδρής Ξενοφών - Διονύσιος Καθηγητής (Μέλος)	Πάτσης Γεώργιος Καθηγητής (Μέλος)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

## ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Σουβατζής Νικήτας, Νοέμβριος 2022

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

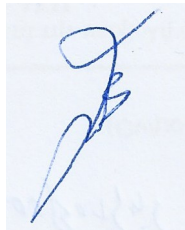
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Σουβατζής Νικήτας του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου msciot 18006, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

#### **δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



Σουβατζής Νικήτας

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός δισδιάστατου αισθητήρα αφής με χρήση μικροελεγκτή και λογισμικού LabVIEW. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκαν αρκετές τεχνολογίες που είχαν ως κεντρικό θέμα τους δισδιάστατους αισθητήρες αφής, και από όλες τις τεχνολογίες που έχουν δοκιμαστεί πειραματικά, επιλέχθηκε η χρήση αισθητήρα θερμοκρασίας/αφής με πίνακα θερμίστορ. Για την αξιοποίηση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ανάγνωσης που περιελάμβανε, αποκωδικοποιητή, πολυπλέκτη, τελεστικούς ενισχυτές, και διάφορες ωμικές αντιστάσεις. Μια σημαντική προσθήκη που δεν προϋπήρχε στην βιβλιογραφία που μελετήθηκε, είναι το κύκλωμα αντιστάθμισης που ο σκοπός ύπαρξης του είναι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και η αντιστάθμιση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του αισθητήρα αφής. Για τον έλεγχο του ηλεκτρονικού κυκλώματος αλλά και για την συλλογή των δεδομένων από τον αισθητήρα, την επεξεργασία, και την αποθήκευση τους, χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής AT mega328 της Atmel, δηλαδή ο μικροελεγκτής που βρίσκεται στην πολύ γνωστή αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO UNO μαζί με το λογισμικό ARDUINO IDE για τη δημιουργία, μεταγλώττιση, έλεγχο λαθών, και στη συνέχεια εκτέλεση του προγράμματος στον μικροελεγκτή. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LabVIEW για τη δημιουργία μιας διεπαφής μεταξύ αισθητήρα και της οθόνης ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η πειραματική διαδικασία στην οποία χρησιμοποιήθηκε ένα θερμικό στοιχείο μικρού μεγέθους (μικροθερμαντήρας), περιελάμβανε την μέτρηση της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα, τον υπολογισμό της επίδρασης του μικροθερμαντήρα στην επιφάνεια του αισθητήρα, καθώς και τον υπολογισμό της θερμικής αδράνειας του αισθητήρα. Στα συμπεράσματα που προέκυψαν προκύπτει ότι ο συγκεκριμένος αισθητήρας λόγω της ευαισθησίας του και της ταχείας αντίδρασης του στα απτικά ερεθίσματα αποτελεί μια ιδανική επιλογή για τη κατασκευή αισθητήρα αφής συνδυάζοντας την οικονομία στα υλικά και την πολύ μικρή κατανάλωση λόγω της απλότητας του κυκλώματος ανάγνωσης.

**ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ:** Αισθητήρας, Αφή, Ηλεκτρονική, ARDUINO, LabVIEW

## ABSTRACT

The subject of the dissertation is the development of a two-dimensional tactile sensor using a microcontroller and LabVIEW software. For this purpose, several technologies were studied regarding the two-dimensional tactile sensors, and from all the technologies that have been experimentally tested, the use of a temperature / tactile sensor with a thermistor panel was chosen. An electronic readout circuit was used to acquire and process the data, which incorporates a decoder, multiplexer, operational amplifiers, and various ohmic resistors. An important innovative addition, was the compensation circuit whose purpose is to calculate the ambient temperature and the temperature compensation on the surface of the tactile sensor. The controller ATmega328 from Atmel was used for the control of the electronic circuit but also for the collection of data from the sensor, as well as the processing, and the corresponding storage. The ATmega328 is the microcontroller located on the well-known ARDUINO UNO development board together with the ARDUINO IDE software which was used to create, compile, check for errors, and then run the implemented program. LabVIEW software was also used to create an interface between the sensor and the screen of a computer. The experimental procedure in which a small thermal element (microheater) was used focused on measuring the sensor resolution, calculating the effect of the microheater on the sensor surface, and calculating the thermal inertia of the sensor. In conclusion it appears that this sensor due to its sensitivity and rapid response to tactile stimuli is an ideal choice for the fabrication of a tactile sensor combining low cost and very low consumption due to the simplicity of the readout circuit.

**KEYWORDS:** ARDUINO, Electronics, LabVIEW, Sensor, Tactile

*Αφιερώνω τη διπλωματική εργασία μου στην οικογένεια μου, η οποία μου παρείχε τη στήριξη και την αμέριστη συμπαράσταση για να ολοκληρώσω όχι μόνο τη συγκεκριμένη εργασία αλλά και το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών στο σύνολό του.*

*Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κο Καλτσά Γρηγόριο, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και μου παρείχε τη πολύτιμη βοήθεια και τη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.*

*Σουβατζής Νικήτας  
Αιγάλεω, 2022*

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ-ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ-ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

2D/2d – 2 Dimensional

μA – Microamperes

μm – Micrometer

μH – Microheater

AC – Alternating Current

ADC – Analog to Digital Converter

API – Application Programming Interface

°C – Celsius

CVI – Cerebral Visual Impairment

DC – Direct Current

EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read Only Memory

GPIO – General Purpose Interface Bus

I – Current

I<sup>2</sup>C – Inter Integrated Circuit

IDE – Integration Development Environment

IR - Infra Red

LCD – Liquid Crystal Display

LED – Light Emitting Diode

LXI – Lan EXTension for Instrumentation

NTC – Negative Temperature Coefficient

Op Amp – Operational Amplifier

PCB – Printed Circuit Board

PTC – Positive Temperature Coefficient

PWM – Pulse Width Modulation

PXI – PCI EXTension for Instrumentation

R – Resistance

RCL – Resistor Capacitor Inductor

RTD – Resistance Temperature Detectors



SD – Secure Digital

SMD – Surface Mount Devices

SPI – Serial Peripheral Interface

SRAM – Static Random Access Memory

T – Temperature

UART – Universal Asynchronous Receiver Transmitter

USB – Universal Serial Bus

V – Voltage, Volt

VI – Virtual Terminal

VISA – Virtual Instrument Software Architecture

VSM – Virtual System Modeling

VXI - VME EXTension for Instrumentation

X – X axis

Y – Y axis

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	5
Εισαγωγή	13
1. Επισκόπηση του επιστημονικού πεδίου	17
1.1 Οι αισθητήρες	17
1.2 Ο αισθητήρας αφής	18
1.3 Κατηγορίες αισθητήρων αφής	20
1.3.1 Χωρητικοί αισθητήρες αφής (Capacitive tactile sensors)	20
1.3.2 Αισθητήρες αφής με πιεζοαντιστάσεις (Piezoresistive tactile sensors)	21
1.3.3 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες αφής (Piezoelectric tactile sensors)	22
1.3.4 Θερμοκρασιακοί αισθητήρες αφής (temperature tactile sensor)	23
1.3.5 Επαγωγικοί αισθητήρες αφής (Inductive tactile sensors)	26
1.3.6 Οπτικοί αισθητήρες αφής (Optical tactile sensors)	26
1.4 Θερμική απεικόνιση χαμηλού κόστους	27
1.5 Ηλεκτρονικά για ανάγνωση (read out electronics)	29
2. Ο δισδιάστατος αισθητήρας αφής με χρήση θερμίστορ	30
2.1 Το θερμίστορ ως στοιχείο ανίχνευσης της μεταβολής της θερμοκρασίας	30
2.2 Επιλογή της μεθόδου σάρωσης ενός πίνακα δισδιάστατου αισθητήρα	31
2.3 Χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την υλοποίηση ενός πίνακα δισδιάστατου αισθητήρα αντιστάσεων	33
2.3.1 Ακρίβεια μέτρησης	33
2.3.2 Ρυθμός ανάγνωσης	33
2.3.3 Μέγεθος πίνακα, περιοχή κάλυψης και χωρική ανάλυση	34
2.3.4 Ευκαμπτότητα (ή ευκαμψία)	34
2.3.5 Εύρος αντίστασης	35
2.3.6 Μέθοδος ανάλυσης προσεγγίσεων σάρωσης στους πίνακες αισθητήρων	35
2.4 Η μέθοδος ανάγνωσης που επιλέχτηκε για τον δισδιάστατο αισθητήρα	35

2.5	Το κύκλωμα αντιστάθμισης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος	38
3.	Η λειτουργία του δισδιάστατου αισθητήρα αφής με χρήση λογισμικού προσομοίωσης κυκλώματος	40
3.1	Το λογισμικό προσομοίωσης	40
3.2	Η προσομοίωση του κυκλώματος	41
4.	Η κατασκευή του κυκλώματος ανάγνωσης με χρήση μικροελεγκτή και διακριτών ηλεκτρονικών στοιχείων	48
4.1	Τα διακριτά ηλεκτρονικά και λοιπά στοιχεία του κυκλώματος	48
4.2	Το τυπωμένο κύκλωμα του δισδιάστατου αισθητήρα και του κυκλώματος ανάγνωσης	51
4.3	Η αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO UNO	54
5.	Το πρόγραμμα οδήγησης (firmware) του μικροελεγκτή	55
5.1	Το λογισμικό ARDUINO Software (IDE)	55
5.2	Το διάγραμμα ροής του προγράμματος οδήγησης (firmware) που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του δισδιάστατου αισθητήρα	57
5.3	Αποθήκευση των δεδομένων σε λογιστικό φύλλο εργασίας	59
6.	Απεικόνιση των δεδομένων σε Η/Υ με χρήση του λογισμικού LabVIEW	61
6.1	Το λογισμικό LabVIEW	61
6.2	Οι λειτουργίες του LabVIEW	62
6.3	Η λειτουργία του VI του δισδιάστατου αισθητήρα	63
	6.3.1. Η διεπαφή του VI με τον δισδιάστατο αισθητήρα με χρήση του API NI-VISA	63
	6.3.2 Η τοπολογία του VI	65
	6.3.3 Η λειτουργία του αισθητήρα αφής και η απεικόνιση της απόκρισης του αισθητήρα στο VI του LabVIEW	74
7.	Χαρακτηρισμός της διάταξης – Αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων	77
7.1	Το λογισμικό MATLAB	77
7.2	Ο μικροθερμαντήρας και η συσκευή XY linear stage	77
7.3	Μέτρηση της μεταβολής των τιμών αντιστάσεων των στοιχείων μιας γραμμής του δισδιάστατου πίνακα υπό την επίδραση του	

μικροθερμαντήρα, και σύγκριση με την αντίσταση του αισθητήρα αντιστάθμισης	79
7.4 Υπολογισμός της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα	82
7.5 Μέτρηση της θερμικής σταθεράς χρόνου θέρμανσης (καθόδου) και ψύξης (ανόδου) του αισθητήρα για διαφορετικές αποστάσεις του μικροθερμαντήρα σε σχέση με τον αισθητήρα	83
7.6 Διαγράμματα των μετρήσεων της τιμής της ωμικής αντίστασης ενός στοιχείου του δισδιάστατου αισθητήρα αφής και χρήση της μέσης τιμής	86
8. Συμπεράσματα – Προτάσεις	92
Παράρτημα	

### Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας

---

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός δισδιάστατου αισθητήρα αφής με χρήση μικροελεγκτή. Για τη κατασκευή του αισθητήρα αφής χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας 16 θερμίστορ (4x4) τύπου NTC. Για την ανάγνωση των δεδομένων από τον αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ανάγνωσης που περιελάμβανε τελεστικούς ενισχυτές, πολυπλέκτη, αποκωδικοποιητή και ωμικές αντιστάσεις. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένα κύκλωμα αντιστάθμισης για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και την αντιστάθμιση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του αισθητήρα αφής. Ενώ για τον έλεγχο του ηλεκτρονικού κυκλώματος, την συλλογή, την επεξεργασία, και την αποθήκευση των δεδομένων από τον αισθητήρα, χρησιμοποιήθηκε η αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO UNO μαζί με το λογισμικό ARDUINO IDE. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LabVIEW για τη δημιουργία του περιβάλλοντος διεπαφής με τον χρήστη.

Οι αισθητήρες αφής, είναι μια κατηγορία αισθητήρων που στηρίζουν τη λειτουργία τους στην πληροφορία που λαμβάνουμε από το περιβάλλον μέσω της απτικής διέγερσης, δηλαδή μέσω της διαδικασίας κατά την οποία ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται την απτική επαφή με κάποιο σώμα, που βρίσκεται στο ίδιο περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται και ο αισθητήρας [1]. Η σημασία των αισθητήρων αφής είναι κατά κανόνα έκδηλη σε εφαρμογές όπου άλλες μέθοδοι ανίχνευσης, όπως για παράδειγμα η τεχνική όραση, μπορεί να μην προσφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Αν και γίνεται σημαντική προσπάθεια τουλάχιστον εδώ και τέσσερις δεκαετίες [2] να αναπτυχθούν ικανοποιητικοί “έξυπνοι” αισθητήρες αφής που να παρέχουν ανατροφοδότηση που προσεγγίζει την ανθρώπινη αίσθηση αφής, τα αποτελέσματα που παράγονται είναι ελπιδοφόρα και οι αισθητήρες που αναπτύσσονται εξελίσσονται συνέχεια, εντούτοις, υπάρχει ακόμα απόσταση που πρέπει να καλυφθεί σε σχέση με το προσδοκώμενο αποτέλεσμα.

Οι αισθητήρες αφής, σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες αισθητήρων (π.χ. θερμοκρασίας, υγρασίας, θέσης κλπ) παρουσιάζουν αυξημένο βαθμό δυσκολίας κατά την ανάπτυξη και αξιοποίησή τους, διότι τα δεδομένα που συλλέγουν, προκύπτουν από χαρακτηριστικά και φυσικές ιδιότητες των οποίων οι τιμές μεταβάλλονται περισσότερο, σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από χαρακτηριστικά και ιδιότητες που χρησιμοποιούνται από άλλες κατηγορίες αισθητήρων [3]. Επίσης, τα σήματα που προέρχονται από τους αισθητήρες αφής μπορεί να παρουσιάζουν πολύ “θόρυβο”, χαμηλή διακριτική ικανότητα, να περιέχουν άσχετες πληροφορίες και γενικά να παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα [4].

Επομένως, ένας αποτελεσματικός αισθητήρας αφής θα πρέπει να διαθέτει προηγμένα χαρακτηριστικά τα οποία θα προσφέρουν υψηλή ακρίβεια, υψηλή διακριτική ικανότητα, ευαισθησία, όσο το δυνατόν γραμμική συμπεριφορά, ελάχιστο σφάλμα κατά τη διαδικασία της μέτρησης, καθώς και ένα επαρκές εύρος μέσα στο οποίο ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει απρόσκοπτα. Επίσης, ένας αποτελεσματικός αισθητήρας αφής θα πρέπει να συνοδεύεται από “έξυπνα” εργαλεία επεξεργασίας του σήματος που ο αισθητήρας παράγει, ικανά να ερμηνεύουν ορθά τα δεδομένα, να μεταβιβάζουν σωστά (όλη) την πληροφορία, ακόμα και να παίρνουν αποφάσεις που θα βελτιώνουν το έργο που επιτελεί ο αισθητήρας. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να δημιουργηθεί ένας δισδιάστατος αισθητήρας αφής με σχετικά φθηνά υλικά, και με χαμηλή πολυπλοκότητα, ο οποίος θα συνοδεύεται από κατάλληλα εργαλεία επεξεργασίας του σήματος, θα έχει χαμηλό θόρυβο, υψηλή ακρίβεια, υψηλή διακριτική ικανότητα και χαμηλή θερμική αδράνεια. Επίσης, θα έχει μικρή κατανάλωση, και δεν θα καταλαμβάνει μεγάλο χώρο.

Στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας γίνεται μια επισκόπηση του επιστημονικού πεδίου, όπου υπάρχει μια ενδελεχής αναφορά στους αισθητήρες και ειδικότερα στους αισθητήρες αφής και τις διάφορες κατηγορίες τους. Επίσης, στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες μέθοδοι θερμικής απεικόνισης και γίνεται αναφορά στη δυνατότητα που υπάρχει να χρησιμοποιηθεί θερμική απεικόνιση με χαμηλό κόστος. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στα ηλεκτρονικά για ανάγνωση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος θερμικής απεικόνισης με χρήση ενός δισδιάστατου αισθητήρα αφής με θερμίστορ. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η χρήση του θερμίστορ ως στοιχείο ανίχνευσης της μεταβολής της θερμοκρασίας, αλλά και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τη σάρωση ενός δισδιάστατου πλέγματος αισθητήρων. Επίσης, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την υλοποίηση μιας τέτοιας διάταξης. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, γίνεται αναφορά στη μέθοδο σάρωσης που επιλέχτηκε για τον δισδιάστατο αισθητήρα αφής, καθώς και στο κύκλωμα αντιστάθμισης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή της λειτουργίας του δισδιάστατου αισθητήρα αφής. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται το λογισμικό προσομοίωσης Proteus, τα βασικά χαρακτηριστικά καθώς και οι δυνατότητες που έχει αυτό το δημοφιλές λογισμικό προσομοίωσης. Επίσης, στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση της προσομοίωσης του κυκλώματος ανάγνωσης του δισδιάστατου αισθητήρα αφής με χρήση του Proteus [5].

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη κατασκευή του κυκλώματος ανάγνωσης του δισδιάστατου αισθητήρα αφής, με χρήση μικροελεγκτή και διακριτών ηλεκτρονικών στοιχείων. Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και μια επίδειξη των τυπωμένων κυκλωμάτων τα οποία σχεδιάστηκαν με χρήση του λογισμικού Proteus. Επίσης, παρουσιάζεται η αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO UNO.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθεται το πρόγραμμα οδήγησης (firmware) του μικροελεγκτή. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στο λογισμικό ARDUINO Software (IDE) μέσω του οποίου ελέγχεται για λάθη, και στη συνέχεια αποθηκεύεται το πρόγραμμα οδήγησης στον μικροελεγκτή του ARDUINO, και μετά παρατίθεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος οδήγησης του μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται για το κύκλωμα ανάγνωσης του δισδιάστατου αισθητήρα. Στο τέλος, γίνεται αναφορά στη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των δεδομένων σε λογιστικό φύλλο εργασίας.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση των δεδομένων στην οθόνη ενός Η/Υ με χρήση του λογισμικού LabVIEW. Γίνεται αναφορά στις λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά του λογισμικού LabVIEW, καθώς και στο API – VISA μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διεπαφή του Η/Υ με τον δισδιάστατο αισθητήρα. Επίσης, παρουσιάζεται η τοπολογία του Virtual Instrument (VI), μέσω του οποίου γίνεται η απεικόνιση της απόκρισης του αισθητήρα στην οθόνη του Η/Υ. Στο τέλος, παραθέτονται μερικές εικόνες με τη λειτουργία και χρήση του αισθητήρα αφής και την απεικόνιση της απόκρισης του αισθητήρα στην οθόνη του Η/Υ.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται χαρακτηρισμός της διάταξης και αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, γίνεται παρουσίαση του λογισμικού MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων και των απαραίτητων διαγραμμάτων, καθώς και του μικροθερμαντήρα αλλά και της συσκευής XY linear stage που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Επίσης, γίνεται αναλυτική παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας, δηλαδή της μέτρησης της μεταβολής των τιμών αντιστάσεων υπό την επίδραση του μικροθερμαντήρα και σύγκριση με την αντίσταση του αισθητήρα αντιστάθμισης, του υπολογισμού της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα, της μέτρησης της θερμικής σταθεράς χρόνου θέρμανσης και ψύξης του αισθητήρα κ.λπ.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη πειραματική διαδικασία, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και μελλοντικές υλοποιήσεις.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Επισκόπηση του επιστημονικού πεδίου

---

### 1.1 Οι αισθητήρες

Οι αισθητήρες είναι συσκευές ή τμήματα συσκευών, των οποίων ο σκοπός είναι αφενός να ανιχνεύουν τις μεταβολές κάποιων φυσικών μεγεθών (ή κάποιων φυσικών ιδιοτήτων) που συνδέονται με συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν, και αφετέρου να παράγουν μια έξοδο, μέσω της οποίας θα γίνει μεταφορά και στη συνέχεια αξιοποίηση της πληροφορίας που ανιχνεύτηκε από κατάλληλα όργανα.

Οι αισθητήρες είναι από τα πλέον χρήσιμα τεχνολογικά “εργαλεία” που έχει επινοήσει ο άνθρωπος, και για αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως εδώ και δεκαετίες με πολλούς και ποικίλους τρόπους, αφού τους συναντούμε τόσο σε αντικείμενα της καθημερινότητας όσο και σε πολύπλοκες συσκευές [6]. Μπορούμε να τους συναντήσουμε μέσα σε ένα παιδικό παιχνίδι, σε μια οικιακή συσκευή, σε ένα αυτοκίνητο, αλλά μπορούμε να τους συναντήσουμε και σε έναν mainframe υπολογιστή, σε ένα ρομποτικό σύστημα, σε ένα διαστημικό σκάφος κ.λπ. Είναι τόσες πολλές και σημαντικές οι χρήσεις των αισθητήρων, για αυτό και αναντίρρητα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι αναρίθμητων τεχνολογικών εφαρμογών, και δεν θα ήταν υπερβολή να ειπωθεί πως χωρίς τη χρήση τους, θα ήταν αδύνατον ο άνθρωπος να φτάσει σε αυτό το υψηλό τεχνολογικό επίπεδο που έχει φτάσει σήμερα.

Οι αισθητήρες ταξινομούνται κατά κύριο λόγο με βάση το υπο-ανίχνευση μέγεθος μέσω του οποίου λειτουργεί ο αισθητήρας. Ο αισθητήρας διαθέτει κάποια κατάλληλη ιδιότητα η οποία επηρεάζεται από τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του φυσικού μεγέθους το οποίο είναι υπό-ανίχνευση, μέσω της οποίας ιδιότητας γίνεται αντιληπτή η μεταβολή.

Για αυτό και υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων σχεδόν όσα και τα φυσικά μεγέθη. Εκτός από το υπο-ανίχνευση μέγεθος, οι αισθητήρες μπορεί να ταξινομηθούν με βάση την αρχή λειτουργίας (π.χ. θερμικοί, μηχανικοί, οπτικοί κ.λπ.) Υπάρχουν αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, μετατόπισης, δύναμης, αφής, έντασης του φωτός, ροής (υγρών ή αερίων), τάσης, έντασης ρεύματος, πίεσης, ήχου, ροπής, ατμοσφαιρικών ρύπων, μαγνητικού πεδίου κ.α.

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του αισθητήρα, είναι μετρήσιμα χαρακτηριστικά της απόδοσης ενός αισθητήρα σε σχέση με το έργο που επιτελεί. Υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά λειτουργίας με πιο κύρια: Την ακρίβεια, δηλαδή την εγγύτητα που έχει η τιμή εξόδου σε σχέση με τη τιμή εισόδου, την διακριτική ικανότητα, δηλαδή την μικρότερη ποσοτικά μεταβολή του σχετικού φυσικού μεγέθους ή ιδιότητας που μπορεί να ανιχνευτεί από τον αισθητήρα, την γραμμικότητα, το σφάλμα, δηλαδή την διαφορά που υπάρχει μεταξύ της μετρούμενης τιμής εισόδου σε σχέση με τη πραγματική τιμή εισόδου, την ευαισθησία, το εύρος, δηλαδή τα όρια εντός των οποίων η συσκευή λειτουργεί σωστά [1] κ.α.

## 1.2 Ο αισθητήρας αφής

Η αίσθηση της αφής είναι μια σημαντική αίσθηση διότι μέσα από αυτή, όχι μόνο αντιλαμβανόμαστε (εν μέρει) το κοντινό περιβάλλον στο οποίο βρισκόμαστε, αλλά ταυτόχρονα μπορούμε να αλληλεπιδρούμε με κινητά ή ακίνητα αντικείμενα που βρίσκονται σε αυτό το περιβάλλον. Δεδομένης της σημασίας την οποία έχει η αίσθηση της αφής στη καθημερινή ζωή, οι επιστήμονες προσπαθούν να κατανοήσουν αυτή τη λειτουργία και να αναπτύξουν συσκευές που στηρίζουν τη λειτουργία τους στην αίσθηση της αφής. Οι αισθητήρες αφής είναι μια κατηγορία συσκευών που στηρίζουν τη λειτουργία τους, στην πληροφορία που λαμβάνουμε από το περιβάλλον μέσω της απτικής διέγερσης, δηλαδή μέσω της διαδικασίας κατά την οποία ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται την απτική επαφή με κάποιο σώμα, που βρίσκεται στο ίδιο περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται και ο αισθητήρας.

Μερικά από τα φυσικά μεγέθη των οποίων τα φυσικά ή μηχανικά χαρακτηριστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από έναν αισθητήρα αφής είναι: Η θερμοκρασία, η πίεση, η δόνηση, η υφή, η ροπή, το σχήμα κ.λπ. Η πίεση και η ροπή, αν και δεν ταξινομούνται στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την αίσθηση της αφής, εντούτοις, επειδή συνήθως αποκτώνται μέσω της διεργασίας αφής μπορούν να ταξινομηθούν στις παραμέτρους αφής. Η σημασία των αισθητήρων αφής είναι κατά κανόνα έκδηλη, σε εφαρμογές όπου άλλες μέθοδοι ανίχνευσης δεν επιφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχει επαρκής χώρος για να αναπτυχθούν και να χρησιμοποιηθούν αυτές οι μέθοδοι. Αν και οι αισθητήρες αφής που αναπτύσσονται εξελίσσονται συνέχεια, και τα βήματα προόδου σε αυτόν τον τομέα είναι σημαντικά, εντούτοις, θα πρέπει να γίνουν επιπλέον βήματα για να προκύψει το προσδοκώμενο αποτέλεσμα.

Τις τελευταίες δεκαετίες για την ανάπτυξη προηγμένων αισθητήρων αφής έχουν δοκιμαστεί και χρησιμοποιηθεί νέα υλικά καθώς και νέες τεχνικές μεταγωγής της πληροφορίας [7]. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι αισθητήρες αφής είναι μια κατηγορία αισθητήρων με πολλές υποκατηγορίες, στις οποίες μπορούμε να συναντήσουμε απλούς αισθητήρες αφής που π.χ. αντιλαμβάνονται τη θέση/σημεία επαφής, καθώς και πολύπλοκους αισθητήρες αφής, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση επιφανειακών ιδιοτήτων των σωμάτων με τα οποία έρχεται σε επαφή ο αισθητήρας, ιδιότητες και χαρακτηριστικά όπως η δυσκαμψία, η τραχύτητα (υφή) και η θερμοκρασία [8].

Μερικές από τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι αισθητήρες αφής σε σύγκριση με άλλους τύπους αισθητήρων, είναι ο μεγάλος βαθμός δυσκολίας ανάπτυξης, αφενός διότι για την ανάπτυξη ενός αισθητήρα αφής μπορεί να απαιτηθεί αυξημένη πολυπλοκότητα, και αφετέρου διότι τα δεδομένα στα οποία στηρίζουν τη λειτουργία τους σχετίζονται με χαρακτηριστικά και φυσικές ιδιότητες, των οποίων οι τιμές μεταβάλλονται περισσότερο σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά και ιδιότητες άλλων αισθητήρων. Επίσης, μπορεί να μην διαθέτουν επαρκή διακριτική ικανότητα, όπως επίσης τα σήματα που καλούνται να διαχειριστούν οι αισθητήρες αφής μπορεί να περιέχουν αυξημένο "θόρυβο", ή να περιέχουν άσχετες πληροφορίες.

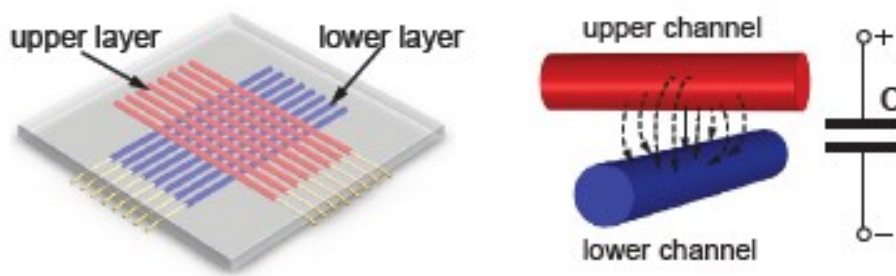
Επομένως, ένας αισθητήρας αφής για να είναι βέλτιστος και αποτελεσματικός, θα πρέπει να διαθέτει υψηλή διακριτική ικανότητα, επαρκή ευαισθησία, μεγάλη ακρίβεια, να παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά σε ένα επαρκές εύρος μέσα στο οποίο θα καλεστεί να λειτουργήσει ο αισθητήρας, με ένα ελάχιστο - όσο το δυνατόν - σφάλμα μέτρησης. Επίσης, μεγάλη σημασία για την ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία του αισθητήρα, έχουν τα εργαλεία επεξεργασίας και διαχείρισης των σημάτων που προκύπτουν από τον αισθητήρα, τα οποία θα πρέπει αφενός να μεταφέρουν γρήγορα και χωρίς απώλειες τα σήματα αυτά στις μονάδες που ακολουθούν (π.χ. επεξεργαστές), και αφετέρου - αν είναι εφικτό - να λαμβάνουν αποφάσεις που θα μεγιστοποιούν την αποτελεσματικότητα του αισθητήρα αφής.

### 1.3 Κατηγορίες αισθητήρων αφής

Στην ερευνητική διαδικασία, οι πιο συνήθεις τεχνικές για τη κατασκευή αισθητήρων αφής χρησιμοποιούν χωρητικά στοιχεία, επαγωγικά στοιχεία, πιεζοαντιστάσεις, θερμίστορες, μαγνητικές διατάξεις, καθώς και οπτικές διατάξεις κ.α. [9] Κάθε τεχνική έχει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Παρακάτω βλέπουμε τις κυριότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται.

#### 1.3.1 Χωρητικοί αισθητήρες αφής (Capacitive tactile sensors)

Ένας στοιχειώδης χωρητικός αισθητήρας αφής αποτελείται από δύο αγώγιμες επιφάνειες μεταξύ των οποίων υπάρχει κάποιο διηλεκτρικό υλικό, μια δομή που παραπέμπει σε ένα πυκνωτή. Η χωρητική αίσθηση της αφής προκύπτει από τη μεταβολή της χωρητικότητας του αισθητήρα, η οποία με τη σειρά της προκύπτει από τη μεταβολή της γεωμετρίας του στοιχειώδους χωρητικού αισθητήρα, και πιο ειδικά της απόστασης μεταξύ των αγώγιμων επιφανειών ως συνέπεια της απτικής επαφής. Οι χωρητικοί αισθητήρες αφής εμφανίζουν μεγάλο δυναμικό εύρος, καλή απόκριση συχνότητας και υψηλή χωρική ανάλυση [10]. Εκτός από τη μεταβολή της γεωμετρίας του στοιχειώδους χωρητικού αισθητήρα αφής, ένας ακόμα τρόπος για να ανιχνευθεί η αφή μέσω της μεταβολής της χωρητικότητας, είναι χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλα διαμορφωμένο κύκλωμα ταλάντωσης RCL [11].

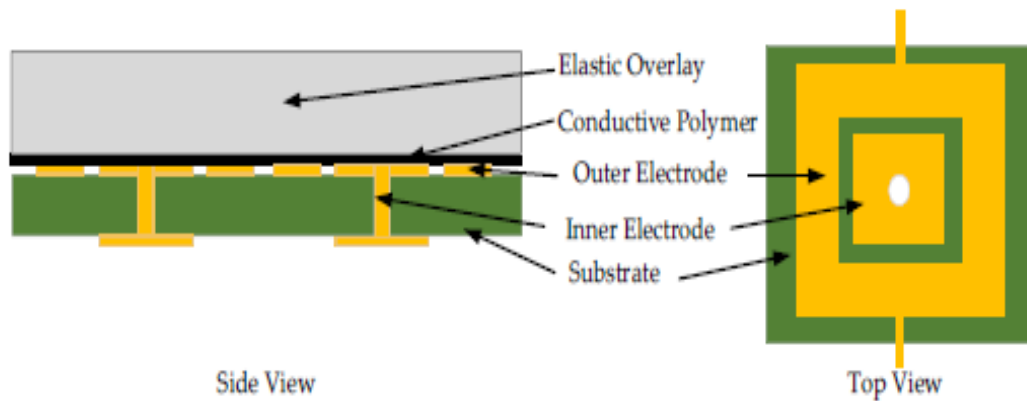


Σχήμα 1: Χωρητικός αισθητήρας αφής [12]

### 1.3.2 Αισθητήρες αφής με πιεζοαντιστάσεις (Piezoresistive tactile sensors)

Στους αισθητήρες αφής που χρησιμοποιούν πιεζοαντιστάσεις, η αίσθηση της αφής προκύπτει από τη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός στοιχείου, ως αποτέλεσμα της (μηχανικής) πίεσης που ασκείται σε αυτό το στοιχείο. Με βάση τον νόμο του Ohm, όταν στη σχέση  $V = I \cdot R$  η τάση  $V$  μεταβάλλεται, αυτό σημαίνει πως είτε το ρεύμα  $I$ , είτε η αντίσταση  $R$ , μεταβάλλεται αναλογικά. Με σταθερό το ρεύμα  $I$ , η μεταβολή της τάσης  $V$  σημαίνει ανάλογη μεταβολή της αντίστασης  $R$ . Το στοιχείο της πιεζοαντίστασης συνηθώς κατασκευάζεται από καουτσούκ, ή κάποιο ελαστομερές, ή κάποιο άλλο υλικό που είναι ευαίσθητο στη πίεση.

