



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

*ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ*

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανάπτυξη τριβοηλεκτρικών διατάξεων για χρήση σε  
εφαρμογές διεπαφής ανθρώπου-μηχανής**

της

**ΖΑΧΑΡΙΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ**

**Ακαδημαϊκός Επιβλέπων**

Γάυρος Κωνσταντίνος

**Αναπληρωτής καθηγητής**

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

**Ερευνητικός Επιβλέπων**

Τσάμης Χρήστος

**Διευθυντής Ερευνών**

ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

*Μάρτιος 2023, Κοζάνη*



**UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA**

**FACULTY OF ENGINEERING**

*DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING*

**DIPLOMA THESIS**

**Development of triboelectric devices for use in  
human-machine interfaces**

by

**ZACHARIA VASILIKI**

**Academic supervisor**

Dr. Gavros Konstantinos

**Associate Professor**

University of Western Macedonia

**Research supervisor**

Dr. Tsamis Christos

**Director of Research**

NCSR "Demokritos"

*March 2023, Kozani*



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

*ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ*

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

## **Ανάπτυξη τριβοηλεκτρικών διατάξεων για χρήση σε εφαρμογές διεπαφής ανθρώπου-μηχανής**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική:

Ο Επιβλέπων Καθηγητής: Γάυρος Κωνσταντίνος

Αναπληρωτής καθηγητής ΠΔΜ

.....  
Κωνσταντίνος Γάυρος  
Επίκουρος Καθηγητής ΠΔΜ

.....  
Χρήστος Τσάμης  
Διευθυντής Ερευνών ΕΚΕΦΕ  
«Δημόκριτος»

.....  
Ανδρέας Αναστασόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής ΠΑΔΑ

*Μάρτιος 2023, Κοζάνη*



# Περίληψη

Η απτική αντίληψη, γνωστή και ως αίσθηση της αφής, είναι ένας από τους βασικότερους τρόπους αλληλεπίδρασης του ανθρώπου με το εξωτερικό του περιβάλλον. Μέσω αυτής, ο άνθρωπος αποκτά πληροφορίες για τα αντικείμενα γύρω του, αντιλαμβάνεται την υφή τους, ενώ παίζει καθοριστικό ρόλο στις συναισθηματικές και κοινωνικές του αλληλεπιδράσεις. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνητή αναπαραγωγή της απτικής αντίληψης, εκμεταλλευόμενη τους τριβοηλεκτρικούς αισθητήρες δεν έχει αφήσει αδιάφορη την σύγχρονη επιστημονική κοινότητα με , την κατασκευή ηλεκτρονικού δέρματος με απτική αντίληψη βρίσκεται στο επίκεντρο μελέτης. Σκοπός αυτών των μελετών είναι να υποβοηθηθούν άνθρωποι με προσθετικά μέλη, άτομα με περιορισμένη ορατότητα αλλά και να δοθούν ικανότητες αφής στην νέα γενιά ευφυών προσθετικών και ρομποτικών συστημάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός ενός εύκαμπτου φορητού αισθητήρα αφής σε μορφή ηλεκτρονικού δέρματος, που προσαρμόζεται στην άκρη του δαχτύλου και ανιχνεύει το είδος και την υφή διαφορετικών αντικειμένων, βασισμένο στο τριβοηλεκτρικό φαινόμενο. Για την κατασκευή του αισθητήρα μελετήθηκαν τεχνικές εναπόθεσης διαφορετικών μετάλλων σε εύκαμπο υπόστρωμα, στο επίπεδο της νανοκλίμακας. Προκειμένου να μελετηθεί η ικανότητα του αισθητήρα να διαχωρίζει τα διαφορετικά υλικά που έρχεται σε επαφή, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε διαφορετικές επιφάνειες όπως ξύλο, γυαλί και δέρμα. Για την μελέτη του διαχωρισμού της υφής, έγινε μελέτη του αισθητήρα, ως προς την ικανότητα του διαχωρίζει διαφορετικές ανάγλυφες κωδικοποιήσεις, σε γραφή Braille.

Προκειμένου να ερμηνευθούν τα αποτελέσματα της μελέτης και να εξαχθούν ποιοτικά αποτελέσματα για την ικανότητα ανίχνευσης των διαφορετικών επιφανειών, κατασκευάστηκε αλγόριθμος μηχανικής μάθησης, με χρήση τεχνικών συνελκτικών νευρωνικών δικτύων. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του μοντέλου, σχηματίστηκε κατά τις πειραματικές διαδικασίες.

**Λέξεις κλειδιά:** τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, τριβοηλεκτρικός αισθητήρας, αισθητήρας αφής, εύκαμπτες φορητές συσκευές, διεπαφή ανθρώπου – μηχανής, συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο

# Abstract

Haptic feedback, also known as tactile sensing, plays a vital role in human interaction with its external environment. The sense of touch allows individuals to gather information about objects in their surroundings and perceive their textures, playing a pivotal role in emotional and social interactions as well as in everyday activities. The artificial replication of tactile sensation using triboelectric sensors, has sparked the attention of the scientific community by developing advanced electronic skins with haptic perception. Artificial electronic skin has provided assistance to individuals with prosthetic limbs and limited vision, providing tactile capabilities to the latest generation of intelligent prosthetic and robotic systems.

The purpose of this thesis is the design, fabrication and characterization of a flexible and wearable tactile sensor, based on the triboelectric effect, in the form of electronic skin. The sensor is designed to follow the contour of the fingertip enabling the detection of the material and texture of an object through contact triboelectrification. Fabrication of the sensor was facilitated by deposition of nanoscale metal films on flexible substrates using standard thin-film deposition methods. To assess the sensor's ability to recognize different materials, experiments were conducted on surfaces such as wood, glass, and human skin. Additionally, the performance of sensor was evaluated in the case of embossed Braille symbols in order to quantify its ability to distinguish textures.

In order to qualitatively measure the performance and ability of the sensor to distinguish between different materials, surfaces and Braille symbols, a machine learning algorithm based on convolutional neural networks was utilized. The model was trained on labeled datasets of different materials and textures, gathered during the experimental phase of this study, extracting the model inference through a confusion matrix.

**Keywords:** triboelectric effect, triboelectric sensor, tactile sensor, flexible wearable devices, human – machine interface, convolutional neural network

# Ευχαριστίες

Αρχικά, οφείλω ένα θερμό ευχαριστώ στον κύριο Ανδρέα Αναστασόπουλο, επίκουρο καθηγητή του Πανεπιστήμιου Δυτικής Αττικής, και πρώην καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, και τον κύριο Χρήστο Τσάμη, Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», για την ευκαιρία που μου έδωσαν να πραγματοποιήσω την διπλωματική μου εργασία υπό την επίβλεψη τους, καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στις ιδέες και τις προσδοκίες μου καθόλη την διάρκεια της έρευνας μου.

Οφείλω ένα ισάξιο ευχαριστώ, στον Αχιλλέα Μπαρδάκα, Υποψήφιο Διδάκτορα στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», για όλες αυτές τις ώρες που ήταν εκεί να με βοηθάει και να με στηρίζει στα πάντα, να ακούει όλους τους προβληματισμούς μου και να με καθοδηγεί σε κάθε επόμενο βήμα. Κρατάω κάθε συμβουλή που μου έδωσες και ευχαριστώ που ήσουν εκεί να επιμένεις για μένα και να πιστεύεις σε εμένα. Αν και είμαι σίγουρη ότι στο έχω ξαναπεί, είσαι από τους πιο καλούς επιστήμονες και τους πιο ιδιαίτερους ανθρώπους που έχω γνωρίσει.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζει στον Απόστολο Σέγκο, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, για όλες τις φορές που ήταν εκεί πρόθυμος να με βοηθήσει και να με συμβουλέψει στις ιδέες και τα άγχη μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Μανώλη Χουρδάκη, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, καθώς και όλους του εργαζόμενους του καθαρού χώρου για την βοήθεια τους.

Οφείλω ένα ευχαριστώ στους φίλους μου, που έκαναν τα φοιτητικά μου χρόνια τόσο μοναδικά και ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην Ιωάννα, που όλα αυτά τα χρόνια με στήριξε και με φρόντισε σε κάθε εύκολη και δύσκολη στιγμή. Φίλη, ήσουν είσαι και θα είσαι κομμάτι των πιο όμορφων στιγμών της ζωής μου.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου και την αδελφή μου που όλα αυτά τα χρόνια με κάνουν καλύτερο άνθρωπο. Η στήριξη σας, η υπομονή σας, το κουράγιο σας και η αγάπη σας, δεν χωράνε σε λόγια. Χωρίς εσάς δεν θα ήταν τίποτα εφικτό. Ένα ευχαριστώ είναι το ελάχιστο που μπορώ να πω.

# Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν.1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο «**Ανάπτυξη τριβοηλεκτρικών διατάξεων για χρήση σε εφαρμογές διεπαφής ανθρώπου-μηχανής**» καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη μέλους του Τμήματος και αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

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

Copyright © **Ζαχαριά Βασιλική, Γαύρος Κωνσταντίνος, Τσάμης Χρήστος, 2023,**  
**Κοζάνη**

Υπογραφή  
Φοιτήτριας



# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη.....</b>	<b>5</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>6</b>
<b>Ευχαριστίες .....</b>	<b>7</b>
<b>Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων .....</b>	<b>8</b>
<b>Κατάλογος σχημάτων.....</b>	<b>13</b>
<b>Κατάλογος πινάκων .....</b>	<b>17</b>
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....</b>	<b>18</b>
1.1 Ορισμός του προβλήματος.....	18
1.2 Απτική αντίληψη .....	19
1.2.1 Φυσιολογία στο ανθρώπινο σύστημα αναγνώρισης υφής.....	19
1.2.2 Τεχνητή αίσθηση της αφής .....	21
1.3 Η τεχνολογία των αισθητήρων.....	21
1.3.1 Ορισμός.....	22
1.3.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας .....	23
1.4 Η Νανοτεχνολογία στο κλάδο των αισθητήρων .....	24
1.5 Εισαγωγή στην τεχνολογία των φορητών βιοιατρικών αισθητήρων .....	25
1.5.1 Εύκαμπτα υλικά.....	26
1.6 Διεπαφή ανθρώπου – μηχανής .....	27
1.7 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας .....	28
1.8 Κίνητρο διεξαγωγής διπλωματικής εργασίας .....	29
1.9 Παρόμοια ερευνητικά έργα.....	29
1.10 Περιγραφή κεφαλαίων.....	32

<b>Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο .....</b>	<b>34</b>
2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο .....	34
2.2 Τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες .....	35
2.2.1 Τριβοηλεκτρική σειρά υλικών .....	36
2.2.2 Αρχή και τρόποι λειτουργίας .....	37
2.2.3 Λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων.....	40
2.2.4 Τριβοηλεκτρικοί αισθητήρες.....	42
2.3 Ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια .....	44
2.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά .....	44
2.3.2 Αρχή λειτουργίας.....	45
2.3.3 Αισθητήρες ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων .....	47
2.4 Τεχνικές μηχανικής μάθησης και συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα .....	48
2.4.1 Ταξινόμηση μοντέλων μηχανικής μάθησης.....	49
2.4.2 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα .....	50
2.4.3 Συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα.....	52
<b>Κεφάλαιο 3 Πειραματικές Τεχνολογίες .....</b>	<b>59</b>
3.1 Νανοκατασκευή δομών.....	59
3.1.1 Διαδικασία εναπόθεσης και μεθοδολογίες.....	60
3.2 Μέθοδοι χαρακτηρισμού επιφανειών .....	68
3.2.1 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης .....	68
3.2.2 Οπτικό μικροσκόπιο .....	70
3.3 Τεχνολογία εύκαμπτων πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων .....	71
3.3.1 Μεθοδολογία κατασκευής .....	71
<b>Κεφάλαιο 4 Σχεδιασμός και υλοποίηση αισθητήρα .....</b>	<b>74</b>
4.1 Γεωμετρίες ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων.....	74

4.2	Σχεδίαση μηχανικών μασκών εναπόθεσης .....	77
4.3	Καθαρισμός μηχανικών μασκών .....	80
4.4	Συνθήκες εναπόθεσης μετάλλων σε εύκαμπτο υπόστρωμα .....	80
4.5	Σχεδιασμός εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων .....	84
4.6	Χαρακτηρισμός δειγμάτων με χρήση οπτικού μικροσκοπίου .....	86
4.6.1	Μηχανικές μάσκες.....	86
4.6.2	Μεταλλικά υμένα με ιοντοβολή και εξάχνωση.....	90
4.6.3	Εύκαμπτα τυπωμένα κυκλώματα .....	93
4.6.4	Ποιοτικός έλεγχος δειγμάτων και υποστρώματος.....	95
4.7	Κατασκευή και τελική δομή του αισθητήρα.....	98
4.8	Κατάλογος δειγμάτων και ονοματολογία αισθητήρων.....	101
<b>Κεφάλαιο 5 Πειραματική διαδικασία και χαρακτηρισμός .....</b>		<b>102</b>
5.1	Πειραματική διάταξη .....	102
5.2	Χαρακτηρισμός αισθητήρων σε επιφάνειες με κάθετη επαφή και διαχωρισμό ....	105
5.2.1	Ανίχνευση υλικού επαφής και μελέτη παραμέτρων των επιφανειών.....	106
5.3	Χαρακτηρισμός αισθητήρων για την ανίχνευση ανωμαλιών με ολίσθηση .....	118
5.3.1	Μελέτη ανίχνευσης ανάγλυφου μεμονωμένης κουκίδας.....	119
5.3.2	Μελέτη ανίχνευσης ανάγλυφου για κάθετα διαδοχικές κουκίδες.....	125
5.3.3	Μελέτη ανίχνευσης ανάγλυφου οριζόντια διαδοχικών κουκίδων .....	129
5.4	Αναγνώριση ανάγλυφων κωδικοποιήσεων γραφής Braille .....	130
5.5	Μελέτη με χρήση συνελκτικών νευρωνικών δικτύων.....	133
5.5.1	Αρχιτεκτονική Δισδιάστατου Συνελκτικού Νευρωνικού Δικτύου .....	134
5.5.2	Σύνολο δεδομένων υλικών επαφής .....	138
5.5.3	Πίνακες σύγχυσης και παρουσίαση αποτελεσμάτων ταξινόμησης.....	139
5.5.4	Μετρικές αξιολόγησης της απόδοσης του μοντέλου.....	141

5.5.5	Αναγνώριση επιφάνειας.....	143
<b>Κεφάλαιο 6</b>	<b>Σύνοψη και μελλοντικές επεκτάσεις.....</b>	<b>144</b>
6.1	Συμπεράσματα και επίλογος .....	144
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις .....	146
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>147</b>

# Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1 Σχεδιαστική απεικόνιση αισθητήριων υποδοχής στο ανθρώπινο δάχτυλο .....	20
Σχήμα 1.2 Αισθητήρες στην μικρο και νανοκλίμακα που αντιγράφουν και ανιχνεύουν τις αισθήσεις του ανθρώπου [4].....	22
Σχήμα 1.3 Αισθητήρας ελέγχου καρδιακού ρυθμού με την μορφή ηλεκτρικού δέρματος, τοποθετημένος σε ανθρώπινο χέρι [11] .....	26
Σχήμα 2.1 Σχηματικό αναπαράστασης τριβοηλεκτρικού φαινομένου [16].....	34
Σχήμα 2.2 Τριβοηλεκτρική σειρά [17].....	37
Σχήμα 2.3 Επικοινωνία των τεσσάρων βασικών τρόπων λειτουργίας των TENG, βάση της σχετικής κίνησης των επιφανειών.....	39
Σχήμα 2.4 Σχηματικό διάταξης TENG ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων χωρίς δεύτερη τριβοηλεκτρική επιφάνεια [17] .....	41
Σχήμα 2.5 Σχηματικό TENG ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων με επιπλέον επιφάνεια επαπτόμενη στα ηλεκτρόδια .....	42
Σχήμα 2.6 Κάτοψη και τομή διάταξης ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων (IDE) [24].....	45
Σχήμα 2.7 Ισοδύναμο κύκλωμα επιφάνειας διάταξης IDE 6 ηλεκτροδίων [24].....	46
Σχήμα 2.8 Αλλαγές στην γεωμετρία των εύκαμπτων IDE αισθητήρων [25].....	48
Σχήμα 2.9 Ενδεικτικό νευρωνικό δίκτυο δύο κρυφών επιπέδων .....	51
Σχήμα 2.10 Αρχιτεκτονική συνελκτικού νευρωνικού δικτύου .....	54
Σχήμα 2.11 Διαδικασία συνέλιξης.....	55
Σχήμα 2.12 Εφαρμογή διαφορετικών φίλτρων σε εικόνα.....	56
Σχήμα 2.13 Μέθοδοι επιπέδου συγκέντρωσης.....	57
Σχήμα 3.1 Διαγραμματική απεικόνιση της διαδικασίας e-beam evaporation” .....	63
Σχήμα 3.2 Radio – Frequency magnetron sputtering.....	64
Σχήμα 3.3 Ενδεικτικά σχέδια μηχανικών μασκών .....	66
Σχήμα 3.4 Διάγραμμα απεικόνισης βασικών μερών ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).....	70
Σχήμα 3.5 Εύκαμπτα δείγματα αισθητήρων αφής.....	73
Σχήμα 4.1 Γεωμετρικά στοιχεία IDE.....	76
Σχήμα 4.2 Σχέδιο μηχανικής μάσκας (C22) στο λογισμικό Fusion 360.....	77

Σχήμα 4.3 Κάτοψη μηχανικής μάσκας (C22) στο λογισμικό Fusion 360 .....	77
Σχήμα 4.4 Πλάγια όψη μηχανικής μάσκας (C22) στο λογισμικό Fusion 360 .....	77
Σχήμα 4.5 Παραμορφωμένες μηχανικές μάσκες (α) A11 (b) B12 (c) C13 .....	79
Σχήμα 4.6 Μηχανικές μάσκες χωρίς παραμόρφωση (a) A22 (b) B22 (c) C22 .....	79
Σχήμα 4.7 Στάδια εναπόθεσης με ιοντοβολή (a) Υπόστρωμα (b) τοποθέτηση μάσκας με το μοτίβο των IDE πάνω απο το υπόστρωμα (c) εναπόθεση χρωμίου (Cr) και χαλκού (Cu) (d) τελική εναπόθεση στρώσης Cr-Cu στο υπόστρωμα μετά την αφαίρεση της μάσκας .....	82
Σχήμα 4.8 Sputtering.....	82
Σχήμα 4.9 Δείγμα εναπόθεσης αλουμινίου 300 nm με πλάτος μεταλλικού διαδρόμου IDE 350 μm.....	83
Σχήμα 4.10 Σχέδια κατασκευής FPCB (a) FPCB_1 (b) FPCB_2 (c) FPCB_3 (d) FPCB_4 .	85
Σχήμα 4.11 Σχέδια FPCB προς κατασκευή.....	86
Σχήμα 4.12 Τυπωμένο εύκαπτο κύκλωμα αισθητήρα (a) όψη υποστρώματος (b) όψη εναπόθεσης μετάλλου (Cu) .....	86
Σχήμα 4.13 Φαινόμενο σκίασης κατά την εναπόθεση.....	91
Σχήμα 4.14 Υπόστρωμα Karton μεγεθυμένο 10 φορές στο οπτικό μικροσκόπιο .....	96
Σχήμα 4.15 Δείγμα με στρογγυλεμένες άκρες.....	97
Σχήμα 4.16 Εναποθέσεις με προβληματικά χαρακτηριστικά.....	97
Σχήμα 4.17 Περιμετρικά κομμένο δείγμα C21.....	99
Σχήμα 4.18 Τομή δομής αισθητήρα.....	99
Σχήμα 4.19 Στάδια δομής αισθητήρα πάνω στο ανθρώπινο δάχτυλο .....	100
Σχήμα 5.1 Συνδεσμολογία αισθητήρα με τον παλμογράφο .....	103
Σχήμα 5.2 Σήματα εμφάνισης θόρυβο χωρίς την χρήση ηλεκτροδίου για γείωση (α) και σήμα ύστερα απο την σύνδεση της γείωσης του παλμογράφου με ηλεκτροδίου τοποθετημένο στο ανθρώπινο δέρμα (β).....	104
Σχήμα 5.3 Επιφάνειες υλικών.....	104
Σχήμα 5.4 Ανάγλυφο επιφάνειας γραφής Braille τυπωμένη σε πλαστικό φύλλο .....	105
Σχήμα 5.5 Αντιπροσωπευτικά σήματα για κάθε υλικό σε επαφή με αισθητήρα εναπόθεση μετάλλου Cr-Cu .....	109
Σχήμα 5.6 Αποτύπωμα σήματος επαφής αισθητήρα 1-KC22_3Cu με χαρτί, υπό διαφορετική ασκούμενη πίεση στην επιφάνεια.....	109

Σχήμα 5.7 Αποτύπωμα ηλεκτρικού σήματος απο την επαφή των τριών αισθητήρων Cr-Cu με διαφορετική γεωμετρία IDE, με ξύλο .....	111
Σχήμα 5.8 Αντιπροσωπευτικά σήματα για κάθε υλικό σε επαφή με αισθητήρα εναπόθεση μετάλλου Al.....	112
Σχήμα 5.9 Αποτύπωμα ηλεκτρικού σήματος απο την επαφή των αισθητήρων μικρότερου και μεγαλύτερους πλάτους μεταλλικών διαδρόμων IDE, με χαρτί.....	112
Σχήμα 5.10 Συγκριτικά ηλεκτρικά σήματα για ηλεκτρόδια χαλκού και αλουμινίου για όμοιες γεωμετρίες αισθητήρων.....	114
Σχήμα 5.11 Αντιπροσωπευτικά σήματα για κάθε υλικό σε επαφή με αισθητήρα FPCB .....	115
Σχήμα 5.12 Σήματα επαφής του αισθητήρα μικρότερου πλάτους μεταλλικών διαδρόμων IDE, για επαφή με γυαλί και χαρτί .....	116
Σχήμα 5.13 Αποτύπωμα σήματος επαφής αισθητήρα 1-FPCB14_18Cu σε δέρμα, υπό διαφορετική ασκούμενη πίεση στην επιφάνεια ( $A > B$ ).....	117
Σχήμα 5.14 Κάθετη ολίσθηση αισθητήρα αφής σε ανάγλυφη κωδικοποίηση Braille .....	118
Σχήμα 5.15 Σήματα αναφοράς ολίσθησης αισθητήρων στην πλαστική διαφάνεια χωρίς ανάγλυφη κωδικοποίηση.....	119
Σχήμα 5.16 Σήματα ανάγλυφου μίας κουκίδας για τους διαφορετικούς αισθητήρες .....	121
Σχήμα 5.17 Μεγέθυνση σήματος αισθητήρα 1-KB22_3Cu για ολίσθηση σε ανάγλυφο μίας κουκίδας .....	122
Σχήμα 5.18 Σύνολο τριών ολισθήσεων του αισθητήρα 1-KB21_3Al για ανάγλυφο μίας κουκίδας .....	123
Σχήμα 5.19 Σήματα ολίσθησης σε πλαστικό φύλλο αναφοράς και σε ανάγλυφη τελεία για αισθητήρα FPCB.....	125
Σχήμα 5.20 Σήματα αισθητήρα 1-KB22_3Cu για την αναγνώριση κάθετη διαδοχικών κουκίδων.....	127
Σχήμα 5.21 Σήματα ανίχνευσης ανάγλυφου δύο κουκίδων απόστασης 0.5 cm για τον αισθητήρα 1-KA22_3Cu .....	128
Σχήμα 5.22 Μεγέθυνση των σημάτων όπου υπάρχει ανίχνευση των κουκίδων, ώστε να παρατηρηθεί η αποτύπωση του πλήθους των μεταλλικών διαδρόμων σε κάθε περίπτωση γεωμετρίας IDE.....	129
Σχήμα 5.23 Σήματα ανίχνευσής δύο κουκίδων σε οριζόντια διάταξη μεταξύ τους.....	130

Σχήμα 5.24 Διαφοροποίηση ανάγλυφων κωδικοποιήσεων γραφής Braille για τον αισθητήρα 1-KA22_3Cu.....	132
Σχήμα 5.25 Διαφοροποίηση ανάγλυφων κωδικοποιήσεων γραφής Braille για τον αισθητήρα 1-KC21_3Al .....	133
Σχήμα 5.26 Περίληψη αρχιτεκτονικής μοντέλου 2D-CNN που σχεδιάστηκε για την αναγνώριση των επιφανειών που αγγίζει ο αισθητήρας αφής .....	136
Σχήμα 5.27 Virtual Instrument παλμογράφου - LabView .....	138
Σχήμα 5.28 Δυναδικός πίνακας σύγκρισης.....	140
Σχήμα 5.29 Πίνακας σύγκρισης μοντέλου 2D-CNN για τον αισθητήρα 1-KA22_3Cu .....	140
Σχήμα 5.30 Τιμές μετρικών αξιολόγησης μοντέλου ταξινόμησης υλικών που άγγιξε ο αισθητήρας αφής 1-KA22_3Cu.....	143



# Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 Βιοϊατρικές εφαρμογές των TENG αισθητήρων .....	44
Πίνακας 4.1 Διαφορετικές γεωμετρίες πεπλεγμένων ηλεκτροδίων.....	74
Πίνακας 4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των 6 διαφορετικών γεωμετριών IDE .....	76
Πίνακας 4.3 Ονοματολογία, διαστάσεις και πάχη μηχανικών μασκών εναπόθεσης.....	78
Πίνακας 4.4 Στοιχεία εναπόθεσης μετάλλων .....	81
Πίνακας 4.5 Εικόνες δειγμάτων.....	84
Πίνακας 4.6 Χαρακτηριστικά σχεδιασμού FPCB .....	85
Πίνακας 4.7 Συγκριτικά χαρακτηριστικά των διαστάσεων που απαιτούμενων και των τελικών διαστάσεων.....	88
Πίνακας 4.8 Εικόνες μασκών εναπόθεσης στο οπτικό μικροσκόπιο.....	89
Πίνακας 4.9 Εικόνες δειγμάτων εναπόθεσης Cr-Cu και Al με χρήση οπτικού μικροσκοπίου .....	92
Πίνακας 4.10 Συγκριτικά χαρακτηριστικά πλάτους κοπής μάσκας και πλάτους εναπόθεσης ..	93
Πίνακας 4.11 Συγκριτικά χαρακτηριστικά και αποκλίσεις δειγμάτων εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων .....	94
Πίνακας 4.12 Εικόνες δειγμάτων FPCB με χρήση οπτικού μικροσκοπίου .....	95
Πίνακας 4.13 Ονοματολογία αισθητήρων.....	101
Πίνακας 5.1 Στάδια ολίσθησης αισθητήρα σε πλαστικό φύλλο με ανάγλυφη κουκίδα.....	120
Πίνακας 5.2 Τιμή τάσης κατά την επαφή των αισθητήρων με την κουκίδα για τους τρεις παλμούς και μέση τιμή.....	124
Πίνακας 5.3 Υπολογισμός μέσου όρου μέγιστης τάσης για κάθε ανάγλυφη κουκίδα και σύγκριση με την τιμή τάσης για την ελάχιστη απόσταση κουκίδων όπου ο αισθητήρας ολισθαίνει ταυτόχρονα και στις δύο .....	128
Πίνακας 5.4 Συγκριτικός πίνακας τιμών τάσης ανίχνευσης μίας και δύο κουκίδων σε οριζόντια απόσταση μεταξύ τους.....	130

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Ορισμός του προβλήματος

Η Νανοτεχνολογία έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη των σύγχρονων κλάδων μελέτης, όπως η επιστήμη των υλικών, η ηλεκτρονική, η ιατρική και η ενέργεια. Στη νανοκλίμακα, τα υλικά μπορούν να παρουσιάσουν μοναδικές φυσικές και χημικές ιδιότητες και οδηγούν σε νέες, πολλά υποσχόμενες εφαρμογές. Η πρόοδος αυτή, επέτρεψε τη δημιουργία αισθητήρων με πρωτοφανή επίπεδα ακρίβειας και λειτουργικότητας.

Η σύγχρονη ηλεκτρονική σε συνδιασμό με όλα τα οφέλη της Νανοεπιστήμης, έχει ανοίξει ένα νέο παράθυρο έρευνας, που δεν θα μπορούσε να μην περιλαμβάνει και τον άνθρωπο, ως μία εξαιρετικά ευαίσθητη πηγή τεράστιου όγκου πληροφοριών, σημάτων και δεδομένων. Με την χρήση της τεχνολογίας των αισθητήρων, η επιστημονική κοινότητα μελετά τρόπους ώστε όσα ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται μέσω των αισθήσεων του, να κωδικοποιηθούν σε μορφή ηλεκτρικών σημάτων, να επεξεργαστούν και να αξιοποιηθούν ως είσοδο σε υπολογιστικές μηχανές, ανοίγοντας έναν νέο δρόμο στην εώς τώρα αντίληψη και μελέτη των ευφών μηχανών και μηχανισμών αλλά και την περίθαλψη και υποστήριξη των ασθενών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αισθητήρες αφής, καθώς ο άνθρωπος έχει αντιληφθεί μέσα από χιλιάδες χρόνια εξέλιξης, πως η απτική αντίληψη είναι μια από τις βασικότερες αισθήσεις. Η αφή είναι αυτή που του επιτρέπει να αντιλαμβάνεται τις φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων, να εκτελεί εργασίες με τα χέρια του, να πραγματοποιεί λεπτούς χειρισμούς και να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον με φυσικό και διαισθητικό τρόπο. Η σημαντικότητα της απτικής αντίληψης γίνεται ακόμα πιο κατανοητή εάν αναλογιστεί κανείς τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει ένας άνθρωπος που δεν την διαθέτει ή που είναι το βασικότερο αισθητήριο όργανο που διαθέτει, όπως στην περίπτωση των ατόμων με προσθετικά μέλη και περιορισμένη όραση, αντίστοιχα. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, είναι ζωτικής σημασίας για τον άνθρωπο να έχει την αίσθηση της αφής και την υφή των αντικειμένων που τον περιβάλλουν, ώστε να μπορεί να διαβάζει, να

γνωρίζει το είδος του υλικού που ακουμπάει, την τραχύτητα του και την πίεση που μπορεί να ασκήσει σε αυτό.

Καθώς οι αισθητήρες αφής ως τεχνολογία, γίνονται πλέον μέρος του ανθρώπινου σώματος, ως προσθετικό εύκαμπτο στρώμα στην επιφάνεια του δέρματος, έχουν αυξηθεί οι απαιτήσεις για τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους. Η ακρίβεια των αισθητήρων, η βιοσυμβατότητα, ο χρόνος λειτουργίας, το κόστος και το μέγεθος είναι ορισμένα από τα χαρακτηριστικά που οφείλει να δοθεί προσοχή κατά την κατασκευή αισθητήρων, κατάλληλων για εφαρμογή στο ανθρώπινο δέρμα.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραπάνω διαπιστώσεις και προκλήσεις, αναπτύχθηκε ο εν λόγω εύκαμπτος φορητός αισθητήρας αφής, που προσαρμόζεται στο άκρο του δακτύλου και λειτουργεί βάση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου, με σκοπό να μελετηθούν τα τριβοηλεκτρικά σήματα ως σήματα αφής για διαφορετικά υλικά και διαφορετικά ανάγλυφα επιφανειών.

## **1.2 Απτική αντίληψη**

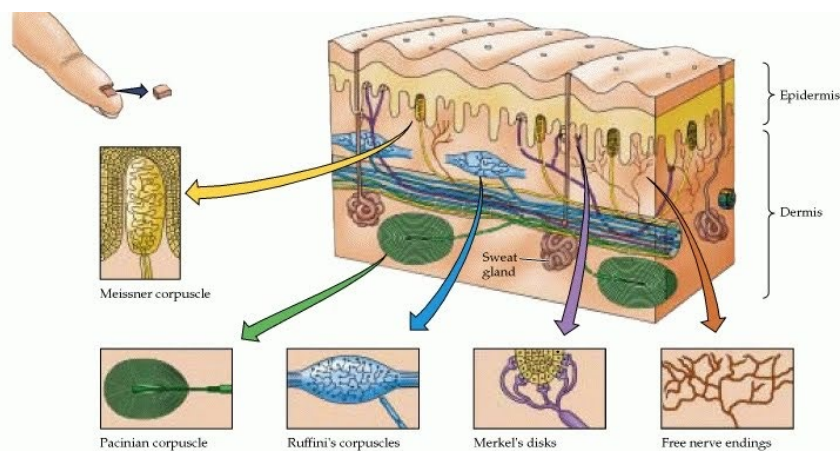
### **1.2.1 Φυσιολογία στο ανθρώπινο σύστημα αναγνώρισης υφής**

Η αίσθηση της αφής επιτρέπει στον άνθρωπο να αντιλαμβάνεται εξωτερικά ερεθίσματα μέσω υποδοχέων που βρίσκονται σε όλο του σώμα, συμπεριλαμβανομένων των μηχανοϋποδοχέων για την πίεση και τη δόνηση και άλλων [1]. Το άτριχο δέρμα στο μπροστινό μέρος του χεριού περιέχει τις περισσότερες νευρικές απολήξεις, με την πυκνότητά τους να κορυφώνεται στην κεντρική σπείρα των άκρων των δακτύλων, με 17.000 υποδοχείς.

Οι υποδοχείς που βρίσκονται στο άκρο του δακτύλου χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Οι υποδοχείς ταχείας προσαρμογής ανταποκρίνονται με εκρήξεις δυναμικών δράσης, όταν το δάχτυλο έρχεται σε επαφή με ένα αντικείμενο ή ένα ερέθισμα και όταν αυτό απομακρύνεται. Ένας υποδοχέας βραδείας προσαρμογής παραμένει ενεργός καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου κατά την οποία το ερέθισμα βρίσκεται σε επαφή με το πεδίο εφαρμογής του [1].

Η διατμητική δύναμη, δηλαδή η δύναμη που αφορά την ολίσθηση του δακτύλου στην εκάστοτε επιφάνεια, για την αναγνώριση της υφής των αντικειμένων, προκαλεί τρία στάδια μηχανικών ερεθισμάτων, την πίεση, την εφελκυστική τάση και τη δόνηση [2]. Καθώς το δάχτυλο πλησιάζει σε ένα τραχύ αντικείμενο, η επαφή μεταξύ της επιφάνειας του δέρματος και

του αντικειμένου προκαλεί πίεση, η οποία ανιχνεύεται από τα κύτταρα Merkel με εύρος ανίχνευσης μεγαλύτερο των 2 kP. Καθώς το δάκτυλο αρχίζει να κινείται, η τριβή μεταξύ των δύο επιφανειών προκαλεί μια δύναμη αντίστασης, αντίθετη προς την κατεύθυνση της κίνησης. Λόγω της τριβής, η επιφάνεια του δέρματος προσκολλάται στο αντικείμενο, παραμορφώνεται και διεγείρει το σωματίο Meissner. Παράλληλα, ασκείται πρόσθετη δύναμη έλξης στο δέρμα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται φαινόμενα δόνησης στο ανάγλυφο του δαχτυλικού αποτυπώματος και έτσι ενεργοποιείται το σωματίο Pacinian, με εύρος ανίχνευσης: 40-800 Hz [2]. Η φυσιολογία των υποδοχών που συμμετέχουν στην διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Με αυτές τις τρεις λειτουργίες των αισθητηρίων οργάνων, ο άνθρωπος μπορεί να αναγνωρίσει λεπτομερείς πληροφορίες που σχετίζονται με την υφή της επιφάνειας και κατ' επέκταση με το είδος του υλικού. Αφού το δάκτυλο έρθει σε επαφή με την επιφάνεια και οι υποδοχείς ενεργοποιηθούν κατάλληλα, λαμβάνει χώρα μια ποικιλία σύνθετων μηχανικών, αντιληπτικών και γνωστικών φαινομένων, για την μεταφορά και την αποκωδικοποίηση της πληροφορίας, στον εγκέφαλο.



Σχήμα 1.1 Σχεδιαστική απεικόνιση αισθητηρίων υποδοχής στο ανθρώπινο δάκτυλο

Υπάρχουν πολλοί πιθανοί λόγοι για τους οποίους κάποιος μπορεί να χάσει την αίσθηση της αφής, όπως τραυματισμοί, νευρικές βλάβες και ορισμένες ιατρικές παθήσεις. Για παράδειγμα, αν κάποιος υποστεί τραυματισμό στο χέρι ή το μπράτσο του, μπορεί να χάσει την αίσθηση της αφής στην πληγείσα περιοχή. Επίσης, νευρικές βλάβες και ιατρικές παθήσεις όπως ο διαβήτης και η σκλήρυνση κατά πλάκας μπορούν επίσης να προκαλέσουν μούδιασμα ή απώλεια της αίσθησης της αφής. Φυσικά, τα άτομα με προσθετικά μέλη, βιώνουν ολική απώλεια της αφής.

Στην παρούσα διπλωματική, όπως θα γίνει αντιληπτό στις επόμενες ενότητες, η επιλογή της κατασκευής του αισθητήρα με βάση την TENG τεχνολογία, , προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό τα σήματα επαφής, δόνησης και απομάκρυνσης κατά την φυσιολογική αίσθηση της αφής, κατά την ολίσθηση σε διαφορετικές επιφάνειες.

### **1.2.2 Τεχνητή αίσθηση της αφής**

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η τεχνητή αίσθηση της αφής, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση τις εργασίες για τις οποίες χρησιμοποιείται, είτε ως "αντίληψη για δράση", όπως στον έλεγχο της λαβής και τον επιδέξιο χειρισμό αντικειμένων, είτε ως "δράση για αντίληψη", όπως στην αναγνώριση αντικειμένων, την χαρτογράφηση των επιφανειών και των διαχωρισμό τους [3]. Με βάση την θέση του σώματος που τοποθετούνται οι αισθητήρες αφής, η τεχνητή αίσθηση της αφής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε ενδογενή και εξωγενή. Οι ενδογενής αισθητήρες αφορούν κυρίως εμφυτεύσιμες διατάξεις ή διατάξεις που τοποθετούνται εντός μηχανικών δομών, για περιπτώσεις τεχνιτών μελών ή ρομπότ. Οι εξωγενής αισθητήρες, τοποθετούνται επιφανειακά στο δέρμα ή την επιφάνεια του μέσου που χρησιμοποιείται για την απτική αντίληψη.

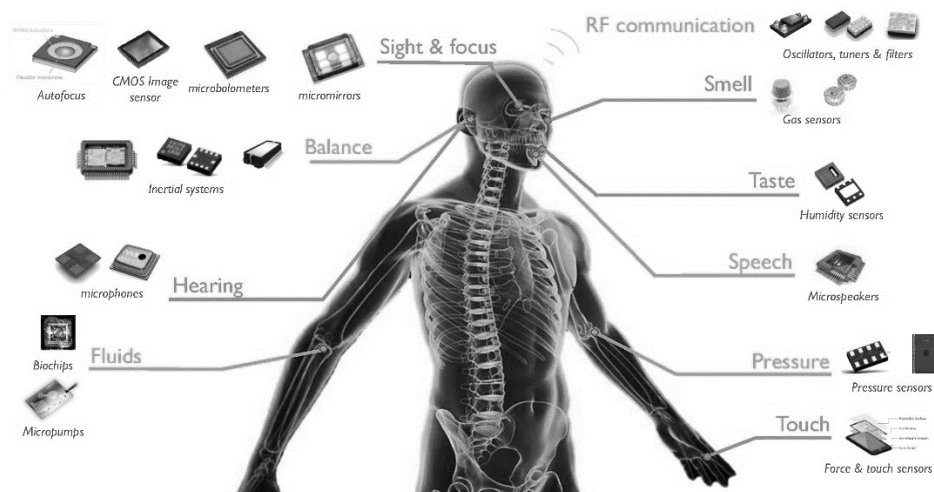
Στην περίπτωση του αισθητήρα αφής της παρούσας διπλωματικής, η εργασία στην οποία χρησιμοποιείται, καταλέγεται ως “δράση για αντίληψη” καθώς ο σκοπός του είναι να έρθει πρώτα σε επαφή με το αντικείμενο και μετά να εξάγει πληροφορίες από αυτό. Η τοποθέτηση του είναι στο άκρο του δαχτύλου και είναι καθαρά επιφανειακή.