Οι αισθητήρες αφής αυτού του τύπου απαιτούν λιγότερα ηλεκτρονικά, καθώς η αλλαγή στην αντίσταση μπορεί εύκολα να “ποσοτικοποιηθεί” και επομένως είναι πιο απλή η διαδικασία ανάπτυξης και ενσωμάτωσης των απαραίτητων ηλεκτρονικών στοιχείων στη διάταξη του αισθητήρα. Επειδή οι πιεζοαντιστάσεις είναι λιγότερο ευαίσθητες στο θόρυβο, λειτουργούν καλά σε ένα πλέγμα δηλαδή σε ένα πίνακα πιεζοαντιστάσεων, καθώς το φαινόμενο παρεμβολής είναι σημαντικά περιορισμένο. Στα μειονεκτήματα των αισθητήρων αφής με πιεζοαντιστάσεις, είναι ότι παρουσιάζουν αυξημένη υστέρηση δηλαδή διαφορά στην έξοδο όταν αντιστρέφεται η κατεύθυνση της μεταβολής εισόδου. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε απόκριση χαμηλότερης συχνότητας, για αυτό και ο αισθητήρας αφής με πιεζοαντιστάσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για δυναμικές μετρήσεις με περιορισμένη χωρική ανάλυση [13].

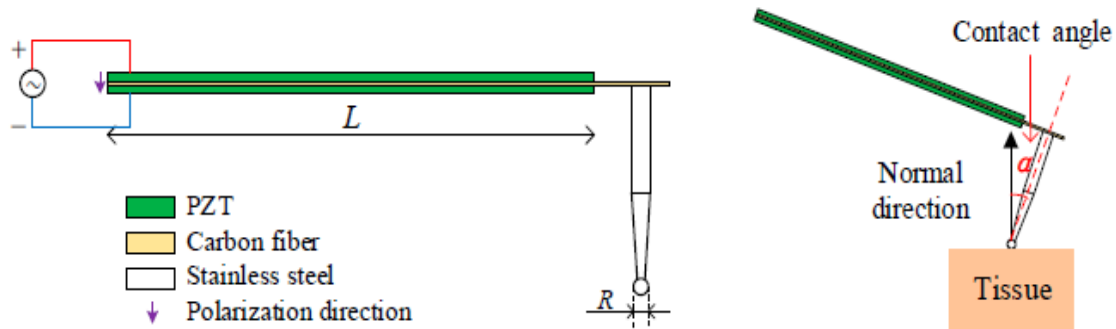


Σχήμα 2: Αισθητήρας αφής με πιεζοαντίσταση [14]

### 1.3.3 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες αφής (Piezoelectric tactile sensors)

Οι αισθητήρες αφής που χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά υλικά, χρησιμοποιούν ειδικά διαμορφωμένους κρυστάλλους ή κάποια κεραμικά, τα οποία παράγουν διαφορά δυναμικού όταν το κρυσταλλικό πλέγμα τους παραμορφώνεται εξαιτίας της εφαρμογής (μηχανικής) πίεσης [15]. Η ευαισθησία που παρουσιάζει το κρυσταλλικό πλέγμα όταν ασκείται πάνω του πίεση, εξαρτάται από κάποιους παράγοντες όπως η δομή του. Ανάλογα τη δομή αλλά και την κατεύθυνση την οποία έχει το κρυσταλλικό πλέγμα, αυτό μεταφράζεται σε διαφορετική ευαισθησία σε σχέση με τις δυνάμεις που ασκούνται από διαφορετικές κατευθύνσεις.

Οι αισθητήρες αφής που χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά υλικά, παρουσιάζουν καλή απόκριση υψηλής συχνότητας και αυτό τους καθιστά ιδανικούς για τη μέτρηση κραδασμών. Όμως εξαιτίας της μεγάλης εσωτερικής αντίστασης τους, δεν είναι ιδανική επιλογή για τη μέτρηση στατικών δυνάμεων. Ένα ακόμα πράγμα που πρέπει να προβλεφθεί κατά τη σχεδίαση ενός αισθητήρα που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικά υλικά, είναι πως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η σύνθετη αντίσταση εισόδου των ηλεκτρονικών διεπαφών, καθώς επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την απόκριση του αισθητήρα [16].



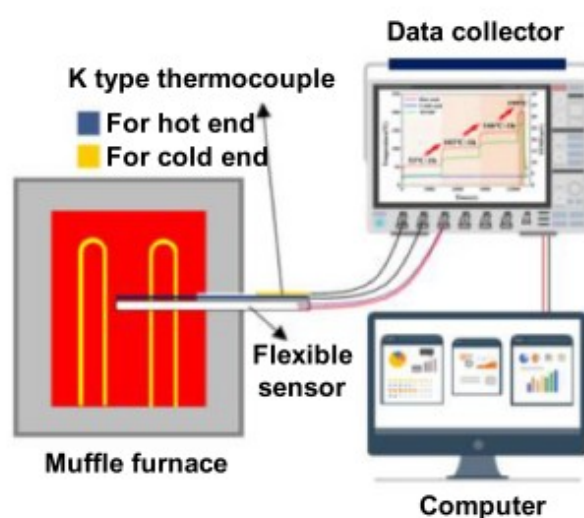
Σχήμα 3: Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας αφής [17]

#### 1.3.4 Θερμοκρασιακοί αισθητήρες αφής (temperature tactile sensor)

Οι αισθητήρες αφής που έχουν ως αρχή λειτουργίας την μεταβολή της θερμοκρασίας, βασίζονται σε διάφορα φυσικά χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, όπως η ηλεκτρική αντίσταση, η ογκομετρική διαστολή, η πίεση των αερίων, καθώς και οι φασματικές ιδιότητες [18]. Αναλόγως του χαρακτηριστικού που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της μεταβολής της θερμοκρασίας, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές και είδη αισθητήρων.

Μερικά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη κατηγορία αισθητήρων, είναι τα θερμοζεύγη, τα θερμίστορες καθώς και οι ανιχνευτές θερμοκρασίας τύπου αντίστασης (Resistance Temperature Detectors RTDs). Για να προσδιορίσουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας, οι RTDs χρησιμοποιούν τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του υλικού τους από την ηλεκτρική αντίσταση. Σε αυτά τα υλικά, μια μεταβολή της αντίστασης μεταφράζεται σε μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι RTDs κατασκευάζονται από καθαρά μέταλλα. Ο συγκεκριμένος τύπος αισθητήρων θερμοκρασίας παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια, γραμμικότητα, καθώς και γρήγορη απόκριση για αυτό και είναι καλύτερη επιλογή σε σχέση με τα θερμοζεύγη. Οι RTDs έχουν ένα ακόμα πλεονέκτημα, ότι μπορούν να έχουν μικρό πάχος όταν τοποθετηθούν σε υπόστρωμα με τη μορφή λεπτού φιλμ [19].

Το θερμοζεύγος είναι ένας τύπος αισθητήρα που αποτελείται από δύο στοιχεία, που μπορεί να είναι είτε αγωγοί, είτε ημιαγωγοί, είτε συνδυασμός αυτών, και στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο Seebeck σύμφωνα με το οποίο, όταν εφαρμοστεί μια θερμοκρασιακή βαθμίδα μεταξύ των δύο άκρων των στοιχείων, τότε σχηματίζεται μια θερμική τάση μεταξύ των στοιχείων η οποία προκαλεί μια ροή ηλεκτρονίων από το θερμό άκρο στο ψυχρό, ένα φαινόμενο που ονομάζεται θερμοηλεκτρικό φαινόμενο Seebeck [20]. Τα θερμοζεύγη έχουν περιορισμένη χρήση ως φορατοί αισθητήρες, παρόλα αυτά είναι ανθεκτικά στοιχεία, και έχουν χαμηλό κόστος αλλά είναι περισσότερο κατάλληλα για εφαρμογές όπου η θερμοκρασία είναι σχετικά σταθερή.



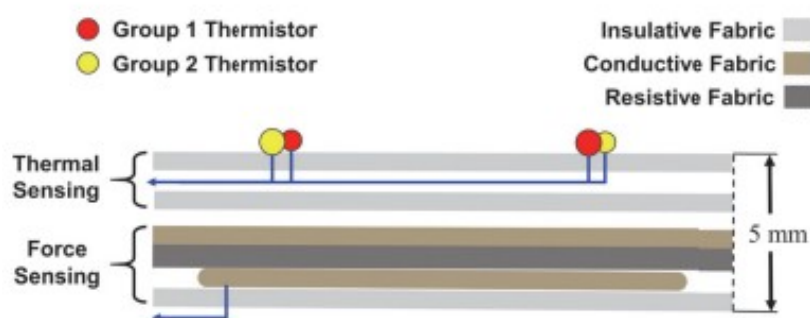
Σχήμα 4: Η λειτουργία ενός αισθητήρα με θερμοζεύγος [21]

Τα θερμίστορ, είναι στοιχεία που είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στη μεταβολή της θερμοκρασίας, καθώς είναι κατασκευασμένα από υλικά που είναι ικανά να αντιληφθούν και τις παραμικρές μεταβολές θερμοκρασίας γύρω τους. Υπάρχουν δύο κατηγορίες θερμίστορ, τα θερμίστορ αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή (NTC Negative Temperature Coefficient) των οποίων η αντίσταση μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, και τα θερμίστορ θετικού θερμοκρασιακού συντελεστή (PTC Positive Temperature Coefficient) των οποίων η αντίσταση αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.



Τα θερμίστορ NTC χρησιμοποιούνται για εφαρμογές αισθητήρων θερμοκρασίας, ή για προστασία κυκλωμάτων συνδεδεμένα παράλληλα με ένα κύκλωμα με σκοπό να περιορίσουν το ρεύμα που το διαρρέει. Αντίστοιχα τα θερμίστορ PTC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές μεταγωγής, ή για προστασία κυκλωμάτων συνδεδεμένα σε σειρά με ένα κύκλωμα με σκοπό να προστατέψουν το κύκλωμα σε περίπτωση υπερρευμάτων. Τα θερμίστορ κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους και σχήματα. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, για να σχηματιστεί το πλέγμα του δισδιάστατου αισθητήρα αφής επιλέχθηκε το θερμίστορ NTC.

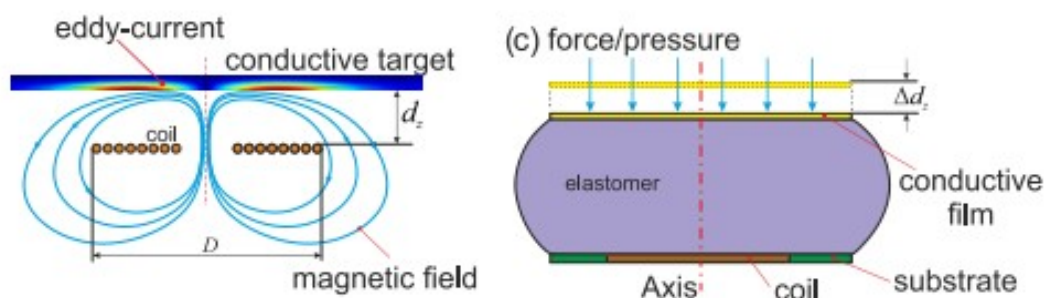
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι κεραμικά ή πολυμερή, ενώ τα σχήματα που τους δίνονται συνήθως είναι ράβδοι, δίσκοι και σφαιρίδια, τα οποία στη συνέχεια τοποθετούνται σε πλαστικό ή γυαλί. Τα θερμίστορ σφαιριδίων είναι τα μικρότερα σε μέγεθος [22]. Τα θερμίστορ επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας συνήθως από  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , σε αντίθεση με τις RTDs που είναι αποδοτικότερες σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες [23]. Η αίσθηση της αφής σε ένα θερμίστορ επιτυγχάνεται έμμεσα, αρχικά μέσω της ανίχνευσης της μεταβολής της θερμοκρασίας εξαιτίας της απτικής επαφής και στην συνέχεια την μεταβολή της αντίστασης που προκύπτει λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5: Πολυτροπικός αισθητήρας αφής που χρησιμοποιεί thermistors για την ανίχνευση της θερμοκρασίας στο σημείο επαφής [24]

### 1.3.5 Επαγωγικοί αισθητήρες αφής (Inductive tactile sensors)

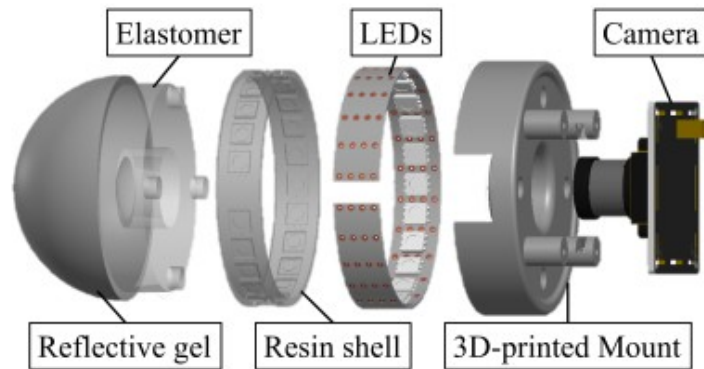
Οι επαγωγικοί αισθητήρες αφής στηρίζουν τη λειτουργία τους, στο φαινόμενο της επαγωγής μεταξύ δύο πηνίων λόγω της ύπαρξης μαγνητικού πεδίου. Το πρωτεύων πηνίο προκαλεί το μαγνητικό πεδίο όταν για παράδειγμα υπάρχει κίνηση του μεταλλικού πυρήνα ή αλλαγή του μήκους του, διαμορφώνοντας το πλάτος και τη φάση της τάσης εξ επαγωγής, διεγείροντας με αυτό τον τρόπο το δευτερεύων πηνίο το οποίο ανιχνεύει την ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Οι επαγωγικοί αισθητήρες αφής έχουν μεγάλο δυναμικό εύρος, αλλά λόγω της στιβαρής και ογκώδους κατασκευής τους έχουν χαμηλή χωρική ανάλυση. Επίσης, λόγω του ότι αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν εναλλασσόμενη τάση απαιτούν πιο πολύπλοκα ηλεκτρονικά σε σχέση με άλλους αισθητήρες αφής, για να αποδιαμορφώσουν το εναλλασσόμενο πλάτος του σήματος [25].



Σχήμα 6: Επαγωγικός αισθητήρας αφής [26]

### 1.3.6 Οπτικοί αισθητήρες αφής (Optical tactile sensors)

Οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν μια πηγή φωτός, ένα μέσο μεταγωγής και έναν φωτοανιχνευτή, π.χ. μια φωτοδίοδο ή μια κάμερα. Η ανίχνευση της οπτικής επαφής γίνεται με επεξεργασία του οπτικού σήματος, βάση της διαμόρφωσης του μήκους κύματος, της φάσης, της πόλωσης ή της έντασης του κύματος [27]. Οι οπτικοί αισθητήρες είναι απρόσβλητοι από τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, έχουν υψηλή χωρική ανάλυση και υψηλό δυναμικό εύρος. Παρόλα αυτά έχουν και μειονεκτήματα, αφού συνήθως έχουν μεγάλο μέγεθος και ειδικά στη περίπτωση όπου γίνεται χρήση μικροκάμερας απαιτούν σημαντική επεξεργαστική ισχύ.



Σχήμα 7: Οπτικός αισθητήρας αφής [28]

#### 1.4 Θερμική απεικόνιση χαμηλού κόστους

Με την αυστηρή έννοια του όρου, η θερμική απεικόνιση (thermal imaging) περιγράφει τη διαδικασία μετατροπής της υπέρυθρης (IR - Infra Red) ακτινοβολίας σε μορφή εικόνας (θερμογράφημα), στην οποία γίνεται χωρική κατανομή των διαφορών θερμοκρασίας έτσι όπως αποτυπώνονται από τη θερμική κάμερα. Η υπέρυθρη ακτινοβολία αφορά τη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ 700 nm έως 1 mm [29]. Δεδομένου του ότι κάθε σώμα αναλόγως της θερμοκρασίας του εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία, ένα θερμογράφημα παρέχει τη δυνατότητα απεικόνισης του περιβάλλοντος με ή χωρίς ορατό φως. Η υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα σώμα, αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Όταν με τη χρήση μιας κάμερας υπέρυθρων εστιάζουμε σε αντικείμενα που έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται, τότε τα αντικείμενα αυτά ξεχωρίζουν σε σχέση με το περιβάλλον.

Οι πρώτοι τύποι αισθητήρων θερμικής απεικόνισης ήταν οι γνωστές σε όλους μας φωτογραφικές μηχανές, και χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στην αμυντική βιομηχανία. Για να ανιχνεύσουν τις θερμικές μεταβολές στο αντικείμενο στόχο, απαιτούσαν ειδικά υλικά φακών που περιείχαν γερμάνιο, θειούχο ψευδάργυρο κ.λπ. και για να είναι επαρκώς ευαίσθητες, χρησιμοποιούσαν φιλμ υπέρυθρων τα οποία έπρεπε να ψυχθούν κατά την αποθήκευση, τη χρήση και την ανάπτυξη.

Οπότε λόγω των ειδικών απαιτήσεων οι εφαρμογές αυτές ήταν δαπανηρές και χρησιμοποιούνταν μόνο σε κρίσιμους τομείς. Επίσης, οι ειδικά διαμορφωμένες κάμερες ήταν ογκώδεις και δυσκίνητες, διότι συνοδεύονταν από ειδικό εξοπλισμό που έπρεπε να εξασφαλίσει τον ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας τους. Σταδιακά αυτές οι δαπανηρές και ογκώδεις συσκευές θερμικής απεικόνισης αντικαταστάθηκαν από γραμμωτούς υπέρυθρους σαρωτές, που μιμούνταν τις φωτογραφικές μηχανές θερμικής απεικόνισης. Η επιτυχία των IR σαρωτών οδήγησε στην ανάπτυξη υπέρυθρων ή θερμικών απεικονιστών, δηλαδή βιντεοκάμερες που μπορούσαν να απεικονίσουν στη περιοχή των υπέρυθρων ακτίνων, μια τεχνολογία που εξελίσσεται συνεχώς μέχρι και σήμερα [30].

Η θερμική απεικόνιση είναι από τα βασικά εργαλεία για την ανέπαφη μέτρηση της θερμοκρασίας στερεών και ρευστών, υλικών και σωμάτων. Αν και η θερμική απεικόνιση εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα σε ότι αφορά τη μέτρηση της θερμοκρασίας, κάποια τεχνικά εμπόδια περιορίζουν την ευρεία χρήση της και υιοθέτηση της σε καταναλωτικές συσκευές. Η αυξημένη δυσκολία κατασκευής IR καμερών και αισθητήρων, έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση του κόστους ενός θερμικού απεικονιστή με χρήση τεχνολογίας IR σε υψηλά επίπεδα. Για παράδειγμα, το κόστος ενός θερμικού απεικονιστή μέχρι και πριν λίγα χρόνια, άγγιζε περίπου τα 1000 δολάρια ΗΠΑ. Εκτός αυτού, οι περισσότεροι θερμικοί απεικονιστές δεν διαθέτουν ικανότητα ασύρματης επικοινωνίας και απαιτούν καλώδιο ή κάρτα μνήμης (SD) για τη μεταφορά δεδομένων [31].

Η θερμική απεικόνιση ως τεχνολογία εντάσσεται στο ευρύτερο σύνολο τεχνολογιών που ασχολούνται με τη θερμοκρασιακή ανίχνευση (temperature sensing). Όμως είναι μια τεχνολογία με αυξημένο κόστος και αυτό περιορίζει την ευρεία χρήση της και υιοθέτηση της σε καταναλωτικές συσκευές. Εκτός από τη θερμική απεικόνιση υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούν αισθητήρες θερμοκρασίας, οι οποίες έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τη θερμική απεικόνιση, για αυτό και τις συναντούμε σε μια πληθώρα εφαρμογών στο χώρο της βιομηχανίας, στα διυλιστήρια, στα αυτοκίνητα, σε κρίσιμους τομείς της αεροδιαστημικής και της άμυνας, σε πανάκριβα αλλά και σε ευρείας κατανάλωσης ηλεκτρονικά κ.λπ.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας εγκαθίστανται σε φορητές ή σταθερές συσκευές, με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός μέσου με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα σε ένα δεδομένο σύνολο απαιτήσεων. Η ανίχνευση και απεικόνιση θερμοκρασίας, είναι τα θεμέλια για όλες τις προηγμένες μορφές ελέγχου θερμοκρασίας και αντιστάθμισης, ενώ δευτερευόντως μπορούν να παρέχουν και άλλες πληροφορίες που είναι σχετικές με την ανίχνευση θερμοκρασίας, όπως είναι η κίνηση ενός σώματος, η απτική επαφή με ένα σώμα κ.λπ.

Έτσι θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η θερμοκρασιακή ανίχνευση με χρήση αισθητήρων θερμοκρασίας, είναι ένα τεχνολογικό πεδίο και μια σειρά τεχνολογιών που μπορεί να προσφέρει λύσεις σε ένα ευρύτερο σύνολο καταναλωτικών αναγκών με κύριο πλεονέκτημα το χαμηλό κόστος, χωρίς αυτό να συνεπάγεται μειωμένη αποτελεσματικότητα ή περιορισμό στο πλήθος των καινοτομιών των οποίων μπορεί να αποτελέσει τον βασικό κορμό ανάπτυξης.

#### 1.5 Ηλεκτρονικά για ανάγνωση (read out electronics)

Σύμφωνα με το λεξικό Merriam Webster ο ορισμός της έκφρασης “read out” είναι: Η διαδικασία αφαίρεσης πληροφοριών από μια αυτόματη συσκευή (όπως έναν υπολογιστή ή έναν αισθητήρα) και η προβολή τους σε κατανοητή μορφή [32]. Πιο ειδικά θα μπορούσαμε να πούμε πως “read out electronics” νοούμε εκείνες τις συσκευές, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ένα κύκλωμα ανίχνευσης για τη συλλογή της πληροφορίας από κάποιο μεμονωμένο αισθητήρα ή σύνολο αισθητήρων, με σκοπό την μεταφορά, την επεξεργασία, και την απεικόνιση της πληροφορίας σε μια κατάλληλη συσκευή.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Ο δισδιάστατος αισθητήρας αφής με χρήση θερμίστορ

---

### 2.1 Το θερμίστορ ως στοιχείο ανίχνευσης της μεταβολής της θερμοκρασίας

Το θερμίστορ είναι ένας τύπος αντίστασης, η τιμή της οποίας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με τις ωμικές αντιστάσεις. Κατασκευάζεται κυρίως από κεραμικό ή πολυμερές υλικό. Ο όρος *thermistor* προέρχεται από τη φράση *THERMally Sensitive RESISTOR*. Οι δύο βασικοί τύποι θερμίστορ είναι αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (*Negative Temperature Coefficient – NTC*), στα οποία η αντίσταση μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, και θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (*Positive Temperature Coefficient – PTC*), στα οποία η αντίσταση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Το θερμίστορ *NTC* είναι το πλέον κατάλληλο για ακρίβεια μέτρησης θερμοκρασίας. Το *PTC* είναι κατάλληλο για εφαρμογές μεταγωγής (*switching*) και προστασίας κυκλώματος από υπερρεύματα [33]. Το θερμίστορ λειτουργεί γραμμικά μόνο σε μια μικρή περιοχή θερμοκρασιών, ενώ έξω από αυτή τη περιοχή λειτουργεί μη γραμμικά. Ως παράδειγμα, το εύρος θερμοκρασίας ενός τυπικού θερμίστορ από τη *BetaTHERM* είναι  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Για ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασιών η καμπύλη θερμοκρασίας-αντίστασης μπορεί να προκύψει από την εξίσωση *Steinhart–Hart* [34] που είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση τρίτης τάξης:

$$1/T = A_0 + A_1(\ln R_T) + A_2(\ln R_T)^3$$

Όπου:

- $T$  : είναι η θερμοκρασία του θερμίστορ (σε Kelvin)
- $A_0, A_1, A_2$  : είναι οι καλούμενες παράμετροι *Steinhart–Hart*, και παρέχονται από τον κατασκευαστή του θερμίστορ
- $R_T$  : είναι η αντίσταση του θερμίστορ στη θερμοκρασία  $T$

Στα πλεονεκτήματα των θερμίστορ μπορούμε να αναφέρουμε ότι διαθέτουν γρήγορη απόκριση (αντίδραση) στις μεταβολές της θερμοκρασίας, έχουν μικρό μέγεθος, έχουν δύο ακροδέκτες, και έχουν χαμηλό κόστος. Στα μειονεκτήματα των θερμίστορ μπορούμε να αναφέρουμε ότι δεν είναι γραμμικά στοιχεία, απαιτούν κάποια διέγερση (τάση), έχουν περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών στην οποία μπορούν να λειτουργήσουν γραμμικά, είναι εύθραυστα, και αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της αυτοθέρμανσης, δηλαδή όταν το θερμίστορ διαρρέεται από ένα ρεύμα μεγαλύτερης έντασης από την επιτρεπτή, η θερμοκρασία του αυξάνεται πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Όταν λοιπόν το θερμίστορ χρησιμοποιείται ως αισθητήρας θερμοκρασίας, τότε εξαιτίας της αυτοθέρμανσης εισάγεται ένα σφάλμα στη μέτρηση που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί.

Για να αποκριθεί γραμμικά ένα θερμίστορ (όταν λειτουργεί ως μεμονωμένο αισθητήριο στοιχείο της θερμοκρασίας) υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι:

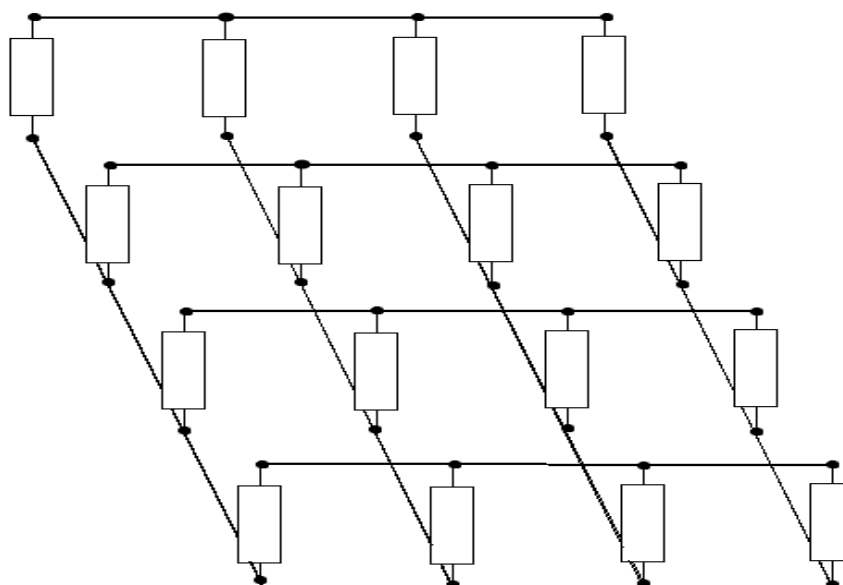
- Το θερμίστορ τοποθετείται σε σειρά με μια τυπική αντίσταση ( $R_{SER}$ ) ίσης τιμής αντίστασης και μια πηγή τάσης ( $V_{REF}$ ) ίση με 5 V
- Το θερμίστορ τοποθετείται παράλληλα με μια τυπική αντίσταση ( $R_{PAR}$ )
- Το θερμίστορ τοποθετείται παράλληλα με μια τυπική αντίσταση ( $R_{PAR}$ ) και στη συνέχεια αυτή η παράλληλη διαμόρφωση συνδυάζεται με μια πρόσθετη αντίσταση αναφοράς και ένα πυκνωτή.

Για να ανταποκριθεί γραμμικά το θερμίστορ στη μεταβολή της θερμοκρασίας, θα πρέπει να διεγείρεται με ένταση ρεύματος μικρότερη από 100  $\mu A$ , κατά προτίμηση 20  $\mu A$ . Τα χαμηλά ρεύματα δεν επιτρέπουν στο θερμίστορ να περιέλθει σε κατάσταση αυτό-θέρμανσης.

## 2.2 Επιλογή της μεθόδου σάρωσης ενός πίνακα 2d αισθητήρα αντιστάσεων

Αν τοποθετήσουμε πολλά θερμίστορ σε ένα πίνακα  $N \times M$ , τότε μπορούμε να φτιάξουμε έναν δισδιάστατο θερμικό αισθητήρα (2d πίνακα αισθητήρων). Οι πίνακες αισθητήρων χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές λόγω της ευκολίας στην εφαρμογή τους. Καθώς όμως το μέγεθος αυτών των πινάκων αυξάνεται, αυξάνεται και ο αριθμός διασυνδέσεων (συνήθως δύο διασυνδέσεις ανά αισθητήρα) και ως εκ τούτου αυξάνεται ο χρόνος πρόσβασης (σάρωσης) σε κάθε μεμονωμένο στοιχείο.

Ο χρόνος πρόσβασης είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την επιλογή της μεθόδου σάρωσης, διότι σε ορισμένες εφαρμογές όπου η αισθητηριακή παράμετρος (δηλαδή το απτικό ερέθισμα) μπορεί να αλλάξει γρήγορα, είναι απαραίτητη η στιγμιαία καταγραφή των πληροφοριών, κάτι που ονομάζεται δυνατότητα στιγμιότυπου [35].



Σχήμα 8: Ένας δισδιάστατος αισθητήρας αντιστάσεων (4x4) που χρησιμοποιεί κοινές σειρές και στήλες από σύρματα

Η χρήση κοινών σειρών και στηλών από σύρματα, είναι μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της πολυπλοκότητας διασύνδεσης σε αυτές τις συστοιχίες. Τα σύρματα κοινής σειράς και τα σύρματα κοινής στήλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρόδια δειγματοληψίας και ηλεκτρόδια οδήγησης αντίστοιχα (ή και το αντίστροφο). Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, ο ρυθμός σάρωσης θα είναι υψηλότερος λόγω λιγότερων κόμβων στον πίνακα. Ωστόσο, η χρήση κοινών σειρών και στηλών από σύρματα οδηγεί στο ανεπιθύμητο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης (παρεμβολής) των πληροφοριών (σημάτων) μεταξύ των συρμάτων των στοιχείων.



2.3 Χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την υλοποίηση ενός δισδιάστατου πίνακα αισθητήρων

#### 2.3.1 Ακρίβεια μέτρησης

Η ακρίβεια μέτρησης σε ένα πίνακα αισθητήρων, επηρεάζεται τόσο από την ακρίβεια μετατροπής της φυσικής παραμέτρου στο ευαίσθητο στοιχείο, καθώς και την προσέγγιση σάρωσης που χρησιμοποιείται. Η ακρίβεια μετατροπής της φυσικής παραμέτρου εξαρτάται από τον μηχανισμό μετατροπής και τη τεχνολογία κατασκευής. Υπό τη προϋπόθεση ότι η φυσική παράμετρος είναι γραμμικά εξαρτώμενη από την αντίσταση, η ακρίβεια μέτρησης του αισθητήρα εξαρτάται και από το πραγματικό κύκλωμα ανάγνωσης. Η ακρίβεια μέτρησης του πραγματικού κυκλώματος ανάγνωσης με τη σειρά της, επηρεάζεται από τις παραμέτρους του πίνακα αισθητήρων και τις παραμέτρους των κυκλωμάτων.

#### 2.3.2 Ρυθμός ανάγνωσης

Ο γρήγορος ρυθμός ανάγνωσης εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση για τα περισσότερα κυκλώματα ανάγνωσης πινάκων αισθητήρων μεγάλης κλίμακας, τα οποία επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά απόκρισης συχνότητας των ευαίσθητων στοιχείων τους και των κυκλωμάτων ανάγνωσής τους. Η ταχύτητα απόκρισης του κυκλώματος ανάγνωσης, πρέπει να είναι σημαντικά ταχύτερη, από αυτή του ευαίσθητου στοιχείου που ανταποκρίνεται στην εξωτερική φυσική διέγερση.

Οι op-amp ενισχυτές δειγματοληψίας, οι ADC μετατροπείς, οι πολυπλέκτες, τα κυκλώματα γρήγορης ανάγνωσης, συμπεριλαμβανομένων των ZPC και τα κυκλώματα του παθητικού ολοκληρωτή, είναι μερικές από τις διατάξεις που προτείνονται και οι οποίες θα μπορούσαν να συμβάλουν στο να διαβαστούν με ακρίβεια και πολύ γρήγορα οι αντιστάσεις των στοιχείων αισθητήρων. Όμως αυτά τα γρήγορα κυκλώματα ανάγνωσης έχουν το μειονέκτημα, ότι συμβάλουν στη πολυπλοκότητα του κυκλώματος. Επίσης, καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια για να λειτουργήσουν και συνήθως έχουν υψηλό κόστος.

### 2.3.3 Μέγεθος πίνακα, περιοχή κάλυψης και χωρική ανάλυση

Στις εφαρμογές ανίχνευσης αφής, βασικό στόχος είναι να υπάρχει μεγαλύτερη περιοχή ανίχνευσης (περιοχή κάλυψης) και υψηλότερη χωρική ανάλυση. Η χωρική ανάλυση προσδιορίζεται από την περιοχή ανίχνευσης κάθε στοιχείου και την απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών στοιχείων του πίνακα αισθητήρων. Θα πρέπει να τονιστεί πως το μέγεθος του πίνακα, η περιοχή κάλυψης και η χωρική ανάλυση, επηρεάζονται αμοιβαία. Όσο μικρότερη είναι η περιοχή κάλυψης και όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος (σε αριθμό κόμβων) του πίνακα, τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρική ανάλυση και το αντίστροφο.

Με δεδομένη την περιοχή κάλυψης, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος (σε αριθμό κόμβων) του πίνακα, τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρική ανάλυση και τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια εντοπισμού της θέσης επαφής. Όμως μια μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης έχει το μειονέκτημα ότι μπορεί να προκαλέσει περισσότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο πίνακα, γεγονός που θα οδηγήσει σε επιπλέον σφάλματα στην διαδικασία σάρωσης. Με μεγαλύτερο (σε αριθμό κόμβων) μέγεθος πίνακα, υπάρχουν περισσότερα στοιχεία στον πίνακα, τα οποία θα απαιτούν μεγαλύτερη ικανότητα οδήγησης από ενισχυτές  $or\ amp$ , θα καταναλώνουν περισσότερη ισχύ και θα προκαλούν πιο σημαντικά προβλήματα σε σχέση με το φαινόμενο της παρεμβολής.

### 2.3.4 Ευκαμπτότητα (ή ευκαμψία)

Διατάξεις με φορητούς ή εύκαμπτους 2d αισθητήρες, που βρίσκουν εφαρμογές σε τεχνολογίες όπως το τεχνητό ηλεκτρονικό δέρμα και οι αισθητήρες αφής αναδεικνύουν την ανάγκη ώστε τα κυκλώματα ανάγνωσης να έχουν σημαντικό βαθμό ευκαμπτότητας. Για αυτό θα πρέπει οι πίνακες αισθητήρων και οι παρελκόμενες διατάξεις, να μπορούν να υλοποιηθούν σε εύκαμπτες πλακέτες κυκλώματος (πλακέτες με εύκαμπτο υπόστρωμα). Σε αυτή τη περίπτωση όμως υπάρχουν κάποιοι αρνητικοί παράγοντες, που μπορεί να δυσχεραίνουν τη λειτουργία του αισθητήρα και θα πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά. Μερικοί από αυτούς τους αρνητικούς παράγοντες είναι: Οι μηχανικοί κραδασμοί, η αντίσταση στο καλώδιο, η αντίσταση διεπαφής κ.λπ.

### 2.3.5 Εύρος αντίστασης

Όταν υλοποιείται μια προσέγγιση σάρωσης για ένα πίνακα αισθητήρων, θα πρέπει το κύκλωμα ανάγνωσης να διαβάζει και να κάνει μετρήσεις των τιμών των ευαίσθητων στοιχείων, τα οποία μπορεί να έχουν διαφορετικό εύρος αντίστασης. Συνεπώς, οι προσεγγίσεις σάρωσης που μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλο εύρος αντίστασης, είναι απαραίτητες για τους πίνακες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες αφής, καθώς και σε χημικούς αισθητήρες.

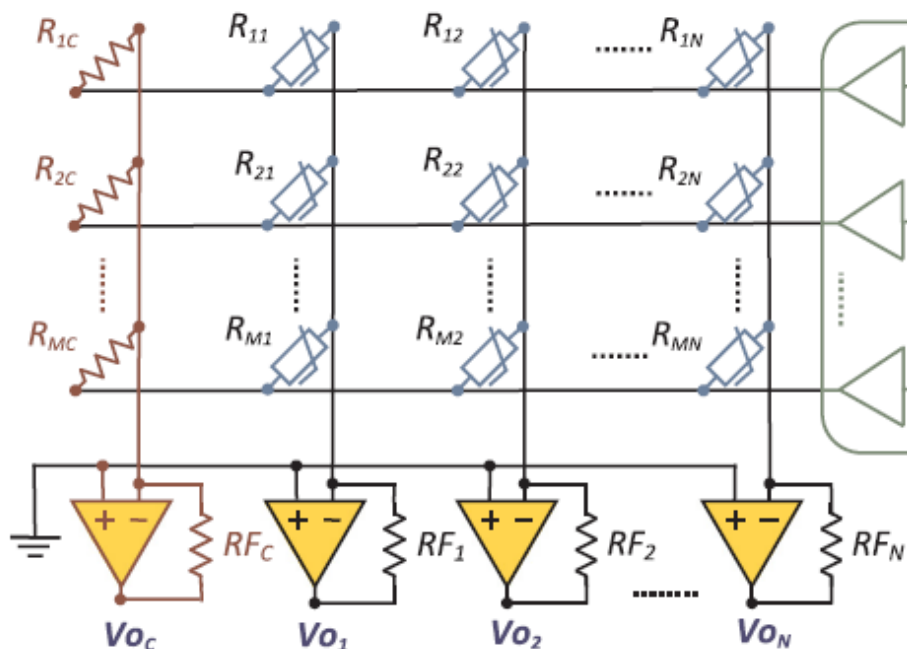
### 2.3.6 Μέθοδος ανάλυσης προσεγγίσεων σάρωσης στους πίνακες αισθητήρων

Στη βιβλιογραφία συναντάμε διάφορες μεθόδους ανάλυσης των προσεγγίσεων σάρωσης, μεθόδους όπως: Δοκιμές του πραγματικού συστήματος, ανάλυση με λογισμικό προσομοίωσης κυκλώματος, και ανάλυση με μοντέλο δοκιμής, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να αξιολογηθούν οι επιδόσεις των πινάκων αισθητήρων και των προσεγγίσεων σάρωσης. Στο πρώτο στάδιο της ανάπτυξης, τα μοντέλα δοκιμών και οι μαθηματικές εκφράσεις των προσεγγίσεων σάρωσης για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων στους πίνακες αισθητήρων, είναι αυτά που προτιμώνται περισσότερο, διότι αφενός προσφέρουν ταχύτητα στην ανάλυση, και αφετέρου έχουν το χαμηλότερο κόστος. Έχοντας υπόψιν το κόστος σε χρόνο και σε υλικό, ολοκληρωμένα, πραγματικά και αξιόπιστα αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν με την υλοποίηση και τη δοκιμή του πραγματικού συστήματος. Με το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους υλικού, και με σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα είναι δυνατή η ανάλυση των προσεγγίσεων σάρωσης με λογισμικό προσομοίωσης του πραγματικού κυκλώματος σε υπολογιστή.

### 2.4 Η μέθοδος ανάγνωσης που επιλέχτηκε για τον δισδιάστατο αισθητήρα

Η μέθοδος ανάγνωσης που επιλέχτηκε για τον δισδιάστατο αισθητήρα, κάνει χρήση κοινών σειρών και στηλών από σύρματα και λειτουργεί με τη προσθήκη ηλεκτρονικών στοιχείων, μέσω των οποίων ελαχιστοποιεί σημαντικά την επίδραση του φαινομένου της παρεμβολής των σημάτων μεταξύ των συρμάτων των στοιχείων. Επίσης, η συγκεκριμένη μέθοδος πετυχαίνει το προσδοκώμενο αποτέλεσμα, που είναι η ακριβής και υψηλού ρυθμού ανάγνωση του πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα αφής [36].

Η συγκεκριμένη μέθοδος εκτός από τον πίνακα με τα θερμίστορ χρησιμοποιεί ωμικές αντιστάσεις, αλλά και τελεστικούς ενισχυτές. Υλοποιώντας αυτή τη μέθοδο ο δισδιάστατος πίνακας παίρνει την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 9: Η μέθοδος υλοποίησης του δισδιάστατου πίνακα

Η λειτουργία του κυκλώματος του πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση, μέσω της οποίας μπορούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια και με μικρό σχετικό σφάλμα (< 2,5%), την ωμική τιμή του θερμίστορ σε κάθε κόμβο αυτού του πίνακα, η οποία τιμή εξαρτάται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια, ή πολύ κοντά στο θερμίστορ. Έτσι, μια μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας η οποία οφείλεται σε απτική επαφή, ανιχνεύεται από τον αισθητήρα μέσω της μεταβολής της ωμικής τιμής του θερμίστορ του πίνακα στο συγκεκριμένο σημείο, ή γύρω από το σημείο:

$$R_{ij} = R_{ic} * \frac{R_{Fj}}{R_{Fc}} * \frac{V_{oc}(0) - V_{oc}(i)}{V_{oj}(0) - V_{oj}(i)}$$

Όπου:

- $V_{oc}(i)$  η τάση εξόδου στο κύκλωμα αναφοράς το οποίο περιέχει μόνο ωμικές αντιστάσεις
- $V_{oj}(i)$  η τάση εξόδου σε κάθε στήλη στο κύκλωμα του δισδιάστατου αισθητήρα
- $V_{oc}(0)$  είναι η τάση εξόδου στο κύκλωμα αναφοράς χωρίς σήμα εισόδου σε καμία γραμμή
- $V_{oj}(0)$  είναι η τάση εξόδου σε κάθε στήλη στο κύκλωμα του δισδιάστατου αισθητήρα χωρίς σήμα εισόδου σε καμία γραμμή
- $R_{Fc}$  η αντίσταση ανάδρασης του τελεστικού ενισχυτή στο κύκλωμα αναφοράς
- $R_{Fj}$  η αντίσταση ανάδρασης του τελεστικού ενισχυτή σε κάθε στήλη στο κύκλωμα του δισδιάστατου αισθητήρα
- $R_{ic}$  η ωμική αντίσταση κάθε αντίστασης στο κύκλωμα αναφοράς
- $R_{ij}$  η ωμική αντίσταση του εκάστοτε θερμίστορ

Το κύκλωμα εκτός από τα θερμίστορ του πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα, περιέχει τελεστικούς ενισχυτές σε συνδεσμολογία αναστρέφοντος ενισχυτή, ωμικές αντιστάσεις τόσο στο κύκλωμα αναφοράς όσο και στους κλάδους ανάδρασης των τελεστικών ενισχυτών. Η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή με βάση τη συνδεσμολογία αναστρέφοντος ενισχυτή σε κάθε στήλη εξόδου του πίνακα, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [37] όπου  $V_{BIAS}$  η τάση πόλωσης σε κάθε γραμμή του πίνακα:

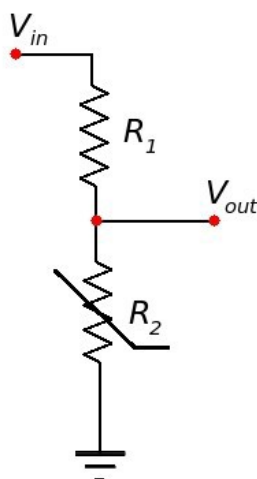
$$V_{oj} = - \left( \frac{R_{Fj}}{R_{ij}} \right) * V_{BIAS}$$

Αντίστοιχα, η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή στη στήλη εξόδου του κυκλώματος αναφοράς δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{oc} = - \left( \frac{R_{Fc}}{R_{ic}} \right) * V_{BIAS}$$

## 2.5 Το κύκλωμα αντιστάθμισης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Εκτός από το κύκλωμα του πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα, χρησιμοποιήθηκε και ένα κύκλωμα αντιστάθμισης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Το κύκλωμα αντιστάθμισης χρησιμοποιήθηκε, για να εξαλειφθούν τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν από τον ενδογενή υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας, στην επιφάνεια κάθε θερμίστορ του πίνακα. Το συγκεκριμένο κύκλωμα χρησιμοποιεί ένα εξωτερικό σε σχέση με το κύκλωμα αισθητήριου - ένα θερμίστορ τύπου NTC - μέσω του οποίου ανιχνεύεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος, με σκοπό να συγκριθεί με τη θερμοκρασία στην επιφάνεια κάθε θερμίστορ στον πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει η πραγματική μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια κάθε θερμίστορ, σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Το κύκλωμα αντιστάθμισης έχει την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 10: Το κύκλωμα αντιστάθμισης

Όπου:

- $V_{in}$  η τάση εισόδου
- $R_1$  μια ωμική αντίσταση
- $R_2$  το θερμίστορ (το αισθητήριο) το οποίο αντιλαμβάνεται την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Σε θερμοκρασία  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  έχει ονομαστική ωμική αντίσταση ίση με την ωμική αντίσταση  $R_1$
- $V_{out}$  η τάση στα άκρα του αισθητηρίου

Με βάση τον τύπο του διαιρέτη τάσης προκύπτει η  $V_{out}$  ως εξής:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_{ολ}} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Επειδή το θερμίστορ είναι αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή, αυτό σημαίνει ότι:

- Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία η ωμική τιμή του θερμίστορ μειώνεται και ως εκ τούτου η τάση  $V_{out}$  μειώνεται
- Όσο μειώνεται η θερμοκρασία η ωμική τιμή του θερμίστορ αυξάνεται και ως εκ τούτου η τάση  $V_{out}$  αυξάνεται.

Για τον υπολογισμό της ωμικής αντίστασης ( $R_2$ ) του αισθητηρίου στο κύκλωμα αντιστάθμισης, ο τύπος του διαιρέτη τάσης χρησιμοποιείται ως εξής:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_{ολ}} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\rightarrow R_2 = \frac{V_{out} * R_1}{V_{in} - V_{out}}$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Η λειτουργία του δισδιάστατου αισθητήρα αφής με χρήση λογισμικού προσομοίωσης

---

### 3.1 Το λογισμικό προσομοίωσης

Το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το Proteus Design Suite (8.9 Professional), ή όπως είναι γνωστό με την εμπορική του ονομασία Proteus Virtual System Modeling (VSM), το οποίο συνδυάζει πολύ χρήσιμα εργαλεία για τη προσομοίωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, όπως τη προσομοίωση SPICE μικτής λειτουργίας, καθώς και μια από τις κορυφαίες λειτουργίες προσομοίωσης μικροελεγκτών.

Το Proteus είναι ένα προηγμένο λογισμικό, με τη βοήθεια του οποίου ο σχεδιαστής μπορεί να σχεδιάσει εκτός από το βασικό κύκλωμα και το αντίστοιχο PCB (Printed Circuit Board) του κυκλώματος. Διαθέτει πολλές δυνατότητες σχεδίασης, που το καθιστούν ένα εξαιρετικό εργαλείο για την ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων (Embedded Systems) καθώς περιέχει εικονικά όργανα μέτρησης, ενδείκτες, οθόνες LED και LCD, καθώς και ενεργοποιητές όπως διακόπτες και κουμπιά. Το Proteus VSM παρέχει επίσης εκτεταμένες δυνατότητες εντοπισμού σφαλμάτων, όπως και τη δυνατότητα ορισμού σημείων διακοπής, καθώς και δυνατότητα αναπαραγωγής του κώδικα βήμα προς βήμα.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του Proteus VSM, είναι η ικανότητά του να προσομοιώνει σε πραγματικό χρόνο την αλληλεπίδραση μεταξύ λογισμικού που λειτουργεί σε έναν μικροελεγκτή και οποιουδήποτε αναλογικού ή ψηφιακού ηλεκτρονικού στοιχείου που είναι συνδεδεμένο σε αυτό. Το μοντέλο μικροελεγκτή βρίσκεται στο ίδιο σχήμα μαζί με τα άλλα στοιχεία του σχεδιασμού του κυκλώματος και προσομοιώνει την εκτέλεση του αντικειμενικού κώδικα (Object Code) όπως ένα πραγματικό ολοκληρωμένο.



Τα μοντέλα διαφόρων μικροεπεξεργαστών προσομοιώνονται πλήρως με κάθε λεπτομέρεια (θύρες εισόδου / εξόδου, διακόπτες, χρονόμετρα, UART και όλα τα άλλα περιφερειακά που υπάρχουν σε κάθε υποστηριζόμενο επεξεργαστή) και υποστηρίζονται πλήρως από το Proteus. Το Proteus VSM περιλαμβάνει έναν αριθμό εικονικών οργάνων, όπως παλμογράφο, λογικό αναλυτή, γεννήτριες, καθώς και απλά βολτόμετρα ή αμπερόμετρα. Επιπλέον, παρέχει αναλυτές πρωτοκόλλου λειτουργίας Master / Slave / Monitor για SPI και I<sup>2</sup>C.

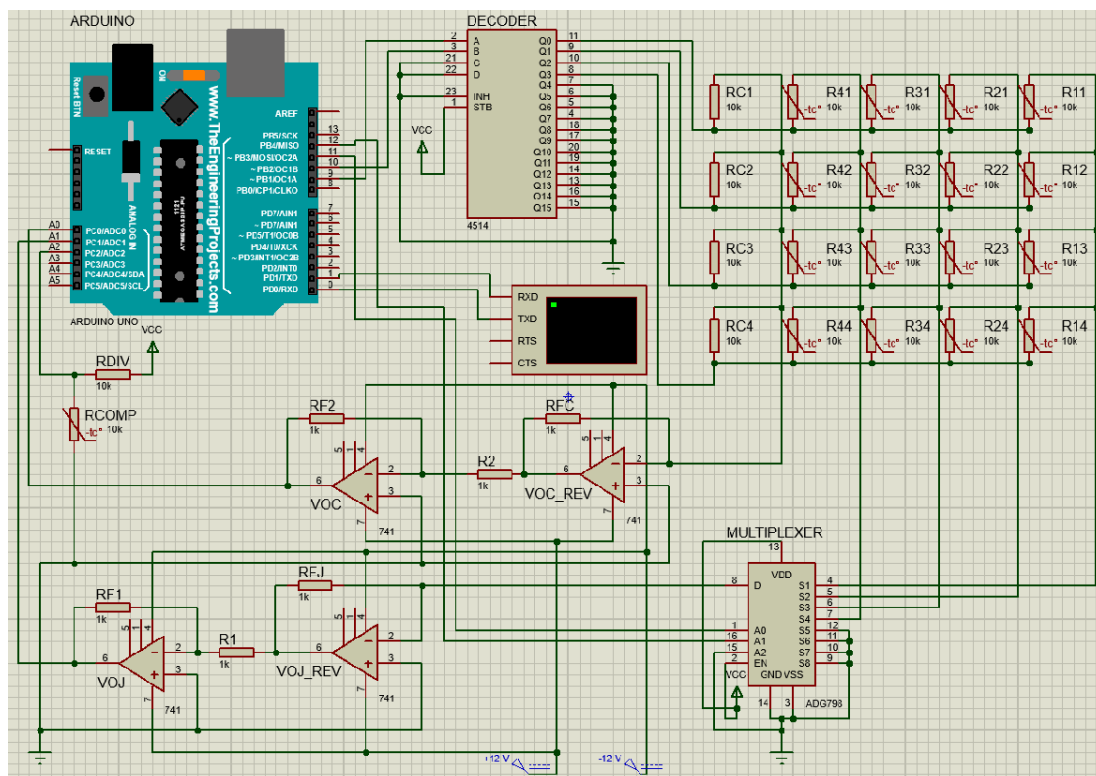
Με περισσότερες από 750 υποστηριζόμενες παραλλαγές μικροεπεξεργαστών, πολλές χιλιάδες ενσωματωμένα μοντέλα SPICE και μία από τις μεγαλύτερες βιβλιοθήκες παγκοσμίως ενσωματωμένων περιφερειακών προσομοίωσης, το Proteus VSM παραμένει η πρώτη επιλογή για προσομοίωση ενσωματωμένων συστημάτων. Εάν κατά την ανάπτυξη ενός project, ο μηχανικός ή η ομάδα μηχανικών σχεδιάζει τόσο το υλικό όσο και το λογισμικό, τότε με τη χρήση του Proteus VSM μπορεί να ωφεληθεί από το γεγονός ότι ο σχεδιασμός του υλικού μπορεί να αλλάξει εξίσου εύκολα (και παράλληλα) με το σχεδιασμό του λογισμικού. Σε μεγαλύτερους οργανισμούς όπου οι ρόλοι των μηχανικών είναι διακριτοί (embedded software engineer, embedded hardware engineer κ.λπ), οι μηχανικοί λογισμικού μπορούν να αρχίσουν να εργάζονται μόλις ολοκληρωθεί το σχηματικό. οπότε δεν χρειάζεται να περιμένουν μέχρι ο μηχανικός hardware να φτιάξει το πρωτότυπο υλικό. Εν ολίγοις, το Proteus VSM βελτιώνει την αποδοτικότητα, την ποιότητα και την ευελιξία σε όλη τη διαδικασία σχεδιασμού.

### 3.2 Η προσομοίωση του κυκλώματος

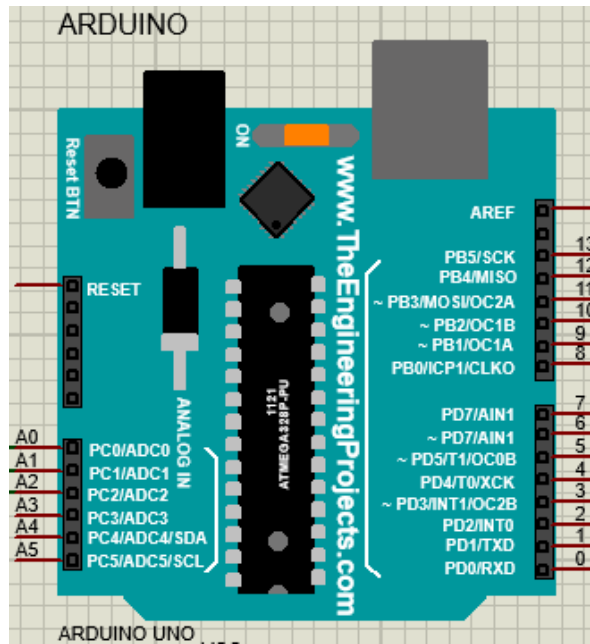
Το κύκλωμα που προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του Proteus αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- Μικροελεγκτής ATmega 328P ενσωματωμένος στην αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO Uno R3
- Αποκωδικοποιητής CD74HC4514 CMOS4000 1of 16 decoder/demultiplexer
- Πίνακας δισδιάστατου αισθητήρα με 16 θερμίστορ NTC 10K 100 mW
- Κύκλωμα αναφοράς με 4 αντιστάσεις 10K 0,6W 1% metal film

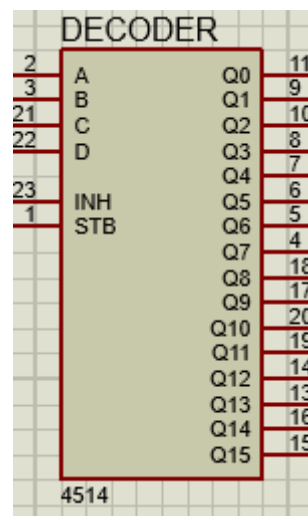
- Πολυπλέκτης ADG798 high temperature, low voltage 8 channel multiplexer
- Τελεστικός ενισχυτής LM741 σε συνδεσμολογία αναστρέφοντος ενισχυτή στην έξοδο του πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα
- Τελεστικός ενισχυτής LM741 σε συνδεσμολογία αναστρέφοντος ενισχυτή για την 2η αναστροφή του σήματος που προκύπτει από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή που βρίσκεται στην έξοδο του πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα
- Τελεστικός ενισχυτής LM741 σε συνδεσμολογία αναστρέφοντος ενισχυτή στην έξοδο του κυκλώματος αναφοράς
- Τελεστικός ενισχυτής LM741 σε συνδεσμολογία αναστρέφοντος ενισχυτή για την 2η αναστροφή του σήματος που προκύπτει από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή που βρίσκεται στην έξοδο του κυκλώματος αναφοράς
- 6 αντιστάσεις στα κυκλώματα των τελεστικών ενισχυτών 1K 0,6W 1% metal film
- 1 θερμίστορ NTC 10K 100 mW για το κύκλωμα αντιστάθμισης
- 1 αντίσταση 10K 0,6W 1% metal film για το κύκλωμα αντιστάθμισης
- 1 virtual terminal



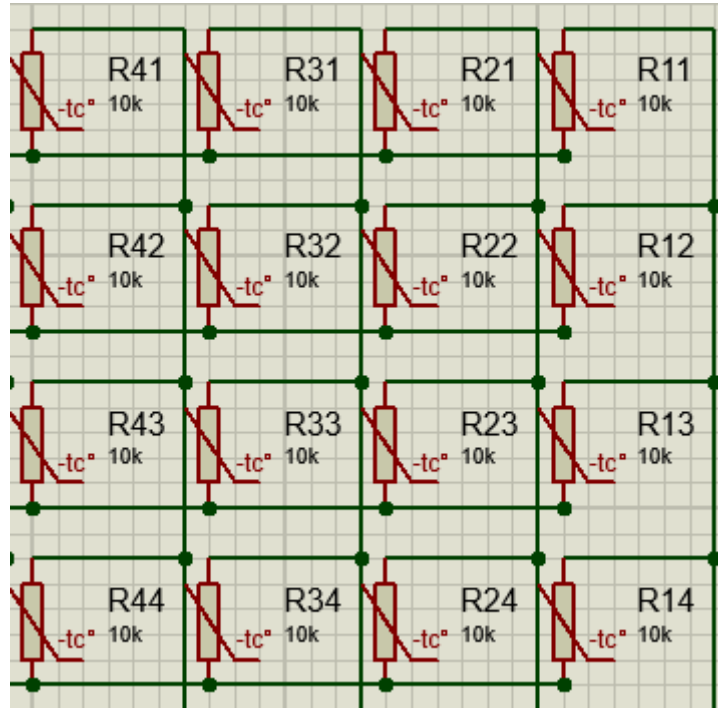
Σχήμα 11: Η προσομοίωση του κυκλώματος του δισδιάστατου αισθητήρα



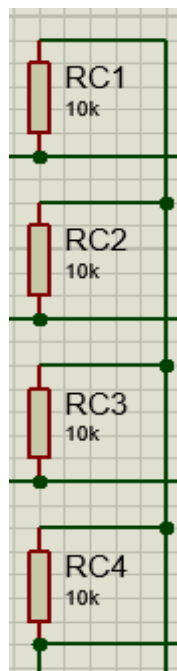
Σχήμα 12: Η αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO



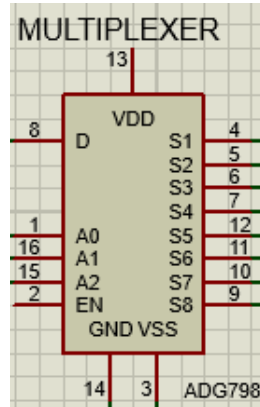
Σχήμα 13: Ο αποκωδικοποιητής CD74HC4514



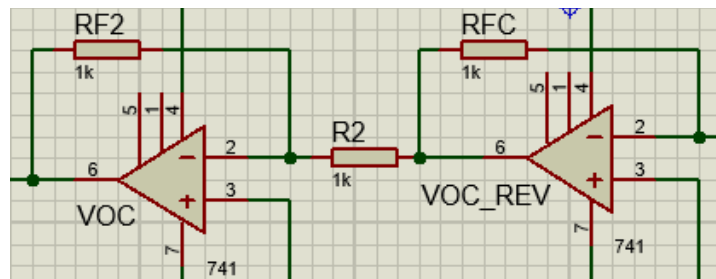
Σχήμα 14: Ο διδιάστατος αισθητήρας με τα δεκαέξι θερμίστορ NTC



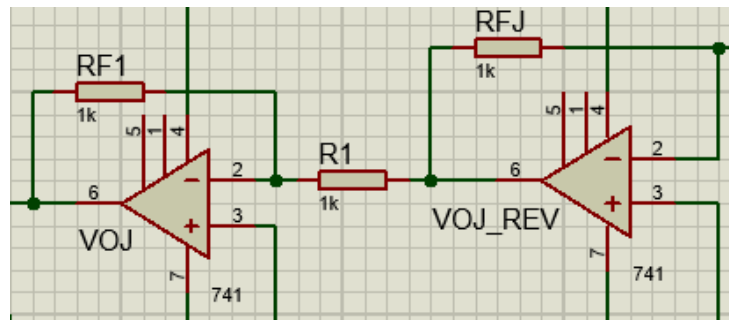
Σχήμα 15: Το κύκλωμα αναφοράς με τέσσερις αντιστάσεις 10K



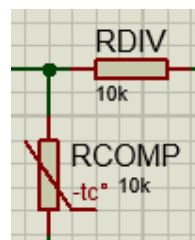
Σχήμα 16: Ο πολυπλέκτης ADG798



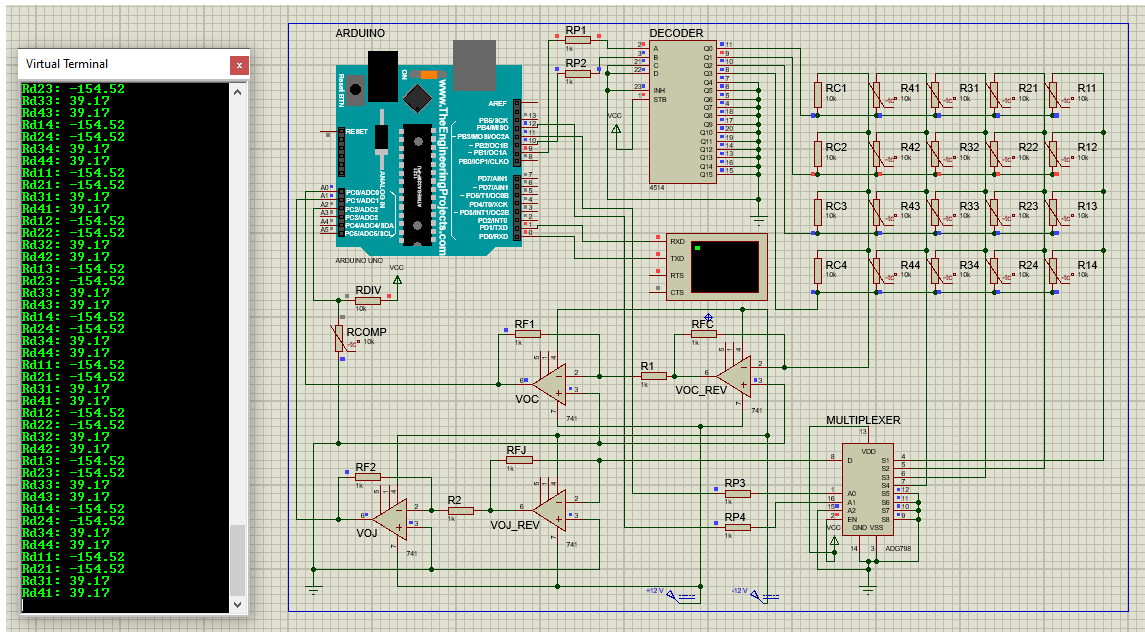
Σχήμα 17: Οι τελεστικοί ενισχυτές στην έξοδο του πίνακα του κυκλώματος αναφοράς



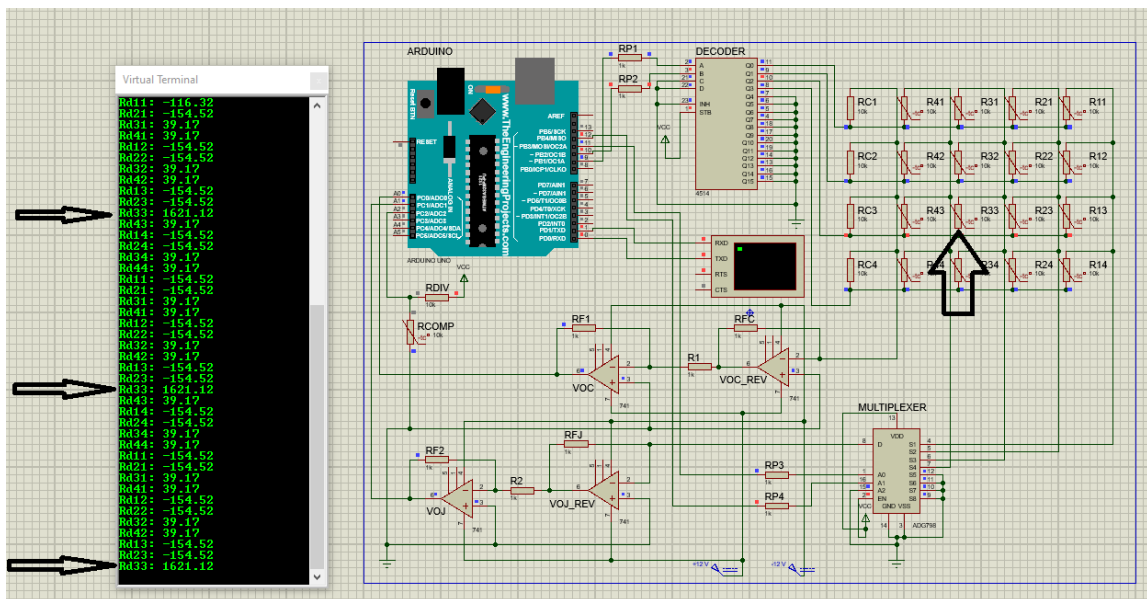
Σχήμα 18: Οι τελεστικοί ενισχυτές στην έξοδο του πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα



Σχήμα 19: Το κύκλωμα αντιστάθμισης

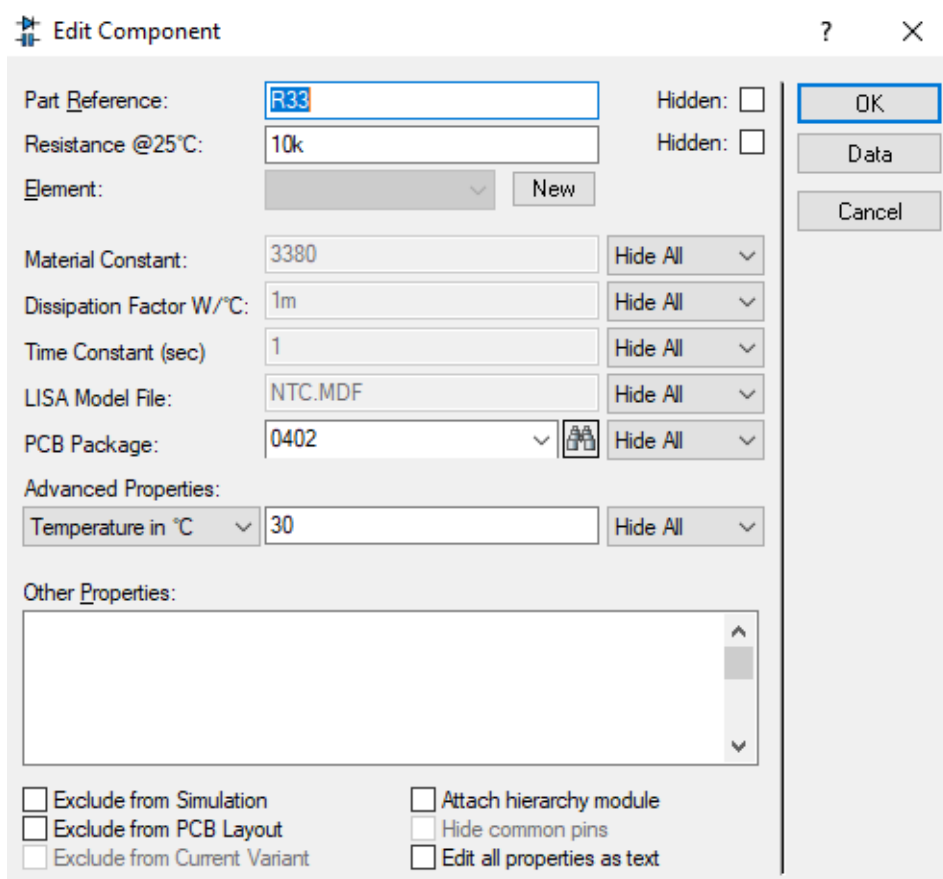


Σχήμα 20: Η προσομοίωση του κυκλώματος του διδιάστατου αισθητήρα σε λειτουργία (χωρίς απτική επαφή) με ανοικτό το virtual terminal



Σχήμα 21: Η προσομοίωση του κυκλώματος του διδιάστατου αισθητήρα σε λειτουργία (με απτική επαφή) με ανοικτό το virtual terminal

Στο σχήμα 20 ο διαδιάστατος αισθητήρας είναι σε λειτουργία και γίνεται η απεικόνιση της διαφοράς  $R_{comp} - R_{ij}$  για κάθε ένα από τα θερμίστορ του αισθητήρα, μέσω του virtual terminal. Στη συγκεκριμένη απεικόνιση δεν υπάρχει απτική επαφή με κάποιο σημείο του διαδιάστατου αισθητήρα. Στο σχήμα 21 ο διαδιάστατος αισθητήρας εξακολουθεί να είναι σε λειτουργία, και όπως μπορούμε να δούμε στο virtual terminal υπάρχει προσομοίωση της απτικής επαφής με το στοιχείο R33 του διαδιάστατου αισθητήρα. Συγκεκριμένα, λόγω της απτικής επαφής η αντίσταση του στοιχείου R33 που είναι thermistor αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή (NTC) μεταβάλλεται από τα 10000 Ω στα 8378,88 Ω και δημιουργείται η διαφορά  $R_{comp} - R_{33} = 1621,12$  Ω. Αυτό συμβαίνει διότι έχει αυξηθεί η επιφανειακή θερμοκρασία στο στοιχείο αυτό, από τους 25 C° στους 30 C°.