## **1.3 Η τεχνολογία των αισθητήρων**

Στην σημερινή εποχή, η τεχνολογία των αισθητήρων έχει διεισδύσει σε τόσο μεγάλο βαθμό σχεδόν σε κάθε πτυχή της καθημερινότητας, που θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι πλέον ορισμένες από τις δραστηριότητες που πραγματοποιεί ο άνθρωπος, όπως η οδήγηση, η ιατρική παρακολούθηση και το Διαδίκτυο των πραγμάτων, δεν θα μπορούσαν να συμβαίνουν χωρίς δεδομένα από αισθητήρες.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην μελέτη αισθητήρων, για εφαρμογές στην υγειονομική περίθαλψη και την υποβοήθηση των ανθρώπων με ειδικές ανάγκες. Οι σύγχρονοι αισθητήρες στον τομέα της υγείας λειτουργούν ως μέρος του ανθρώπινου σώματος, παρέχοντας πρόσθετη ασφάλεια και ανακούφιση στην καθημερινή ζωή, ιδίως για τους χρόνια πάσχοντες και τα άτομα

με ειδικές ανάγκες. Ειδικότερα στον τομέα της αποκατάστασης και υποστήριξης των βασικών αισθήσεων του ανθρώπου, όπως η γεύση, η ακοή και η αφή, η τεχνολογία των αισθητήρων και της μικρο και νανοηλεκτρονικής, επενδύει σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Ενδεικτικά παραδείγματα φαίνονται στο Σχήμα 1.2. Οι ασθένειες, αλλά και οι ανάγκες υποστήριξης των ασθενών, φέρνουν τον άνθρωπο αντιμέτωπο με σοβαρές προκλήσεις που απαιτούν και θα συνεχίζουν να απαιτούν, ισχυρά εργαλεία για την πρόληψη, την διάγνωση και την θεραπεία τους. Η τεχνολογία των αισθητήρων βρίσκεται στην πρώτη γραμμή μαζί με τα πεδία της επιστήμης των υπολογιστών, της ηλεκτρονικής και της ιατρικής να συνδυάζονται, ώστε να μελετήσουν νέες διαγνωστικές και θεραπευτικές προσεγγίσεις.



Σχήμα 1.2 Αισθητήρες στην μικρο και νανοκλίμακα που αντιγράφουν και ανιχνεύουν τις αισθήσεις του ανθρώπου [4]

### 1.3.1 Ορισμός

Ο ορισμός της τεχνολογία των αισθητήρων, δίνεται από την επιστημονική κοινότητα με διαφορετικούς τρόπους, καθώς είναι και πολλές οι διαφορετικές εφαρμογές τους. Στην πλειοψηφία τους, οι μελέτες, ορίζουν τον αισθητήρα ως μία συσκευή εισόδου που ανταποκρίνεται σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος εισόδου ως ερέθισμα, προσφέροντας ως έξοδο ένα ηλεκτρικό σήμα [5]. Πιο γενικά, ο αισθητήρας ορίζεται ως μια συσκευή, που όταν εκτεθεί σε μια συγκεκριμένη αλλαγή σε ότι θεωρείται «κατάσταση ηρεμίας» στο περιβάλλον δράσης του, αλλάζει κατάσταση με τρόπο που μπορεί να μετρηθεί και να καταγραφεί.

Μελετώντας τους αισθητήρες ως μέρος διεπαφών ανθρώπου – μηχανής, ο αισθητήρας αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου συστήματος ή μιας διεργασίας, που η έξοδος του παρέχεται ως

είσοδος σε ένα μεγαλύτερο σύστημα ελέγχου, συνήθως κάποια υπολογιστική μηχανή. Σε μεγάλες εφαρμογές, όπως σε οικιακές συσκευές ή αυτοκίνητα, ο αισθητήρας δεν αρκεί να επιστρέψει ως έξοδο ό,τι ανίχνευσε. Είναι σημαντικό τα δεδομένα που προσφέρει, να αξιοποιηθούν ανάλογα από άλλες μονάδες, ώστε να εκτελεστεί μια επόμενη ενέργεια.

### 1.3.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

Οι αισθητήρες, όπως έχει ήδη τονιστεί, χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις για κρίσιμες διεργασίες. Αυτό, όπως είναι αντιληπτό, απαιτεί να δοθεί έμφαση σε βασικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές που θα πρέπει να ικανοποιούνται, ώστε οι συσκευές να θεωρούνται κατάλληλες για χρήση. Τα χαρακτηριστικά αυτά, συγκεντρώνεται στα εξής:

- **Ακρίβεια:** Είναι σημαντικό η ανιχνεύσιμη ποσότητα ή διεργασία, να μετράται με ακρίβεια και το σφάλμα του συστήματος να είναι σε λογικά πλαίσια που να μην προκαλείται ζημία. Για να γίνει κατανοητή η σημαντικότητα της έννοιας στην περίπτωση των αισθητήρων αφής, αρκεί να αναλογιστεί κανείς την περίπτωση που ενώ ο χρήστης αγγίζει μία γυάλινη επιφάνεια, η ακρίβεια του αισθητήρα είναι χαμηλή και ειδοποιεί τον χρήστη ότι η επιφάνεια που αγγίζει είναι ξύλο. Εάν ο χρήστης ασκήσει παραπάνω δύναμη, με την ασφάλεια ότι ακουμπάει ξύλο, ενδέχεται η γυάλινη επιφάνεια να σπάσει και να τραυματιστεί σοβαρά.
- **Ολίσθηση:** Η ολίσθηση αποτελεί την φυσική τάση κάθε συστήματος να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του βάσει των περιβαλλοντικών αλλαγών, όπως η αύξηση της θερμοκρασία και η υγρασία. Και εδώ, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και κατάλληλες τεχνολογίες προκειμένου η ολίσθηση να μην επηρεάζει καθοριστικά το σύστημα.
- **Ευαισθησία:** Οι αισθητήρες απαιτείται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στην ανιχνεύσιμη ποσότητα ή διεργασία τους. Είναι σημαντικό να αρκεί η ελάχιστη δυνατή έκθεση του αισθητήρα στην μετρήσιμη διεργασία, προκειμένου να ανταποκριθεί ταχύτατα.
- **Επιλεκτικότητα:** Στα διάφορα περιβάλλοντα που εκτίθεται ένας αισθητήρας, μεταδίδονται γιγάντιες ποσότητες πληροφορίας και διαφορετικές μεταξύ τους, από διαφορετικές πηγές. Ο αισθητήρας, θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι, ώστε να είναι πολύ συγκεκριμένη η πληροφορία που τον ενδιαφέρει να καταγράψει και να μην επηρεάζεται η λειτουργία του από την πληθώρα των διαφορετικών σημάτων και πληροφοριών, παρόμοιων ή μη με την μελετώμενη συνθήκη.

- Ανταπόκριση: Οι σύγχρονοι αισθητήρες οφείλουν να αντλούν την χρήσιμη πληροφορία σε ελάχιστο χρονικό διάστημα, ειδικά εάν ληφθεί υπόψιν ότι ορισμένα από τα σήματα που μελετώνται, διαρκούν ελάχιστα κλάσματα του δευτερολέπτου.
- Χρόνος λειτουργίας: Είναι σημαντικό να μην απαιτείται συχνή αλλαγή των αισθητήρων σε συσκευές και να κατασκευάζονται έτσι ώστε να είναι ανθεκτικοί. Σε αυτό το χαρακτηριστικό δίνεται βαρύτητα κυρίως σε περιπτώσεις αισθητήρων στον τομέα της υγείας, όπου ο μικρός χρόνος ζωής απαιτεί συχνές αλλαγές και επιβάρυνση του χρήστη.

## 1.4 Η Νανοτεχνολογία στο κλάδο των αισθητήρων

Η νανοτεχνολογία είναι η μελέτη υλικών και τεχνικών σε νανοκλίμακα, συνήθως σε μέγεθος μεταξύ 1 και 100 νανομέτρων. Ο τομέας αυτός περιλαμβάνει τη δημιουργία, τον έλεγχο και τη διερεύνηση συσκευών και υλικών, όπου τουλάχιστον μία ή περισσότερες διαστάσεις είναι στην περιοχή των 100 nm [6], [7]. Σε αυτή την κλίμακα, τα υλικά αποκτούν εξαιρετικές ιδιότητες, διαφορετικές από αυτές που έχουν σε μεγαλύτερη κλίμακα, όπως η ελαστικότητα, η υψηλή αγωγιμότητα και η λεπτότητα, κι αυτό είναι που τα καθιστά τόσο ελκυστικά για μια τεράστια γκάμα εφαρμογών.

Αξιοποιώντας τη δυνατότητα χρήσης αισθητήρων στο επίπεδο της νανοκλίμακας, ο αισθητήρας μπορεί να είναι πιο συμπαγής, πιο μικρός και πιο αποτελεσματικός. Ωστόσο, ορισμένα σημεία της βιβλιογραφίας αναφέρεται ότι οι νάνο-αισθητήρες δεν είναι απαραίτητα μειωμένοι σε μέγεθος στη νανοκλίμακα, αλλά θα μπορούσαν να είναι μεγαλύτερες συσκευές που χρησιμοποιούν τις μοναδικές ιδιότητες των νανοϋλικών για την ανίχνευση και τη μέτρηση γεγονότων [6]. Η τεχνολογία των αισθητήρων, δεν θα μπορούσε να μην επωφεληθεί από την μελέτη στην νανοκλίμακα, καθώς ο συνδιασμός των δύο επιστημονικών κατευθύνσεων συγκλίνουν σε εφαρμογές που ξεκινούν από την ανίχνευση ρύπων στο νερό έως τα εύκαμπτα τατουάζ νάνο-αισθητήρων για την υποστήριξη των ανθρώπων με διαβήτη και αισθητήρες ικανούς να επαναφέρουν σε άτομα με προσθετικά μέλη την ικανότητα να αισθάνονται τα αγγίγματα στο χέρι τους.

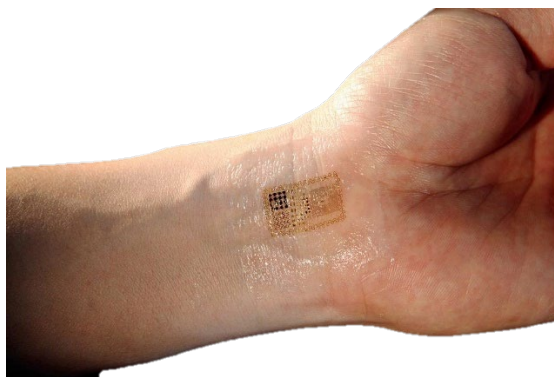


## 1.5 Εισαγωγή στην τεχνολογία των φορητών βιοιατρικών αισθητήρων

Ο αναδυόμενος κλάδος της Νανοτεχνολογίας παράλληλα με την επιστήμη των υλικών, οδήγησαν πρόσφατα σε αξιοσημείωτη ανάπτυξη των εύκαμπτων φορητών αισθητήρων. Οι φορητοί αισθητήρες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην υλοποίηση της εξατομικευμένης ιατρικής, καθώς μπορούν να συλλέγουν συνεχώς δεδομένα από το ανθρώπινο σώμα για να καταγράφουν έγκαιρα σημαντικές αλλαγές [8]. Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους, όπως η υψηλή ευελιξία και η προσαρμοστικότητα, τα εύκαμπτα ηλεκτρονικά επιτρέπουν μια φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρονικών και του ανθρώπινου σώματος.

Ειδικότερα, οι φορητοί αισθητήρες σε μορφή δέρματος, με τα χαρακτηριστικά της ελαφρότητας, της ευκαμψίας και της ελαστικότητας, έχουν βρει ισχυρές εφαρμογές στην ανίχνευση συνεχών φυσιολογικών διεργασιών, σε πραγματικό χρόνο [8]. Η παρακολούθηση φυσικών σημάτων, όπως ο καρδιακός ρυθμός και η σωματική δραστηριότητα, και η ενσωμάτωσή τους σε διεπαφές ανθρώπου-μηχανής, για τη βοήθεια ασθενών με διαταραχές κίνησης, είναι από τις σημαντικότερες εφαρμογές που βρίσκουν οι εύκαμπτοι φορητοί αισθητήρες. Ως αισθητήρες μεγάλης μηχανικής συμβατότητας, έχουν επιδείξει εξαιρετική συμμόρφωση με τις καμπυλότητες του δέρματος και τις κινήσεις του σώματος, παρέχοντας ένα πρόσθετο επίπεδο άνεσης του χρήστη, ασφάλειας του δέρματος και ακρίβειας του σήματος [9].

Οι δυνατότητες αυτών των φορητών βιοαισθητήρων, προσαρμοσίμων επιφανειακά στο ανθρώπινο σώμα (Σχήμα 1.3), έχουν επεκταθεί από την ανίχνευση κοινών σημάτων, όπως τα σήματα αφής, σε πιο ειδικούς χημικούς βιοδείκτες, όπως η γλυκόζη του αίματος, για την παρακολούθηση του διαβήτη. Επιπλέον, οι φορητοί αισθητήρες προσφέρουν τη δυνατότητα παροχής ψηφιακών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο που μπορούν να καταγραφούν από έξυπνα τηλέφωνα, δημιουργώντας επαναστατικές ευκαιρίες για εξατομικευμένη, ψηφιοποιημένη ιατρική και υποστήριξη των ασθενών [8], [10].



Σχήμα 1.3 Αισθητήρας ελέγχου καρδιακού ρυθμού με την μορφή ηλεκτρικού δέρματος, τοποθετημένος σε ανθρώπινο χέρι [11]

### 1.5.1 Εύκαμπτα υλικά

Η επιλογή των υλικών, για την κατασκευή εύκαμπτων αισθητήρων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοσή τους. Οι φορητές συσκευές αισθητήρων με βιολογικό προσανατολισμό θέτουν υψηλότερες απαιτήσεις στην ευελιξία, την αγωγιμότητα και την ανθεκτικότητα των υλικών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, είναι το πολυϊμίδιο (PI), το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και Kapton φιλμ πολυϊμιδίου (DuPont) [9].

Το πολυϊμίδιο (PI) είναι ένας τύπος πολυμερούς που είναι γνωστός για την εξαιρετική του ευελιξία, αντοχή και ανθεκτικότητα. Είναι ένα ανθεκτικό στη θερμότητα υλικό που μπορεί να διατηρήσει το σχήμα και τις διαστάσεις του σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση σε εύκαμπτους φορητούς αισθητήρες. Το PI είναι επίσης ανθεκτικό στην υγρασία, τις χημικές ουσίες και την υπεριώδη ακτινοβολία. Επιπλέον, το PI είναι ένας καλός ηλεκτρικός μονωτής, ο οποίος μπορεί να είναι σημαντικός για φορητούς αισθητήρες που πρέπει να διατηρούν ηλεκτρική απομόνωση.

Το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) είναι ένας τύπος πλαστικού που είναι επίσης γνωστός για την αντοχή, την ανθεκτικότητα και την ευελιξία του. Επιπλέον, το PET έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, πράγμα που σημαίνει ότι δεν διαστέλλεται ή συστέλλεται σημαντικά όταν εκτίθεται σε μεταβολές της θερμοκρασίας. Αυτή η ιδιότητα το καθιστά ιδανικό για χρήση σε αισθητήρες που πρέπει να διατηρούν το σχήμα και τις διαστάσεις τους σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Το Kapton είναι ένας τύπος μεμβράνης πολυϊμιδίου που διατηρεί την ανθεκτικότητα του σε υψηλές θερμοκρασίες, με όμοια πλεονεκτήματα όπως αυτά των PI και PET. Το Kapton είναι επίσης ανθεκτικό στην υγρασία, τις χημικές ουσίες και την υπεριώδη ακτινοβολία, καθιστώντας το μια ανθεκτική επιλογή για χρήση σε αισθητήρες που διατηρούνται προσκολλημένοι στο ανθρώπινο σώμα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

## 1.6 Διεπαφή ανθρώπου – μηχανής

Η άνοδος των εύκαμπτων φορητών συσκευών τα τελευταία χρόνια προαναγγέλλει μια νέα εποχή στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής (Human machine interface, HMI), η οποία μπορεί να ικανοποιήσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις σε εφαρμογές, για η βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών. Εμβαθύνοντας στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης και της υποστήριξης ασθενών, ο συνδιασμός των εύκαμπτων φορητών συσκευών και της διεπαφής ανθρώπου μηχανής, είναι αυτός που παρέχει δυνατότητες όπως η επικοινωνία και ο έλεγχος ιατρικών συσκευών και συστημάτων, την συλλογή δεδομένων από αισθητήρες συσκευές και την παρακολούθηση ζωτικών σημείων. Επιπλέον, οι HMI μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βοηθητικές συσκευές ή μηχανήματα αποκατάστασης [12].

Οι συμβατικές άκαμπτες συσκευές επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το επίπεδο άνεσης των χρηστών και σχεδόν εξαφανίζουν τη δυνατότητα διάδρασης με μηχανές. Τα μειονεκτήματα αυτά, ξεπερνούνται με την εξαιρετική μηχανική ευελιξία και δυνατότητα τεντώματος των εύκαμπτων αισθητήρων, προσφέροντας την δυνατότητα για σχεδιασμό εξαιρετικά δυναμικών εφαρμογών HMI [13]. Οι εύκαμπτοι και ελαστικοί αισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να προσαρτηθούν σε καμπύλες και δυναμικές επιφάνειες, όπως το ανθρώπινο δέρμα και ρομπότ, μπορούν να παρακολουθούν συνεχώς τους φυσιολογικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, ενισχύουν τη διαδραστική ακρίβεια και την εμπειρία του χρήστη κατά τη διαδικασία αλληλεπίδρασης.

Για τα φορητά συστήματα HMI, η διαδικασία λειτουργίας τους μπορεί να περιγραφεί ως η ανίχνευση των φυσικών, ηλεκτροφυσιολογικών και περιβαλλοντικών σημάτων από τους χρήστες, τα οποία χρησιμοποιεί η εκάστοτε μηχανή για να εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες. Συγκεκριμένα, οι πληροφορίες εισόδου βασίζονται στα δεδομένα του αισθητήρα και την καταγραφή των καταστάσεων κίνησης του ανθρώπινου σώματος καθώς και των βιοηλεκτρικών

και περιβαλλοντικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο [13]. Η επεξεργασία του σήματος προστίθενται μεταξύ της εισόδου και της εξόδου για τη σύνδεση των δύο τμημάτων και στο τμήμα εξόδου, η "μηχανή", αξιοποιώντας διάφορες αλληλεπιδραστικές διεπαφές, όπως είναι η οθόνη του κινητού, παρουσιάζει μια πληροφορία. Με τη συνεχή ενημέρωση του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) και την ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να αναλογιστεί κανείς το μέγεθος των εφαρμογών και των δυνατοτήτων που μπορούν να προκύψουν.