Σχήμα 22: Το παράθυρο στο οποίο μεταβάλλουμε την επιφανειακή θερμοκρασία κάθε στοιχείου του διαδιάστατου αισθητήρα για να προσομοιώσουμε την απτική επαφή

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Η κατασκευή του κυκλώματος ανάγνωσης με χρήση μικροελεγκτή και διακριτών ηλεκτρονικών στοιχείων

---

### 4.1 Τα διακριτά ηλεκτρονικά και λοιπά στοιχεία του κυκλώματος

Για τη κατασκευή του δισδιάστατου αισθητήρα καθώς και του κυκλώματος ανάγνωσης (read out) του δισδιάστατου αισθητήρα, εκτός από τις 2 πλακέτες χαλκού διπλής όψης, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα διακριτά ηλεκτρονικά και λοιπά στοιχεία:

- 16 θερμίστορ NTC 10K 100 mW (NCP15XH103 - SMD) για τον δισδιάστατο αισθητήρα
- 1 θερμίστορ NTC 10K 100 mW (NCP15XH103 - SMD) για το κύκλωμα αντιστάθμισης
- 6 αντιστάσεις 1K 0,6W 1% metal film (MINRES1K) στα κυκλώματα των τελεστικών ενισχυτών
- 4 αντιστάσεις 10K 0,6W 1% metal film (MINRES10K) για το κύκλωμα αναφοράς
- 1 αντίσταση 10K 0,6W 1% metal film (MINRES10K) για το κύκλωμα αντιστάθμισης
- 4 τελεστικοί ενισχυτές LM741
- 1 πολυπλέκτης (ADG709) high temperature, low voltage 8 channel multiplexer
- 1 αποκωδικοποιητής (CD74HC4514 CMOS4000) 1 of 16 decoder/demultiplexer
- 27 Pins (2.54 mm Single Row Pin Header Strip)
- Δεκάδες Jumper Wires (Male to Female / Female to Female)



Σχήμα 23: Θερμίστορ NTC (SMD)





Σχήμα 24: Αντίσταση 1K 0,6W 1% metal film



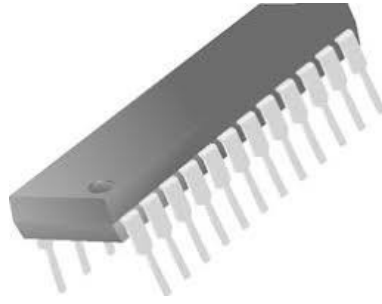
Σχήμα 25: Αντίσταση 10K 0,6W 1% metal film



Σχήμα 26: Τελεστικός ενισχυτής LM741



Σχήμα 27: Πολυπλέκτης (ADG709) high temperature, low voltage 8 channel multiplexer



Σχήμα 28: Αποκωδικοποιητής (CD74HC4514 CMOS4000) 1 ο f16 decoder/demultiplexer

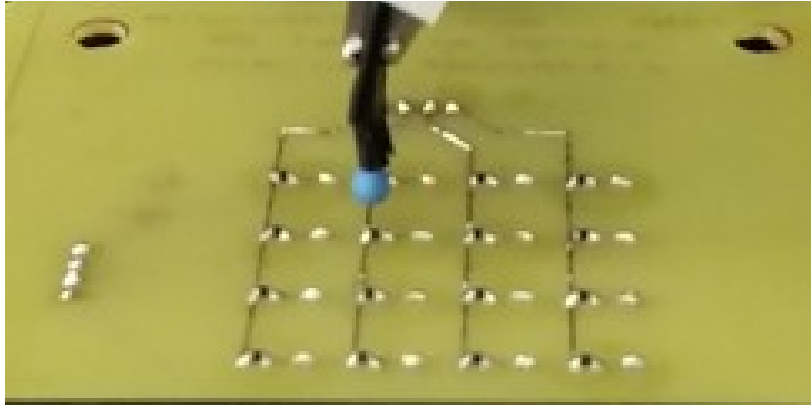


Σχήμα 29: Pins (2.54 mm Single Row Pin Header Strip)

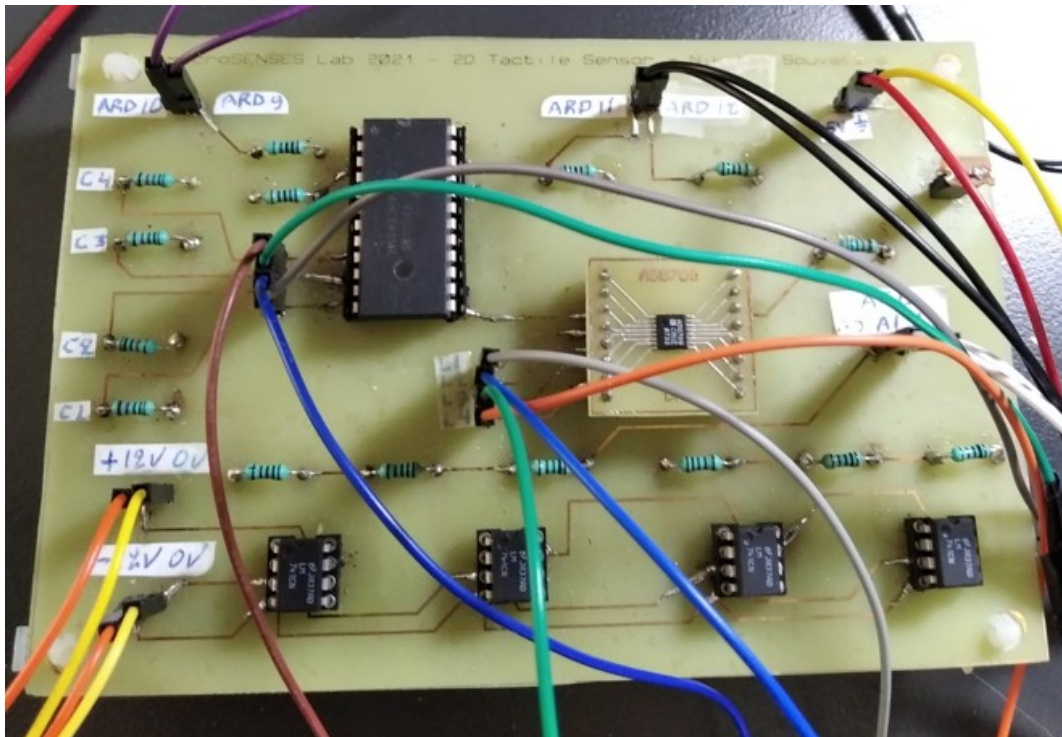


Σχήμα 30: Jumper Wires (Male to Female / Female to Female)

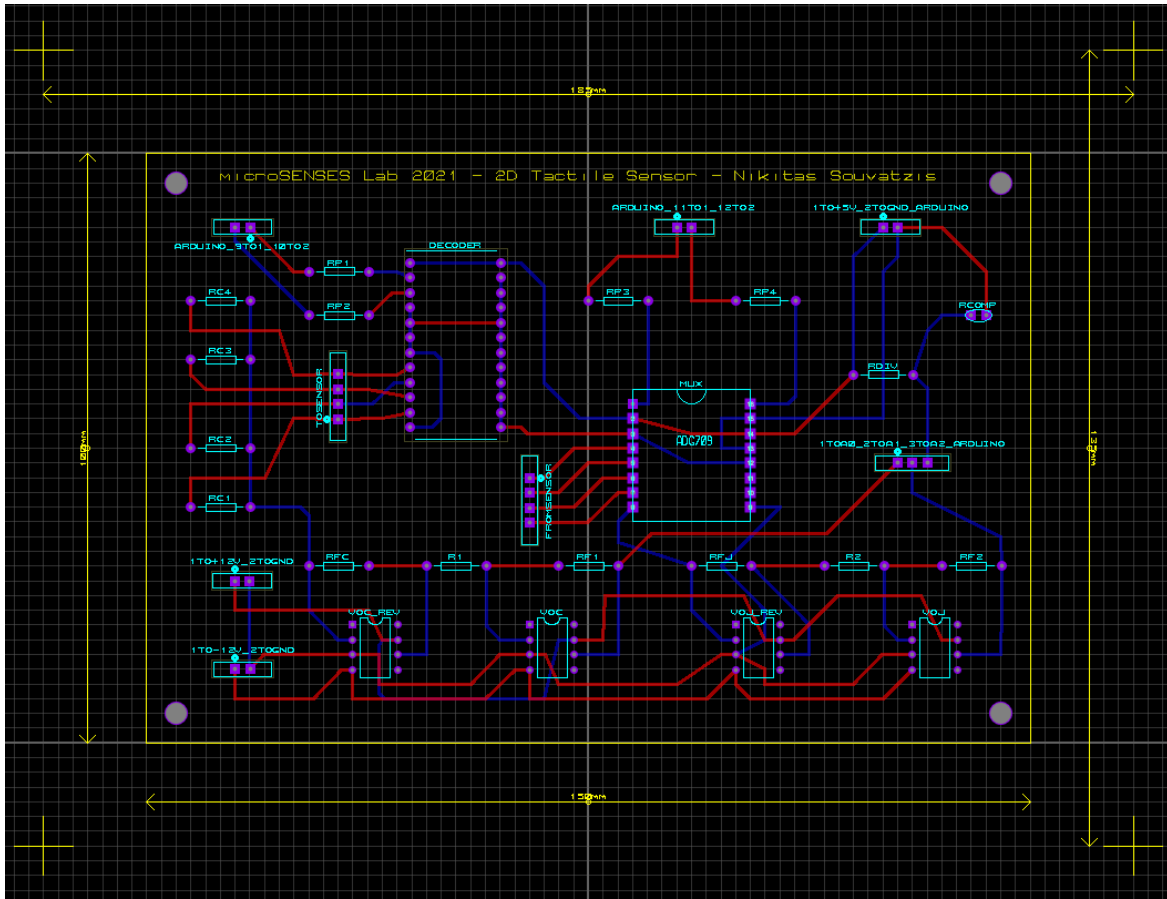
4.2 Το τυπωμένο κύκλωμα του δισδιάστατου αισθητήρα και του κυκλώματος ανάγνωσης  
Το κύκλωμα ανάγνωσης περιελάμβανε την αναπτυξιακή πλακέτα του ARDUINO, καθώς και το τυπωμένο κύκλωμα με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος όπως τον πολυπλέκτη, τον αποκωδικοποιητή, τους τελεστικούς ενισχυτές, τις ωμικές αντιστάσεις κ.λπ.



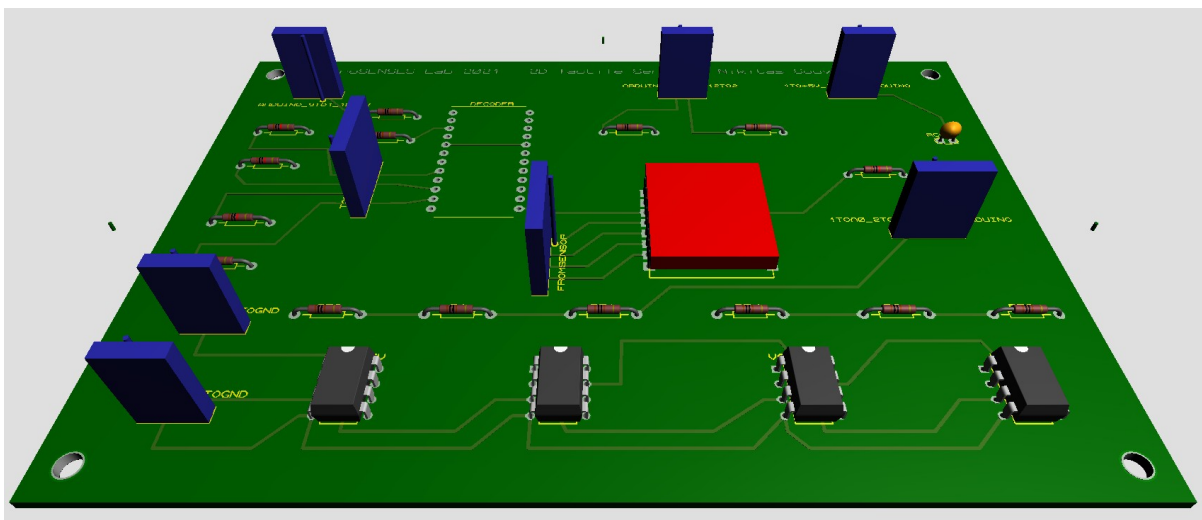
Σχήμα 31: Το τυπωμένο κύκλωμα του δισδιάστατου αισθητήρα αφής



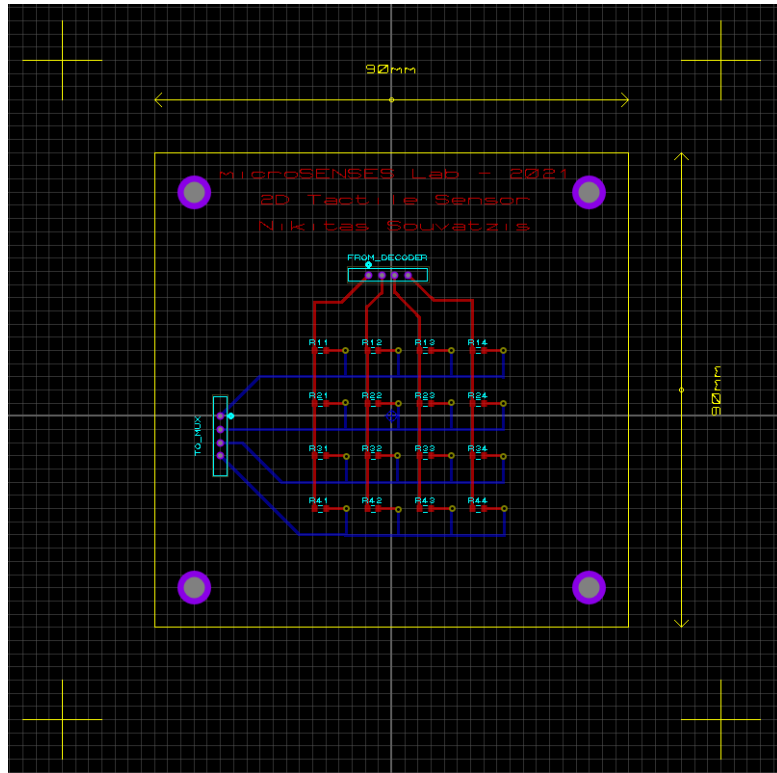
Σχήμα 32: Το τυπωμένο κύκλωμα ανάγνωσης με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος



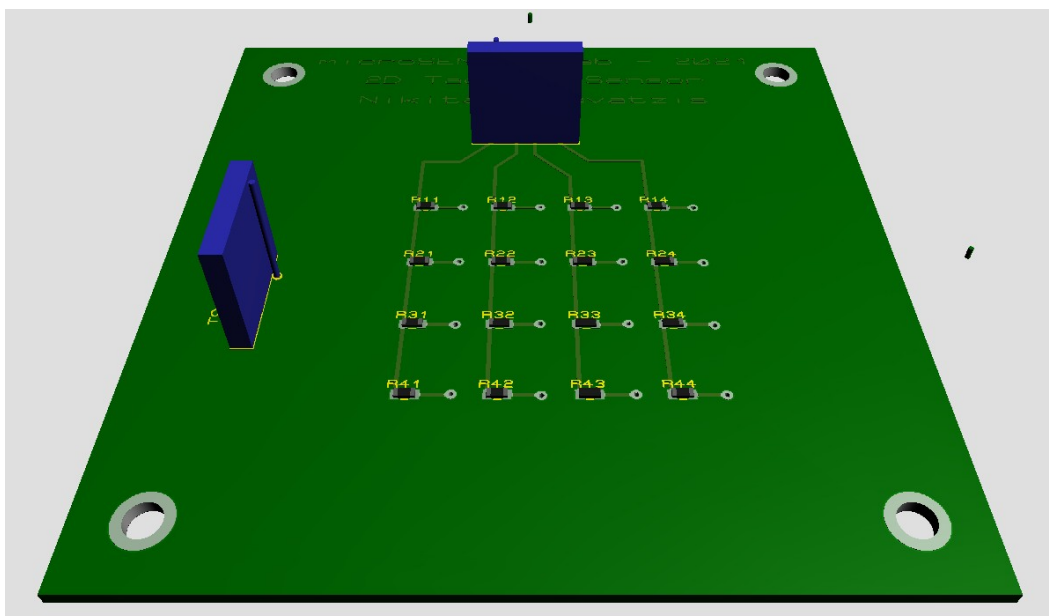
Σχήμα 33: Το PCB layout του τυπωμένου κυκλώματος ανάγνωσης



Σχήμα 34: Η 3D απεικόνιση του τυπωμένου κυκλώματος ανάγνωσης



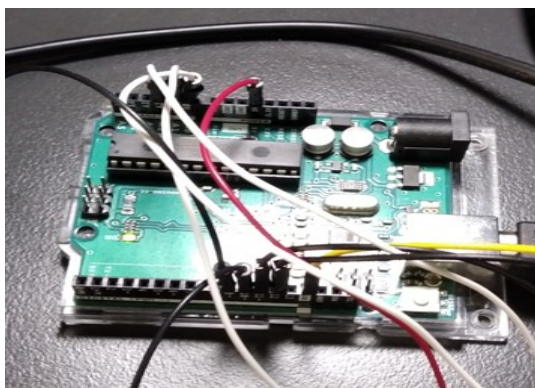
Σχήμα 35: Το PCB layout του διδιάστατου αισθητήρα



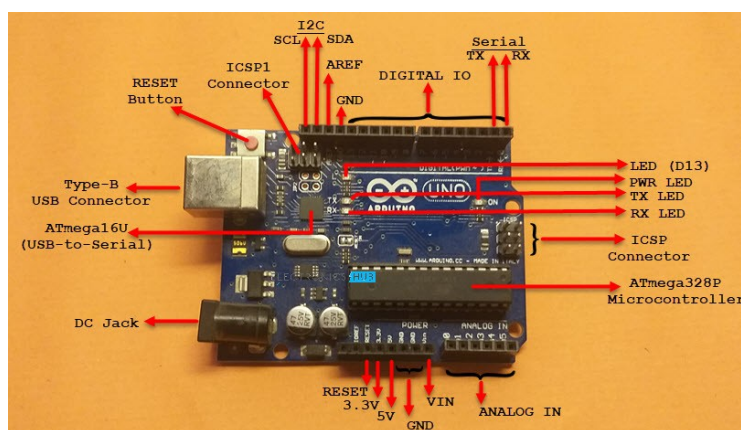
Σχήμα 36: Η 3D απεικόνιση του διδιάστατου αισθητήρα

### 4.3 Η αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO UNO

Η έκδοση αναπτυξιακής πλακέτας που χρησιμοποιήσαμε ήταν το ARDUINO UNO R3. Το ARDUINO UNO διαθέτει τον μικροελεγκτή ATmega328p, του οποίου η συχνότητα λειτουργίας είναι στα 16 MHz. Εκτός από τη θύρα για την τροφοδοσία (DC Jack => 7 – 12 V), το ARDUINO UNO διαθέτει 6 αναλογικές θύρες εισόδου, 14 ψηφιακές θήρες εισόδου/εξόδου από τις οποίες οι 6 μπορεί να χρησιμοποιηθούν για P.W.M. (Pulse Width Modulation). Επίσης, διαθέτει 1 μνήμη EEPROM 1 KB, 1 μνήμη SRAM 2KB, και μια μνήμη flash 32 KB, ενώ διαθέτει και θύρα USB Type – B η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτός από τη μεταφορά δεδομένων και για τη τροφοδοσία της αναπτυξιακής πλακέτας. Το ARDUINO UNO υποστηρίζει και κάποια πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το UART, το I<sup>2</sup>C και το SPI [38].



Σχήμα 37: Η αναπτυξιακή πλακέτα του ARDUINO UNO συνδεδεμένη στο κύκλωμα του δισδιάστατου αισθητήρα αφής



Σχήμα 38: Το pinout του ARDUINO UNO [39]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Το πρόγραμμα οδήγησης (firmware) του μικροελεγκτή

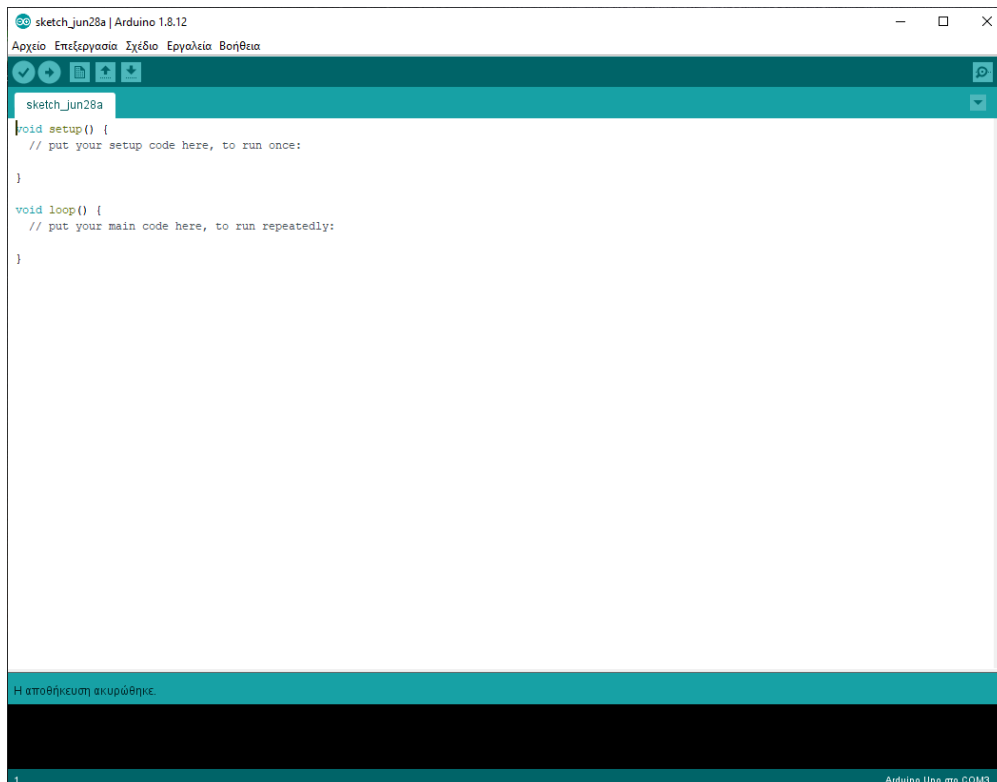
---

### 5.1 Το λογισμικό ARDUINO Software (IDE)

Το ARDUINO Integrated Development Environment (IDE) (Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης ARDUINO), είναι μια εφαρμογή cross-platform αφού μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορα λειτουργικά συστήματα όπως τα Windows, το macOS, το Linux κ.λπ, και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, απασφαλμάτωση και μεταφόρτωση προγραμμάτων στις διάφορες εκδόσεις αναπτυξιακών πλακετών του ARDUINO, που είναι βασισμένες σε πυρήνα AVR (ARDUINO Uno, ARDUINO Mega, ARDUINO Nano κ.λπ.). Επίσης, εκτός από πλακέτες με πυρήνα AVR, το ARDUINO Software IDE μπορεί πλέον να υποστηρίξει αναπτυξιακές πλακέτες και τρίτων κατασκευαστών που έχουν διαφορετικούς πυρήνες (π.χ. ARM) [40].

Το ARDUINO Software (IDE) είναι ανοικτού κώδικα, διανέμεται δωρεάν και ο πηγαίος κώδικας για το IDE κυκλοφορεί βάσει της άδειας GNU General Public License, έκδοση 2 [41]. Για τη δημιουργία των προγραμμάτων υποστηρίζει τις γλώσσες προγραμματισμού C και C++ [42], ενώ διαθέτει μια επιπλέον βιβλιοθήκη λογισμικού με έτοιμες συναρτήσεις που προέρχεται από το project με την ονομασία Wiring, για αυτό πολλές φορές οι προγραμματιστές λένε πως τα προγράμματα στο ARDUINO “τρέχουν” σε γλώσσα Wiring C. Το ARDUINO Software (IDE) περιέχει έναν επεξεργαστή κειμένου για τη σύνταξη του κώδικα. Τα προγράμματα που γράφονται χρησιμοποιώντας το λογισμικό ARDUINO Software (IDE) ονομάζονται “σκίτσα” (sketches). Αυτά τα “σκίτσα” γράφονται με τον επεξεργαστή κειμένου και αποθηκεύονται με την επέκταση αρχείου .ino.





Σχήμα 39: Η κεντρική οθόνη του ARDUINO Software (IDE)

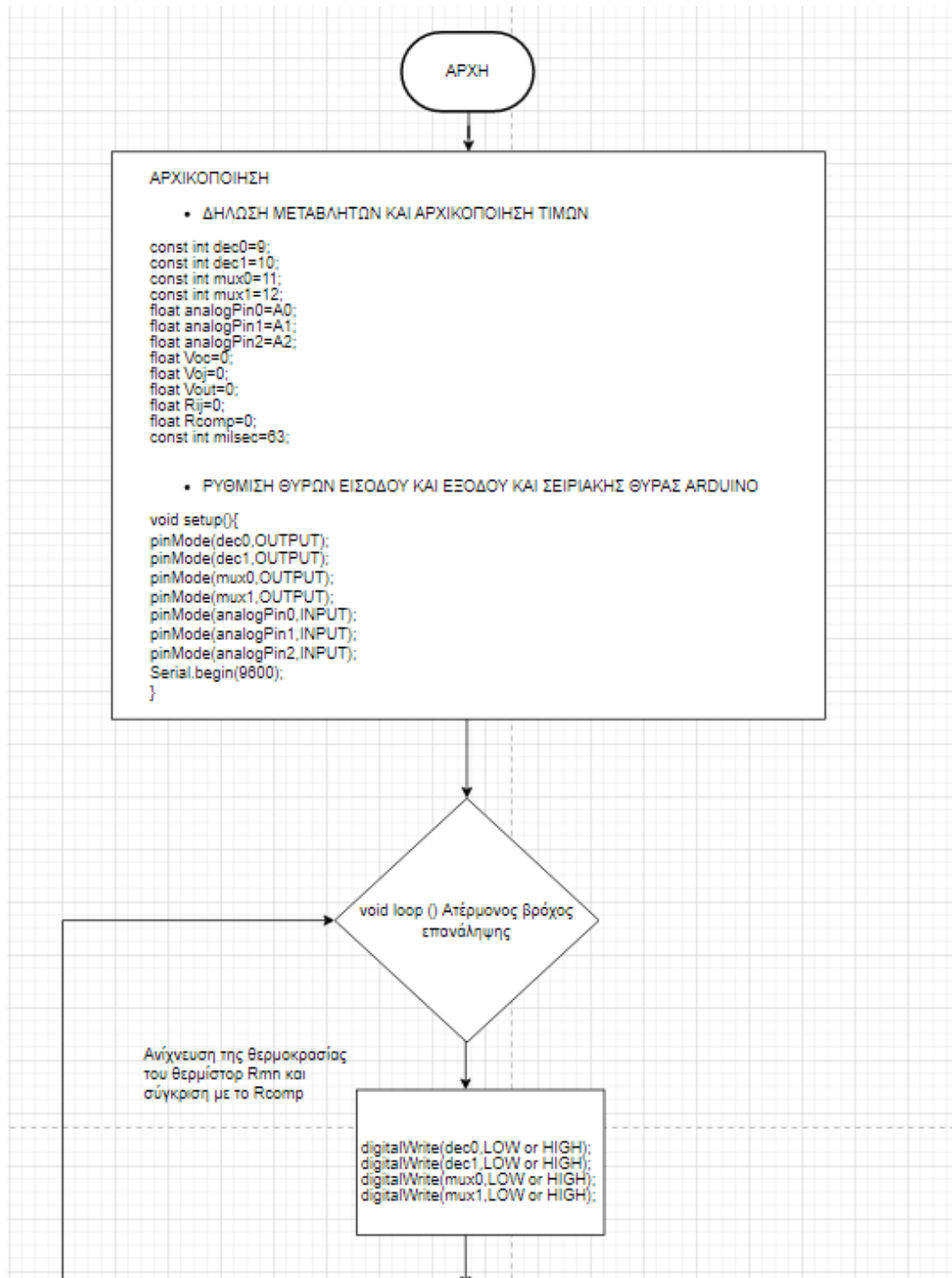
Στην οθόνη του ARDUINO Software (IDE) εμφανίζεται ένα μενού με τις διαθέσιμες λειτουργίες, μια περιοχή εμφάνισης μηνυμάτων, καθώς και κάποια κουμπιά για τις πιο κοινές λειτουργίες, όπως για παράδειγμα το κουμπί ανοίγματος ενός προγράμματος, το κουμπί αποθήκευσης του τρέχοντος προγράμματος, το κουμπί απασφαλμάτωσης (debugging) του προγράμματος, το κουμπί ανεβάσματος (upload) του προγράμματος στον μικροελεγκτή, το κουμπί παρακολούθησης της σειριακής κ.λπ.

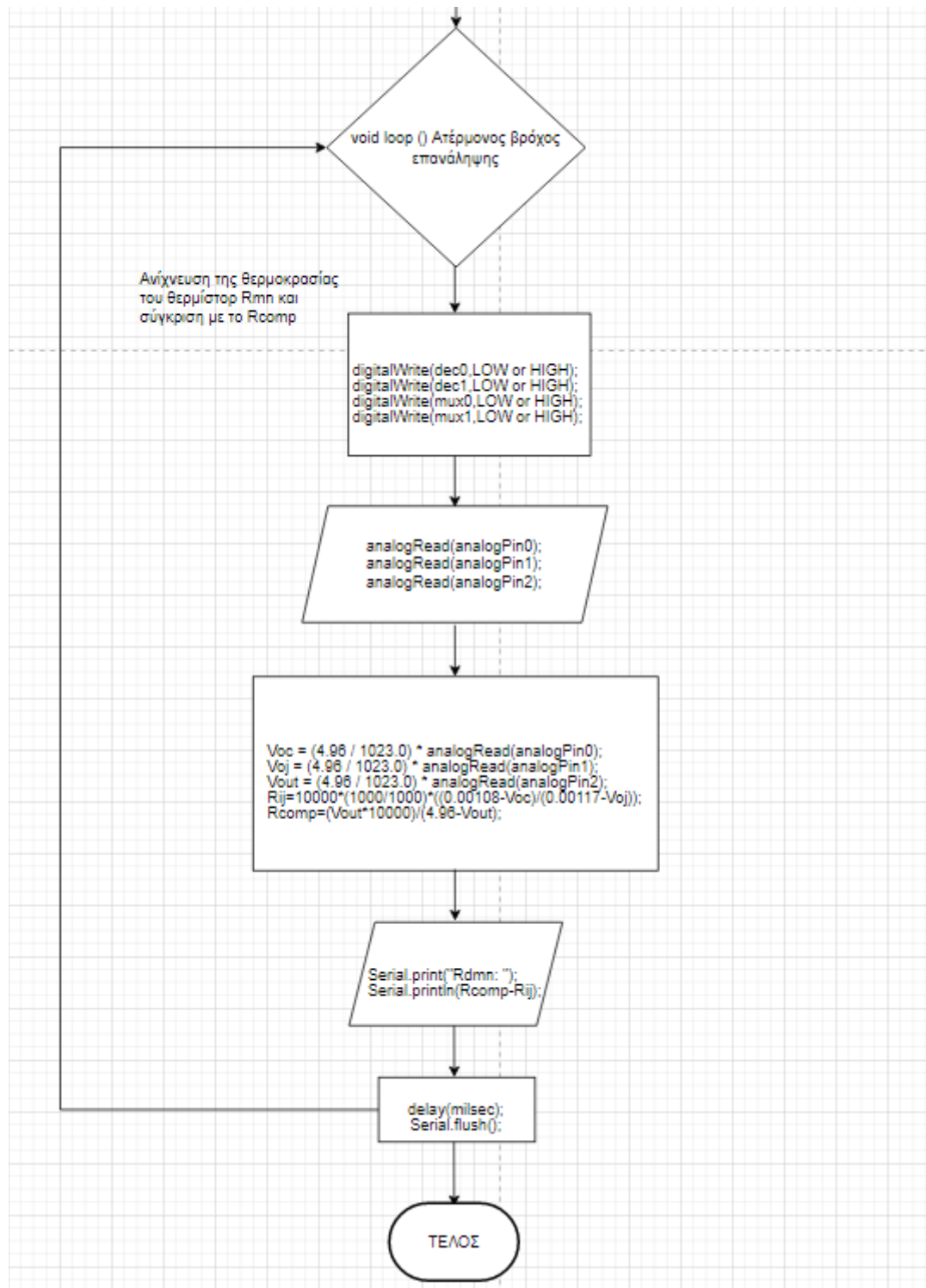
Επομένως, το ARDUINO Software (IDE) είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης, καθώς περιέχει όσα χρειάζεται κάποιος για να γράψει ένα πρόγραμμα (firmware) για τον μικροελεγκτή, να ελέγξει και ενδεχομένως να διορθώσει ένα πρόγραμμα, και στη συνέχεια να φορτώσει αυτό το πρόγραμμα στον μικροελεγκτή παρακολουθώντας τη λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο δηλαδή κατά τη στιγμή της λειτουργίας, με τη βοήθεια του τερματικού (terminal) μέσω του οποίου γίνεται παρακολούθηση της σειριακής θύρας με την οποία έχει συνδεθεί το ARDUINO.



5.2 Το διάγραμμα ροής του προγράμματος οδήγησης (firmware) που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του δισδιάστατου αισθητήρα

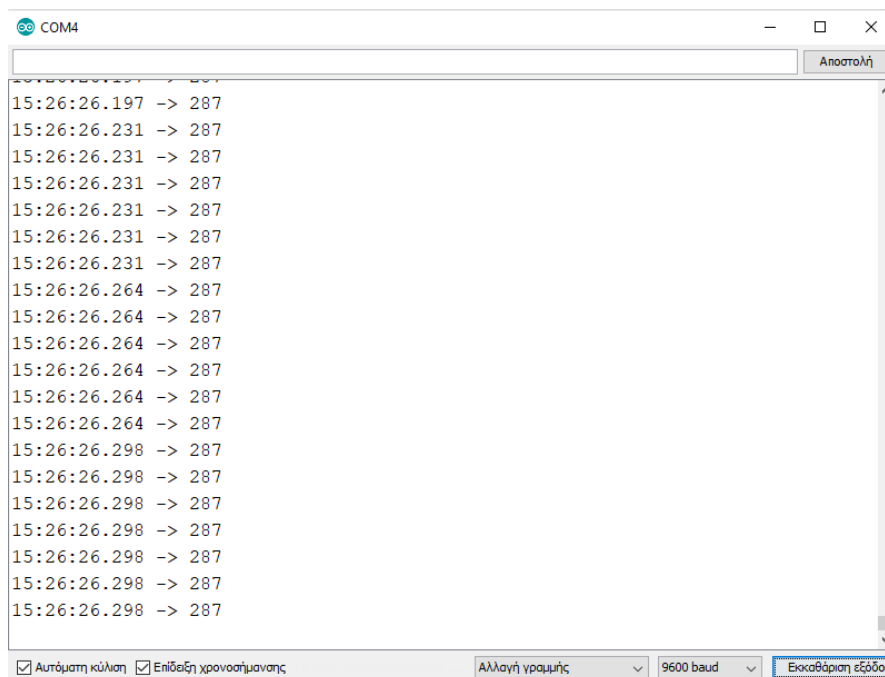
Το διάγραμμα ροής (flow chart) του προγράμματος οδήγησης στο ARDUINO που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του δισδιάστατου αισθητήρα είναι αυτό που ακολουθεί:





### 5.3 Αποθήκευση των δεδομένων σε λογιστικό φύλλο εργασίας

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τον δισδιάστατο αισθητήρα αφής μέσω του ARDUINO, εξέρχονται μέσω της σειριακής θύρας του ARDUINO και μπορούμε να τα παρακολουθήσουμε ανοίγοντας για το σκοπό αυτό το παράθυρο σειριακού τερματικού (serial terminal). Μέσω του serial terminal μπορούμε να δούμε τα δεδομένα εξόδου, αλλά και να στείλουμε δεδομένα μέσω ενός πλαισίου που βρίσκεται στο ίδιο παράθυρο. Επίσης, μπορούμε να αλλάξουμε τον αριθμό Baud, να προσθέσουμε χρονοσήμανση κ.λπ.



Σχήμα 40: Το παράθυρο serial terminal σε λειτουργία

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τη σειριακή θύρα του ARDUINO μπορούμε να τα δούμε αλλά και να τα αποθηκεύσουμε σε λογιστικό φύλλο εργασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε 2 εφαρμογές ανοικτού λογισμικού. Η πρώτη εφαρμογή είναι το LibreOffice [43] που αποτελεί μια ολοκληρωμένη σουίτα εφαρμογών γραφείου, η οποία περιέχει και έναν επεξεργαστή λογιστικών φύλλων εργασίας, και η δεύτερη εφαρμογή είναι το ArduSpreadsheet [44], το οποίο εγκαθίσταται στα εργαλεία του ARDUINO IDE και ουσιαστικά είναι ένας εναλλακτικός serial terminal, ο οποίος έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων σε ένα λογιστικό φύλλο εργασίας του LibreOffice.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## Απεικόνιση των δεδομένων σε Η/Υ με χρήση του λογισμικού LabVIEW

---

### 6.1 Το λογισμικό LabVIEW

Στη συγκεκριμένη εργασία, η απόκριση του αισθητήρα απεικονίζεται στην οθόνη του υπολογιστή με χρήση του λογισμικού LabVIEW. Το LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) [46] είναι ένα περιβάλλον ανάπτυξης που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία National Instruments, χρησιμοποιεί μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού την G, και μπορεί να εγκατασταθεί σε διάφορα λειτουργικά συστήματα όπως τα Windows, Linux, και MacOS. Το LabVIEW προσφέρει μια γραφική προσέγγιση προγραμματισμού, που επιτρέπει την οπτικοποίηση και διαχείριση εφαρμογών μετρήσεων, εφαρμογών αυτοματισμού, εφαρμογών που διαμορφώνουν το υλικό για τον έλεγχο οργάνων μέτρησης, εφαρμογών που αναλύουν δεδομένα μετρήσεων κ.λπ.

Το γραφικό περιβάλλον του LabVIEW, καθιστά απλή την ενσωμάτωση υλικού και συσκευών μέτρησης από οποιονδήποτε κατασκευαστή, μπορεί να παρουσιάσει σε διάγραμμα μια πολύπλοκη λογική, αναπτύσσει αλγόριθμους ανάλυσης δεδομένων και σχεδιάζει προσαρμοσμένες διεπαφές χρήστη, ενώ διαθέτει λειτουργίες για τη διόρθωση λαθών. Το LabVIEW διαθέτει μια μεγάλη συλλογή από δευτερεύοντα εικονικά όργανα (sub VIs - Virtual Instruments) που μπορούν να απλοποιήσουν εφαρμογές φέρνοντας εις πέρας πολλές λειτουργίες που αφορούν τη διαχείριση μετρήσεων, είσοδο και έξοδο των δεδομένων, την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, τη διαχείριση υλικού κ.λπ. Οι τελευταίες εκδόσεις του LabVIEW αυτή τη χρονική στιγμή είναι το LabVIEW 2022 Q3 και LabVIEW NXG 5.1 [47].

## 6.2 Οι λειτουργίες του LabVIEW

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το LabVIEW διαθέτει εικονικά όργανα που φέρνουν εις πέρας πολλές λειτουργίες και επιτελούν το σκοπό που αντίστοιχα επιτελούν οι συναρτήσεις και οι υπορουτίνες σε μια γλώσσα προγραμματισμού όπως η γλώσσα C, η Pascal κ.λπ. Όταν ανοίγουμε το LabVIEW καλούμαστε να εργαστούμε σε δύο βασικές οθόνες διεπαφής. Η πρώτη βασική οθόνη είναι το front panel και στη συνέχεια από το μενού Window μπορούμε να επιλέξουμε και να ανοίξουμε τη δεύτερη βασική οθόνη που είναι το block diagram. Επίσης, κάποια πολύ χρήσιμα παράθυρα που είναι χρήσιμο να επιλέξουμε στο front panel, είναι η παλέτα στοιχείων ελέγχου (controls) και η παλέτα εργαλείων (tools palette) τα οποία μπορούμε να επιλέξουμε και να ανοίξουμε από το μενού View, ενώ στο block diagram μπορούμε να επιλέξουμε το παράθυρο συναρτήσεων (functions) πάλι από το μενού View.

Το παράθυρο του front panel είναι η οθόνη διεπαφής με τον χρήστη, όπου απεικονίζονται οι κυριότερες λειτουργίες του εκάστοτε VI. Το front panel διαθέτει στοιχεία ελέγχου (controls) και ενδείκτες (indicators) τα οποία καταλαμβάνουν ένα ορισμένο χώρο στο front panel και αποτελούν τους ακροδέκτες για τις διαδραστικές εξόδους και εισόδους του VI. Τα controls όπως και τα indicators είναι διαθέσιμα από τη παλέτα controls. Τα controls είναι οι διαδραστικοί ακροδέκτες εισόδου, ενώ τα indicators είναι οι διαδραστικοί ακροδέκτες εξόδου.

Μερικά από τα controls τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε στη παλέτα controls είναι: Numeric controls, string controls, control-knobs, push buttons, switches, text controls, dials κ.λπ. Αντίστοιχα μερικά από τα indicators τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε στη παλέτα controls είναι: Numeric indicators, string indicators, text indicators, indicators-graphs, LEDs κ.λπ. Στη παλέτα tools μπορούμε να συναντήσουμε μια σειρά από εργαλεία όπως: Automatic tool selector, operating tool, positioning tool, labeling tool, wiring tool κ.λπ. Όταν ανοίγουμε ένα VI, ανοίγει απευθείας το front panel, ενώ αν μπούμε στο μενού Window μπορούμε να επιλέξουμε και να ανοίξουμε το block diagram.

Στο block diagram ουσιαστικά οργανώνεται, σχεδιάζεται και επιτελείται όλη η προγραμματιστική λειτουργία ενός VI. Σε αυτή την οθόνη θα δούμε μερικά από τα βασικά δομικά στοιχεία ενός VI, όπως: Ακροδέκτες εισόδου-εξόδου (input-output terminals), δευτερεύοντα εικονικά όργανα (sub VIs), συναρτήσεις (functions), σταθερές (constants), δομές ελέγχου (control structures), δομές επανάληψης (repetition structures), δομές βρόχου (loop structures), καλώδια ροής (wires), αριθμητικούς τελεστές (arithmetic operators), λογικούς τελεστές (boolean operators), τελεστές σύγκρισης (comparison operators).

Η παλέτα functions διαθέτει μια βιβλιοθήκη από πολλά και χρήσιμα sub VIs που μπορούν να απλοποιήσουν εφαρμογές διότι εξειδικεύονται σε συγκεκριμένες εργασίες όπως: Η διαχείριση των μετρήσεων, η επεξεργασία του σήματος εισόδου (μετατροπή, ενίσχυση, εξασθένηση, συμπίεση κ.λπ.) η διαχείριση της εισόδου και εξόδου των δεδομένων, η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, η επίλυση σφαλμάτων, η αποθήκευση των δεδομένων στη μνήμη, η παρουσίαση των δεδομένων σε πίνακες, η κατασκευή γραφημάτων, η διαχείριση υλικού για τον έλεγχο πραγματικών οργάνων μέτρησης κ.λπ.

### 6.3 Η λειτουργία του VI του δισδιάστατου αισθητήρα

#### 6.3.1. Η διεπαφή του VI με τον δισδιάστατο αισθητήρα με χρήση του API NI-VISA

Για να μπορέσουμε να οπτικοποιήσουμε την λειτουργία του αισθητήρα και να βλέπουμε σε πραγματικό χρόνο την απόκριση του αισθητήρα στις εξωτερικές διεγέρσεις, χρησιμοποιήσαμε ένα VI το οποίο αποτελεί τη διεπαφή μεταξύ αισθητήρα και υπολογιστή και ταυτόχρονα μας δίνει τη δυνατότητα να βλέπουμε την απόκριση που έχει ο αισθητήρας στις εξωτερικές διεγέρσεις που εφαρμόζονται σε κάθε σημείο του δισδιάστατου πίνακα του. Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το υλικό που χρησιμοποιήσαμε για να οδηγήσουμε τον δισδιάστατο αισθητήρα περιλαμβάνει τη πλατφόρμα ARDUINO UNO. Το ARDUINO συνδέεται στον υπολογιστή μέσω μιας σειριακής θύρας USB, μέσω της οποίας το ARDUINO αφενός μπορεί να τροφοδοτείται με την απαραίτητη ενέργεια και αφετέρου μεταφέρει στον υπολογιστή τα δεδομένα προς επεξεργασία.

Για να μπορέσουμε να συνδέσουμε το ARDUINO με το LabVIEW θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε μια εξειδικευμένη διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών, δηλαδή ένα API (Application Programming Interface) που έχει τη δυνατότητα να καθορίζει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ πολλαπλών διαμεσολαβητών λογισμικού. Το API που χρησιμοποιήσαμε για να συνδέσουμε το ARDUINO με το LabVIEW ονομάζεται NI-VISA (National Instruments - Virtual Instrument Software Architecture).

Το NI-VISA είναι ένα API που παρέχει μια διεπαφή προγραμματισμού για τον έλεγχο των οργάνων που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως Ethernet / LXI, GPIB, serial, USB, PXI και VXI σε περιβάλλοντα ανάπτυξης εφαρμογών National Instruments όπως το LabVIEW, το LabVIEW NXG, το LabWindows / CVI και το Measurement Studio. Το API εγκαθίσταται μέσω του προγράμματος οδήγησης NI-VISA [48].

Στα πλεονεκτήματα αυτού του API είναι, πως παρέχει ανεξαρτησία από το είδος της διεπαφής καθώς οι λειτουργίες των οργάνων που υποστηρίζει το LabVIEW με χρήση του NI-VISA δεν εξαρτώνται από τον τύπο της διεπαφής (δηλαδή αν είναι μέσω GRIB ή μέσω USB θύρας). Επίσης, υποστηρίζει φορητότητα πλατφόρμας καθώς τα προγράμματα που είναι σχεδιασμένα στο LabVIEW και χρησιμοποιούν κλήσεις συνάρτησης VISA, μπορούν να μετακινηθούν και να χρησιμοποιηθούν σε άλλη πλατφόρμα.

Επίσης, το NI-VISA μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορα λειτουργικά συστήματα όπως Windows, Linux, MacOS κ.λπ. Επίσης, το NI-VISA είναι εύκολο στην εγκατάσταση και την εκμάθηση, διαθέτοντας λειτουργικότητα που προκύπτει από ένα συμπαγές σύνολο εντολών, που δεν καθιστά αναγκαία την εκμάθηση πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου.

Μια τυπική εφαρμογή VISA λειτουργεί με βάση τα ακόλουθα βήματα:

- Άνοιγμα μιας περιόδου σύνδεσης σε ένα δοσμένο πόρο VISA
- Διαμόρφωση των ρυθμίσεων που αφορούν τον ρυθμό Baud-Rate, τον χαρακτήρα τερματισμού, τη θύρα επικοινωνίας κ.λ.π.
- Διαδικασία εγγραφής ή διαδικασία ανάγνωσης ή και τα δύο



- Κλείσιμο της περιόδου σύνδεσης
- Ανάγνωση και αντιμετώπιση των τυχόντων σφαλμάτων επικοινωνίας

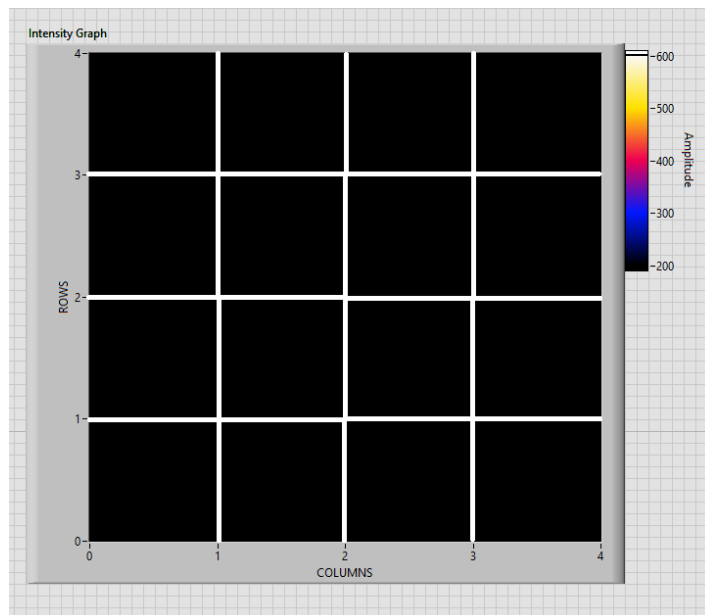
Αυτή η σειρά βημάτων είναι ανεξάρτητη από το πρωτόκολλο επικοινωνίας και το μόνο που αλλάζει σε κάθε υποπερίπτωση είναι το όνομα του VISA πόρου.

### 6.3.2 Η τοπολογία του VI

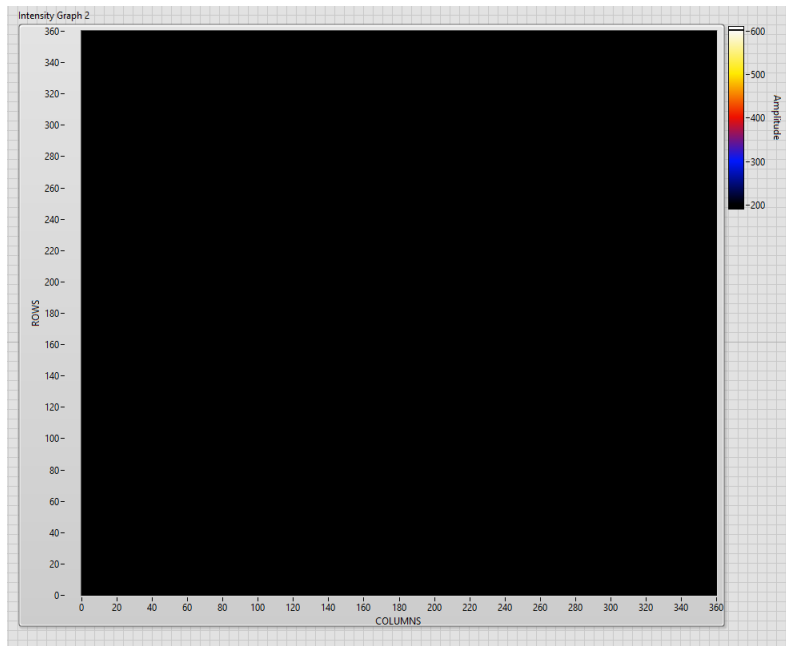
Η τοπολογία των στοιχείων ελέγχου στο front panel, καθώς και των συναρτήσεων όπως και των υπόλοιπων δομικών στοιχείων στο block-diagram του VI που χρησιμοποιήσαμε για την απεικόνιση των δεδομένων στην οθόνη ενός Η/Υ, έχει την ακόλουθη μορφή:

1. Στο front-panel χρησιμοποιήσαμε τα ακόλουθα στοιχεία ελέγχου:

- Γράφημα έντασης (Intensity Graph - 2 τον αριθμό) που χρησιμοποιούν χρωματική αντιστοίχιση σε μια γραφική παράσταση 2D, με βάση μια κλίμακα χρώματος η οποία αντιστοιχίζει με διαφορετικά χρώματα, τις μεταβολές της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εκάστοτε θερμίστορ του δισδιάστατου αισθητήρα αφής και του θερμίστορ αντιστάθμισης.



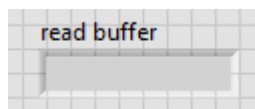
Σχήμα 43: Το 1ο γράφημα έντασης



Σχήμα 44: Το 2ο γράφημα έντασης

Στο σχήμα 43, το 1ο γράφημα έντασης χρησιμοποιεί εναλλαγή των χρωμάτων με βάση τη χρωματική παλέτα δεξιά, για να απεικονίσει τη διαφορά της τιμής κάθε θερμίστορ - το οποίο αντιπροσωπεύεται γραφικά με ένα ξεχωριστό τετράγωνο - του διαστάτου αισθητήρα αφής σε σχέση με το θερμίστορ αντιστάθμισης. Στο σχήμα 44, το 2ο γράφημα έντασης χρησιμοποιεί εναλλαγή των χρωμάτων με βάση τη χρωματική παλέτα δεξιά, για να απεικονίσει τη διαφορά της τιμής σε κάθε σημείο του διαστάτου αισθητήρα αφής σε σχέση με το θερμίστορ αντιστάθμισης.

- Τον ενδείκτη read buffer, στον οποίο εμφανίζεται η τιμή του δεδομένου που εισέρχεται στον buffer μέσω της σειριακής θύρας USB



Σχήμα 45: Ο ενδείκτης read buffer

- Τον διακόπτη stop για τον τερματισμό λειτουργίας του οργάνου



Σχήμα 46: Ο διακόπτης stop

2. Στο block diagram χρησιμοποιήσαμε τα ακόλουθα δομικά στοιχεία:

Τα στοιχεία λειτουργίας του NI-VISA τα οποία είναι τα εξής:

- Η συνάρτηση VISA Clear, η οποία είναι το σημείο εισόδου που αφενός συνδέεται με τον δοσμένο πόρο VISA (στη συγκεκριμένη περίπτωση της θύρα COM του υπολογιστή που συνδέεται με το ARDUINO) και αφετέρου καθαρίζει τους Buffer εισόδου και εξόδου της συσκευής.



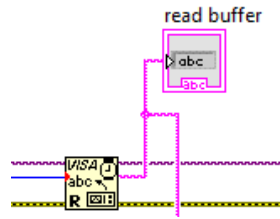
Σχήμα 47: Η συνάρτηση VISA Clear

- Η VISA Clear στη συνέχεια συνδέεται με τη συνάρτηση VISA Open, η οποία ανοίγει μια περίοδο σύνδεσης στη συσκευή που καθορίστηκε πριν με το όνομα πόρου και επιστρέφει ένα αναγνωριστικό περίοδου λειτουργίας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κλήση οποιωνδήποτε άλλων λειτουργιών αυτής της συσκευής.



Σχήμα 48: Η συνάρτηση VISA Open

- Στη συνέχεια η VISA Open συνδέεται μέσα στον βρόχο επανάληψης με τη συνάρτηση VISA Read, η οποία διαβάζει τα δεδομένα, δηλαδή τον καθορισμένο αριθμό byte από τη συσκευή ή τη διεπαφή που καθορίζεται από το όνομα πόρου και επιστρέφει τα δεδομένα στον buffer ανάγνωσης.



Σχήμα 49: Η συνάρτηση VISA Read

- Η συνάρτηση VISA Read συνδέεται αφενός με τον Buffer στον οποίο στέλνει τα δεδομένα, και αφετέρου με τη συνάρτηση VISA Flush I/O Buffer, η οποία καθαρίζει τον buffer από τα δεδομένα εισόδου και εξόδου.



Σχήμα 50: Η συνάρτηση VISA Flush I/O Buffer

- Η συνάρτηση VISA Flush I/O Buffer συνδέεται έξω από τον βρόχο με τη συνάρτηση VISA Close, η οποία κλείνει μια περίοδο λειτουργίας συσκευής, ή ένα αντικείμενο συμβάντος που καθορίζεται από το όνομα πόρου.



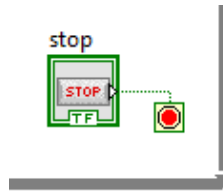
Σχήμα 51: Η συνάρτηση VISA Close

- Η συνάρτηση VISA Close συνδέεται με το VI Simple Error Handler, το οποίο υποδεικνύει εάν προέκυψε σφάλμα. Εάν προκύψει σφάλμα, αυτό το VI επιστρέφει μια περιγραφή του σφάλματος και εμφανίζει προαιρετικά ένα παράθυρο διαλόγου.



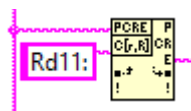
Σχήμα 52: Το VI Simple Error Handler

- Ο βρόχος while loop, ο οποίος τερματίζεται με το πάτημα του διακόπτη stop



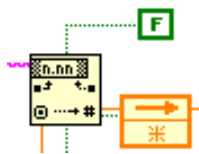
Σχήμα 53: Ο βρόχος while loop τερματίζεται με το πάτημα του διακόπτη stop

- Οι 16 Συναρτήσεις συμβολοσειράς, αντιστοίχισης κανονικής έκφρασης (Match Regular Expression Function) μία για κάθε θερμίστορ. Η συγκεκριμένη συνάρτηση αναζητά μια κανονική έκφραση στη συμβολοσειρά εισόδου που ξεκινά από τη μετατόπιση (offset) που εισάγουμε (π.χ. "Rd11:") και εάν εντοπίσει αντιστοίχιση, χωρίζει τη συμβολοσειρά σε τρεις υποσυμβολοσειρές και οποιονδήποτε αριθμό δευτερευουσών αντιστοιχιών. Οι 16 συναρτήσεις είναι ρυθμισμένες να επιλέγουν και στη συνέχεια να διοχετεύουν τα δεδομένα από τα 16 θερμίστορ, με βάση την μετατόπιση στην οποία αναφερθήκαμε πριν, που λειτουργεί ως μοναδική ταυτότητα (ID) και είναι της μορφής Rdnm (όπου n η σειρά στην οποία βρίσκεται το εκάστοτε θερμίστορ και m η στήλη). Με αυτή την μορφή ελέγχου κάθε Match Regular Expression επιλέγει μόνο τα δεδομένα που αντιστοιχούν στο θερμίστορ που έχει υπό στη δικαιοδοσία της και το οποίο όπως είδαμε έχει μοναδική ταυτότητα μέσα στη συμβολοσειρά. Για παράδειγμα, η πρώτη συνάρτηση έχει στη δικαιοδοσία της το θερμίστορ Rd11, η δεύτερη το Rd12 κ.λπ.



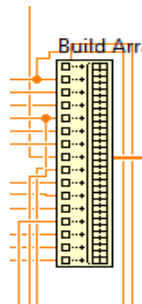
Σχήμα 54: Η συνάρτηση Match Regular Expression

- Οι 16 Συναρτήσεις συμβολοσειράς, μετατροπής αλφαριθμητικού σε αριθμό (Fract / Expr String To Number) μία για κάθε θερμίστορ. Η συγκεκριμένη συνάρτηση ερμηνεύει τους χαρακτήρες 0 έως 9, (+) συν, (-) μείον, e, E και το δεκαδικό σημείο (συνήθως τελεία) σε μια συμβολοσειρά (που ξεκινούν από τη μετατόπιση) ως αριθμό κινητής υποδιαστολής σε μηχανική σημειογραφία, εκθετική ή κλασματική μορφή και τον επιστρέφει σε αριθμό. Με λίγα λόγια, η συγκεκριμένη συνάρτηση παίρνει από την συνάρτηση Match Regular Expression Function την έκφραση που αντιστοιχεί στο θερμίστορ που έχει υπό τη δικαιοδοσία της και στη συνέχεια αφού αποβάλει το ID Rdnm, μετατρέπει τη συμβολοσειρά σε αριθμό. Για παράδειγμα, η συμβολοσειρά Rd31=0.55 μετατρέπεται στον δεκαδικό αριθμό 0.55 . Η συγκεκριμένη συνάρτηση κάνει χρήση και ενός κόμβου ανατροφοδότησης (feedback node), για να ανατροφοδοτήσει τα δεδομένα στην επόμενη συνάρτηση



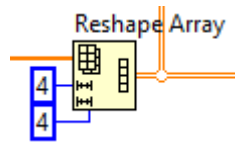
Σχήμα 55: Η συνάρτηση Fract / Expr String To Number

- Η συνάρτηση Build Array συνενώνει πολλούς πίνακες, ή δημιουργεί ένα πίνακα m x n διαστάσεων με τα δεδομένα τα οποία εισέρχονται σε αυτή, μέσω των 16 συναρτήσεων Fract / Expr String To Number. Ο πίνακας που δημιουργείται στο συγκεκριμένο VI είναι ένας πίνακας 16x1:



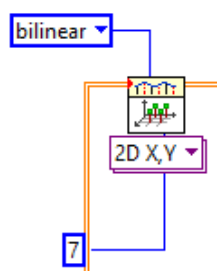
Σχήμα 56: Η συνάρτηση Build Array

- Η συνάρτηση Reshape Array αλλάζει τις διαστάσεις ενός πίνακα σύμφωνα με τις επιθυμητές διαστάσεις. Το συγκεκριμένο VI μετατρέπει τον πίνακα που δημιούργησε η προηγούμενη συνάρτηση (Build Array) και ήταν 16x1, σε πίνακα 4x4. Δηλαδή δημιουργεί έναν πίνακα που έχει το ίδιο μέγεθος με τον πίνακα του δισδιάστατου αισθητήρα αφής.



Σχήμα 57: Η συνάρτηση Reshape Array

- Η συνάρτηση Interpolate 2D VI κάνει δισδιάστατη παρεμβολή, χρησιμοποιώντας μια επιλεγμένη μέθοδο παρεμβολής που βασίζεται στον πίνακα αναζήτησης που ορίζεται από τα X, Y και Z, όπου το Z είναι ένας πίνακας 2D. Η επιλογή bilinear σημαίνει ότι οι παρεμβαλλόμενες τιμές θα τοποθετηθούν σε σημεία κατά μήκος των ευθύγραμμων τμημάτων που συνδέουν το X και το Y. Το ntimes καθορίζει τις θέσεις των σημείων παρεμβολής. Οι παρεμβολές μεταξύ κάθε στοιχείου X και κάθε στοιχείου Y, επαναλαμβάνονται n φορές. Στο συγκεκριμένο VI έχουμε ορίσει 7 επαναλήψεις. Από την έξοδο της συνάρτησης interpolate 2D VI, γίνεται δισδιάστατη παρεμβολή στον 2ο γράφημα έντασης (Intensity Graph 2).



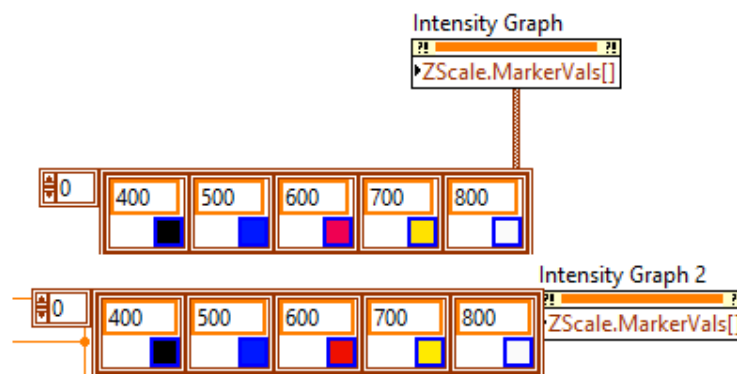
Σχήμα 58: Η συνάρτηση Interpolate 2D VI

- Τα γραφήματα έντασης (Intensity Graphs) του front panel, συνδέονται με τους αντίστοιχους κόμβους στο block diagram, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες συνδέσεις με τα υπόλοιπα VIs και συναρτήσεις.