## 1.7 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τον χαρακτηρισμό ενός εύκαμπτου τριβοηλεκτρικού φορητού αισθητήρα αφής, προσαρμόσιμο ως πρόσθετο δέρμα στο άκρο του δαχτύλου. Στόχος είναι συνδυάζοντας την πρόσφατη τεχνολογία των τριβοηλεκτρικών γεννητριών με την ανεπτυγμένη τεχνολογία των εύκαμπτων αισθητήρων, να παρουσιαστούν τα συμπεράσματα από την μελέτη των τριβοηλεκτρικών σημάτων εξόδου, από την επαφή του αισθητήρα αφής με διαφορετικά υλικά και διαφορετικές τραχύτητες υλικών.

Ο σχεδιασμός των ηλεκτροδίων του αισθητήρα, βασίστηκε στην γεωμετρία των πεπλεγμένων ηλεκτροδίων (IDE), όπου πραγματοποιήθηκε μελέτη για διαφορετικές διαστάσεις στην επιφάνεια του μετάλλου και του κενού. Ως μέταλλα των ηλεκτροδίων επιλέχθηκαν το αλουμίνιο και ο χαλκός και μελετήθηκαν οι διαφορές τους ως προς τα σήματα εξόδου. Ως υλικό επαφής του αισθητήρα με τις διάφορες επιφάνειες επιλέχθηκε το KAPTON, το οποίο αποτέλεσε και το υπόστρωμα εναπόθεσης των ηλεκτροδίων. Η εναπόθεση των πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της ιοντοβολής (sputtering) και της εξάχνωση (e-beam evaporation), ενώ για τις εναποθέσεις απαιτήθηκε ο σχεδιασμός και η κοπή μηχανικών μασκών στις ανάλογες διαστάσεις, σε μοτίβα IDE. Εκτός των αισθητήρων που κατασκευάστηκαν, σχεδιάστηκαν και οι αντίστοιχοι αισθητήρες που τυπώθηκαν ως εύκαμπτες πλακέτες έτοιμων κυκλωμάτων, προκειμένου να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών τρόπος κατασκευής.

Οι διαφορετικοί αισθητήρες προς μελέτη, προσαρμόστηκαν σε ανθρώπινο δάχτυλο, καλυμμένο με γάντι νιτριλίου, προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα διαφορετικά πειράματα. Τα τριβοηλεκτρικά σήματα που μελετήθηκαν προέκυψαν από το χτύπημα και την ολίσθηση του αισθητήρα σε διαφορετικά υλικά αλλά και ανάγλυφες κωδικοποιήσεις της γραφής Braille, σε

μορφή κουκίδων. Η παρατήρηση των διαφορετικών μοτίβων των ηλεκτρικών σημάτων, για τα διαφορετικά υλικά και τις υφές είναι το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, οι παρατηρήσεις των σημάτων που προκύπτουν από την επαφή του αισθητήρα με τα υλικά και τα ανάγλυφα, ερμηνεύτηκαν και με χρήση μηχανικής μάθησης. Προκειμένου να εξαχθούν ποσοστά ακρίβειας για την αναγνώριση των υλικών και των υφών της γραφής Braille, σχεδιάστηκε αλγόριθμος συνελκτικού νευρωνικού δικτύου (2D-CNN), όπου τροφοδοτείται με εικόνες από τα διαφορετικά σήματα, βάση των διαφορετικών υλικών, εξάγοντας αποτελέσματα αναγνώρισης.

## **1.8 Κίνητρο διεξαγωγής διπλωματικής εργασίας**

Καθώς οι εξελίξεις της σύγχρονης επιστήμης και των κλάδων μελέτης των αισθητήρων, της ναυοτεχνολογίας και της πληροφορικής, είναι ραγδαίες, ένα πρώτο κίνητρο διεξαγωγής της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εμβάθυνση στους παραπάνω τομείς και η αποκόμιση γνώσεων και δεξιοτήτων πάνω στις εφαρμογές του τριβοηλεκτρικού φαινομένου στον κλάδο της υγείας και της κατασκευής αισθητήρων.

Ωστόσο το μεγαλύτερο κίνητρο για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του συγκεκριμένου αισθητήρα αφής, είναι η συνεισφορά στην βελτίωση της ανθρώπινης υγείας και της ποιότητας ζωής, μέσω της ανάπτυξης νέων και καινοτόμων ιατρικών τεχνολογιών. Η δημιουργία νέων εργαλείων που δίνουν την δυνατότητα σε ανθρώπους που έχουν χάσει την αίσθηση της αφής να ξανά αναγνωρίσουν τα αντικείμενα γύρω τους, η δυνατότητα σε άτομα με περιορισμένη όραση να βοηθηθούν στην ανάγνωση Braille αλλά και τα άτομα που τα περιβάλλουν να κατανοούν την γλώσσα των τυφλών ανθρώπων άμεσα, η ικανότητα που προσφέρει σε άτομα με προσθετικά μέλη και πολλές ακόμα εφαρμογές και μελλοντικές επεκτάσεις του συγκεκριμένου αισθητήρα, αποτελούν το μεγαλύτερο κίνητρο για όλο τον κόπο και την δουλειά που περιέχεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## **1.9 Παρόμοια ερευνητικά έργα**

Η έρευνα για την έξυπνη απτική ανίχνευση έχει προσελκύσει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον σε τομείς όπως η βιομηχανία και η Βιοϊατρική τεχνολογία. Τα τελευταία χρόνια, στην βιβλιογραφία αναφέρονται μελέτες που αναπτύσσουν αισθητήρες αφής με χρήση της

τεχνολογίας των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών και του τριβοηλεκτρικού φαινομένου, που αφορούν εφαρμογές σε ρομπότ, ευφυή προσθετικά μέλη και ενίσχυση της αλληλεπίδρασης ανθρώπου – μηχανής. Τα σημαντικότερα ερευνητικά έργα, που η μελέτη και τα συμπεράσματα τους συνέβαλαν στην κατασκευή και μελέτη του αισθητήρα αφής, της παρούσας διπλωματικής, παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι Zhao και άλλοι [14], αναπτύσσουν ηλεκτρικό δέρμα, βασισμένο στην TENG τεχνολογία, το οποίο αντιλαμβάνεται τις διαφορετικές υφές των εξεταζόμενων αντικειμένων, και κατηγοριοποιεί τα ηλεκτρικά σήματα που συλλέγονται με χρήση νευρωνικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, ο TENG αισθητήρας αφής που παρουσιάζεται, κατασκευάστηκε με χύτευση ειδικής μεμβράνης σε καλούπι σιλικόνης, με μοτίβο ομόκεντρων κύκλων, εμπνευσμένο από τα ανθρώπινα δαχτυλικά αποτυπώματα. Η δομή του αισθητήρα περιλαμβάνει επιπλέον φιλμ Kapton ταινίας 50  $\mu\text{m}$  ως μονωτικό υπόστρωμα και φύλο αλουμινίου 150  $\mu\text{m}$  ως στρώμα θωράκισης. Για την εξέταση της ικανότητας αναγνώρισης της επιφανειακής υφής του αντικείμενου από τον αισθητήρα, χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση ανάγνωσης διαφορετικών αριθμών της γραφής Braille.

Τα συμπεράσματα της μελέτης [14], σύμφωνα με τους συγγραφείς, συγκλίνουν στην παρατήρηση ότι τα ηλεκτρικά σήματα εξόδου, για 10 διαφορετικούς Braille αριθμούς, παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές στην κυματομορφή, που είναι ορατές και με γυμνό μάτι. Ως αποτέλεσμα, με την εκπαίδευση και του νευρωνικού δικτύου που κατασκευάστηκε, η συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο ευφύες σύστημα έξυπνης ανάγνωσης γραφής Braille, με χρήση αισθητήρα αφής.

Ωστόσο, αν και τα ποσοστά, εκπαίδευσης και ελέγχου του μοντέλου είναι αρκετά υψηλά, έως και 93.3%, παρατηρήθηκαν ορισμένα σημεία που εγείρουν προβληματισμούς. Σύμφωνα με την ερευνητική ομάδα, δεν ελέγχθηκαν αυστηρά ο χρόνος δειγματοληψίας και η ταχύτητα ολίσθησης, για την εξαγωγή των ηλεκτρικών σημάτων, με αποτέλεσμα τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου νευρωνικού δικτύου, ενδεχομένως να θεωρηθούν αμφιλεγόμενα, καθώς δεν υπάρχουν σταθερές μετρικές για την δειγματοληψία. Ακόμα, τα μεταλλικά πλακίδια Braille που χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό του αισθητήρα, δεν είναι ανάλογων διαστάσεων και υλικού, με την τυπική μορφή της γραφής Braille. Συνεπώς τα συμπεράσματα να μην επιβεβαιώνουν την ικανότητα του αισθητήρα να διαχωρίζει

τις υφή σε μεγάλη κλίμακα, αλλά η έρευνα δεν εγγυάται την ικανότητα του αισθητήρα να διαχωρίζει τις διαφορετικές υφές της γραφής Braille, στην τυπική κλίμακα ανάγνωσης σε χαρτί.

Οι Song και άλλοι [15], παρουσιάζουν ένα ολοκληρωμένο ασύρματο σύστημα απτικής αντίχενωσης, που αναγνωρίζει ταυτόχρονα διαφορετικά υλικά και υφές με βάση έναν εύκαμπτο τριβοηλεκτρικό αισθητήρα αφής. Ο προτεινόμενος αισθητήρας, βασίζεται στην τεχνολογία πεπλεγμένων ηλεκτροδίων, και για την συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες διατάξεις εύκαμπτων τυπωμένων πλακετών (Flexible printed circuit board). Ο αισθητήρας, αποτελείται από ένα υπόστρωμα πλουμιδιού, που εφάπτεται στο δάχτυλο, το στρώμα των χάλκινων ηλεκτροδίων με πάχος 20  $\mu\text{m}$  και ως τριβοηλεκτρικό στρώμα, για την επαφή με τις διαφορετικές επιφάνειες, χρησιμοποιείται Karton, πάχους 30  $\mu\text{m}$ . Ομοίως με την μελέτη [13], αναπτύσσεται και σε αυτήν αλγόριθμος συνελκτικού νευρωνικού δικτύου (CNN), για την υποστήριξη της αναγνώρισης υλικού και υφής ξεχωριστά.

Στην συγκεκριμένη μελέτη, οι ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει πειράματα και για τον διαχωρισμό διαφορετικών υλικών, εκτός από τον διαχωρισμό της υφής. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα ηλεκτρικά σήματα, για τα διαφορετικά υλικά, παρουσιάζουν διαφορετικές κυματομορφές ανάλογα το υλικό και διαφορετική τάση αιχμής ανάλογα την πίεση. Μάλιστα, για όμοια υλικά αλλά διαφορετικές επιφανειακές διατάξεις, παρουσιάζονται επίσης διαφορές στις εξαγόμενες κυματομορφές. Και σε αυτή την μελέτη, ο αισθητήρας δοκιμάζεται σε αναγνώριση διαφορετικών υφών σε γραφή Braille.

Τα συμπεράσματα της μελέτης, συνοψίζονται στην σημαντική παρατήρηση ότι οι προσομοιώσεις που διεξάχθηκαν επιβεβαιώνουν πως το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο μαζί με τις διαφορετικές διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους αισθητήρες αφής, για τον διαχωρισμό καθημερινών υλικών, όπως ο χαλκός, το γυαλί, το ξύλο, το βαμβάκι και άλλα.

Οι προβληματισμοί που εγείρει η ερευνητική μελέτη [15], αφορούν κυρίως τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των συμπερασμάτων. Αν και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον αλγόριθμο νευρωνικού δικτύου είναι πλήρως ικανοποιητικά, δεν γίνεται αναφορά στον ακριβή τύπο υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Ως συμπέρασμα, θα μπορούσε να θεωρηθεί πως ο αισθητήρας διαχωρίζει συγκεκριμένου τύπου ξύλο από συγκεκριμένο τύπο

χαρτιού και ούτω καθ' εξής. Θα θεωρούνταν πιο γενικώς αποδεκτά τα συμπεράσματα εάν είχαν χρησιμοποιηθεί υλικά συγκεκριμένων προδιαγραφών και συγκεκριμένες μετρικές.

Οι παρατηρήσεις από τα παραπάνω παρόμοια ερευνητικά έργα, κρίθηκαν ιδιαίτερα πολύτιμες τα συμπεράσματα το ερευνητών χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφορά για την παρούσα διπλωματική εργασία. Τα σημεία που διαφοροποιείται ο αισθητήρας αφής που αναπτύχθηκε, αφορούν την ελαχιστοποίηση του πάχους της διάταξης, τις μεθόδους κατασκευής και τον τρόπο χαρακτηρισμού.

## **1.10 Περιγραφή κεφαλαίων**

Το πρώτο κεφάλαιο, αποτελεί μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες που αφορούν το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία ώστε να γίνει κατανοητό κυρίως το κίνητρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στόχος είναι μέσω του πρώτου κεφαλαίου να περιγραφεί η σύγχρονη πραγματικότητα στον τομέα των αισθητήρων και των εφαρμογών τους, κυρίως στον τομέα της βιοϊατρικής τεχνολογίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο, αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτήθηκε να μελετηθεί ώστε να κατασκευαστεί το σύνολο των τριβοηλεκτρικών αισθητήρων αφής, της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στόχος του κεφαλαίου είναι να περιγραφούν και να γίνουν πλήρως κατανοητές οι τεχνολογίες και οι μεθοδολογίες που εφαρμόζονται.

Το τρίτο κεφάλαιο, εμβαθύνει στην θεωρία πίσω από τις πειραματικές τεχνολογίες που χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν προκειμένου να κατασκευαστούν οι αισθητήρες, της παρούσας διπλωματικής.

Το τέταρτο κεφάλαιο, αποτελεί την εκτενή αναφορά στον σχεδιασμό του κάθε αισθητήρα με λεπτομέρειες για την επιλογή των διαστάσεων, την αρχιτεκτονική του, τον τρόπο λειτουργίας του και ό,τι άλλο αφορά την δομή και την υλοποίησή του, ως πλήρως λειτουργικός εύκαμπτος τριβοηλεκτρικός αισθητήρα αφής.

Το πέμπτο κεφάλαιο, εμβαθύνει στις πειραματικές διαδικασίες που διεξάχθηκαν προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία των αισθητήρων και να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του. Επιπλέον, παρουσιάζονται όλες οι μετρικές και τα αποτελέσματα που αφορούν τον χαρακτηρισμό του μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης και νευρωνικών δικτύων.



Το έκτο κεφάλαιο, αποτελεί την κατακλείδα της παρούσας διπλωματικής όπου γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα από την συγκεκριμένη εργασία καθώς οι διάφορες μελλοντικές επεκτάσεις και εφαρμογές που θα μπορούσε να έχει ο παρόν αισθητήρας αφής.

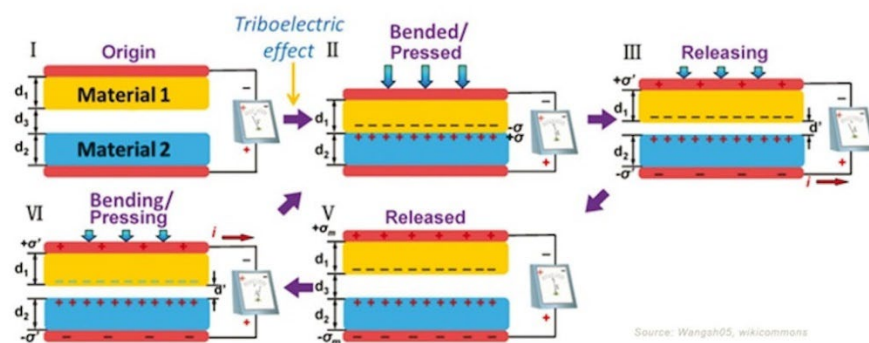
# Κεφάλαιο 2

## Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του θεωρητικού υποβάθρου που διέπει τον τριβοηλεκτρικό αισθητήρα αφής που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Σκοπός είναι το δεύτερο κεφάλαιο να παρέχει την επαρκή κατανόηση των διαφορετικών εννοιών που αφορούν την συγκεκριμένη μελέτη και να τεθούν τα θεμέλια για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του αισθητήρα.

### 2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ένας τύπος ηλεκτρισμού επαφής που συμβαίνει όταν δύο υλικά έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και στη συνέχεια διαχωρίζονται, με αποτέλεσμα τη μεταφορά φορτίων από το ένα υλικό στο άλλο. Αυτό οδηγεί στη συσσώρευση ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια των υλικών, με το ένα υλικό να φορτίζεται θετικά και το άλλο αρνητικά. Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο υλικών, η οποία καθορίζει την κατεύθυνση και το μέγεθος της μεταφοράς φορτίου [16]. Σχηματικό αναπαράστασης της διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Σχηματικό αναπαράστασης τριβοηλεκτρικού φαινομένου [16]

Ένας από τους πιο συνηθισμένους μηχανισμούς για το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η τριβή, η οποία μπορεί να προκαλέσει τη μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ των υλικών. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί σε καθημερινές δραστηριότητες, όπως όταν τρίβεται ένα μπαλόνι στα

μαλλιά και αυτά φορτίζονται με στατικό ηλεκτρισμό. Ο στατικός ηλεκτρισμός είναι η συσσώρευση ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια ενός υλικού. Εμφανίζεται όταν ηλεκτρόνια μεταφέρονται μεταξύ υλικών μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ηλεκτρισμός επαφής, η οποία μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό ηλεκτρικού φορτίου [16]. Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ένας κοινός μηχανισμός για τη δημιουργία στατικού ηλεκτρισμού. Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί επίσης να προκληθεί από άλλους τύπους επαφής και διαχωρισμού, όπως η πίεση και η κάμψη. Λόγω της μη προβλεψιμότητας του φαινομένου, υπάρχουν κάποιες γενικές παρατηρήσεις που διέπουν το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο και βασίζονται κυρίως σε πειράματα και ερευνητικές μελέτες. Πιο συγκεκριμένα η φόρτιση των επιφανειών, η πολικότητα που θα αναπτύξουν και η ισχύς τους, διαφέρει ανάλογα με το είδος του υλικού, την τραχύτητα της επιφάνειας του, τη θερμοκρασία και άλλα.

Παρόλο που το φαινόμενο του τριβοηλεκτρισμού καθώς και ο στατικός ηλεκτρισμός είναι γνωστά ήδη από την αρχαιότητα, η εφαρμογές τους αποτελούν πεδίο μελέτης των τελευταίων χρόνων. Ένας εκ των πιο σύγχρονων κλάδων μελέτης είναι η ανάπτυξη τριβοηλεκτρικών γεννητριών και τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών, οι οποίες χρησιμοποιούν την μηχανική κίνηση ή την παραμόρφωση των υλικών, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ανανεώσιμες και φορητές πηγές ενέργειας για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών, των αισθητήρων και των ιατρικών συσκευών.

Εκτός από τις πρακτικές εφαρμογές του, το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο παρουσιάζει επίσης επιστημονικό ενδιαφέρον, διότι παρέχει πληροφορίες για τις θεμελιώδεις ιδιότητες των υλικών και των αλληλεπιδράσεών τους. Οι ερευνητές μελετούν το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο προκειμένου να κατανοήσουν καλύτερα τους υποκείμενους μηχανισμούς του και να εντοπίσουν τρόπους βελτιστοποίησης και ελέγχου του, για διαφορετικούς σκοπούς.

## **2.2 Τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες**

Η πρώτη τριβοηλεκτρική νανογεννήτρια (triboelectric nanogenerator, TENG) αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα του καθηγητή Zhong Lin Wang στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Γεωργίας (ΗΠΑ), το 2012. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάζεται ένα σύστημα συλλογής και

μετατροπής της μηχανικής ενέργειας μικρής κλίμακας σε ηλεκτρική ενέργεια, από την εκμετάλλευση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου.

Συνοπτικά, μια μηχανική κίνηση όπως οι περιστροφικές κινήσεις, οι κινήσεις του αέρα, κραδασμοί, δονήσεις ακόμα και καθημερινές δραστηριότητες όπως το βάδισμα ή το κούνημα των δαχτύλων, επιβάλλει την στιγμιαία επαφή ή τριβή και απομάκρυνση δύο επιφανειών. Καθώς οι επιφάνειες αυτές έρχονται σε επαφή, εμφανίζονται σε αυτές τριβοηλεκτρικά φορτία, ως αποτέλεσμα του τριβοηλεκτρικού φαινομένου και την ηλεκτροστατικής επαγωγής.

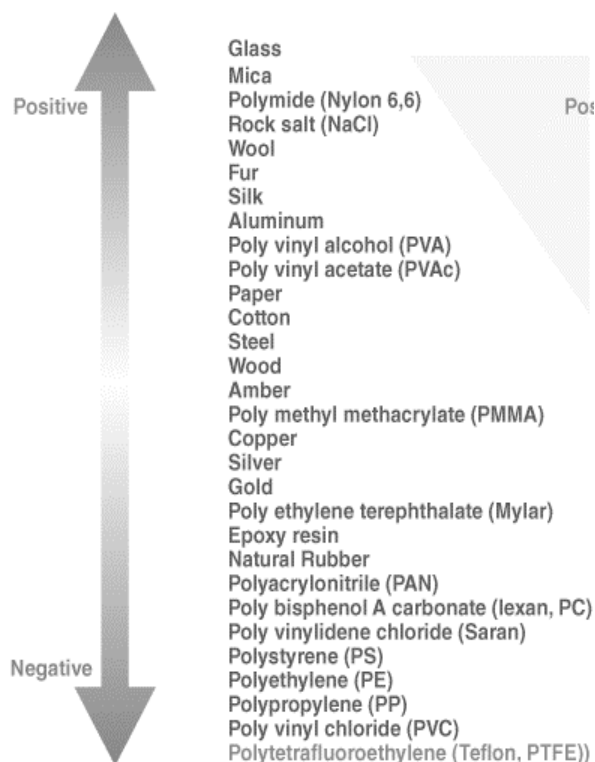
Από την ανάπτυξή τους και έπειτα, οι TENG αποτέλεσαν αντικείμενο μεγάλης έρευνας και ανάπτυξης, με στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους και τον εντοπισμό νέων εφαρμογών τους. Οι TENG έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές στη μετατροπή μηχανικής ενέργειας από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένης της ανθρώπινης κίνησης, του ανέμου και του νερού, και έχουν διερευνηθεί για την πιθανή χρήση τους σε εφαρμογές όπως της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μικρές ηλεκτρονικές συσκευές, της ανάπτυξης αισθητήρων και της δημιουργίας αυτοτροφοδοτούμενων συστημάτων με χρήση μηχανικών κινήσεων.

### **2.2.1 Τριβοηλεκτρική σειρά υλικών**

Ως τριβοηλεκτρική σειρά (Σχήμα 2.2), ορίζεται ένας κατάλογος υλικών που κατατάσσονται σύμφωνα με τις τριβοηλεκτρικές τους ιδιότητες, δηλαδή την ικανότητα τους να φορτίζονται ηλεκτρικά μέσω της διαδικασίας του τριβοηλεκτρισμού. Τα υλικά της τριβοηλεκτρικής σειράς, κατατάσσονται βάση της τάσης τους για θετική φόρτιση και αρνητική φόρτιση, δηλαδή την τάση τους να χάνουν και να κερδίζουν ηλεκτρόνια, αντίστοιχα, όταν έρχονται σε επαφή με άλλα υλικά. Τα υλικά που βρίσκονται στην κορυφή της τριβοηλεκτρικής σειράς, τείνουν να χάνουν ηλεκτρόνια και να φορτίζονται θετικά, όταν έρχονται σε επαφή με υλικά που βρίσκονται χαμηλότερα στη σειρά [16], [17]. Τα υλικά που βρίσκονται στο κάτω μέρος της σειράς, τείνουν να κερδίζουν ηλεκτρόνια και να φορτίζονται αρνητικά, όταν έρχονται σε επαφή με υλικά που βρίσκονται ψηλότερα στη σειρά. Στη μέση της λίστας υπάρχουν υλικά που δεν παρουσιάζουν καμία από τις δύο προαναφερθείσες συμπεριφορές.

Η τριβοηλεκτρική σειρά χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη και την κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών, όταν έρχονται σε επαφή και διαχωρίζονται και αποτελεί σημαντική έννοια στον τομέα των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών (TENG). Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί

υπόψιν ότι εκτός από την επιλογή των υλικών, βάση της τριβοηλεκτρικής σειράς, μπορούν να υπάρξουν και κατάλληλες τροποποιήσεις στην επιφάνεια των υλικών με μικρο και νανοδομές, όπως νανοϋμένια και νανοσωματίδια, ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη απόδοση. Επομένως, υπάρχουν πολυάριθμοι τρόποι για την ενίσχυση της απόδοσης των TENG από την άποψη των υλικών και η τριβοηλεκτρική σειρά αποτελεί ένα θεωρητικό σημείο αναφοράς.



Σχήμα 2.2 Τριβοηλεκτρική σειρά [17]

## 2.2.2 Αρχή και τρόποι λειτουργίας

Τα δύο βασικότερα φαινόμενα που περιγράφουν την αρχή λειτουργίας των TENG είναι ο ηλεκτρισμός επαφής και η ηλεκτροστατική επαγωγή. Πιο συγκεκριμένα, ο ηλεκτρισμός επαφής είναι η διαδικασία κατά την οποία μεταφέρεται ηλεκτρικό φορτίο μεταξύ δύο υλικών (tribo-pairs) που βρίσκονται σε επαφή ή τρίβονται μεταξύ τους, ενώ η ηλεκτροστατική επαγωγή αναφέρεται στον κύριο μηχανισμό μετατροπής της μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η αρχή λειτουργίας των TENG, από πλευράς χημικών δεσμών, βασίζεται στο φαινόμενο της προσκόλλησης. Όταν δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, σε ορισμένα τμήματα

σχηματίζεται ένας χημικός δεσμός και έτσι τα φορτία, ηλεκτρόνια μόρια ή ιόντα, μετακινούνται από την μια επιφάνεια στην άλλη, με σκοπό την εξισορρόπηση του ηλεκτροχημικού δυναμικού τους. Κατά τον διαχωρισμό των επιφανειών, οι επιφάνειες δεν επανέρχονται ηλεκτρικά στην αρχική τους κατάσταση. Ορισμένα από τα άτομα των υλικών, διατηρούν τα ηλεκτρόνια που δέσμευσαν κατά την προσκόλληση, ενώ άλλα έχουν την τάση να τα απομακρύνουν, δημιουργώντας έτσι τριβοηλεκτρικά φορτία στις επιφάνειες. Η παρουσία αυτών των φορτίων, είναι που αποτελεί το θεμελιώδες φαινόμενο στο οποίο οφείλεται η λειτουργία των TENG, καθώς στα τριβοηλεκτρικά φορτία οφείλεται η μεταφορά των ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια, που βρίσκονται προσκολλημένα στις επιφάνειες, ώστε να ισοροπηθεί η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού.

Μοντελοποιώντας μαθηματικά την διαφορά δυναμικού που παρουσιάζεται σε κάθε δομή τριβοηλεκτρικής νανογεννήτριας, προκύπτει η εξής θεμελιώδης εξίσωση:

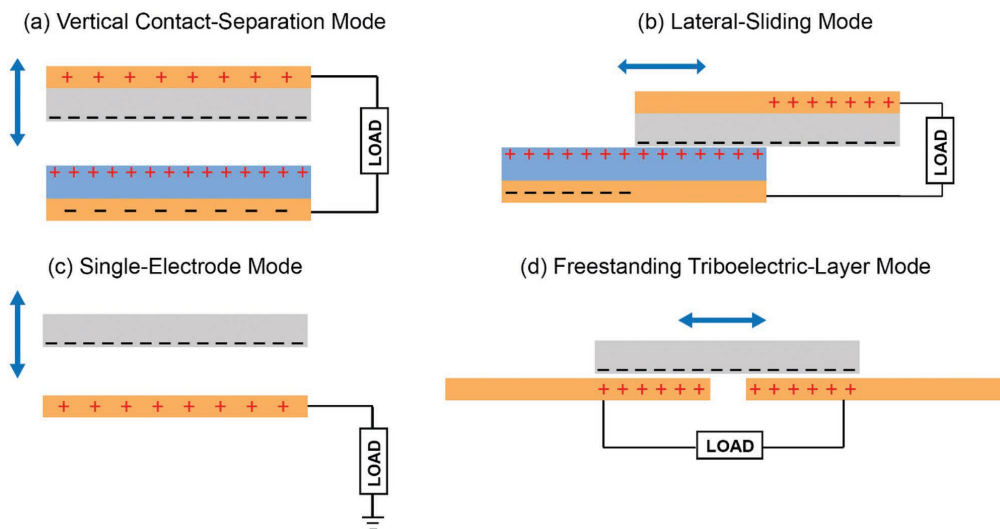
$$V = \frac{|Q|}{C(x)} + V_{oc}(x)$$

Το μέγεθος  $|Q|$  περιγράφει τα θετικά και αρνητικά φορτία που δημιουργούνται στις επιφάνειες των υλικών, αφού αυτές διαχωριστούν. Η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτρόδιων, καθώς υπάρχει ροή ηλεκτρονίων, δηλώνεται με το μέγεθος  $C$ , ενώ ως  $V_{oc}$  ορίζεται η διαφορά δυναμικού των τριβοηλεκτρικών φορτίων. Τα μεγέθη είναι συνάρτηση της απόστασης  $x$  μεταξύ των υλικών, καθώς αυτή μεταβάλλεται.

Οι βασικοί τρόποι λειτουργία των TENG, χωρίζονται βάση της σχετικής κίνησης των επιφανειών, και διακρίνονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες [18], [19]:

- Λειτουργία κάθετης επαφής – διαχωρισμού (Vertical Contact – Separation Mode)
- Λειτουργία πλευρικού τρόπου ολίσθησης (Lateral Sliding Mode)
- Λειτουργία μονού ηλεκτροδίου (Single Electrode Mode)
- Λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων (Freestanding triboelectric-layer Mode)

Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται οι τέσσερις βασικοί τρόποι λειτουργίας. Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά οι τρεις πρώτες διατάξεις ενώ η λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων αναλύεται στην επόμενη υποενότητα, καθώς αποτελεί τον βασικό τρόπο λειτουργίας του εύκαμπτου TENG αισθητήρα αφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 2.3 Επικονίαση των τεσσάρων βασικών τρόπων λειτουργίας των TENG, βάση της σχετικής κίνησης των επιφανειών

## 1. Λειτουργία κάθετης επαφής – διαχωρισμού

Οι επιφάνειες της TENG δομής βρίσκονται στραμμένες η μία προς την άλλη, στην εξωτερική επιφάνεια των οποίων εναποτίθενται ηλεκτρόδια. Η μηχανική δύναμη που ενεργοποιεί το φαινόμενο, ασκείται στον κάθετο άξονα και έτσι τα δύο υλικά έρχονται σε επαφή. Η επαφή των δύο υλικών οδηγεί στην συσσώρευση αντίθετου φορτίου στις επιφάνειες, σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναλυθεί, και η απομάκρυνση των επιφανειών, που οδηγεί στην σταδιακή αύξηση του κενού ανάμεσα τους, είναι η αιτία εμφάνισης της διαφοράς δυναμικού. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων μέσω των ηλεκτροδίων από την μία επιφάνεια στην άλλη, ώστε να εξισορροπηθεί το ηλεκτροστατικό πεδίο.

## 2. Λειτουργία πλευρικού τρόπου ολίσθησης

Ο μηχανισμός αυτής της λειτουργίας TENG, βασίζεται στην οριζόντια κίνηση της μίας από τις δύο επιφάνειες, δηλαδή την ολίσθηση της, στην δεύτερη επιφάνεια, που λειτουργεί ως βάση. Στην διάταξη αυτή, όταν οι δύο επιφάνειες βρίσκονται σε πλήρη επαφή, έχουν ίση και αντίθετη επιφανειακή φόρτιση και αυτή η θέση δεν παρουσιάζει διαφορά δυναμικού. Καθώς η μία επιφάνεια ολισθαίνει προς μια κατεύθυνση σε σχέση με την άλλη, η περιοχή επαφής των υλικών μειώνεται και διαταράσσεται η προηγούμενη ισορροπία. Η μετακίνηση αυτή είναι που προκαλεί την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού, ώστε να εξισορροπηθεί το δυναμικό των τριβοηλεκτρικών φορτίων. Το μέγεθος αυτού το φορτίου, που μεταφέρεται στα ηλεκτρόδια, είναι ανάλογο της

μετατόπισης την ολισθαίνουσας επιφάνειας και μεταβάλλεται σε κάθε στιγμή που μειώνεται το σημείο επαφής των δύο επιφανειών . Όταν υπάρξει πλήρης διαχωρισμός, τα τριβοηλεκτρικά φορτία μηδενίζονται. Τα φαινόμενα αυτά επαναλαμβάνονται για κάθε επόμενη επιστροφή και απομάκρυνση της επιφάνειας που ολισθαίνει.

### 3. Λειτουργία μονού ηλεκτροδίου

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα αντικείμενα που αποτελούν μέρος της TENG διάταξης δεν μπορούν να συνδεθούν ηλεκτρικά με το φορτίο, καθώς είναι κινητά, όπως ένα άτομο που περπατάει στο έδαφος. Για μια τέτοια περίπτωση, δημιουργήθηκε TENG με ένα μόνο ηλεκτρόδιο. Αυτή η παραλλαγή αντιστοιχεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα στο οποίο το ηλεκτρόδιο στο κάτω μέρος της TENG είναι γειωμένο. Το τριβοηλεκτρικό ζεύγος σε αυτή την περίπτωση λειτουργίας είναι μία επιφάνεια και ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο, που ονομάζεται πρωτεύουν ηλεκτρόδιο. Η επιφάνεια έρχεται σε επαφή με το πρωτεύουν ηλεκτρόδιο και το φορτίο που θα αποκτήσει μεταφέρεται στο γειωμένο ηλεκτρόδιο, δημιουργώντας διαφορά δυναμικού και ροή ηλεκτρονίων.

### **2.2.3 Λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων**

Μεταξύ των διαφορετικών τρόπων λειτουργίας των TENG διατάξεων, οι γεννήτριες ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων, έχουν μοναδικά πλεονεκτήματα που τις καθιστούν μέρος εφαρμογών με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Σε σύγκριση με τις κλασσική δομή του προσαρτημένου ηλεκτροδίου στις επιφάνειες που συμμετέχουν στο φαινόμενο, οι γεννήτριες ελεύθερων στρωμάτων δεν είναι απαραίτητο να διαθέτουν ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο στενά με την επιφάνεια, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για συλλογή μηχανική ενέργεια από οποιοδήποτε αυθαίρετα κινούμενο αντικείμενο, όπως το ανθρώπινο σώμα, τα οχήματα και άλλα. Επιπλέον, οι γεννήτριες ελεύθερων στρωμάτων, μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς απαραίτητα να υπάρξει πλήρης επαφή του τριβοηλεκτρικού ζεύγους. Αυτό αυξάνει την απόδοση της διάταξης σημαντικά, καθώς υπάρχει μεγάλη μείωση της απώλειας ενέργειας λόγω της τριβής και την σύγκρουσης των υλικών.

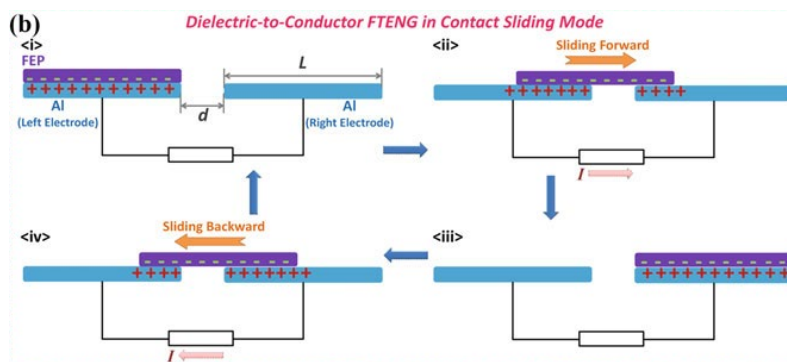
Η διάταξη των TENG με ελεύθερα τριβοηλεκτρικά στρώματα φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Είναι αποτελούμενη από δύο ή περισσότερα όμοια ηλεκτρόδια, συνδεδεμένα μεταξύ τους σε ομάδες και το διηλεκτρικό στρώμα που συμμετέχει στο φαινόμενο είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Η



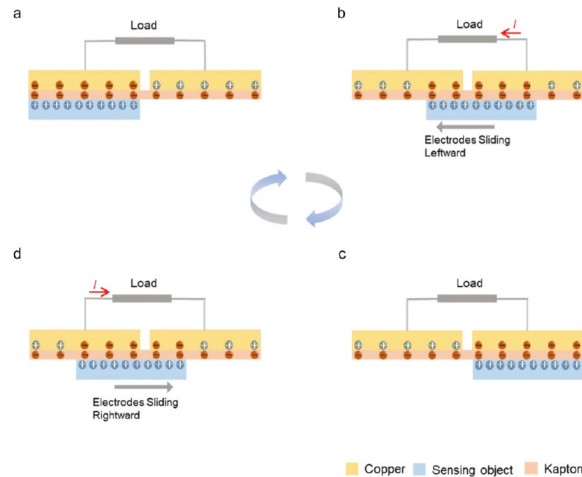
επιφάνεια κινείται σε οριζόντια κατεύθυνση με τα ηλεκτρόδια, ενώ τα ηλεκτρόδια παραμένουν σταθερά σε καθορισμένη θέση, βάση του σχεδιασμού της διάταξης. Η οριζόντια αυτή κίνηση προκαλεί δυσανάλογη κατανομή του φορτίου, βάση και της θέσης της κινούμενης επιφάνειας, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται λόγω των φαινομένων τριβής, να κινούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων με σκοπό να ισοροπηθεί η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται.

Εκτός των περιπτώσεων διάταξης ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων που φαίνεται στο Σχήμα 2.4, στις περιπτώσεις εφαρμογής τους για αισθητήρες αφής συχνά χρησιμοποιείται η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Η διαφορά της σε σχέση με την τυπική μορφή TENG ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων, είναι η ύπαρξη δεύτερης επιφάνειας, η οποία προσκολλάται στα διαταγμένα ηλεκτρόδια και πάνω σε αυτή πραγματοποιείται η ολίσθηση της μελετώμενης επιφάνειας, προς ανίχνευση του υλικού και της υφής.

Όταν το αντικείμενο προς ανίχνευση παραμένει σε επαφή με την περιοχή του ενός ηλεκτροδίου του αισθητήρα, πραγματοποιείται μεταφορά επιφανειακού φορτίου στην περιοχή επαφής, η οποία προκαλεί αλλαγές στην κατανομή φορτίου των ηλεκτροδίων (Σχήμα 2.5 (α)). Σε αυτό το στάδιο, δεν δημιουργείται ρεύμα που να διαρρέει το φορτίο. Καθώς ο αισθητήρας ολισθαίνει προς τα αριστερά (Σχήμα 2.5 (β)), η αμετάβλητη κατανομή φορτίου στο επιπλέον στρώμα εύκαμπτου υλικού, στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, και η αλλαγή της σχετικής θέσης του αντικειμένου ανίχνευσης, οδηγούν στη μεταφορά θετικού φορτίου από το ένα ηλεκτρόδιο στο επόμενο. Οι επόμενες δύο καταστάσεις (Σχήμα 2.5 (γ),(δ)) δημιουργούν ροή ηλεκτρονίων προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η μέγιστη τιμή ηλεκτρικού σήματος εξόδου, δημιουργούνται όταν ο αισθητήρας μετακινείται σε θέση όπου εμφανίζεται κάθετη επικάλυψη μεταξύ ενός εκ των ηλεκτροδίων ή του αντικειμένου ανίχνευσης.