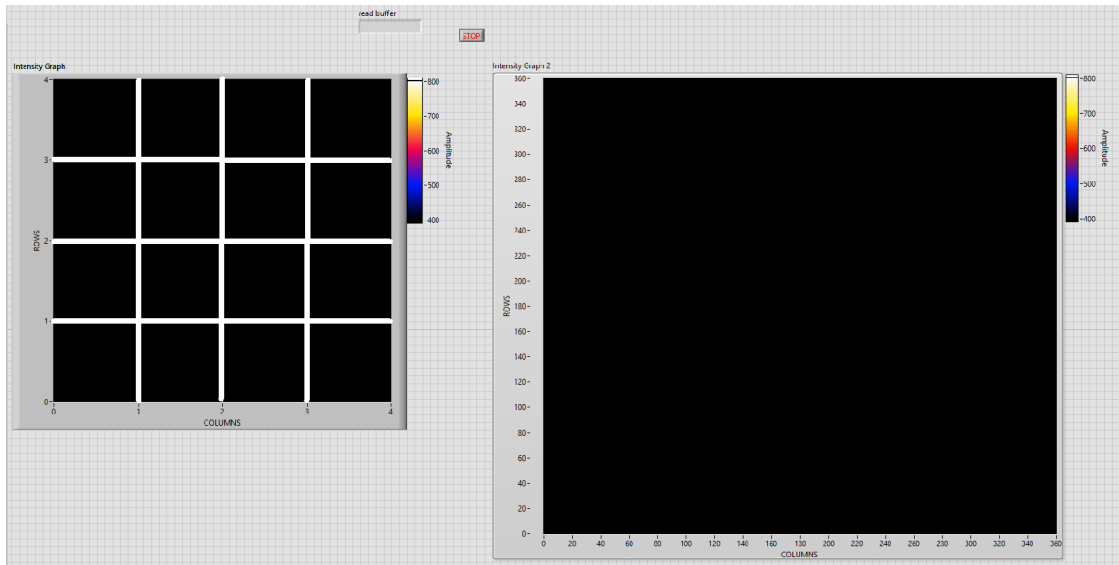
Σχήμα 59: Οι κόμβοι των Intensity Graphs στο block diagram

- Τα γραφήματα έντασης (Intensity Graphs) διαθέτουν δείκτες κλίμακας (Scale Markers), μέσω των οποίων καθορίζεται το χρώμα με την οποία θα αποτυπωθούν τα εισερχόμενα δεδομένα σε κάθε σημείο του γραφήματος έντασης. Στο συγκεκριμένο VI, όταν η διαφορά  $R_{comp} - R_{min}$  είναι μικρότερη ή ίση με 400 το χρώμα παραμένει μαύρο, μεταξύ 401 έως 500 το χρώμα γίνεται μπλε, μεταξύ 501 έως 600 το χρώμα γίνεται κόκκινο, μεταξύ 601 έως 700 το χρώμα γίνεται κίτρινο, και από 701 και πάνω το χρώμα γίνεται λευκό.

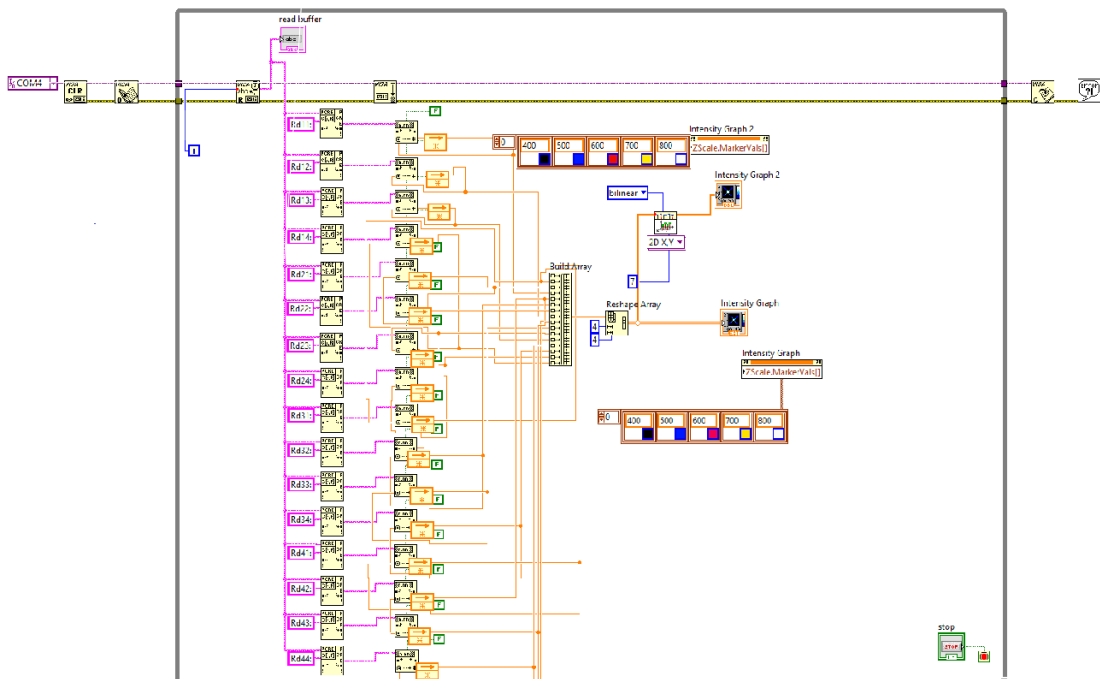


Σχήμα 60: Οι δείκτες κλίμακας των γραφημάτων έντασης





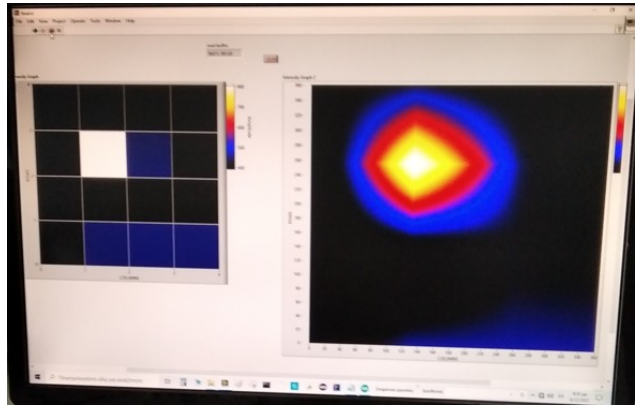
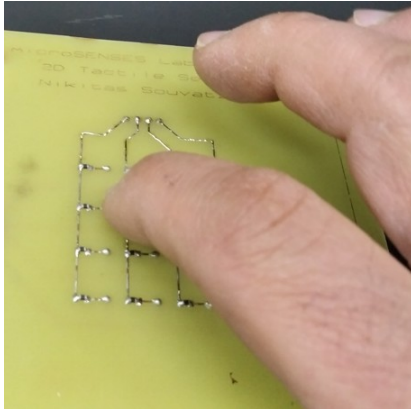
Σχήμα 61: To front panel του VI



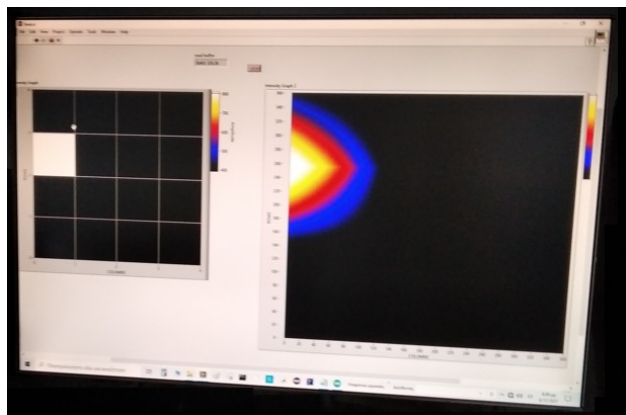
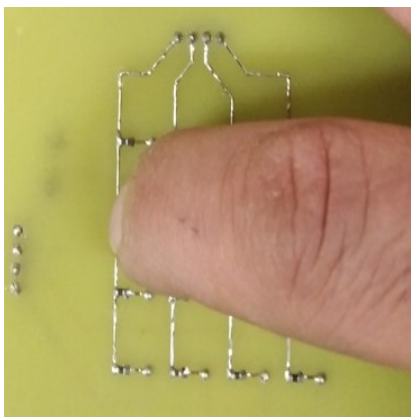
Σχήμα 62: To block diagram του VI

### 6.3.3 Η λειτουργία του αισθητήρα αφής και η απεικόνιση της απόκρισης του αισθητήρα στο VI του LabVIEW

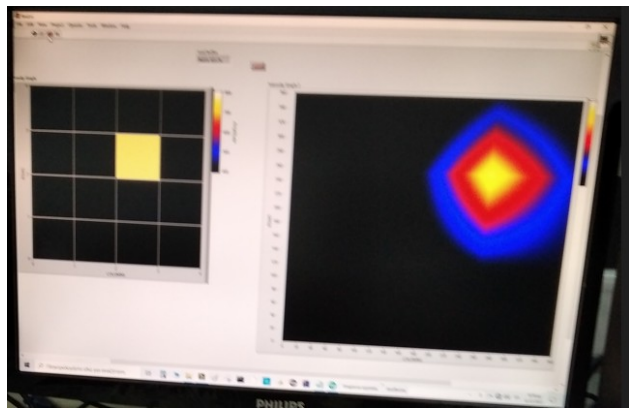
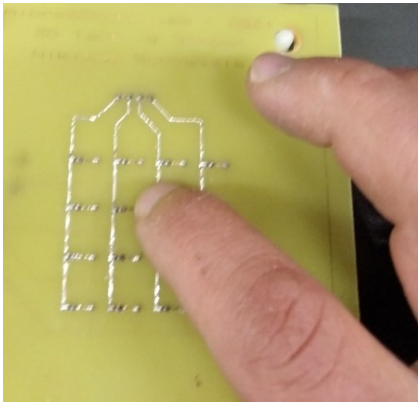
Ακολουθούν μερικές εικόνες όπου φαίνεται η απτική επαφή σε διάφορα σημεία του αισθητήρα και η αντίστοιχη απεικόνιση στο VI του LabVIEW.



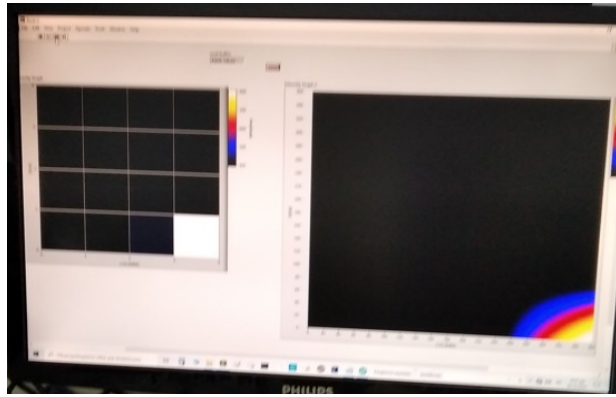
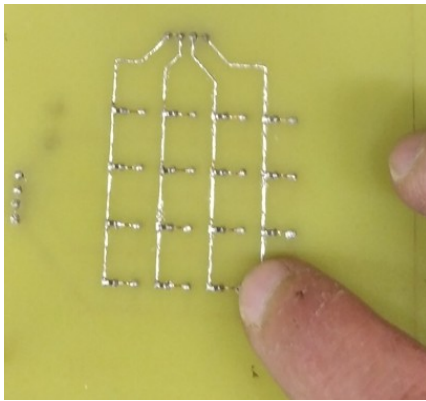
Σχήμα 63: Απτική επαφή στο θερμίστορ R22



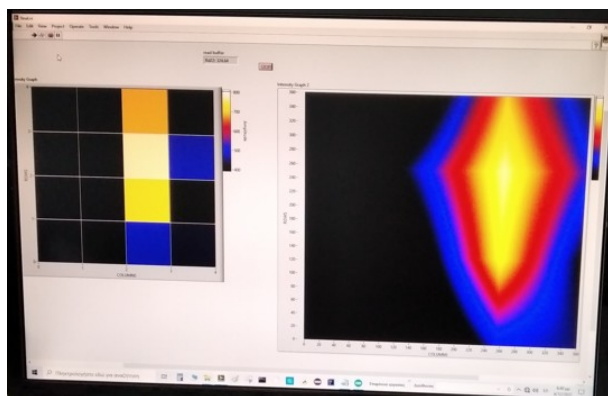
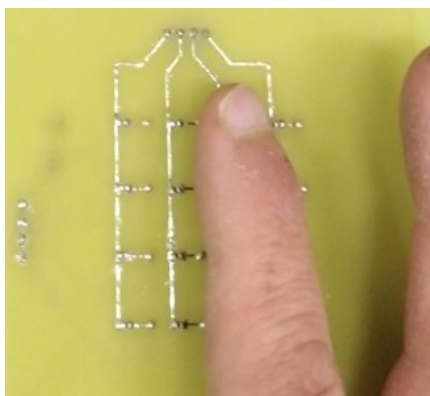
Σχήμα 64: Απτική επαφή στο θερμίστορ R21



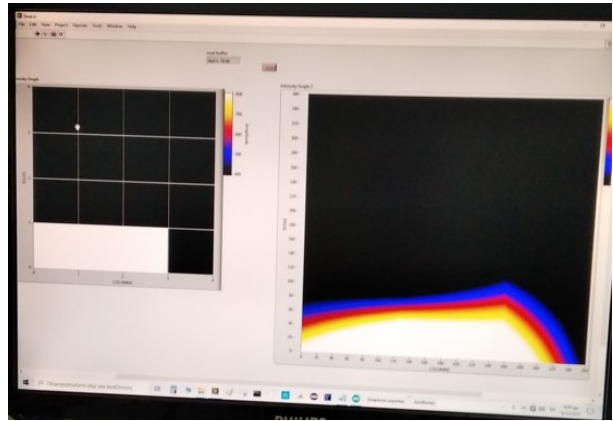
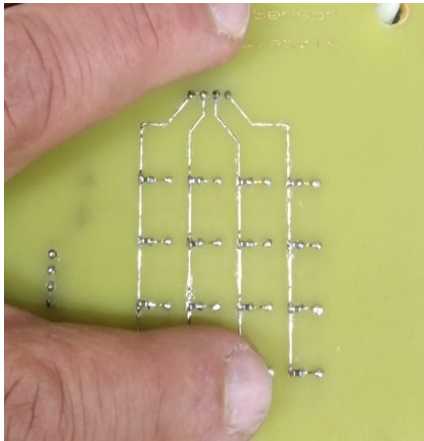
Σχήμα 65: Απτική επαφή στο θερμίστορ R23



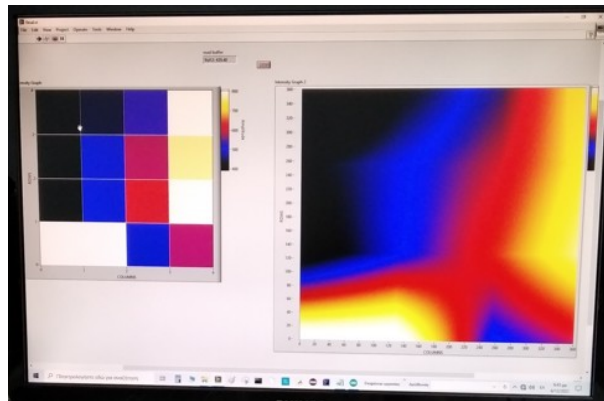
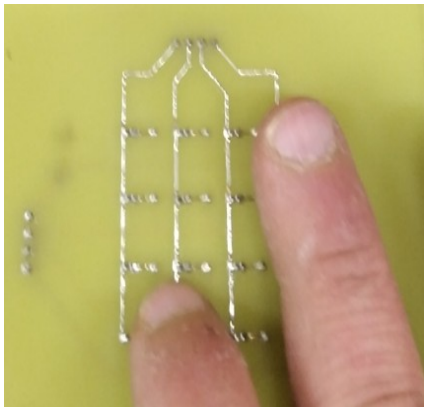
Σχήμα 66: Απτική επαφή στο θερμίστορ R44



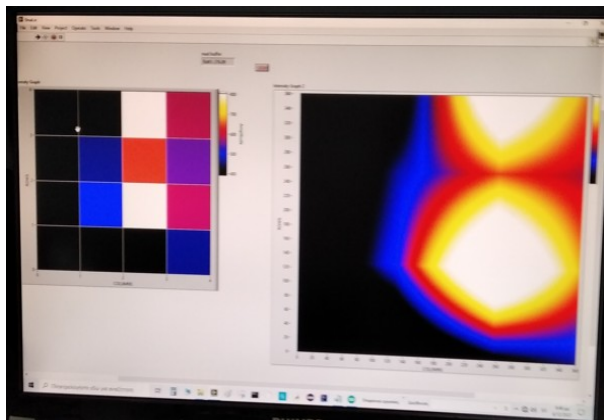
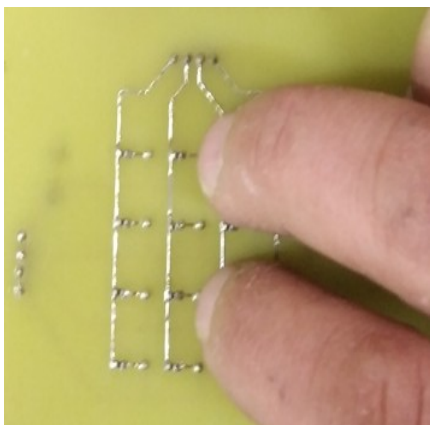
Σχήμα 67: Απτική επαφή ταυτόχρονα στα θερμίστορ R13, R23, R33



Σχήμα 68: Απτική επαφή ταυτόχρονα στα θερμίστορ R41, R42, R43



Σχήμα 69: Απτική επαφή ταυτόχρονα στα θερμίστορ R41, R42, R14, R24, R34



Σχήμα 70: Απτική επαφή ταυτόχρονα στα θερμίστορ R13, R33

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## Χαρακτηρισμός της διάταξης – Αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων

---

### 7.1 Το λογισμικό MATLAB

Το λογισμικό MATLAB (MAtrix LABoratory) είναι μια ισχυρή πλατφόρμα προγραμματισμού, την οποία χρησιμοποιούν εκατομμύρια επιστήμονες και μηχανικοί για να πραγματοποιήσουν από απλούς αριθμητικούς υπολογισμούς και σχεδίαση διαγραμμάτων, μέχρι και πιο σύνθετες εργασίες όπως δημιουργία μοντέλων, ανάλυση δεδομένων, επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών προβλημάτων, ανάπτυξη αλγόριθμων κ.λπ. [49]

Το λογισμικό MATLAB διαχειρίζεται ένα περιβάλλον εργασίας στον υπολογιστή, το οποίο προσφέρεται για επαναληπτικές διαδικασίες ανάλυσης και σχεδίασης μέσω μιας γλώσσας προγραμματισμού που χρησιμοποιεί στοιχεία της γραμμικής άλγεβρας (πίνακες, μήτρες κ.λπ.) Στο βασικό μενού περιλαμβάνει τον Live Editor για τη δημιουργία σεναρίων (scripts), τα Plots για τη δημιουργία διαγραμμάτων και γραφημάτων, τα Apps για την εισαγωγή εξειδικευμένων εφαρμογών, το Publish για τη διαχείριση του κώδικα και της μορφής εξαγωγής του κειμένου κ.λπ.

### 7.2 Ο μικροθερμαντήρας και η συσκευή XY linear stage

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ένας μικροθερμαντήρας με τον οποίο έγινε η προσομοίωση της επίδρασης ενός θερμικού στοιχείου, μέσω του οποίου μεταβάλλεται η επιφανειακή θερμοκρασία σε συγκεκριμένα σημεία πάνω από τον δισδιάστατο αισθητήρα αφής. Ο μικροθερμαντήρας αποτελούνταν από τα καλώδια τροφοδοσίας και ένα θερμίστορ PTC, το οποίο τροφοδοτούνταν με τάση 230 V AC μέσω της οποίας αυτοθερμαίνονταν και επιλέχθηκε επειδή έχει 2 βασικά πλεονεκτήματα.

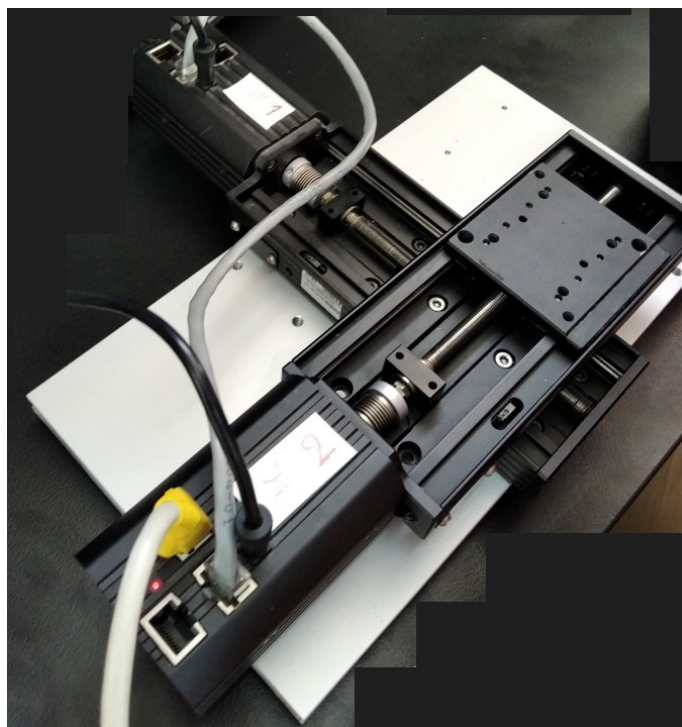
Το ένα πλεονέκτημα του είναι η πολύ μικρή διάσταση του, με διάμετρο μόλις 4 mm που το καθιστά πολύ καλή επιλογή για τη χρήση του ως μικροθερμαντήρα και το δεύτερο πλεονέκτημα του είναι - με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή - η πολύ γρήγορη μετάβαση του από την κατάσταση θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας, όπου ο μικροθερμαντήρας έχει τη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας, αλλά και η μετάβαση του από την κατάσταση σταθερής λειτουργίας όπου ο μικροθερμαντήρας έχει τη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας, στην κατάσταση θερμοκρασίας περιβάλλοντος, σε χρόνο ίσο με 6 δευτερόλεπτα [50].



Σχήμα 71: Ο μικροθερμαντήρας κατά τη διάρκεια του πειράματος ευρισκόμενος πάνω από τον δισδιάστατο πίνακα αισθητήρα αφής

Η συσκευή XY linear stage έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί ως φορέας μετακίνησης ακριβείας ενός στοιχείου (στη πειραματική διαδικασία το κινητό μέρος ήταν ο δισδιάστατος αισθητήρας) σε ιδανική ευθεία στον άξονα X ή/και στον άξονα Y. Οι συνδυασμοί κίνησης που μπορούν να προκύψουν, επιλέγονται και καθορίζονται από τον χρήστη μέσω ενός προγράμματος που ελέγχεται από το λογισμικό LabVIEW, ενώ οι συρμοί στους άξονες X και Y χρησιμοποιούν ενεργοποιητές ακρίβειας (της τάξης του 1  $\mu\text{m}$ ), προηγμένες διαμορφώσεις ατέρμονα, καθώς και κατάλληλα διαμορφωμένους υποδοχείς.

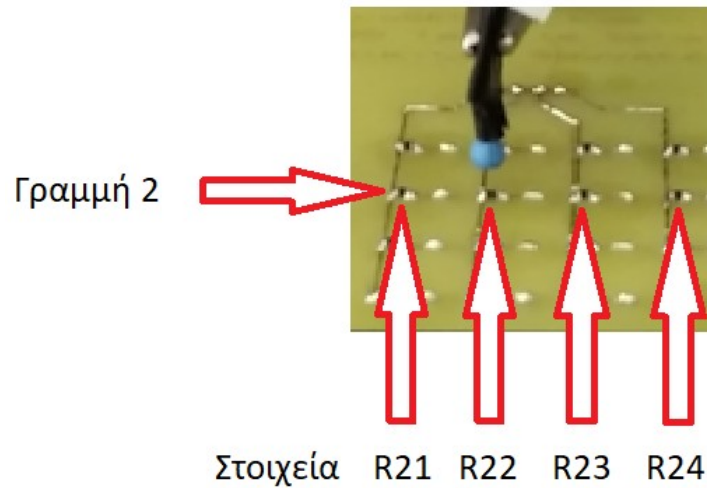




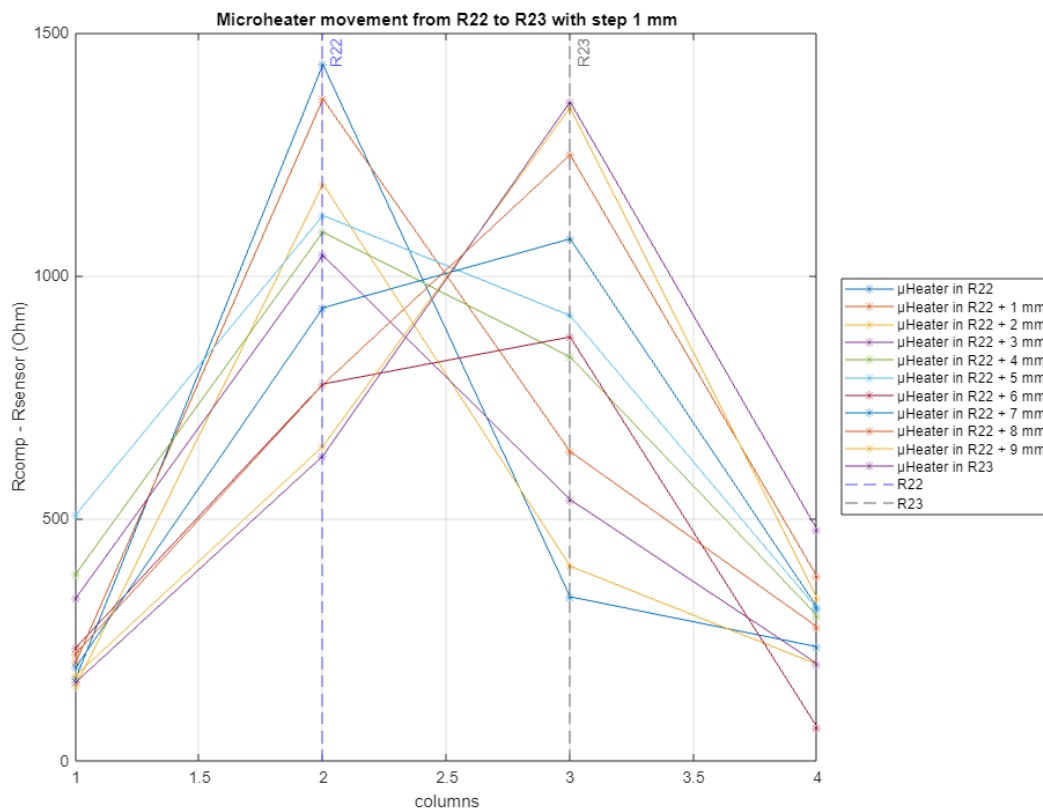
Σχήμα 72: Η συσκευή XY linear stage

7.3 Μέτρηση της μεταβολής των τιμών αντιστάσεων των στοιχείων μιας γραμμής του διδιάστατου πίνακα υπό την επίδραση του μικροθερμαντήρα, και σύγκριση με την αντίσταση του αισθητήρα αντιστάθμισης

Μια από τις πειραματικές δοκιμές στην οποία υποβάλλαμε τον διδιάστατο πίνακα αισθητήρα αφής, ήταν η μέτρηση της μεταβολής των αντιστάσεων των στοιχείων μιας γραμμής του διδιάστατου πίνακα υπό την επίδραση του μικροθερμαντήρα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε τα στοιχεία της 2ης γραμμής του πίνακα (δηλαδή τα στοιχεία R21, R22, R23, R24), όταν ο μικροθερμαντήρας μετακινείται από το σημείο A (θερμίστορ R22) στο σημείο B (θερμίστορ R23). Στη συνέχεια καταγράψαμε τη διαφορά μεταξύ της τιμής της αντίστασης κάθε στοιχείου και του αισθητήρα αντιστάθμισης. Η διαδρομή που ακολούθησε ο μικροθερμαντήρας σε αυτή τη πειραματική διαδικασία, φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 73. Τα διαγράμματα της απόκρισης του συστήματος που έγιναν με τη βοήθεια του Matlab, φαίνονται παρακάτω στο σχήμα 74 (οι αντίστοιχες μετρήσεις είναι διαθέσιμες στο παράρτημα A της εργασίας).



Σχήμα 73: Η διαδρομή που ακολούθησε ο μικροθερμαντήρας στη γραμμή 2 του δισδιάστατου αισθητήρα μεταξύ των στοιχείων R22 και R23



Σχήμα 74: Τα διαγράμματα της διαφοράς του Rcomp με τα 4 θερμίστορ της γραμμής 2

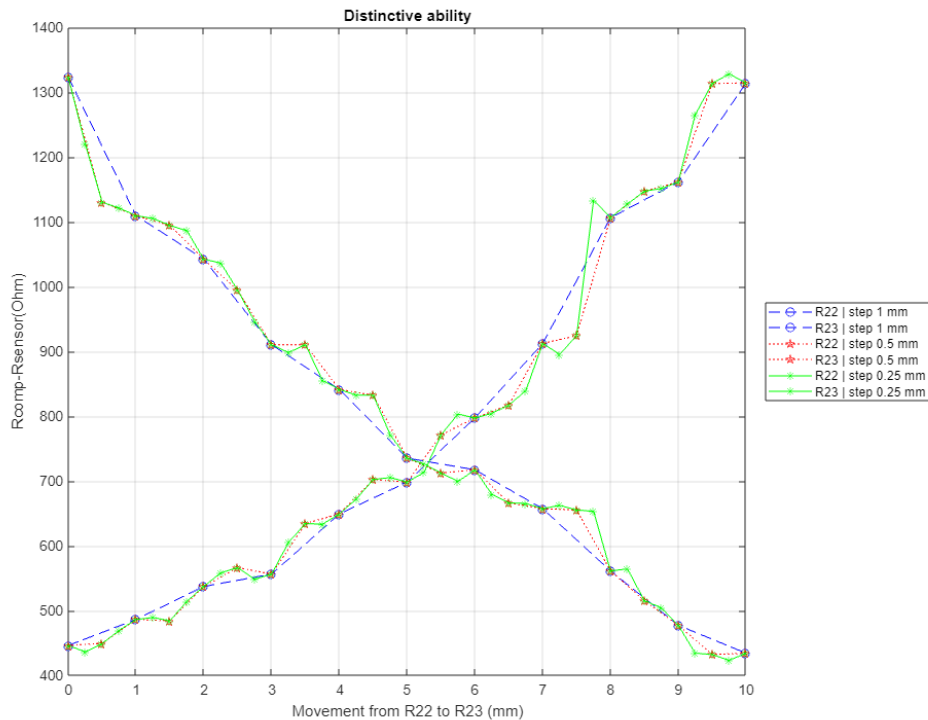


Βλέποντας τα διαγράμματα, αλλά και τις τιμές στο παράρτημα Α της εργασίας της διαφοράς του  $R_{comp}$  με τα 4 θερμίστορ της γραμμής 2, παρατηρούμε τα εξής:

- Η μεγαλύτερη διαφορά του  $R_{comp}$  με τα θερμίστορ R22 και R23 προέκυπτε όπως αναμενόταν όταν ο μικροθερμαντήρας βρισκόταν στο πλησιέστερο σημείο σε σχέση με αυτά τα θερμίστορ. Αντίστοιχα η μικρότερη διαφορά μεταξύ του  $R_{comp}$  με τα θερμίστορ R22 και R23 προέκυπτε όπως αναμενόταν όταν ο μικροθερμαντήρας βρισκόταν στο πιο απομακρυσμένο σημείο σε σχέση με αυτά τα θερμίστορ.
- Οι διαφορές που προέκυψαν μεταξύ του  $R_{comp}$  και των ακριανών θερμίστορ της γραμμής 2 (δηλαδή με τα θερμίστορ R21 και R24) δεν φαίνονταν να επηρεάζονται από τη θέση του μικροθερμαντήρα και κυμάνθηκαν με τυχαίο τρόπο από 69  $\Omega$  η ελάχιστη, έως και 507  $\Omega$  η μέγιστη. Αυτό σημαίνει ότι τα ακριανά θερμίστορ R21 και R24, σε μια απόσταση από 1cm η ελάχιστη έως και 2 cm η μέγιστη από το σημείο στο οποίο βρισκόταν ο μικροθερμαντήρας, δεν επηρεάζονταν από τη μεταβολή της θερμοκρασίας που προκαλούσε ο μικροθερμαντήρας και ήταν σχετικά “αναίσθητα”.
- Οι διαφορές του  $R_{comp}$  με το θερμίστορ R22 (που ήταν και το σημείο αφετηρίας ή αλλιώς σημείο Α της πορείας του μικροθερμαντήρα πάνω από την γραμμή 2), μειώνονταν όπως αναμενόταν όσο ο μικροθερμαντήρας απομακρύνονταν από το θερμίστορ R22, αλλά η διαφορά παρέμεινε σε υψηλό σημείο (628  $\Omega$ ) ακόμα και όταν ο μικροθερμαντήρας βρέθηκε στο σημείο Β, δηλαδή στο πιο απομακρυσμένο σημείο της πορείας του μικροθερμαντήρα από το θερμίστορ R22. Αυτό προφανώς σημαίνει ότι ο χρόνος ψύξης (ανόδου) του θερμίστορ ήταν πιο αργός από ότι αναμενόταν. Οι λόγοι για τους οποίους ο χρόνος ψύξης του θερμίστορ ήταν αργός, θα τους δούμε αναλυτικά στην ενότητα 7.5 όπου γίνεται μέτρηση της σταθεράς χρόνου θέρμανσης και ψύξης των θερμίστορ του δισδιάστατου πίνακα.