Σχήμα 2.4 Σχηματικό διάταξης TENG ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων χωρίς δεύτερη τριβοηλεκτρική επιφάνεια [17]



Σχήμα 2.5 Σχηματικό TENG ελεύθερων τριβηλεκτρικών στρωμάτων με επιπλέον επιφάνεια εραπτόμενη στα ηλεκτρόδια

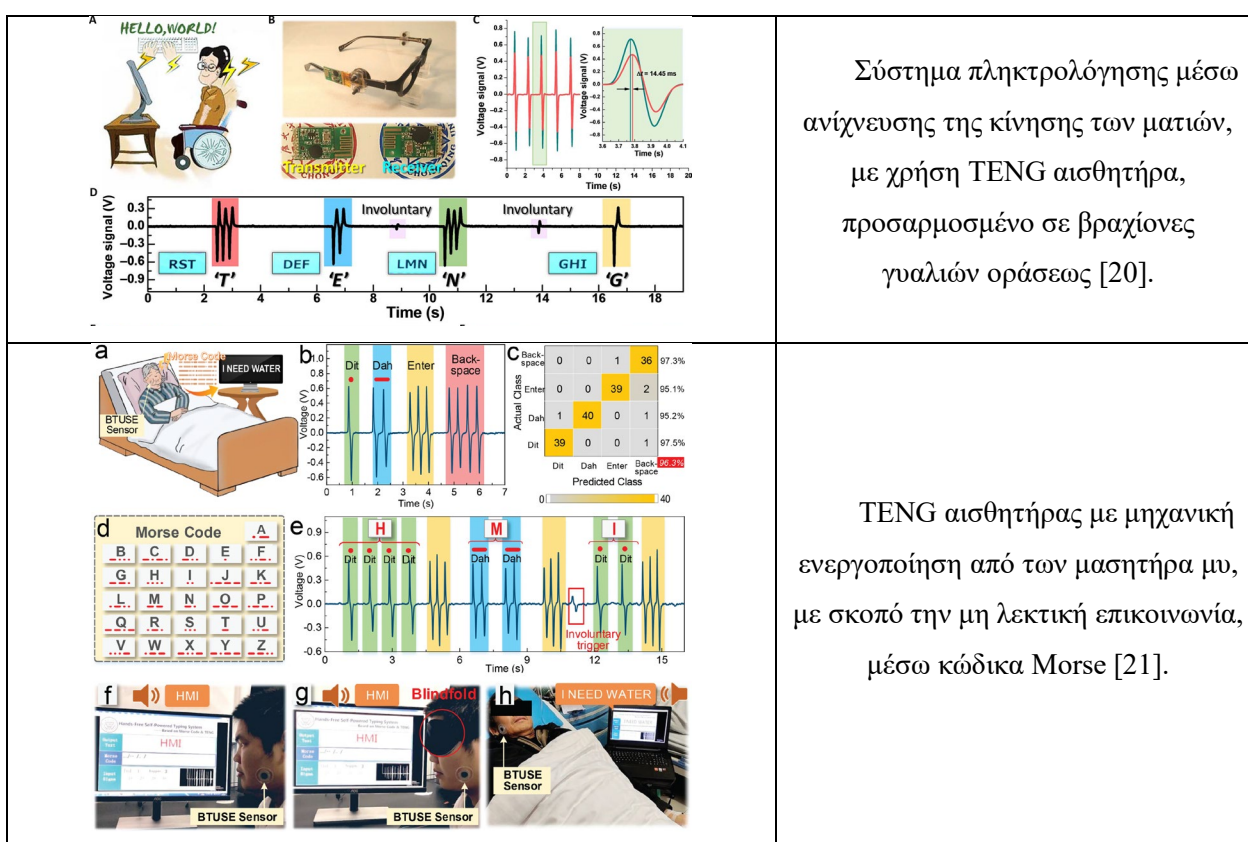
## 2.2.4 Τριβηλεκτρικοί αισθητήρες

Οι TENG, όπως έχει ήδη περιγραφεί ο τρόπος λειτουργίας τους, αποτελούν διατάξεις που μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτή η ικανότητα, μαζί με όλα τα πλεονεκτήματα της ελαστικότητας, του μικρού βάρους και την μεγάλης γκάμας επιλογής υλικών, προσφέρει μοναδικές δυνατότητες και τεράστια ποικιλία εφαρμογών των TENG, ως αισθητήρες ανίχνευσης κινήσεων και αλλαγών, σε καθημερινά αντικείμενα, σε οχήματα ακόμα και στο ανθρώπινο σώμα. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των TENG αισθητήρων είναι ότι μπορούν να παράγουν ηλεκτρικά σήματα από μικρές κινήσεις ή αλλαγές στο περιβάλλον τους, καθιστώντας τα κατάλληλα για ανίχνευση πολύ ασθενών μηχανικών κινήσεων αλλά και κινήσεων ελάχιστης χρονικής διάρκειας. Είναι επίσης σε θέση να λειτουργούν χωρίς την ανάγκη εξωτερικών πηγών ενέργειας, καθιστώντας τους αυτοσυντηρούμενους και κατάλληλους για χρήση σε δυσπρόσιτα σημεία όπως τα ιατρικά εμφυτεύματα [17].

Ωστόσο, οι TENG έχουν ορισμένους περιορισμούς και η μελέτη τους έως και σήμερα εγείρει προβληματισμούς. Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί είναι επί του παρόντος σχετικά μικρή και ενδέχεται να μην είναι κατάλληλες, για χρήση σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Μπορεί επίσης να μην είναι τόσο ανθεκτικοί όσο ορισμένοι άλλοι τύποι αισθητήρων, καθώς τα υλικά που χρησιμοποιούνται μπορεί να φθαρούν με την πάροδο του χρόνου ή να καταστραφούν, λόγω της έκθεσης σε ορισμένα περιβάλλοντα.

## 2.2.4.1 Εφαρμογές στην Βιοϊατρική Τεχνολογία

Καθώς η εξασφάλιση της παγκόσμιας υγείας προκαλεί τεράστιο ενδιαφέρον στην σύγχρονη κοινωνία, απαιτείται συνεχώς να δίνεται λύση, μέσω της τεχνολογίας, σε σύνθετα προβλήματα που έως τώρα δεν ήταν εφικτό. Η τεχνολογία των TENG αισθητήρων συμβάλει στην προσπάθεια αυτή, με ιδιαίτερα πρωτοφανής και πολλά υποσχόμενες εφαρμογές. Στον Πίνακα 2.1, παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές των TENG, στα πλαίσια στήριξης και αποκατάστασης ανθρώπων με ειδικές ανάγκες, προκειμένου να γίνει κατανοητό το μέγεθος των δυνατοτήτων που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία.



Σύστημα πληκτρολόγησης μέσω ανίχνευσης της κίνησης των ματιών, με χρήση TENG αισθητήρα, προσαρμοσμένο σε βραχιόνες γυαλιών οράσεως [20].

TENG αισθητήρας με μηχανική ενεργοποίηση από των μασητήρα μυ, με σκοπό την μη λεκτική επικοινωνία, μέσω κώδικα Morse [21].



Πίνακας 2.1 Βιοϊατρικές εφαρμογές των TENG αισθητήρων

Σύστημα TENG αισθητήρων προσαρμόσιμων στο ανθρώπινο χέρι για αναγνώριση χειρονομιών και γλωσσικής νοηματικής έκφρασης με τα χέρια [22].

## 2.3 Ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια

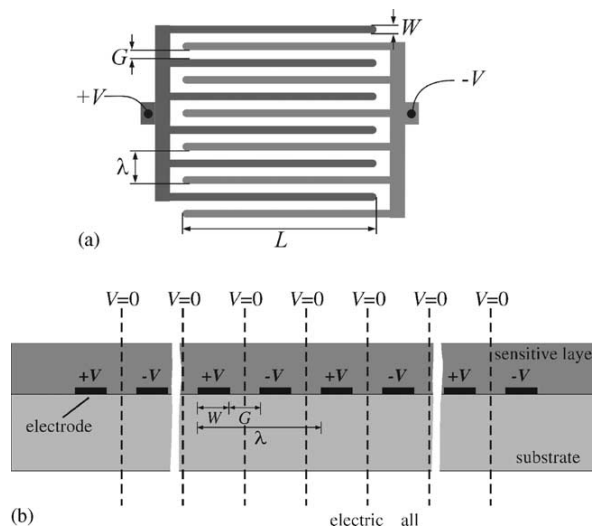
Τα ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια (Interdigitated electrodes, IDE) αποτελούνται συνήθως από μια σειρά παράλληλων, στενά διατεταγμένων μεταξύ τους μεταλλικών ράβδων, που είναι διατεταγμένα σε εναλλασσόμενο μοτίβο. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως από αγωγίμο μέταλλο, όπως αλουμίνιο ή χαλκό, σε ορθογώνιο ή τετράγωνο μοτίβο, είναι λεπτά και επιμήκη σε σχήμα και απέχουν μεταξύ τους μικρή απόσταση, ώστε να δημιουργείται κενό ή διηλεκτρικό στρώμα μεταξύ τους [23]. Το μέγεθος και η απόσταση των ηλεκτροδίων μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Τα IDE είναι ένας από τους πιο δημοφιλής σχεδιασμούς, που χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες τεχνολογικές και αναλυτικές εφαρμογές, ιδίως στον τομέα των βιολογικών και χημικών αισθητήρων, λόγω του χαμηλού κόστους, της ευκολίας κατασκευής και της εξαιρετικής ευαισθησίας τους. Ενδεικτικές εφαρμογές είναι οι διατάξεις επιφανειακών ακουστικών κυμάτων, η χημική και βιολογική ανίχνευση και ο διηλεκτρικός χαρακτηρισμός υλικών.

### 2.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται η κάτοψη και η εγκάρσια τομή μιας τυπικής διάταξης IDE, αποτελούμενης από δυο σύνολα ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. Κάθε ξεχωριστό ηλεκτρόδιο

περιλαμβάνει έναν αριθμό μεταλλικών διαδρόμων  $N$ , μήκους  $L$ , που ονομάζονται «δάχτυλα» (fingers) και είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω μίας κάθετης σε αυτά αγωγίμης προέκτασης, που ονομάζεται τοίχωμα. Ως  $W$  ορίζεται το πλάτος των επιμήκη μεταλλικών διαδρόμων, ενώ το διάκενο μεταξύ δυο «δαχτύλων», στο Σχήμα 2.1, ορίζεται ως  $G$  και τυπικά είναι ίσο με το κενό στα άκρα των δαχτύλων. Τα μεγέθη  $L$ ,  $W$  και  $G$  δεν είναι προκαθορισμένα αλλά σχεδιάζονται βάσει των απαιτήσεων χρήσης των IDE.



Σχήμα 2.6 Κάτοψη και τομή διάταξης ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων (IDE) [24]

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

### 2.3.2 Αρχή λειτουργίας

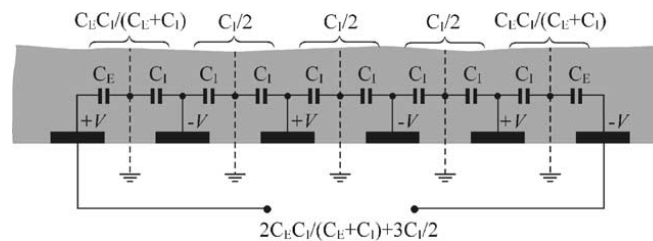
Η αρχή λειτουργίας των IDE θα μπορούσε να περιγραφεί εάν μελετηθεί η διάταξη ως μία σειρά παράλληλων μεταλλικών πλακών που χωρίζονται μεταξύ τους από κάποιο μονωτικό υλικό. Να μελετηθούν δηλαδή ως μια σειρά από πυκνωτές, ανάλογου αριθμού με τα «δάχτυλα» των IDE, συνδεδεμένους σε σειρά [23], [24].

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία της ηλεκτρονικής, ως πυκνωτής ορίζεται ένα σύστημα δύο αγωγών, που ονομάζονται οπλισμοί, φορτισμένοι με φορτία  $+Q$  και  $-Q$  και χωρίζονται μεταξύ τους από κάποιο μονωτικό υλικό. Κατά αντιστοιχία με την διάταξη των IDE, καθώς

υπάρχει προκαθορισμένο δυναμικό  $+V$  και  $-V$ , η πλέξη ανάμεσα στα «δάχτυλα» των δύο αντίθετα φορισμένων συνόλων, δημιουργεί μια εναλλαγή θετικού και αρνητικού δυναμικού, μεταξύ των διαδοχικών μεταλλικών διαδρομών. Συνεπώς, κάθε ζευγάρι ηλεκτροδίων από την θετικά και την αρνητικά φορισμένη πλευρά της διάταξης, αποτελεί έναν πυκνωτή, εμφανίζοντας διαφορά δυναμικού  $V$ , μεταξύ των σπλισμών.

Ανάγοντας την βασική θεωρία των πυκνωτών παράλληλων πλακών στις διατάξεις IDE, οι μαθηματικοί τύποι που περιγράφουν έναν πυκνωτή, ανάγονται σε πιο σύνθετες μορφές καθώς παράμετροι όπως το πλήθος των δαχτύλων, το πάχος τους ( $W$ ), η απόσταση ( $G$ ) και η διηλεκτρικά σταθερά του υλικού πάνω στο οποίο εναποτίθενται, επηρεάζουν καθοριστικά την μελέτη τους.

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα για την επιφάνεια μίας διάταξης IDE, 6 ηλεκτροδίων φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Τα επίπεδα της διάταξης που βρίσκεται το υπόστρωμα, μεταξύ των ηλεκτροδίων, ορίζονται ως γειωμένα ηλεκτρικά τοιχώματα και θεωρείται ότι παρουσιάζουν  $V = 0$ .



Σχήμα 2.7 Ισοδύναμο κύκλωμα επιφάνειας διάταξης IDE 6 ηλεκτροδίων [24]

Η χωρητικότητα μεταξύ των ζευγών ηλεκτροδίων υπολογίζονται ως συνάρτηση της χωρητικότητας  $C_I$  και  $C_E$ , όπου η πρώτη περιγράφει την χωρητικότητα ανάμεσα σε ένα εσωτερικό δάχτυλο και το κενό, που θεωρείται γείωση, και η δεύτερη αφορά τα εξωτερικά ηλεκτρόδια και την γείωση. Η συνολική χωρητικότητα μεταξύ δύο διαδοχικών, αντίθετα φορισμένα δαχτύλων, ισούται με:

$$C = (N - 3) \frac{C_I}{2} + \frac{2(C_I C_E)}{C_I + C_E} [24]$$

Όπου  $N$  είναι ο το πλήθος των δαχτύλων της διάταξης.

Λαμβάνοντας υπόψιν την συμμετρική δομή των διατάξεων IDE, είναι προφανές ότι ο παραπάνω τύπος προσδιορισμού της χωρητικότητας αφορά την μισή δομή και η συνολική

χωρητικότητα θα είναι το άθροισμα δύο όμοιων χωρητικοτήτων. Σύμφωνα με την θεωρία, η εσωτερική ( $C_E$ ) και εξωτερική ( $C_I$ ) χωρητικότητα εξαρτώνται από το μήκος και το πλάτος των δακτύλων, το μήκος του κενού και την διηλεκτρική σταθερά αλλά όχι από τις απόλυτες διαστάσεις τις συνολικής διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, η χωρητικότητα αυξάνεται καθώς μειώνονται τα διάκενα ή αυξάνεται του μήκους των δακτύλων [24].

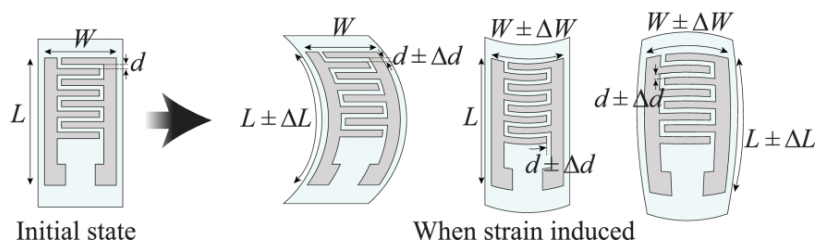
### 2.3.3 Αισθητήρες ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Στην περίπτωση που οι διατάξεις IDE, χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες για την έξοδο ενός ηλεκτρικού σήματος ως αντίδραση σε ένα ερέθισμα, αυτό που στην πραγματικότητα μετράται ως συμπεριφορά ανίχνευσης είναι η μεταβολή της χωρητικής αντίδρασης στα IDE. Με τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ηλεκτροδίων, αυτό διαπερνά το υπό δοκιμή υλικό, το οποίο με τη σειρά του μεταβάλλει την κατάσταση του αισθητήρα και πραγματοποιείται ανίχνευση.

Ένα δεδομένο συμπέρασμα σύμφωνα με την βιβλιογραφία, είναι πως η ευαισθησία των IDE αισθητήρων επηρεάζεται καθοριστικά από την γεωμετρία τους. Ωστόσο, ο ακριβής τρόπος με τον οποίο οι γεωμετρικοί παράμετροι αυτών των διατάξεων επηρεάζουν την απόδοση τους, βρίσκεται ακόμα υπό μελέτη. Θεωρείται πως τα δύο βασικότερα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν στο μέγιστο είναι το πλάτος των δακτύλων και το πάχος του υποστρώματος εναπόθεσης [25]. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα εφαρμογής των IDE στην τεχνολογία των αισθητήρων είναι ο επαναλαμβανόμενος χαρακτήρας των δακτύλων. Το αποτέλεσμα αυτού του μοτίβου είναι να εξάγεται ισχυρότερο σήμα ανίχνευσης, έναντι του μονού ζεύγους ηλεκτροδίων.

Η γεωμετρία των IDE αισθητήρων, επηρεάζει τον τρόπο ανίχνευσης τους, ακόμα πιο καθοριστικά στην περίπτωση που αποτελούνται από εύκαμπτο υλικό και προορίζονται κυρίως για εφαρμογές τοποθέτησης φορητών αισθητήρων στην επιφάνεια του δέρματος. Λόγω της εύκαμπτης φύσης τους, η μεταβολή της απόκρισης του αισθητήρα, θα επηρεάζεται αντίστοιχα και από την μεταβολή της συνολικής διάστασης του αισθητήρα [25]. Όταν ο αισθητήρας κάμπτεται, μεταβάλλεται η γεωμετρία του, και σταθερές όπως το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων ( $G$ ), το μήκος ( $L$ ) και το πλάτος ( $W$ ) του συνολικού αισθητήρα αλλάζουν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8, με αποτέλεσμα την ουσιαστική αλλαγή της συνολικής δομής, προκαλώντας αλλαγές στη χωρητικότητα εξόδου του αισθητήρα. Καθώς ο αισθητήρας αλλάζει μορφή, η μοντελοποίηση του συστήματος γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκη και οι αλλαγές δεν

μετρούνται με το τυπικό μαθηματικό μοντέλο που αφορά τους συμβατικούς IDE αισθητήρες, που βασίζονται την αρχή λειτουργίας των πυκνωτών παράλληλων πλακών.



Σχήμα 2.8 Αλλαγές στην γεωμετρία των εύκαμπτων IDE αισθητήρων [25]

## 2.4 Τεχνικές μηχανικής μάθησης και συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα

Η τεχνητή νοημοσύνη (TN) αναφέρεται στην ικανότητα μιας μηχανής ή ενός υπολογιστικού συστήματος να εκτελεί εργασίες που κανονικά απαιτούν ανθρώπινη νοημοσύνη, όπως η μάθηση, η επίλυση προβλημάτων και η λήψη αποφάσεων. Η τεχνητή νοημοσύνη έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε πολλούς τομείς και έχει ήδη σημειώσει σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια. Βρίσκει σημαντικές εφαρμογές στην ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων, στην πραγματοποίηση ακριβέστερων προβλέψεων και στην αποτελεσματικότερη εκτέλεση εργασιών. Ενδεικτικά, στην υγειονομική περίθαλψη, η TN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση ιατρικών αρχείων και να βοηθήσει στη διάγνωση και τα σχέδια θεραπείας, ενώ στα χρηματοοικονομικά, μπορεί να βοηθήσει στις επενδυτικές αποφάσεις και αυτά αποτελούν την ελάχιστη επιρροή που μπορεί να έχει η TN στην σύγχρονη πραγματικότητα.

Η μηχανική μάθηση (Machine Learning), αποτελεί ένα εκ των σημαντικότερων εργαλείων που διαθέτει η τεχνητή νοημοσύνη. Η μηχανική μάθηση αφορά όλες τις υπολογιστικές τεχνικές και τις προγραμματιστικές διαδικασίες, όπου οι υπολογιστές χρησιμοποιούν προκειμένου να διδάσκονται μέσω δεδομένων, χωρίς να προγραμματίζονται ρητά. Η μηχανική μάθηση, περιλαμβάνει την εκπαίδευση ενός συστήματος για το πως θα πρέπει να δρα, να λύνει προβλήματα αντίληψης και να παίρνει αποφάσεις, χωρίς να του δίνονται αυστηρές εντολές εκτέλεσης.

Όλα τα παραπάνω σημαίνουν ότι μέσω της μηχανικής μάθησης, είναι δυνατή η γρήγορη και αυτόματη παραγωγή μοντέλων, που μπορούν να αναλύουν μεγαλύτερα, πιο σύνθετα δεδομένα



και να παρέχουν ταχύτερα και ακριβέστερα συμπεράσματα, λύνοντας ακόμα και προβλήματα που ο άνθρωπος από μόνος του δεν έχει την δυνατότητα να λύσει.

### 2.4.1 Ταξινόμηση μοντέλων μηχανικής μάθησης

Η μηχανική μάθηση, διαχωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, βάση της φύσης των δεδομένων που επεξεργάζεται και του τρόπου εκπαίδευσης του συστήματος [26].

#### 1. Μάθηση υπό επίβλεψη (Supervised Learning)

Η μάθηση με επίβλεψη είναι μια τεχνική μηχανικής μάθησης στην οποία ένα μοντέλο εκπαιδεύεται για να κάνει προβλέψεις, με βάση δεδομένα εκπαίδευσης με ετικέτες (labels). Το μοντέλο λαμβάνει ένα σύνολο ζευγών εισόδου/εξόδου και ο στόχος είναι να σχηματίσει μια συνάρτηση, που αντιστοιχίζει τα δεδομένα εισόδου στα δεδομένα εξόδου. Τα ζεύγη εισόδου/εξόδου ονομάζονται "επισημειωμένα" δεδομένα (labeled data), επειδή η επιθυμητή έξοδος παρέχεται για κάθε παράδειγμα στο σύνολο εκπαίδευσης.

Για παράδειγμα, σε μια εργασία μάθησης με επίβλεψη, για την ταξινόμηση των μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου ως spam ή όχι spam, τα δεδομένα εισόδου θα ήταν το κείμενο του μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και τα δεδομένα εξόδου (labels) θα ήταν μια δυαδική τιμή, που θα έδειχνε αν το μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου είναι spam ή όχι. Το μοντέλο θα εκπαιδευόταν από παραδείγματα μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και τις αντίστοιχες ετικέτες τους, και στη συνέχεια θα ήταν σε θέση να προβλέψει την ετικέτα για νέα, αθέατα μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

#### 2. Μάθηση χωρίς επίβλεψη (Unsupervised Learning)

Η μάθηση χωρίς επίβλεψη είναι ένας τύπος μηχανικής μάθησης όπου στο μοντέλο δεν δίνονται δεδομένα εκπαίδευσης με ετικέτες ή οποιαδήποτε καθοδήγηση, σχετικά με το ποια θα πρέπει να είναι η έξοδος. Αντ' αυτού, το μοντέλο καλείται να μάθει από τα δεδομένα, βρίσκοντας μοτίβα και σχέσεις στα δεδομένα εισόδου. Ορισμένα παραδείγματα μάθησης χωρίς επίβλεψη περιλαμβάνουν την ομαδοποίηση δεδομένων, παραδείγματος χάριν για την ομαδοποίηση πελατών με βάση τις αγοραστικές του συνήθειες, την ανίχνευση ανωμαλιών σε υπολογιστικά συστήματα που δέχονται επιθέσεις και δυσλειτουργίες σε εξοπλισμό.

#### 3. Εκμάθηση δια ανταμοιβής (Reinforcement Learning)

Η ενισχυτική μάθηση είναι ένας τύπος μηχανικής μάθησης όπου ένας πράκτορας μαθαίνει να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, προκειμένου να δεχτεί μια ανταμοιβή. Στην ενισχυτική μάθηση, ο πράκτορας μαθαίνει μέσω δοκιμής και σφάλματος, λαμβάνοντας θετικές ή αρνητικές ανταμοιβές για τις ενέργειές του. Ορισμένα παραδείγματα ενισχυτικής μάθησης περιλαμβάνουν την εκπαίδευση ρομπότ να πλοηγείται σε έναν χώρο με εμπόδια και την εκπαίδευση αυτοκινούμενων οχημάτων, για ασφαλή οδήγηση.

## 2.4.2 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

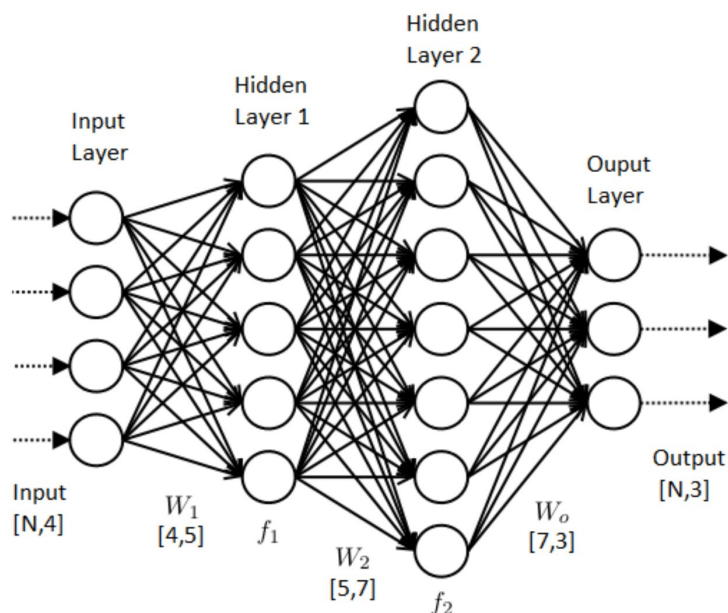
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks, ANN), αποτελούν το σημαντικότερο εργαλείο που διαθέτει η μηχανική μάθηση για να επιλύει προβλήματα. Τα ANN ορίζονται ως συστήματα επεξεργασίας δεδομένων, βασισμένα σε οργανωμένες δομές νευρώνων, που μιμούνται τον τρόπο λειτουργίας των νευρώνων στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Τα βασικά επίπεδα από τα οποία αποτελείται ένα νευρωνικό δίκτυο είναι τα εξής:

**Επίπεδο εισόδου (input layer):** Το επίπεδο εισόδου ενός νευρωνικού δικτύου είναι το επίπεδο που λαμβάνει τα δεδομένα εισόδου. Το στρώμα εισόδου δεν κάνει υπολογισμούς, απλώς μεταβιβάζει τα δεδομένα εισόδου στο επόμενο στρώμα του δικτύου. Ο αριθμός των νευρώνων στο στρώμα εισόδου καθορίζεται από τη διάσταση των δεδομένων εισόδου. Για παράδειγμα, εάν τα δεδομένα εισόδου είναι μια εικόνα 28x28 σε κλίμακα του γκρι, το στρώμα εισόδου θα έχει 784 νευρώνες.

**Κρυφό επίπεδο (hidden layer):** Σε αυτό το επίπεδο υπάρχουν καταναμημένοι νευρώνες σε διαφορετικά επίπεδα, με κάθε επίπεδο να επιτελεί διαφορετικές λειτουργίες για το μοντέλο. Τα κρυφά στρώματα είναι υπεύθυνα για τη μάθηση και την εξαγωγή χαρακτηριστικών από τα δεδομένα εισόδου και για τη μετατροπή των δεδομένων εισόδου σε κατάλληλη αναπαράσταση, για το στρώμα εξόδου. Τα κρυφά στρώματα χρησιμοποιούν “βάρη” ( $w_i$ ), που μαθαίνουν κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, για να μετατρέψουν τα δεδομένα εισόδου σε μια πιο χρήσιμη αναπαράσταση. Για παράδειγμα, σε εργασίες ταξινόμησης εικόνων, τα κρυφά στρώματα μπορεί να μάθουν να ανιχνεύουν ακμές, γωνίες και άλλα χαρακτηριστικά στις εικόνες εισόδου, που είναι χρήσιμα για την ταξινόμηση των εικόνων σε διαφορετικές κατηγορίες.

**Επίπεδο εξόδου (output layer):** Το επίπεδο εξόδου ενός νευρωνικού δικτύου είναι το επίπεδο που παράγει την τελική έξοδο του δικτύου. Το στρώμα εξόδου λαμβάνει τα μετασχηματισμένα

δεδομένα εισόδου από τα κρυφά στρώματα και τα χρησιμοποιεί για να παράγει την τελική έξοδο του δικτύου. Ο αριθμός των νευρώνων στο στρώμα εξόδου καθορίζεται από τον αριθμό των κλάσεων σε προβλήματα ταξινόμησης. Για παράδειγμα, εάν το έργο είναι η ταξινόμηση εικόνων σε 10 διαφορετικές κατηγορίες, το στρώμα εξόδου θα έχει 10 νευρώνες, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μία από τις 10 κατηγορίες. Το επίπεδο εξόδου χρησιμοποιεί συνήθως μια συνάρτηση ενεργοποίησης για να παράγει μια κατανομή πιθανότητας για διάφορες κατηγορίες. Η κλάση με την υψηλότερη πιθανότητα επιλέγεται ως η τελική έξοδος του δικτύου.



Σχήμα 2.9 Ενδεικτικό νευρωνικό δίκτυο δύο κρυφών επιπέδων

Σε μοντέλα πιο σύνθετων επιπέδων, αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων στην έξοδο του δικτύου, ωστόσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα σε σημείο που μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά η απόδοση του συστήματος. Δύο από τις βασικότερα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την εκπαίδευση συστημάτων με χρήση νευρωνικών δικτύων είναι το φαινόμενο της υποπροσαρμογής (underfitting) και το φαινόμενο της υπερπροσαρμογής (overfitting). Η υποπροσαρμογή στα νευρωνικά δίκτυα συμβαίνει όταν ένα μοντέλο δεν είναι σε θέση να συλλάβει την δομή και την πολυπλοκότητα των δεδομένων. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν το μοντέλο είναι πολύ απλό ή όταν δεν έχει εκπαιδευτεί για επαρκή αριθμό epochs, δηλαδή έλεγχο όλων των δειγμάτων. Ένας τρόπος ανίχνευσης της υποπροσαρμογής είναι η σύγκριση της απόδοσης του μοντέλου στα δεδομένα εκπαίδευσης, με την απόδοσή του στα δεδομένα δοκιμής. Εάν το μοντέλο έχει σημαντικά καλύτερες επιδόσεις στα δεδομένα εκπαίδευσης από ό,τι στα

δεδομένα δοκιμής, είναι πιθανό το μοντέλο να έχει υπερπροσαρμογή στα δεδομένα εκπαίδευσης. Βασικές τακτικές για την διόρθωση της υποπροσαρμογής είναι η προσθήκη επιπλέον κρυφών στρωμάτων, η εκπαίδευση του μοντέλου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και η προσθήκη περισσότερων δεδομένων εκπαίδευσης.

Η υπερπροσαρμογή στα νευρωνικά δίκτυα συμβαίνει όταν ένα μοντέλο είναι υπερβολικά πολύπλοκο και μπορεί να προσαρμοστεί εξαιρετικά καλά στα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά δεν είναι σε θέση να γενικεύσει καλά σε νέα δεδομένα. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν το μοντέλο έχει πάρα πολλές παραμέτρους ή όταν εκπαιδεύεται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Ως αποτέλεσμα, το μοντέλο μπορεί να έχει πολύ καλή απόδοση στα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά θα έχει κακή απόδοση στο σύνολο δοκιμών ή σε νέα, αθέατα δεδομένα. Εάν το μοντέλο είναι υπερπροσαρμοσμένο, παρατηρείται ότι η απόδοση στα δεδομένα εκπαίδευσης συνεχίζει να βελτιώνεται, ενώ η απόδοση στα δεδομένα δοκιμής αρχίζει να υποβαθμίζεται. Η ενέργειες για την διόρθωση της υπερπροσαρμογής είναι οι αντίθετες από αυτές της υποπροσαρμογής.

### **2.4.3 Συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα**

Το συνελικτικό νευρωνικό δίκτυο (Convolutional Neural Network, CNN) είναι ένας τύπος νευρωνικού δικτύου που έχει σχεδιαστεί ειδικά για να λειτουργεί με δεδομένα που έχουν δομή που μοιάζει με πλέγμα, όπως μια εικόνα, εάν αυτή μελετηθεί ως μια ψηφιακή αναπαράσταση οπτικών πληροφοριών, που αποτελείται από ένα πλέγμα εικονοστοιχείων (pixels), καθένα από τα οποία έχει τη δική του φωτεινότητα και τιμή χρώματος.

Από την στιγμή που στο οπτικό πεδίου του ανθρώπου φτάνει μια εικόνα, ο ανθρώπινος εγκέφαλος επεξεργάζεται τεράστιο όγκο πληροφοριών. Κάθε νευρώνας σε αυτή την διαδικασία, λειτουργεί στο δικό του προσλαμβάνον πεδίο και συνδέεται με άλλους νευρώνας, ώστε να μεταφερθεί και να αποκωδικοποιηθεί η πληροφορία. Ακριβώς όπως κάθε νευρώνας ανταποκρίνεται σε ερεθίσματα μόνο στην δική του περιορισμένη περιοχή, αλλά επικοινωνεί και με άλλους νευρώνες, έτσι και κάθε νευρώνας σε ένα CNN επεξεργάζεται δεδομένα ατομικά αλλά επικοινωνεί και με τους νευρώνες των επόμενων στρωμάτων. Τα στρώματα είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να ανιχνεύουν πρώτα απλούστερα μοτίβα (γραμμές, καμπύλες κ.λπ.) και πιο σύνθετα μοτίβα (πρόσωπα, αντικείμενα κ.λπ.).

Τα CNN είναι σε θέση να μαθαίνουν και να αναγνωρίζουν χαρακτηριστικά στις εικόνες μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται συνέλιξη, κατά την οποία το δίκτυο εφαρμόζει ένα σύνολο φίλτρων στην εικόνα για να εξάγει χρήσιμες πληροφορίες. Αυτά τα φίλτρα ή πυρήνες (kernels) μπορούν να θεωρηθούν ως μικρά "παράθυρα" που ολισθαίνουν πάνω στην εικόνα, αναλύοντας μικρές περιοχές κάθε φορά και δημιουργώντας μια αναπαράσταση ολόκληρης της εικόνας, καθώς προχωρούν.

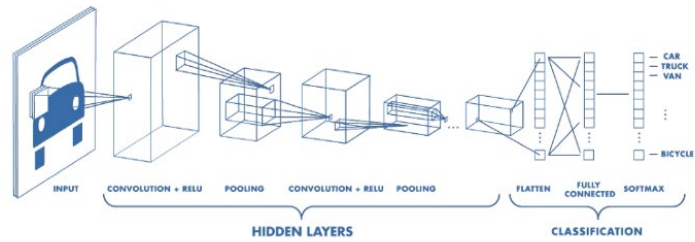
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των CNN είναι ότι είναι σε θέση να μαθαίνουν και να αναγνωρίζουν χαρακτηριστικά σε μια εικόνα, ακόμη και όταν αυτά δεν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένα ή προσανατολισμένα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης στρωμάτων ομαδοποίησης (pooling layers), τα οποία εκτελούν μια πράξη μείωσης της δειγματοληψίας στην εικόνα, μειώνοντας την ανάλυση της, διατηρώντας όμως σημαντικές πληροφορίες. Επιπλέον, τα CNN μπορούν να μάθουν πολλαπλά επίπεδα αφαίρεσης, όπως ακμές και σχήματα, τα οποία μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν αντικείμενα ή ακόμη και σκηνές. Αυτή η ικανότητα εκμάθησης πολλαπλών επιπέδων αφαίρεσης, επιτρέπει στα CNN να χρησιμοποιούνται για μια ευρεία ποικιλία εργασιών υπολογιστικής όρασης, συμπεριλαμβανομένης της ταξινόμησης εικόνων, της ανίχνευσης αντικειμένων και της κατάτμησης εικόνων.

#### **2.4.3.1 Αρχιτεκτονική επιπέδων δικτύου**

Η αρχιτεκτονική των CNN περιγράφεται με την ανάλυση τριών βασικών τύπων επιπέδων[27]:

- Συνελικτικό επίπεδο – Convolutional Layer
- Επίπεδο συγκέντρωσης – Pooling Layer
- Πλήρως συνδεδεμένο επίπεδο – Fully Connected Layer

Συνολικά, η αρχιτεκτονική φαίνεται στο Σχήμα 2.10 και κάθε επίπεδο αναλύεται παρακάτω.

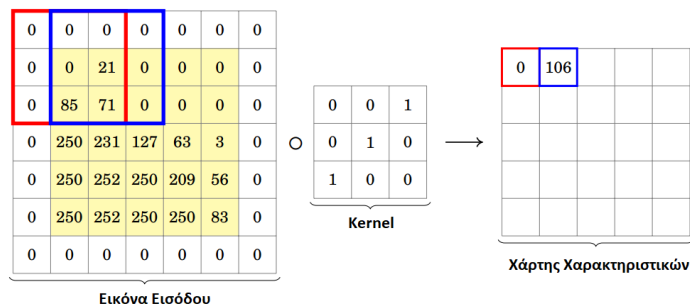


Σχήμα 2.10 Αρχιτεκτονική συνελκτικού νευρωνικού δικτύου

## 1. Συνελκτικό επίπεδο

Το συνελκτικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση και την εξαγωγή χρήσιμων χαρακτηριστικών από την εικόνα εισόδου. Αυτό το στρώμα εφαρμόζει ένα σύνολο φίλτρων στην εικόνα εισόδου, καθένα από τα οποία έχει σχεδιαστεί για να ανιχνεύει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό στην εικόνα, όπως ακμές, υφές ή σχήματα. Η έξοδος του στρώματος συνέλιξης είναι μια συμπυκνωμένη αναπαράσταση της εικόνας εισόδου που διατηρεί μόνο τις πιο σημαντικές πληροφορίες.

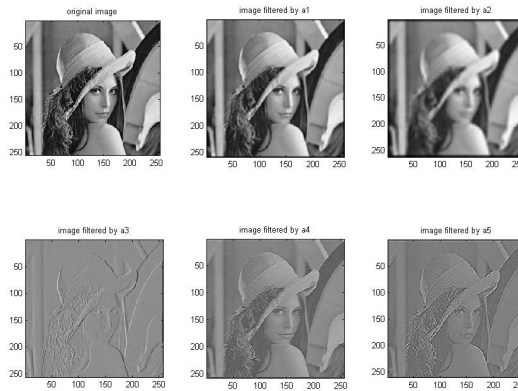
Ένα συνελκτικό επίπεδο αποτελείται από πολλούς νευρώνες, καθένας από τους οποίους εφαρμόζει ένα διαφορετικό φίλτρο στην εικόνα εισόδου. Το φίλτρο είναι ένας μικρός πίνακας βαρών, που συχνά ονομάζεται πυρήνας (kernel), ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του εσωτερικού γινομένου μεταξύ των βαρών και των εικονοστοιχείων, σε μια μικρή περιοχή της εικόνας εισόδου. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.11 φαίνεται η διαδικασία. Αυτό το γινόμενο περνά στη συνέχεια από μια συνάρτηση ενεργοποίησης, όπως η συνάρτηση ReLU (Rectified Linear Unit), για να εισαχθεί μη γραμμικότητα στο δίκτυο.