#### 7.4 Υπολογισμός της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα

Οι μετρήσεις για τον υπολογισμό της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα έγιναν με μετακίνηση του μικροθερμαντήρα από το σημείο A (θερμίστορ R22) στο σημείο B (θερμίστορ R23) για βήμα στον XY linear stage ίσο με: 1mm, 0,5 mm και 0,25 mm. Τα διαγράμματα της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα απεικονίζονται παρακάτω στο σχήμα 75 και οι αντίστοιχες μετρήσεις είναι διαθέσιμες στο παράρτημα Β της εργασίας.



Σχήμα 75: Τα διαγράμματα της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα για βήμα 1 mm, για βήμα 0.5 mm, και για βήμα 0.25 mm

Βλέποντας τα διαγράμματα της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα, αλλά και τις τιμές στο παράρτημα Β της εργασίας, παρατηρούμε τα εξής:

- Η διακριτική ικανότητα του αισθητήρα για βήμα 1 mm ήταν επαρκής, αφού τόσο κατά τη ψύξη του θερμίστορ R22 όσο και κατά τη θέρμανση του θερμίστορ R23 δεν προέκυψε καμία παλινδρόμηση στις διαφορές  $R_{comp} - R_{mn}$  (δηλαδή μεταβολή της διαφοράς από μεγαλύτερη τιμή σε μικρότερη τιμή και πάλι σε μεγαλύτερη τιμή, αλλά και το αντίστροφο)

- Η διακριτική ικανότητα για βήμα 0.5 mm ήταν σχετικά ικανοποιητική, αφού τόσο κατά τη ψύξη του θερμίστορ R22 όσο και κατά τη θέρμανση του θερμίστορ R23 προέκυψαν 3 παλινδρομήσεις (ποσοστό 14% σε σύνολο 21 μετρήσεων) στις διαφορές  $R_{comp} - R_{mn}$
- Η διακριτική ικανότητα για βήμα 0.25 mm ήταν σχετικά ικανοποιητική ως και ανεπαρκής, αφού κατά τη ψύξη του θερμίστορ R22 προέκυψαν 7 παλινδρομήσεις (ποσοστό 17% σε σύνολο 41 μετρήσεων), όσο και κατά τη θέρμανση του θερμίστορ R23 προέκυψαν 9 παλινδρομήσεις (ποσοστό 22% σε σύνολο 41 μετρήσεων) στις διαφορές  $R_{comp} - R_{mn}$
- Οι διαφορές  $R_{comp} - R_{mn}$  τόσο για το θερμίστορ R22 όσο και για το θερμίστορ R23, έγιναν ίσες μεταξύ τους περίπου στα 5,2 mm της απόστασης μεταξύ R22 και R23, δηλαδή σχεδόν στο μέσο της, αφού η συνολική διαδρομή είναι 10 mm

7.5 Μέτρηση της θερμικής σταθεράς χρόνου θέρμανσης (καθόδου) και ψύξης (ανόδου) του αισθητήρα για διαφορετικές αποστάσεις του μικροθερμαντήρα σε σχέση με τον αισθητήρα

Η ωμική αντίσταση ενός θερμίστορ μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η εξωτερική θερμοκρασία. Η θερμική σταθερά χρόνου (thermal time constant) του θερμίστορ του οποίου η ωμική αντίσταση μεταβάλλεται συναρτήσει της μεταβολής της εξωτερικής θερμοκρασίας, είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταβολή της θερμοκρασίας του θερμίστορ στο 63,21% της διαφοράς μεταξύ αρχικής και τελικής θερμοκρασίας [51].

Η θερμική χρονική σταθερά υποδεικνύει τον χρόνο που χρειάζεται το θερμίστορ για να μεταβεί από την αρχική θερμοκρασία στη τελική. Είναι λογικό πως ένα στοιχείο με χαμηλότερη (ή αντίστοιχα υψηλότερη) θερμική χρονική σταθερά χρειάζεται λιγότερο (ή αντίστοιχα μεγαλύτερο) χρόνο για να επιτύχει αλλαγή θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλάζει από  $T_1$  σε  $T_2$  (όπως συνέβη όταν πλησιάσαμε ή αντίστοιχα απομακρύνουμε τον μικροθερμαντήρα από τον αισθητήρα) προκύπτουν οι ακόλουθες ισοδύναμες εξισώσεις [52] που δείχνουν τη σχέση μεταξύ του χρόνου  $t$  που έχει παρέλθει, της θερμικής σταθεράς χρόνου  $\tau$ , και της θερμοκρασίας  $T$  του θερμίστορ:

$$T = (T_1 - T_2) \exp(-t/\tau) + T_2 \quad (1)$$

$$T = (T_2 - T_1)[1 - \exp(-t/\tau)] + T_1 \quad (2)$$

Κάνοντας χρήση της εξίσωσης (2) προκύπτει ότι:

$$(T - T_1) / (T_2 - T_1) = 1 - \exp(-t/\tau)$$

Και για  $t = \tau$  προκύπτει ότι:

$$(T - T_1) = 63,21\% (T_2 - T_1)$$

Με άλλα λόγια, η διαφορά της θερμοκρασίας  $T$  του θερμίστορ συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας μείον την αρχική εξωτερική θερμοκρασία, είναι ίση με το 63,21% της διαφοράς της τελικής εξωτερικής θερμοκρασίας μείον την αρχική εξωτερική θερμοκρασία. Γνωρίζοντας πως σε ένα θερμίστορ NTC όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στον δισδιάστατο αισθητήρα αφής, η ωμική αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιήσαμε τη σταθερά χρόνου συσχετίζοντας τη με τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Οι μετρήσεις για τον υπολογισμό της σταθεράς χρόνου καθόδου και ανόδου του αισθητήρα, έγιναν για απόσταση του μικροθερμαντήρα από τον αισθητήρα (και πιο συγκεκριμένα το θερμίστορ R33) ίση με: 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm. Κάθε μέτρηση διήρκησε 40 λεπτά (20 λεπτά με ενεργοποιημένο τον μικροθερμαντήρα και 20 λεπτά με απενεργοποιημένο τον μικροθερμαντήρα, με σκοπό να σταθεροποιηθούν γύρω από μια περιοχή τιμών, αντίστοιχα η ελάχιστη μέση τιμή και η μέγιστη μέση τιμή ωμικής αντίστασης). Η διττή σχέση που χρησιμοποιήσαμε για να υπολογίσουμε την τιμή της ωμικής αντίστασης, την οποία λαμβάνει το θερμίστορ κατά τη χρονική στιγμή που είναι ίση με την σταθερά χρόνου, είναι η ακόλουθη:

$$\text{Για τη σταθερά χρόνου καθόδου: } R = 63,21\% |R_1 - R_2| + R_2$$

$$\text{Για τη σταθερά χρόνου ανόδου: } R = 63,21\% |R_1 - R_2| + R_1$$

Με βάση την παραπάνω σχέση, υπολογίσαμε τη σταθερά χρόνου θέρμανσης (καθόδου) και ψύξης (ανόδου) του αισθητήρα:

	Χρόνος (ανόδου) θέρμανσης			
ΑΠΟΣΤΑΣΗ (mm)	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
ΣΤΑΘΕΡΑ ΧΡΟΝΟΥ $\tau$ (sec)	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>23</b>

	Χρόνος (καθόδου) ψύξης			
ΑΠΟΣΤΑΣΗ (mm)	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
ΣΤΑΘΕΡΑ ΧΡΟΝΟΥ $\tau$ (sec)	<b>114</b>	<b>91</b>	<b>81</b>	<b>74</b>

Σε σχέση με αυτές τις τιμές της σταθεράς χρόνου θέρμανσης και ψύξης του αισθητήρα, παρατηρούμε τα εξής:

- Η σταθερά χρόνου θέρμανσης αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση του μικροθερμαντήρα από τον αισθητήρα, διότι όσο πιο κοντά βρίσκεται ο μικροθερμαντήρας στον αισθητήρα, τόσο πιο γρήγορα ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται η απόσταση αυξάνεται και η σταθερά χρόνου θέρμανσης
- Η σταθερά χρόνου ψύξης μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση του μικροθερμαντήρα από τον αισθητήρα, κάτι που σημαίνει ότι όσο πιο κοντά βρίσκεται ο μικροθερμαντήρας (όταν απενεργοποιείται) στον αισθητήρα, τόσο πιο αργά ψύχεται ο αισθητήρας. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ τους, μειώνεται και η σταθερά χρόνου ψύξης του αισθητήρα
- Η σταθερά χρόνου θέρμανσης του αισθητήρα είναι αρκετά γρήγορη, από 8 sec η μικρότερη έως 23 sec η μεγαλύτερη και είναι πολύ κοντά στον ονομαστικό χρόνο μετάβασης του μικροθερμαντήρα που είναι τα 6 sec

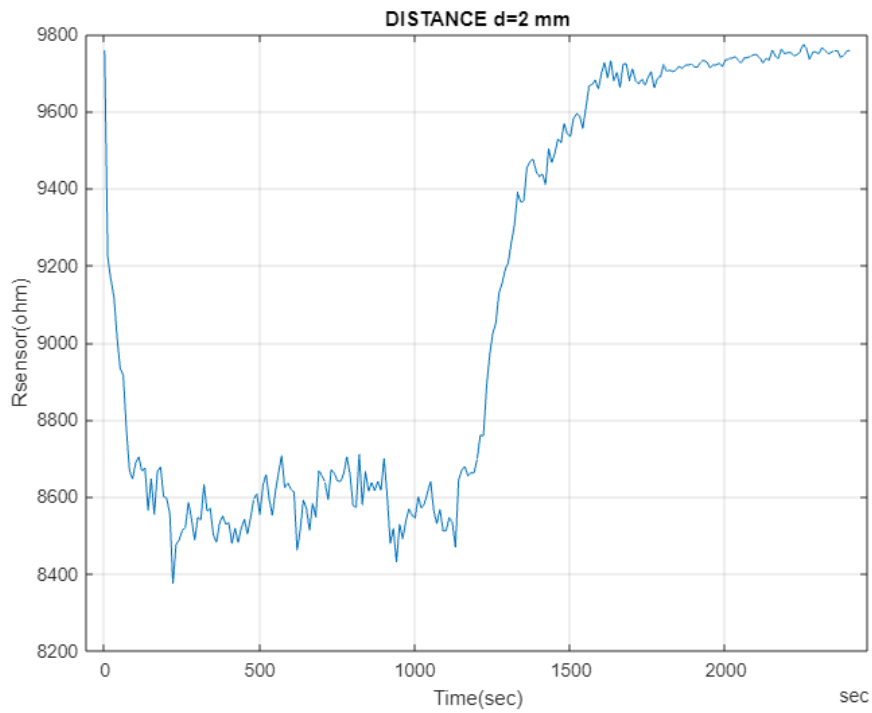
- Η σταθερά χρόνου ψύξης του αισθητήρα είναι γενικά πιο αργή από τη σταθερά χρόνου θέρμανσης και γίνεται πιο αργή, από 114 sec η μεγαλύτερη έως 74 sec η μικρότερη, όσο πιο κοντά βρίσκεται ο μικροθερμαντήρας στον αισθητήρα. Ο λόγος για τον οποίο προκύπτει αυτή η διαφορά μεταξύ σταθεράς χρόνου θέρμανσης και σταθεράς χρόνου ψύξης, είναι διότι όταν ενεργοποιείται ο συγκεκριμένος μικροθερμαντήρας, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του αγγίζει τους 80 °C [53]. Επειδή αυτή η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, όταν απενεργοποιείται ο μικροθερμαντήρας το θερμίστορ επιδεικνύει μια μη γραμμική συμπεριφορά [54] και διατηρεί την αντίσταση του πιο χαμηλά (άρα και τη διαφορά μεταξύ  $R_{comp} - R_{m\eta}$ ) για παραπάνω χρόνο από το αναμενόμενο, συγκρινόμενο με τη σταθερά χρόνου θέρμανσης, επιδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο μια αξιοσημείωτη θερμική αδράνεια όταν μεταβαίνει από την κατάσταση θέρμανσης στη κατάσταση ψύξης.

#### 7.6 Διαγράμματα των μετρήσεων της τιμής της ωμικής αντίστασης ενός στοιχείου του δισδιάστατου αισθητήρα αφής και χρήση της μέσης τιμής

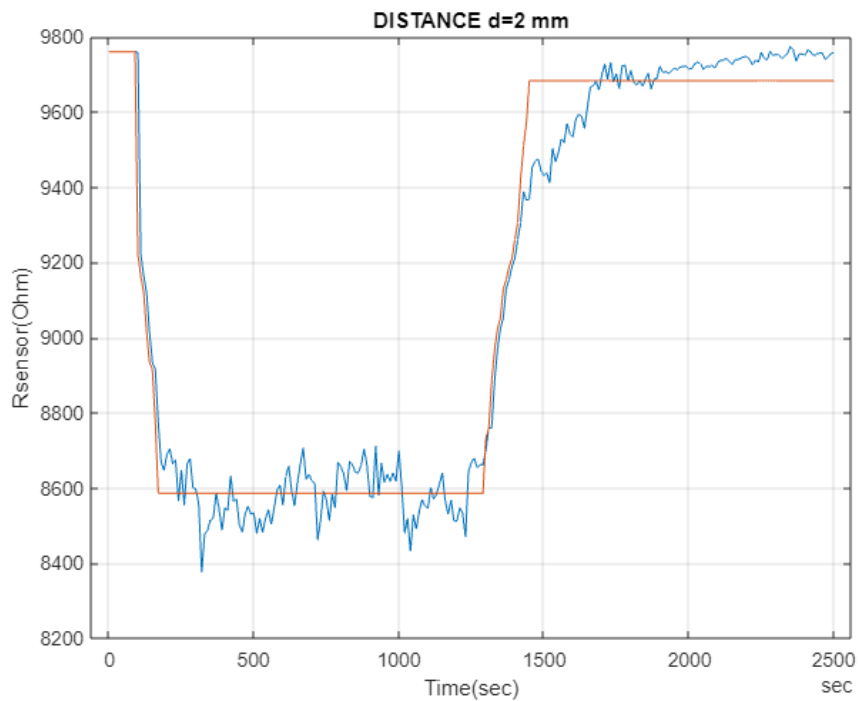
Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, οι μετρήσεις της ωμικής αντίστασης του στοιχείου που χρησιμοποιήσαμε για να υπολογίσουμε την σταθερά χρόνου ανόδου και καθόδου, περιείχαν θόρυβο οπότε για τη δημιουργία των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν και οι μέσες τιμές [II] στα ακόλουθα διαστήματα:

- Στο διάστημα των αρχικών 10 μετρήσεων χωρίς την επίδραση του μικροθερμαντήρα
- Στο διάστημα των μετρήσεων που ενεργοποιήθηκε ο μικροθερμαντήρας
- Στο διάστημα των μετρήσεων όπου η ωμική αντίσταση σταθεροποιήθηκε γύρω από ένα κατώτατο όριο
- Στο διάστημα των μετρήσεων που απενεργοποιήθηκε ο μικροθερμαντήρας
- Στο διάστημα των μετρήσεων όπου η ωμική αντίσταση σταθεροποιήθηκε γύρω από ένα ανώτατο όριο

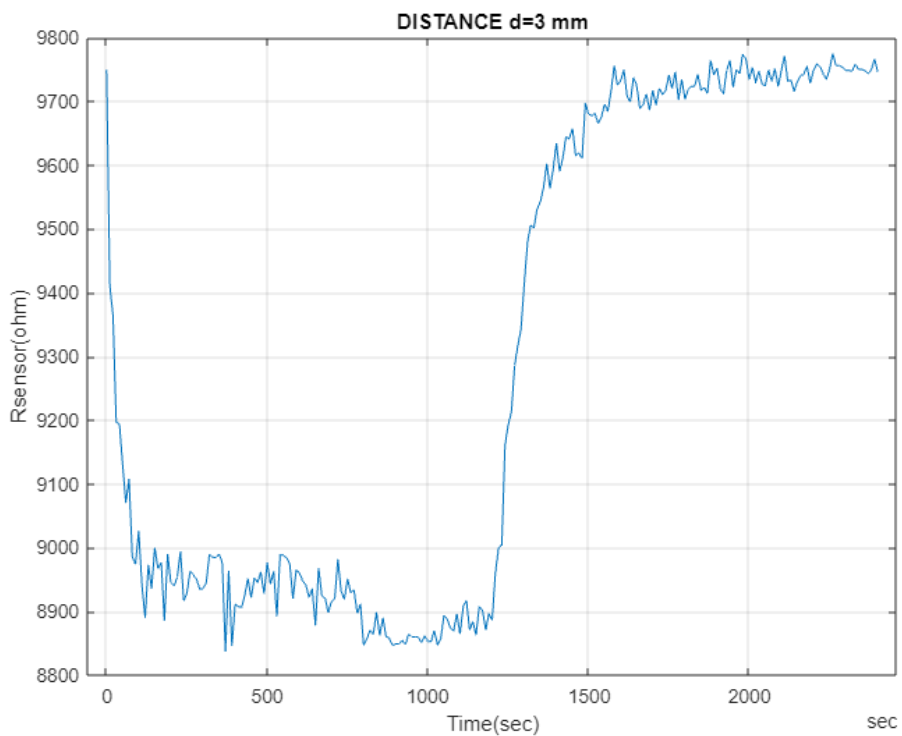
Οι αντίστοιχες μετρήσεις είναι διαθέσιμες στο παράρτημα Γ της εργασίας.



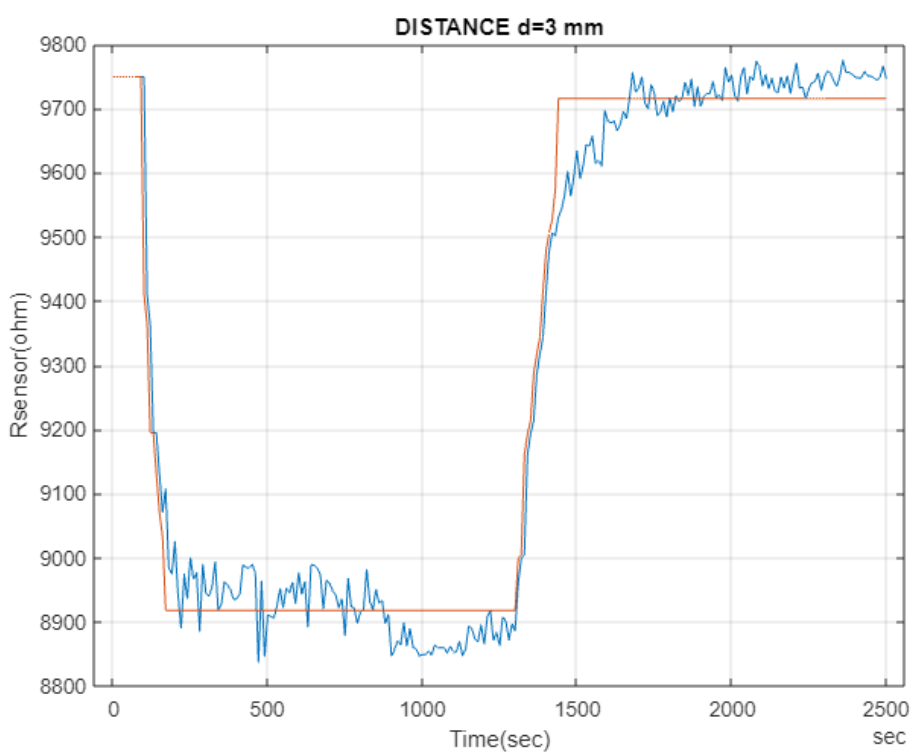
Σχήμα 76: Το διάγραμμα για απόσταση 2 mm



Σχήμα 77: Το διάγραμμα για απόσταση 2 mm (με χρήση μέσης τιμής)

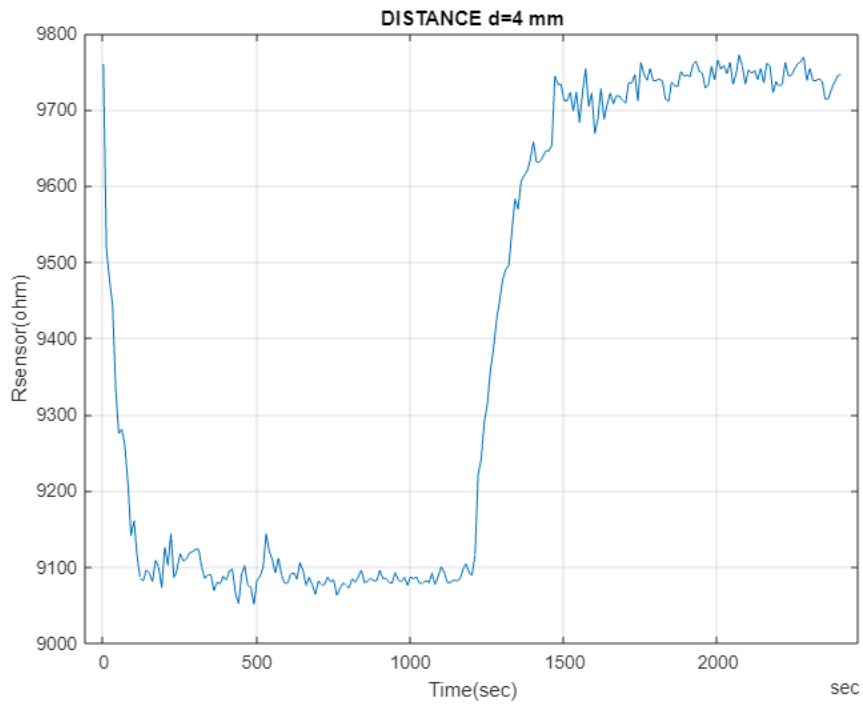


Σχήμα 78: Το διάγραμμα για απόσταση 3 mm

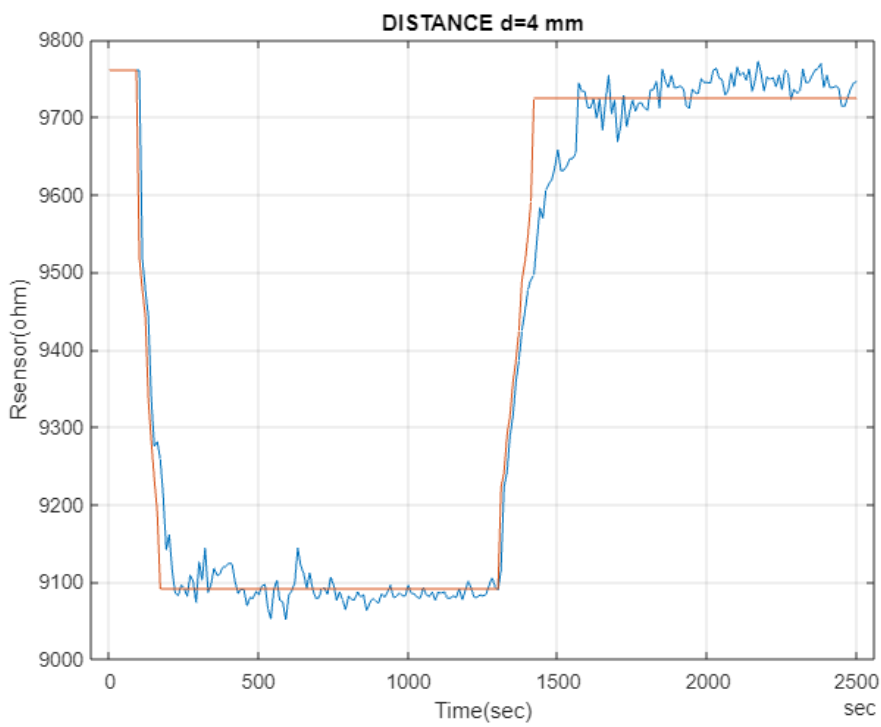


Σχήμα 79: Το διάγραμμα για απόσταση 3 mm (με χρήση μέσης τιμής)

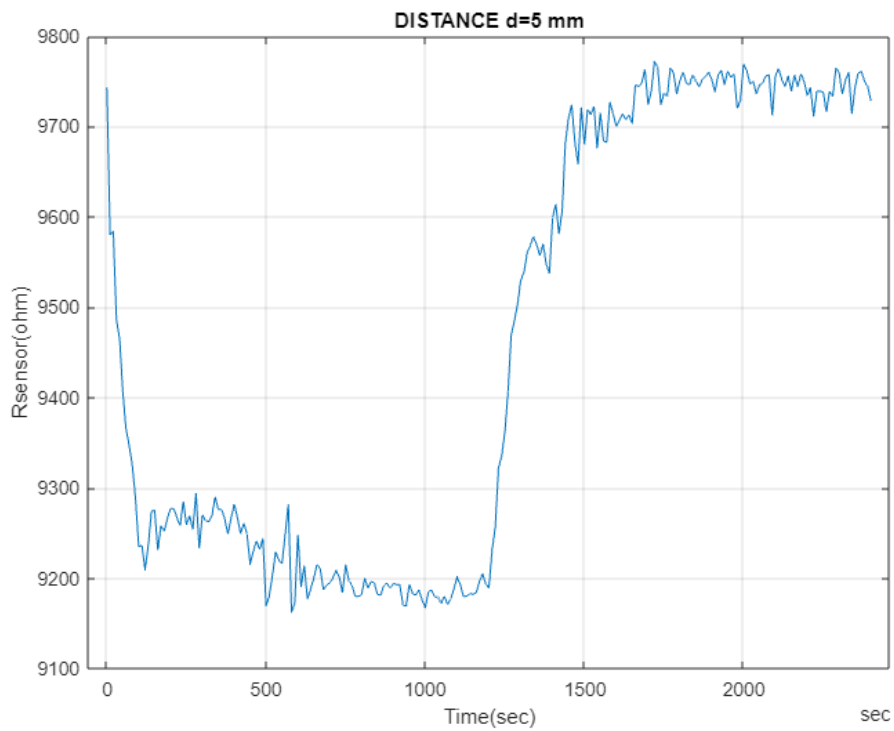




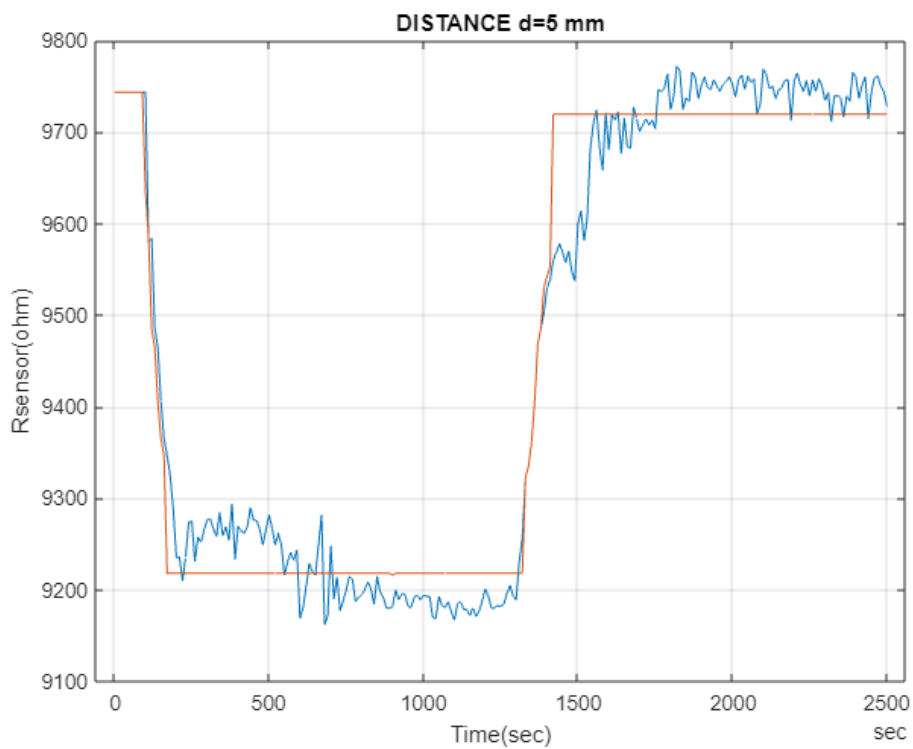
Σχήμα 80: Το διάγραμμα για απόσταση 4 mm



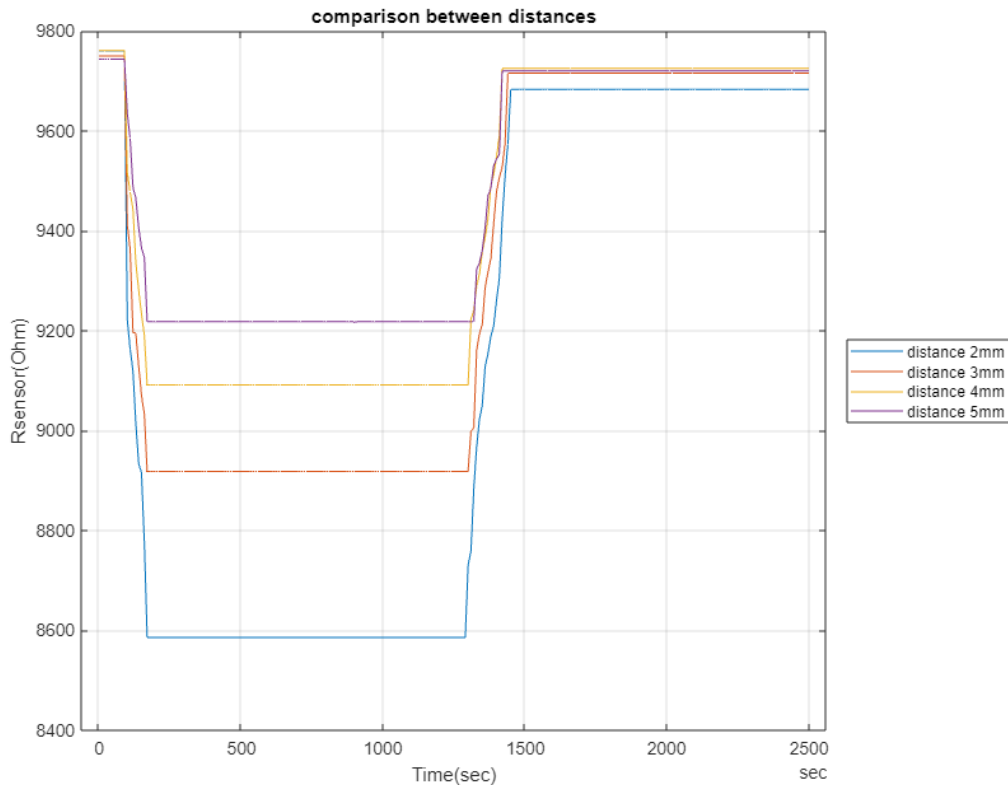
Σχήμα 81: Το διάγραμμα για απόσταση 4 mm (με χρήση μέσης τιμής)



Σχήμα 82: Το διάγραμμα για απόσταση 5 mm



Σχήμα 83: Το διάγραμμα για απόσταση 5 mm (με χρήση μέσης τιμής)



Σχήμα 84: Σύγκριση των διαγραμμάτων των αποστάσεων (με χρήση μέσης τιμής)

Βλέποντας τα διαγράμματα των μετρήσεων της τιμής της ωμικής αντίστασης ενός στοιχείου του δισδιάστατου αισθητήρα αφής σε διαφορετικές αποστάσεις από τον μικροθερμαντήρα και με χρήση της μέσης τιμής, παρατηρούμε τα εξής:

- Στο διάστημα των μετρήσεων όπου η ωμική αντίσταση σταθεροποιήθηκε γύρω από ένα κατώτατο όριο, η μέση τιμή των διαφορών μεταξύ  $R_{comp} - R_{mn}$  είναι μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ μικροθερμαντήρα και αισθητήρα.
- Στο διάστημα των μετρήσεων όπου η ωμική αντίσταση σταθεροποιήθηκε γύρω από ένα ανώτατο όριο, η μέση τιμή των διαφορών μεταξύ  $R_{comp} - R_{mn}$  είναι μικρότερη όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ μικροθερμαντήρα και αισθητήρα. Αυτό συμβαίνει διότι όπως είδαμε και στη προηγούμενη ενότητα, όσο πιο κοντά βρίσκεται ο μικροθερμαντήρας με τον αισθητήρα τόσο μεγαλύτερη θερμική αδράνεια επιδεικνύει κατά την άνοδο (ψύξη)

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## Συμπεράσματα – Προτάσεις

---

Σε αυτή την εργασία επιτεύχθηκε η κατασκευή ενός δισδιάστατου αισθητήρα αφής με σχετικά φθηνά υλικά, καθώς το κόστος της κατασκευής του πρωτοτύπου (μαζί με τη αναπτυξιακή πλατφόρμα ARDUINO UNO) δεν ξεπέρασε τα 40 ευρώ. Επίσης, η πολυπλοκότητα της κατασκευής κρατήθηκε σε ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα. Σε ότι αφορά τις επιδόσεις του αισθητήρα, η πειραματική διαδικασία έδειξε πως ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει υψηλή διακριτική ικανότητα της τάξεως του 1mm και χαμηλή θερμική αδράνεια ειδικά σε σχέση με τη θερμική σταθερά καθόδου όπου η απόκριση του αισθητήρα ήταν μόλις μερικά δευτερόλεπτα.

Επίσης, ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει πολύ μικρή κατανάλωση, αφού εκτός από την αναπτυξιακή πλακέτα και τους τελεστικούς ενισχυτές, τα θερμίστορς για να λειτουργήσουν χρειάζονται πολύ μικρό ρεύμα άρα καταναλώνουν μικρή ισχύ, ενώ το κύκλωμα ανάγνωσης δεν καταλαμβάνει μεγάλο χώρο. Μια σημαντική προσθήκη στον συγκεκριμένο δισδιάστατο αισθητήρα αφής ήταν η χρήση ενός κυκλώματος αντιστάθμισης της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Το βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου δισδιάστατου αισθητήρα αφής είναι ότι για να λειτουργήσει γραμμικά και για να έχει υψηλή ακρίβεια, θα πρέπει να εργάζεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών. Αν η θερμοκρασία του απτικού ερεθίσματος είναι στα όρια ή έξω από το εύρος αυτών των θερμοκρασιών, ο αισθητήρας λειτουργεί μη γραμμικά, επιδεικνύοντας ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά όπως μεγάλη θερμική αδράνεια (όπως είδαμε στην ενότητα 7.5 αυτής της εργασίας).

Στα συμπεράσματα που προέκυψαν παρατηρούμε ότι ο συγκεκριμένος αισθητήρας λόγω της ευαισθησίας του, της υψηλής διακριτικής ικανότητάς του και της ταχείας αντίδρασης του στα απτικά ερεθίσματα, αποτελεί μια ιδανική επιλογή για τη κατασκευή αισθητήρα αφής συνδυάζοντας την οικονομία στα υλικά και την πολύ μικρή κατανάλωση λόγω της απλότητας του κυκλώματος ανάγνωσης.

Μερικές από τις κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα που προτείνεται να διερευνηθούν είναι:

- Η κατασκευή του δισδιάστατου πίνακα σε εύκαμπτο υπόστρωμα
- Η κατασκευή του δισδιάστατου πίνακα σε μεγαλύτερη κλίμακα (π.χ. 16x16, 32x32, 64x64 κ.λπ.)
- Η χρήση του αισθητήρα αφής για εφαρμογές τεχνητού – ηλεκτρονικού – δέρματος
- Η χρήση του αισθητήρα αφής σε εφαρμογές μηχανικής μάθησης
- Η χρήση του αισθητήρα αφής σε οθόνες αφής

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

---

Βιβλιογραφία – Πηγές στην ελληνική γλώσσα

- [I] Elgar, P. (2000). Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- [II] Εισαγωγή στη θεωρία σφαλμάτων (2014). Εργαστήριο Φυσικής, τμήμα Φυσικής, Ε.Κ.Π.Α.

Βιβλιογραφία – Πηγές σε ξένες γλώσσες

- [1] Tiwana, M. I., Redmond, S. J., & Lovell, N. H. (2012). A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering. *Sensors and Actuators A: physical*, 179, 17-31.
- [2] Harmon, L. D. (1982). Automated tactile sensing. *The International Journal of Robotics Research*, 1(2), 3-32.
- [3] Grunwald, M. (Ed.). (2008). *Human haptic perception: Basics and applications*. Springer Science & Business Media.
- [4] Kroemer, O., Lampert, C. H., & Peters, J. (2011). Learning dynamic tactile sensing with robust vision-based training. *IEEE transactions on robotics*, 27(3), 545-557.
- [5] labcenter.com/Proteus VSM/Circuit Simulation Software (2021). Retrieved from <https://www.labcenter.com/simulation/> June 16 2021
- [6] Fraden, J. (2004). *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Springer Science & Business Media.
- [7] Dahiya, R. S., & Valle, M. (2013). Tactile sensing technologies. In *Robotic tactile sensing* (pp. 79-136). Springer, Dordrecht.
- [8] Zou, L., Ge, C., Wang, Z. J., Cretu, E., & Li, X. (2017). Novel tactile sensor technology and smart tactile sensing systems: A review. *Sensors*, 17(11), 2653.
- [9] Najarian, S., Dargahi, J., & Mehrizi, A. A. (2009). *Artificial tactile sensing in biomedical engineering*. McGraw Hill Professional.

- [10] Tiwana, M. I., Redmond, S. J., & Lovell, N. H. (2012). A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering. *Sensors and Actuators A: physical*, 179, 17-31.
- [11] Ko, C. T., Tseng, S. H., & Lu, M. S. C. (2006). A CMOS micromachined capacitive tactile sensor with high-frequency output. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15(6), 1708-1714.
- [12] Li, B., Gao, Y., Fontecchio, A., & Visell, Y. (2016). Soft capacitive tactile sensing arrays fabricated via direct filament casting. *Smart Materials and Structures*, 25(7), 075009.
- [13] Tiwana, M. I., Redmond, S. J., & Lovell, N. H. (2012). A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering. *Sensors and Actuators A: physical*, 179, 17-31.
- [14] Pohtongkam, S., & Srinonchat, J. (2021). Tactile Object Recognition for Humanoid Robots Using New Designed Piezoresistive Tactile Sensor and DCNN. *Sensors*, 21(18), 6024.
- [15] Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). Principles of instrumental analysis. Cengage learning.
- [16] Saccomandi, P., Schena, E., Oddo, C. M., Zollo, L., Silvestri, S., & Guglielmelli, E. (2014). Microfabricated tactile sensors for biomedical applications: a review. *Biosensors*, 4(4), 422-448.
- [17] Zhang, Y., Ju, F., Wei, X., Wang, D., & Wang, Y. (2020). A piezoelectric tactile sensor for tissue stiffness detection with arbitrary contact angle. *Sensors*, 20(22), 6607.
- [18] Kuzubasoglu, B. A., & Bahadir, S. K. (2020). Flexible Temperature Sensors: A Review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 112282
- [19] Davidson, A., Buis, A., & Glesk, I. (2017). Toward novel wearable pyroelectric temperature sensor for medical applications. *IEEE Sensors Journal*, 17(20), 6682-6689.
- [20] Childs, P. R., Greenwood, J. R., & Long, C. A. (2000). Review of temperature measurement. *Review of scientific instruments*, 71(8), 2959-2978.
- [21] Liu, Z., Tian, B., Jiang, Z., Li, S., Lei, J., Zhang, Z., ... & Lin, Q. (2022). Flexible temperature sensor with high sensitivity ranging from liquid nitrogen temperature to 1200° C. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(1), 015601.

- [22] Godse, A. P., & Bakshi, U. A. (2009). *Electronic Devices*. Technical Publications.
- [23] "NTC Thermistors". Micro-chip Technologies. 2010.
- [24] Wade, J., Bhattacharjee, T., Williams, R. D., & Kemp, C. C. (2017). A force and thermal sensing skin for robots in human environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 96, 1-14.
- [25] Tiwana, M. I., Redmond, S. J., & Lovell, N. H. (2012). A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering. *Sensors and Actuators A: physical*, 179, 17-31.
- [26] Wang, H., Jones, D., de Boer, G., Kow, J., Beccai, L., Alazmani, A., & Culmer, P. (2018). Design and characterization of tri-axis soft inductive tactile sensors. *IEEE Sensors Journal*, 18(19), 7793-7801.
- [27] Xie, H., Liu, H., Luo, S., Seneviratne, L. D., & Althoefer, K. (2013, November). Fiber optics tactile array probe for tissue palpation during minimally invasive surgery. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 2539-2544). IEEE.
- [28] Do, W. K., & Kennedy, M. (2022, May). DenseTact: Optical tactile sensor for dense shape reconstruction. In *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 6188-6194). IEEE.
- [29] Liew, S. C. (2006). *Electromagnetic Waves*. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing.
- [30] Kopp, C. (2006). Thermal imaging sensors. *NCW*, 101, 52-55.
- [31] Lee, F. F., Chen, F., & Liu, J. (2015). Infrared thermal imaging system on a mobile phone. *Sensors*, 15(5), 10166-10179.
- [32] Merriam-Webster Dictionary Online (2020)
- [33] Baker, B. (1999). Thermistors in single supply temperature sensing circuits. AN685, Microchip Technology Inc.
- [34] Liu, G., Guo, L., Liu, C., & Wu, Q. (2018). Evaluation of different calibration equations for NTC thermistor applied to high-precision temperature measurement. *Measurement*, 120, 21-27.
- [35] Saxena, R. S., Saini, N. K., & Bhan, R. K. (2010). Analysis of crosstalk in networked arrays of resistive sensors. *IEEE Sensors Journal*, 11(4), 920-924.



- [36] Hidalgo-López, J. A., Romero-Sánchez, J., Fernández-Ramos, R., Martín-Canales, J. F., & Ríos-Gómez, J. F. (2018). A low-cost, high-accuracy temperature sensor array. *Measurement*, 125, 425-431.
- [37] Saxena, R. S., Bhan, R. K., Saini, N. K., & Muralidharan, R. (2010). Virtual ground technique for crosstalk suppression in networked resistive sensors. *IEEE Sensors Journal*, 11(2), 432-433.
- [38] ARDUINO UNO R3 (2022). Retrieved from <https://docs.ARDUINO.cc/hardware/uno-rev3> August 11 2022
- [39] ARDUINO UNO Board Layout (2022). Retrieved from <https://www.electronicshub.org/ARDUINO-uno-pinout/> August 11 2022
- [40] ARDUINO Forum (2021). Retrieved from <https://forum.ARDUINO.cc/t/what-arm-32bit-boards-that-use-ARDUINO-ide/510882> June 28 2021
- [41] Ο κώδικας του ARDUINO Software IDE στο GitHub (2021). Retrieved from <https://github.com/ARDUINO/ARDUINO> June 28 2021
- [42] Purdum, J. J., & Levy, B. (2012). *Beginning C for ARDUINO*. Apress. June 28 2021
- [43] LibreOffice (2021). Retrieved from <https://el.libreoffice.org/> June 28 2021
- [44] ArduSpreadsheet (2021). Retrieved from <https://circuitjournal.com/ARDUINO-serial-to-spreadsheet> June 28 2021
- [45] Stream data from ARDUINO to Excel (2022). Retrieved from <https://create.ARDUINO.cc/projecthub/HackingSTEM/stream-data-from-ARDUINO-into-excel-f1bede> August 12 2022
- [46] Jeffrey, T., & Jim, K. (2006). *LabVIEW for everyone: graphical programming made easy and fun*. Prentice Hall PTR.
- [47] National Instruments Official Website (2022)
- [48] NI-VISA documentation from National Instruments Official Website (2020)
- [49] MATLAB Math, Graphics, Programming (2022). Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> August 10 2022
- [50] Thermistor PTC Retrieved from <https://www.digikey.com/en/products/detail/epcos-tdk-electronics/B59890C0080A070/651937> August 10 2022

[51] Thermal time constant (2022). Retrieved from <https://mechcontent.com/thermal-time-constant/> August 09 2022

[52] Thermal time constant in heat transfer (2022). Retrieved from <https://www.mmc.co.jp/adv/dev/english/document/thermistor/thermistor08.html> August 09 2022

[53] PTC thermistors for overcurrent protection (2022). Retrieved from [https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/55/db/PTC/PTC\\_OC\\_Leaded\\_230V\\_C810\\_C890.pdf](https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/55/db/PTC/PTC_OC_Leaded_230V_C810_C890.pdf) November 01 2022

[54] Thermistors (2022). Retrieved from <https://www.electronics-tutorials.ws/io/thermistors.html> November 01 2022

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

---

### Παράρτημα Α

Οι μετρήσεις της διαφοράς του αισθητήρα αντιστάθμισης  $R_{comp}$  με τα 4 θερμίστορ (R21, R22, R23, R24) της γραμμής 2 του πίνακα, όταν ο μικροθερμαντήρας μετακινείται από το σημείο Α (θερμίστορ R22) στο σημείο Β (θερμίστορ R23) με βήμα 1 mm, είναι οι ακόλουθες:

	$R_{comp} - R21$	$R_{comp} - R22$	$R_{comp} - R23$	$R_{comp} - R24$
μHeater in R22 (A)	170	1434	338	235
μHeater in R22+1 mm	203	1363	637	276
μHeater in R22+2 mm	154	1188	401	199
μHeater in R22+3 mm	335	1041	538	200
μHeater in R22+4 mm	385	1089	832	299
μHeater in R22+5 mm	507	1123	917	313
μHeater in R22+6 mm	233	776	873	69
μHeater in R22+7 mm	193	933	1075	316
μHeater in R22+8 mm	221	775	1248	379
μHeater in R22+9 mm	176	648	1345	335
μHeater in R23 (B)	162	628	1357	476

## Παράρτημα Β

Οι μετρήσεις για τον υπολογισμό της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα έγιναν για βήμα στον XY linear stage ίσο με: 1mm, 0,5 mm και 0,25 mm, είναι οι ακόλουθες:

BHMA 1 mm	Rcomp - R22	Rcomp - R23	BHMA 0,5 mm	Rcomp - R22	Rcomp - R23	BHMA 0,25 mm	Rcomp - R22	Rcomp - R23
R22 (A)	1323	446	R22 (A)	1323	446	R22 (A)	1323	446
R22+1 mm	1109	486	0,5	1130	449	0,25	1220	436
R22+2 mm	1042	537	R22+1 mm	1109	486	0,5	1130	449
R22+3 mm	910	556	0,5	1094	484	0,75	1121	469
R22+4 mm	841	649	R22+2 mm	1042	537	R22+1 mm	1109	486
R22+5 mm	735	698	0,5	994	566	0,25	1105	489
R22+6 mm	717	797	R22+3 mm	910	556	0,5	1094	484
R22+7 mm	657	912	0,5	910	634	0,75	1086	514
R22+8 mm	561	1106	R22+4 mm	841	649	R22+2 mm	1042	537
R22+9 mm	477	1161	0,5	832	702	0,25	1036	558
R23 (B)	434	1314	R22+5 mm	735	698	0,5	994	566
			0,5	712	771	0,75	946	548
			R22+6 mm	717	797	R22+3 mm	910	556
			0,5	666	817	0,25	898	605
			R22+7 mm	657	912	0,5	910	634
			0,5	655	924	0,75	855	633
			R22+8 mm	561	1106	R22+4 mm	841	649
			0,5	515	1147	0,25	832	672
			R22+9 mm	477	1161	0,5	832	702
			0,5	432	1313	0,75	771	705
			R23 (B)	434	1314	R22+5 mm	735	698
						0,25	726	713
						0,5	712	771
						0,75	699	803
						R22+6 mm	717	797
						0,25	679	804
						0,5	666	817
						0,75	665	839
						R22+7 mm	657	912

0,25	662	895
0,5	655	924
0,75	663	1133
R22+8 mm	561	1106
0,25	564	1127
0,5	515	1147
0,75	504	1151
R22+9 mm	477	1161
0,25	434	1265
0,5	432	1313
0,75	423	1328
R23 (B)	434	1314

## Παράρτημα Γ

Οι ενδιάμεσες τιμές των μετρήσεων (1 μέτρηση ανά 10 δευτερόλεπτα) της ωμικής αντίστασης του στοιχείου που χρησιμοποιήσαμε, για να υπολογίσουμε την σταθερά χρόνου ανόδου και καθόδου του δισδιάστατου αισθητήρα αφής, είναι οι ακόλουθες:

ΑΑ	ΧΡΟΝΟΣ (sec)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 2	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 3	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 4	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 5
		mm	mm	mm	mm
		ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω)	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω)	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω)	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω)
0	- 100	9761	9749	9767	9751
1	- 90	9763	9753	9762	9745
2	- 80	9744	9744	9758	9740
3	- 70	9757	9746	9760	9738
4	- 60	9754	9752	9763	9743
5	- 50	9763	9761	9761	9745
6	- 40	9753	9763	9755	9743
7	- 30	9757	9746	9753	9746
8	- 20	9764	9731	9759	9742
9	- 10	9769	9740	9762	9738
10	0	9759	9749	9760	9743
11	10	9221	9411	9517	9635
12	20	9163	9363	9477	9584
13	30	9119	9196	9443	9486
14	40	9014	9194	9336	9465
15	50	8934	9130	9281	9406
16	60	8915	9070	9233	9365
17	70	8777	9033	9190	9347
18	80	8669	8985	9147	9304
19	90	8646	8974	9141	9288
20	100	8689	9026	9161	9235
21	110	8704	8942	9114	9236
22	120	8666	8890	9086	9210
23	130	8675	8973	9082	9236
24	140	8565	8936	9096	9274
25	150	8647	9000	9092	9275
26	160	8554	8967	9081	9231

27	170	8665	8977	9109	9258
28	180	8678	8885	9100	9252
29	190	8601	8990	9073	9266
30	200	8596	8945	9126	9277
31	210	8555	8940	9102	9277
32	220	8375	8954	9144	9267
33	230	8476	8994	9086	9258
34	240	8488	8917	9097	9285
35	250	8513	8928	9118	9259
36	260	8520	8963	9108	9269
37	270	8586	8958	9111	9254
38	280	8543	8950	9119	9294
39	290	8487	8935	9120	9233
40	300	8547	8936	9124	9270
41	310	8540	8944	9123	9264
42	320	8632	8989	9101	9262
43	330	8563	8985	9085	9269
44	340	8571	8984	9090	9290
45	350	8502	8990	9090	9276
46	360	8482	8977	9069	9276
47	370	8531	8837	9080	9266
48	380	8551	8964	9078	9249
49	390	8529	8846	9088	9266
50	400	8533	8911	9083	9282
51	410	8479	8908	9095	9267
52	420	8519	8906	9097	9249
53	430	8481	8925	9066	9261
54	440	8519	8952	9052	9249
55	450	8542	8922	9090	9216
56	460	8503	8953	9102	9230
57	470	8546	8945	9076	9241
58	480	8594	8962	9074	9232
59	490	8608	8928	9051	9244
60	500	8554	8977	9083	9169
61	510	8630	8943	9088	9180
62	520	8658	8963	9099	9203
63	530	8594	8892	9144	9229

64	540	8552	8989	9121	9220
65	550	8612	8988	9110	9216
66	560	8662	8984	9092	9248
67	570	8707	8975	9112	9282
68	580	8623	8920	9090	9162
69	590	8636	8965	9079	9172
70	600	8619	8961	9079	9248
71	610	8612	8948	9091	9190
72	620	8461	8942	9092	9214
73	630	8513	8922	9084	9177
74	640	8592	8936	9106	9188
75	650	8569	8878	9096	9200
76	660	8513	8968	9076	9215
77	670	8583	8924	9087	9211
78	680	8547	8921	9077	9187
79	690	8668	8898	9064	9192
80	700	8656	8916	9082	9195
81	710	8637	8919	9077	9200
82	720	8592	8982	9077	9209
83	730	8671	8932	9087	9201
84	740	8660	8919	9081	9184
85	750	8641	8951	9083	9215
86	760	8640	8929	9063	9197
87	770	8660	8934	9072	9192
88	780	8704	8897	9079	9180
89	790	8660	8912	9076	9180
90	800	8578	8847	9072	9182
91	810	8573	8857	9085	9200
92	820	8711	8871	9080	9189
93	830	8579	8864	9087	9196
94	840	8666	8899	9096	9195
95	850	8614	8862	9080	9182
96	860	8637	8890	9081	9181
97	870	8616	8860	9086	9192
98	880	8640	8858	9082	9194
99	890	8617	8847	9082	9189
100	900	8700	8849	9096	9194



101	910	8603	8849	9085	9193
102	920	8479	8855	9085	9193
103	930	8519	8848	9080	9170
104	940	8431	8864	9079	9169
105	950	8529	8860	9093	9193
106	960	8491	8860	9083	9183
107	970	8537	8860	9081	9181
108	980	8569	8851	9087	9187
109	990	8552	8862	9076	9176
110	1000	8545	8853	9087	9167
111	1010	8601	8853	9085	9185
112	1020	8570	8870	9087	9187
113	1030	8583	8847	9079	9179
114	1040	8611	8857	9079	9179
115	1050	8640	8894	9082	9172
116	1060	8564	8889	9080	9180
117	1070	8530	8874	9091	9171
118	1080	8568	8869	9077	9177
119	1090	8512	8896	9088	9188
120	1100	8512	8865	9101	9201
121	1110	8547	8908	9093	9193
122	1120	8532	8917	9080	9180
123	1130	8469	8871	9080	9180
124	1140	8644	8884	9083	9183
125	1150	8668	8863	9082	9182
126	1160	8679	8908	9084	9184
127	1170	8654	8901	9096	9196
128	1180	8662	8871	9105	9205
129	1190	8662	8897	9094	9194
130	1200	8699	8886	9089	9189
131	1210	8731	8960	9116	9231
132	1220	8758	8999	9222	9256
133	1230	8883	9005	9241	9322
134	1240	8967	9160	9289	9335
135	1250	9023	9193	9314	9361
136	1260	9051	9213	9358	9406
137	1270	9128	9286	9386	9469

138	1280	9153	9317	9424	9485
139	1290	9188	9343	9490	9530
140	1300	9209	9414	9512	9542
141	1310	9260	9478	9546	9553
142	1320	9305	9506	9591	9560
143	1330	9422	9527	9604	9568
144	1340	9509	9574	9625	9578
145	1350	9572	9603	9628	9569
146	1360	9454	9565	9641	9557
147	1370	9469	9602	9653	9570
148	1380	9475	9563	9704	9548
149	1390	9444	9594	9635	9537
150	1400	9430	9634	9658	9599
151	1410	9437	9590	9631	9614
152	1420	9410	9611	9631	9581
153	1430	9503	9644	9637	9606
154	1440	9466	9641	9646	9681
155	1450	9491	9657	9646	9709
156	1460	9528	9614	9653	9724
157	1470	9518	9619	9744	9683
158	1480	9569	9610	9733	9658
159	1490	9541	9697	9733	9721
160	1500	9534	9680	9712	9680
161	1510	9580	9677	9712	9719
162	1520	9593	9681	9723	9713
163	1530	9588	9665	9698	9722
164	1540	9555	9675	9723	9676
165	1550	9609	9695	9683	9715
166	1560	9665	9684	9722	9684
167	1570	9669	9715	9754	9682
168	1580	9681	9756	9704	9727
169	1590	9658	9725	9722	9714
170	1600	9698	9732	9668	9700
171	1610	9727	9749	9688	9707
172	1620	9686	9708	9728	9714
173	1630	9731	9699	9687	9707
174	1640	9679	9737	9706	9713

175	1650	9701	9724	9722	9703
176	1660	9661	9688	9707	9746
177	1670	9722	9695	9718	9744
178	1680	9723	9711	9718	9748
179	1690	9681	9686	9712	9763
180	1700	9710	9717	9708	9724
181	1710	9679	9694	9735	9739
182	1720	9670	9720	9735	9772
183	1730	9684	9710	9746	9766
184	1740	9667	9716	9711	9724
185	1750	9686	9741	9762	9737
186	1760	9703	9720	9746	9733
187	1770	9660	9746	9738	9765
188	1780	9685	9702	9754	9759
189	1790	9689	9734	9738	9736
190	1800	9721	9703	9738	9751
191	1810	9704	9718	9740	9760
192	1820	9706	9723	9737	9748
193	1830	9702	9723	9714	9746
194	1840	9707	9742	9711	9757
195	1850	9717	9717	9736	9750
196	1860	9711	9721	9731	9744
197	1870	9719	9712	9730	9752
198	1880	9720	9744	9750	9755
199	1890	9722	9741	9744	9760
200	1900	9714	9752	9745	9752
201	1910	9715	9720	9743	9738
202	1920	9727	9711	9760	9757
203	1930	9732	9749	9763	9762
204	1940	9727	9764	9750	9746
205	1950	9712	9722	9748	9761
206	1960	9720	9750	9728	9754
207	1970	9720	9743	9734	9758
208	1980	9724	9774	9757	9720
209	1990	9716	9765	9739	9729
210	2000	9732	9734	9765	9769
211	2010	9736	9753	9753	9762

212	2020	9737	9730	9758	9747
213	2030	9742	9747	9747	9750
214	2040	9733	9727	9762	9736
215	2050	9725	9724	9733	9746
216	2060	9738	9749	9747	9748
217	2070	9739	9731	9772	9756
218	2080	9742	9751	9757	9757
219	2090	9746	9723	9733	9712
220	2100	9747	9748	9752	9756
221	2110	9738	9771	9748	9764
222	2120	9725	9731	9751	9752
223	2130	9737	9733	9739	9744
224	2140	9732	9715	9754	9756
225	2150	9758	9731	9735	9739
226	2160	9743	9740	9761	9757
227	2170	9737	9742	9757	9744
228	2180	9761	9755	9722	9758
229	2190	9749	9728	9736	9750
230	2200	9752	9748	9731	9734
231	2210	9752	9758	9733	9743
232	2220	9742	9755	9762	9711
233	2230	9747	9743	9744	9739
234	2240	9754	9734	9745	9739
235	2250	9774	9750	9753	9738
236	2260	9764	9775	9760	9716
237	2270	9734	9756	9763	9739
238	2280	9753	9756	9769	9733
239	2290	9754	9753	9738	9765
240	2300	9749	9748	9754	9759
241	2310	9764	9748	9738	9736
242	2320	9759	9747	9738	9751
243	2330	9749	9758	9740	9760
244	2340	9753	9750	9737	9714
245	2350	9756	9750	9714	9743
246	2360	9757	9748	9714	9759
247	2370	9739	9743	9726	9761
248	2380	9745	9749	9736	9750

249	2390	9755	9766	9744	9744
250	2400	9758	9746	9746	9728
		<b>ΑΠΟΣΤΑΣΗ 2 mm</b>	<b>ΑΠΟΣΤΑΣΗ 3 mm</b>	<b>ΑΠΟΣΤΑΣΗ 4 mm</b>	<b>ΑΠΟΣΤΑΣΗ 5 mm</b>
	<b>Μ. Ο. ΧΩΡΙΣ μΗΕΑΤΕΡ</b>	9.759	9.749	9.760	9.743
	<b>Μ. Ο. ΕΛΑΧ.ΤΙΜΗΣ (ΚΑΘΟΔΟΥ)</b>	8.586	8.918	9.091	9.218
	<b>Μ. Ο. ΜΕΓ. ΤΙΜΗΣ (ΑΝΟΔΟΥ)</b>	9.682	9.715	9.724	9.719

## Παράρτημα Δ

Το πρόγραμμα οδήγησης του ARDUINO UNO με το οποίο γίνεται ο έλεγχος και ο συντονισμός της λειτουργίας όλου του κυκλώματος ανάγνωσης που υποστηρίζει τον διαδιάστατο αισθητήρα αφής, μαζί με τα σχόλια που υποδεικνύονται με πράσινο χρώμα, είναι το ακόλουθο:

```
const int dec0=9; // declaration & initialization dec0 & connect digital pin 9
const int dec1=10; // declaration & initialization dec1 & connect digital pin 10
const int mux0=11; // declaration & initialization mux0 & connect digital pin 11
const int mux1=12; // declaration & initialization mux1 & connect digital pin 12
float analogPin0=A0; // declaration & initialization variable analogPin0
// & connect analog pin A0
float analogPin1=A1; // declaration & initialization variable analogPin1
// & connect analog pin A1
float analogPin2=A2; // // declaration & initialization variable analogPin2
// & connect analog pin A2
float Voc=0; // declaration & initialization variable Voc
float Voj=0; // declaration & initialization variable Voj
float Vout=0; // declaration & initialization variable Vout
float Rij=0; // declaration & initialization variable Rij
float Rcomp=0; // declaration & initialization variable Rcomp
const int milsec=63; // declaration & initialization milsec & rendering of value 63 msec

void setup() {
pinMode(dec0,OUTPUT); // set the address pin dec0 (digital pin 9) as output
pinMode(dec1,OUTPUT); // set the address pin dec1 (digital pin 10) as output
pinMode(mux0,OUTPUT); // set the address pin mux0 (digital pin 11) as output
pinMode(mux1,OUTPUT); // set the address pin mux1 (digital pin 12) as output
```

```

pinMode(analogPin0,INPUT); // set the address pin analogPin0 (analog pin 0) as input
pinMode(analogPin1,INPUT); // set the address pin analogPin1 (analog pin 1) as input
pinMode(analogPin2,INPUT); // set the address pin analogPin0 (analog pin 2) as input
Serial.begin(9600); // open serial port,set data rate to 9600 bps
}

void loop() {
// Enable pin R11
// Enable decoder output YO (sets column 1 HIGH)
digitalWrite(dec0,LOW); // initialize dec0 as low
digitalWrite(dec1,LOW); // initialize dec1 as low
digitalWrite(mux0,LOW); // initialize mux0 as low
digitalWrite(mux1,LOW); // initialize mux1 as low
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd11: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R21
// Column 1 is still HIGH
digitalWrite(mux0,HIGH); // set the mux0 pin (digital pin 11) on
digitalWrite(mux1,LOW); // set the mux1 pin (digital pin 12) off

```

```

Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd21: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R31
// Column 1 is still HIGH
digitalWrite(mux0,LOW); // set the mux0 pin (digital pin 11) off
digitalWrite(mux1,HIGH); // set the mux1 pin (digital pin 12) on
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd31: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

```



```

// Enable pin R41
// Column 1 is still HIGH
digitalWrite(mux0,HIGH); // set the mux0 pin (digital pin 11) on
digitalWrite(mux1,HIGH); // set the mux1 pin (digital pin 12) on
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd41: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R12
// Enable decoder output Y1 (set column 2 HIGH)
digitalWrite(dec0,HIGH); // set the dec0 pin (digital pin 9) on
digitalWrite(dec1,LOW); // set the dec1 pin (digital pin 10) off
digitalWrite(mux0,LOW); // set mux0 as low
digitalWrite(mux1,LOW); // set mux1 as low
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)

```

```

Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd12: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R22
// Column 2 is still HIGH
digitalWrite(mux0,HIGH); // set the mux0 pin (digital pin 11) on
digitalWrite(mux1,LOW); // set the mux1 pin (digital pin 12) off
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd22: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R32
// Column 2 is still HIGH
digitalWrite(mux0,LOW); // set the mux0 pin (digital pin 11) off
digitalWrite(mux1,HIGH); // set the mux1 pin (digital pin 12) on
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)

```

```

Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd32: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R42
// Column 2 is still HIGH
digitalWrite(mux0,HIGH); // set the mux0 pin (digital pin 11) on
digitalWrite(mux1,HIGH); // set the mux1 pin (digital pin 12) on
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd42: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

```

```

// Enable pin R13
// Enable decoder output Y2 (set column 3 HIGH)
digitalWrite(dec0,LOW); // set the dec0 pin (digital pin 9) off
digitalWrite(dec1,HIGH); // set the dec1 pin (digital pin 10) on
digitalWrite(mux0,LOW); // set mux0 as low
digitalWrite(mux1,LOW); // set mux1 as low
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd13: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // prints the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R23
// Column 3 is still HIGH
digitalWrite(mux0,HIGH); // set the mux0 pin (digital pin 11) on
digitalWrite(mux1,LOW); // set the mux1 pin (digital pin 12) off
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));

```

```

Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd23: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R33
// Column 3 is still HIGH
digitalWrite(mux0,LOW); // set the mux0 pin (digital pin 11) off
digitalWrite(mux1,HIGH); // set the mux1 pin (digital pin 12) on
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd33: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R43
// Column 3 is still HIGH
digitalWrite(mux0,HIGH); // set the mux0 pin (digital pin 11) on
digitalWrite(mux1,HIGH); // set the mux1 pin (digital pin 12) on
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)

```

```

Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd43: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R14
// Enable decoder output Y3 (set column 4 HIGH)
digitalWrite(dec0,HIGH); // set the dec0 pin (digital pin 9) on
digitalWrite(dec1,HIGH); // set the dec1 pin (digital pin 10) on
digitalWrite(mux0,LOW); // set mux0 as low
digitalWrite(mux1,LOW); // set mux1 as low
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd14: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

```

```

// Enable pin R24
// Column 4 is still HIGH
digitalWrite(mux0,HIGH); // set the mux0 pin (digital pin 11) on
digitalWrite(mux1,LOW); // set the mux1 pin (digital pin 12) off
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd24: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R34
// Column 4 is still HIGH
digitalWrite(mux0,LOW); // set the mux0 pin (digital pin 11) off
digitalWrite(mux1,HIGH); // set the mux1 pin (digital pin 12) on
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd34: "); // print a label

```

```

Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data

// Enable pin R44
// Column 4 is still HIGH
digitalWrite(mux0,HIGH); // set the mux0 pin (digital pin 11) on
digitalWrite(mux1,HIGH); // set the mux1 pin (digital pin 12) on
Voc = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin0); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin0 (analog pin 0)
Voj = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin1); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin1 (analog pin 1)
Vout = (4.96 / 1023.0) * analogRead(analogPin2); // Vout reads and takes the voltage
// value of analogPin2 (analog pin 2)
Rij=10000*(1000/1000)*((0.00108-Voc)/(0.00117-Voj));
Rcomp=(Vout*10000)/(4.96-Vout);
Serial.print("Rd44: "); // print a label
Serial.println(Rcomp-Rij); // print the value of Rcomp-Rij
delay(milsec); // enter a delay
Serial.flush(); // remove any buffered incoming serial data
}

```