Σχήμα 2.11 Διαδικασία συνέλιξης

Το φίλτρο ολισθαίνει πάνω στην εικόνα εισόδου, σε μια διαδικασία που ονομάζεται συνέλιξη, εξού και η ονομασία Convolutional layer (στρώμα συνέλιξης). Αυτό επιτρέπει στο επίπεδο να ανιχνεύει το χαρακτηριστικό που αντιπροσωπεύεται από το φίλτρο σε πολλαπλές θέσεις στην εικόνα εισόδου. Ως αποτέλεσμα, η έξοδος του στρώματος συνέλιξης είναι ένας χάρτης χαρακτηριστικών, δηλαδή μια συμπυκνωμένη έκδοση της εικόνας εισόδου που διατηρεί μόνο τις πιο σχετικές πληροφορίες.

Με τη χρήση πολλαπλών στρωμάτων συνέλιξης, ένα CNN μπορεί να μαθαίνει όλο και πιο σύνθετα χαρακτηριστικά και αναπαραστάσεις της εικόνας εισόδου, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εργασίες ταξινόμησης εικόνων. Εφαρμογή διαφορετικών φίλτρων σημαίνει και εξαγωγή διαφορετικών χαρακτηριστικών στην εκάστοτε εικόνα. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.12 όπου έχουν εφαρμοστεί 5 διαφορετικά φίλτρα στην εικόνα. Το μέγεθος και ο αριθμός των πυρήνων που εφαρμόζεται (depth), καθορίζει και τον όγκο των δεδομένων που θα εξαχθούν προς το επόμενο επίπεδο. Αν και αυτό κοστίζει σε υπολογιστική ισχύ, συμβάλει στην εξαγωγή περισσότερων χαρακτηριστικών. Το βήμα με το οποίο ο πυρήνας ολισθαίνει στην εικόνα (stride), ώστε να υπολογισθούν τα διαφορετικά εσωτερικά γινόμενα, επηρεάζει επίσης τον όγκο των δεδομένων εξόδου.



Σχήμα 2.12 Εφαρμογή διαφορετικών φίλτρων σε εικόνα

Σε ορισμένες περιπτώσεις, που το φίλτρο δεν εφαρμόζει πλήρως στην εικόνα εισόδου, κυρίως στα σημεία του περιγράμματος της εικόνας, εφαρμόζεται γέμισμα (padding), συνήθως με μηδενικά (zero padding) στο περίγραμμα της, ώστε να μη χαθούν τυχόν σημαντικά χαρακτηριστικά που βρίσκονται κοντά στο πλαίσιο της εικόνας. Σε άλλες περιπτώσεις αγνοείται αυτό το σημείο της εικόνας, εάν αυτό δεν σημαίνει την απώλεια σημαντικής πληροφορίας.

## 2. Επίπεδο συγκέντρωσης

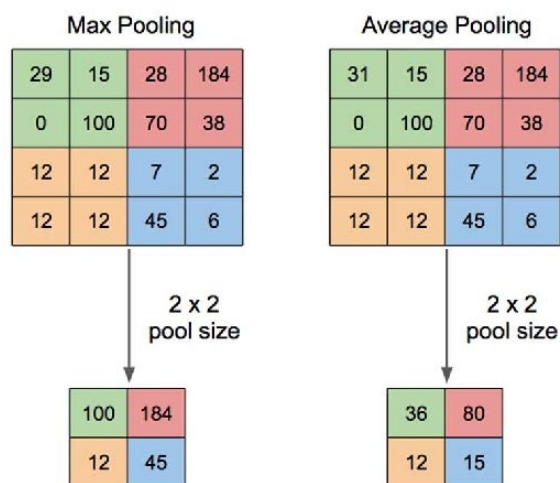
Το επίπεδο συγκέντρωσης ακολουθεί το συνελικτικό επίπεδο και αφορά την μείωση του όγκου των δεδομένων και των παραμέτρων πολυπλοκότητας, για το επόμενο επίπεδο συνέλιξης. Στο επίπεδο συγκέντρωσης η μείωση αυτή του όγκου οδηγεί σε μερική απώλεια πληροφοριών από το σύνολο των δεδομένων, ωστόσο αυτό επιδιώκεται, προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος του δικτύου αλλά και για λόγους που αφορούν την αποφυγή την υπερπροσαρμογής.

Ο μετασχηματισμός των δεδομένων σε αυτό το επίπεδο, γίνεται επίσης με την μέθοδο του συρόμενου παραθύρου και υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές [27]:

- Max pooling: Είναι η διαίρεση της εικόνας εισόδου σε ένα σύνολο μη επικαλυπτόμενων περιοχών και, για κάθε περιοχή, στη λήψη της μέγιστης τιμής. Αυτό μειώνει αποτελεσματικά τη χωρική ανάλυση της εικόνας, διατηρώντας μόνο το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό σε κάθε περιοχή.
- Average pooling: Αντί για τη λήψη της μέγιστης τιμής, λαμβάνεται ο μέσος όρος όλων των τιμών στην περιοχή.



Σχηματικά οι δύο μεθοδολογίες φαίνονται στο Σχήμα 2.13. Η λήψη της μέγιστης τιμής θεωρείται πιο αποδοτική και χρησιμοποιείται συχνότερα.



Σχήμα 2.13 Μέθοδοι επιπέδου συγκέντρωσης

### 3. Πλήρως συνδεδεμένο επίπεδο

Το πλήρως συνδεδεμένο στρώμα, επίσης γνωστό και ως πυκνό στρώμα (Dense Layer), χρησιμοποιείται για να κάνει μια τελική πρόβλεψη με βάση τα χαρακτηριστικά που εξάγονται από τα προηγούμενα στρώματα συνελκτικής σύνδεσης και συγκέντρωσης. Ένα πλήρως συνδεδεμένο στρώμα αποτελείται από μεγάλο αριθμό νευρώνων, καθένας από τους οποίους λαμβάνει είσοδο από όλους τους νευρώνες του προηγούμενου στρώματος. Στο πλήρως συνδεδεμένο στρώμα, όλοι οι νευρώνες από τα προηγούμενα στρώματα είναι συνδεδεμένοι, εξού και η ονομασία πλήρως συνδεδεμένο. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά που έχουν μάθει τα προηγούμενα στρώματα με σφαιρικό και πλήρη τρόπο, για να λάβει την τελική απόφαση.

Το πλήρως συνδεδεμένο στρώμα είναι το τελευταίο στρώμα ενός CNN πριν από το τελικό στρώμα εξόδου, το οποίο παρέχει την τελική πρόβλεψη για την εικόνα εισόδου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της ταξινόμησης εικόνων, η έξοδος του τελικού πλήρως συνδεδεμένου στρώματος είναι ένα διάνυσμα βαθμολογιών, δηλαδή ποσοστών αντιστοίχισης της εικόνας, μία για κάθε κλάση στο σύνολο δεδομένων.



# Κεφάλαιο 3

## Πειραματικές Τεχνολογίες

Το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των πειραματικών τεχνικών και τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του υπό μελέτη αισθητήρα αφής. Δίνεται έμφαση στην αναλυτική παρουσίαση των διαφορετικών μεθόδων εναπόθεσης των IDE καθώς και των υλικών και εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει επίσης της παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηρισμού και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης του αισθητήρα αφής. Παρουσιάζοντας μια σαφή και εμπειριστατωμένη περιγραφή των πειραματικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μια ισχυρή βάση για τη συζήτηση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν στα επόμενα κεφάλαια.

### 3.1 Νανοκατασκευή δομών

Ο όρος “nanofabrication” υπονοεί τη δημιουργία αντικειμένων των οποίων η κλίμακα είναι στο νάνο-πεδίο. Ο τομέας αυτός περιλαμβάνει τον χειρισμό υλικών και μεμονωμένων ατόμων και μορίων, για τη δημιουργία δομών με ακριβείς διαστάσεις και ιδιότητες [28].

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της νανοκατασκευής είναι η δυνατότητα δημιουργίας δομών με πρωτοφανή έλεγχο του μεγέθους και του σχήματός τους. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία υλικών και συσκευών με μοναδικές και ιδιαίτερα επιθυμητές ιδιότητες, όπως αυξημένη αντοχή, βελτιωμένη ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεγαλύτερη ευαισθησία στο φως και άλλα. Επιπλέον, επειδή αυτές οι δομές είναι τόσο μικρές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου οι ογκωδέστερες δομές δεν θα ήταν εφικτές, όπως σε ιατρικές διαγνωστικές συσκευές και βιοαισθητήρες.

Στη νανοκατασκευή, ένα από τα βασικά στοιχεία για την επίτευξη ακριβούς ελέγχου της δομής και των ιδιοτήτων των υλικών, είναι η εργασία με υλικά σε νανοκλίμακα. Η δυνατότητα εργασίας με υλικά σε νανοκλίμακα επιτρέπει στους ερευνητές να μελετήσουν νέους τύπους υλικών και να εξάγουν νέες παρατηρήσεις για αυτά, που δεν θα ήταν δυνατόν να υπάρξουν με τις

παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής. Αλλαγές στις ηλεκτρικές, οπτικές και μαγνητικές ιδιοτήτων των υλικών σε νανοκλίμακα, τα καθιστούν ιδανικά για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, διαφορετικών από αυτές σε μεγαλύτερες κλίμακες μελέτης. Για παράδειγμα, υλικά που είναι μονωτές σε χύδην (bulk) μορφή, μπορούν να γίνουν αγωγοί στη νανοκλίμακα, όπως το γραφένιο.

Για να επιτευχθεί η κατασκευή δομών σε επίπεδο νανοκλίμακας, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και τεχνικές που επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο του μεγέθους, του σχήματος και των ιδιοτήτων των υλικών σε νανοκλίμακα. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν προσεγγίσεις «από πάνω προς τα κάτω» (top – down) και «από κάτω προς τα πάνω» (bottom – up) , με τις μεθόδους από πάνω προς τα κάτω να περιλαμβάνουν τη μείωση των υλικών χύδην σε μικρότερα μεγέθη και τις μεθόδους από κάτω προς τα πάνω να περιλαμβάνουν την συναρμολόγηση μορίων ή ατόμων σε μεγαλύτερες δομές.

### **3.1.1 Διαδικασία εναπόθεσης και μεθοδολογίες**

Η εναπόθεση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται στη νανοκατασκευή για την προσθήκη υλικού σε μια επιφάνεια υποστρώματος. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, όπως η χημική εναπόθεση ατμών (CVD), η φυσική εναπόθεση ατμών (PVD) και η ηλεκτροχημική εναπόθεση (ECD) [29].

Στη χημική εναπόθεση ατμών (CVD), πραγματοποιείται χημική αντίδραση μεταξύ μιας αέριας ουσίας και της επιφάνειας του υποστρώματος με αποτέλεσμα η αντίδραση αυτή να παράγει ένα στερεό φιλμ του υλικού, στην επιφάνεια του υποστρώματος. Στη μέθοδο φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD), ένα υλικό εξατμίζεται από μια πηγή και στη συνέχεια εναποτίθεται στην επιφάνεια του υποστρώματος. Η εξάχνωση μπορεί να επιτευχθεί με θέρμανση του υλικού της πηγής (θερμική εξάχνωση), με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων για τη θέρμανση του υλικού της πηγής (εξάχνωση με ηλεκτρονική δέσμη) ή με βομβαρδισμό του με ιόντα (sputtering). Η PVD χρησιμοποιείται συνήθως για την εναπόθεση λεπτών υμενίων μετάλλων, διηλεκτρικών και ημιαγωγών. Η ηλεκτροχημική εναπόθεση (ECD) είναι μια διαδικασία κατά την οποία το υλικό εναποτίθεται στην επιφάνεια του υποστρώματος με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, μέσω του διαλύματος του επιθυμητού υλικού.

Όλες αυτές οι μέθοδοι έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τον τύπο του υλικού που πρόκειται να εναποτεθεί, το πάχος

και τις επιθυμητές ιδιότητες του υλικού. Στην παρούσα διπλωματική θα αναλυθούν δύο εκ των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων PVD μεθόδων εναπόθεσης, η εξάχνωση (evaporation) και το ιοντοβολή (sputtering), καθώς αυτές πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή του αισθητήρα.

### **3.1.1.1 Electron – beam evaporation**

Στην γενική του μορφή η μεθοδολογία της εξάχνωσης (evaporation), αφορά τη διαδικασία κατά την οποία, ένα υλικό θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία ώστε να εξατμιστεί και να μετατραπεί σε αέριο [28]. Στη συνέχεια, το αέριο κατευθύνεται προς την επιφάνεια του υποστρώματος, όπου συμπυκνώνεται και πάλι σε στερεή μορφή, σχηματίζοντας ένα λεπτό υμένιο του υλικού, στο υπόστρωμα. Η εξάχνωση χρησιμοποιείται συνήθως για την εναπόθεση μιας ποικιλίας υλικών, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, διηλεκτρικών και ημιαγωγών, και είναι ικανή να εναποθέτει υμένια με πάχος από το εύρος των νανομέτρων έως τα μικρόμετρα, ανάλογα κυρίως με τον ρυθμό εξάχνωσης.

Το βασικό μέγεθος που επηρεάζει την διαδικασία της εξάχνωσης είναι η πίεση ατμών. Η πίεση ατμών είναι η πίεση που ασκείται από έναν ατμό σε θερμοδυναμική ισορροπία, με τις συμπυκνωμένες φάσεις του (στερεό ή υγρό), σε ένα κλειστό δοχείο. Είναι ένα μέτρο της τάσης μιας ουσίας να εξατμίζεται. Η πίεση ατμών ενός υγρού είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του. Σε δεδομένη θερμοκρασία, μια ουσία με υψηλότερη πίεση ατμών εξατμίζεται ταχύτερα από μια ουσία με χαμηλότερη πίεση ατμών.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι εξάχνωσης και διαφέρουν ως προς τη μέθοδο παροχής ενέργειας στην πηγή. Στην περίπτωση της μεθόδου εξάχνωσης με αντίσταση (resistively heated evaporation), η πηγή με τη μορφή σφαιριδίων, τοποθετείται σε ένα μεταλλικό σκάφος και θερμαίνεται, περνώντας από αυτό πολύ υψηλό ρεύμα, της τάξης των 100 A. Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η απλότητά της, διότι απαιτείται μόνο μια πηγή συνεχούς ρεύματος υψηλού ρεύματος (χαμηλής τάσης) για την τροφοδοσία της πηγής.

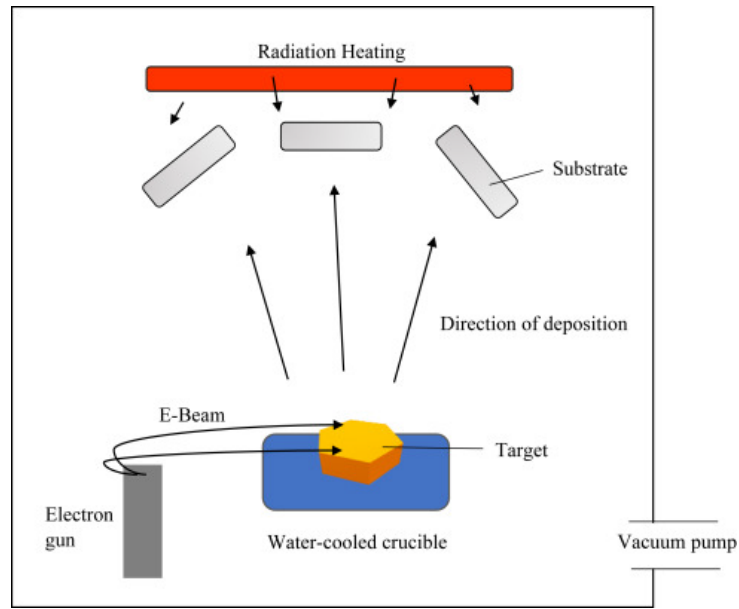
Για την εναπόθεση αλουμινίου σε KAPTON, στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του electron – beam evaporation. Η εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι μια μορφή φυσικής εναπόθεσης ατμών, κατά την οποία το υλικό-στόχος που πρόκειται να εναποθεθεί, βομβαρδίζεται με δέσμη ηλεκτρονίων από φορτισμένο νήμα βολφραμίου, για να εξατμιστεί και να μετατραπεί σε αέρια κατάσταση, για εναπόθεση στο υλικό

που πρόκειται να επιστρωθεί [28], [30]. Στη συνέχεια, σε θάλαμο υψηλού κενού, αυτά τα άτομα ή μόρια σε φάση ατμών κατακρημνίζονται και σχηματίζουν μια λεπτή επίστρωση φιλμ στο υπόστρωμα.

Η βασική διαδικασία εναπόθεσης e-beam evaporation είναι ότι το υλικό-στόχος που πρόκειται να εξατμιστεί τοποθετείται στο θάλαμο κενού σε ένα χωνευτήρι ή μια υποδοχή. Ένα νήμα βολφραμίου τοποθετείται κάτω από αυτό, ως άνοδος ή αρνητικό φορτίο που εφαρμόζει μια μεγάλη τάση ηλεκτρονίων, εστιασμένη από μαγνήτες στο υλικό-στόχο που πρόκειται να εξατμιστεί. Το υπόστρωμα προς επικάλυψη τοποθετείται από πάνω του στο θάλαμο κενού ως δίοδος με θετικό φορτίο. Δύο μαγνητικά πηνία περιβάλλουν το χωνευτήρι. Το ένα μαγνητικό πηνίο εστιάζει την υψηλής ενέργειας δέσμη E-Beam, ενώ το άλλο μαγνητικό πεδίο, γνωστό ως "XY Sweeping", διαχέει την ενέργεια, για να θερμάνει το υλικό-στόχο ομοιόμορφα.

Η ισχύς της δέσμης E-Beam σαρώνεται σε όλο το υλικό-στόχο που πρόκειται να θερμανθεί και το εξατμίζει σε αέρια φάση. Είτε το υλικό-στόχος είναι ένα στερεό κομμάτι υλικού που θερμαίνεται σε ένα χωνευτήρι είτε μια ράβδος σε μια υποδοχή, οι υψηλές εμπλεκόμενες ενέργειες απαιτούν την ψύξη τους, η οποία επιτυγχάνεται με την κυκλοφορία νερού. Ανάλογα με τις πιέσεις, η απόσταση του δοχείου που περιέχει τον στόχο, με το υπόστρωμα της εναπόθεσης, έχουν απόσταση εργασίας 300 mm έως 1 μέτρο [30]. Τα άτομα ή τα μόρια που εξατμίζονται από το υλικό-στόχο, ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή τοποθεσίας, γνωστή ως μέση ελεύθερη διαδρομή, μέχρι να συγκρουστούν με άλλο άτομο, διαχέοντας την τροχιά τους σε νέφος ατμών.

Η εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να αποδώσει σημαντικά υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης, από 0,1 nm ανά λεπτό έως 100 nm ανά λεπτό, ανάλογα πάντα και με το υλικό-στόχο, με αποτέλεσμα να προκύπτουν επιστρώσεις ψηλότερης πυκνότητας με αυξημένη πρόσφυση στο υπόστρωμα. Επίσης, υπάρχει υψηλή απόδοση χρήσης του υλικού σε σύγκριση με άλλες διεργασίες PVD, μειώνοντας το κόστος.



Σχήμα 3.1 Διαγραμματική απεικόνιση της διαδικασίας e-beam evaporation

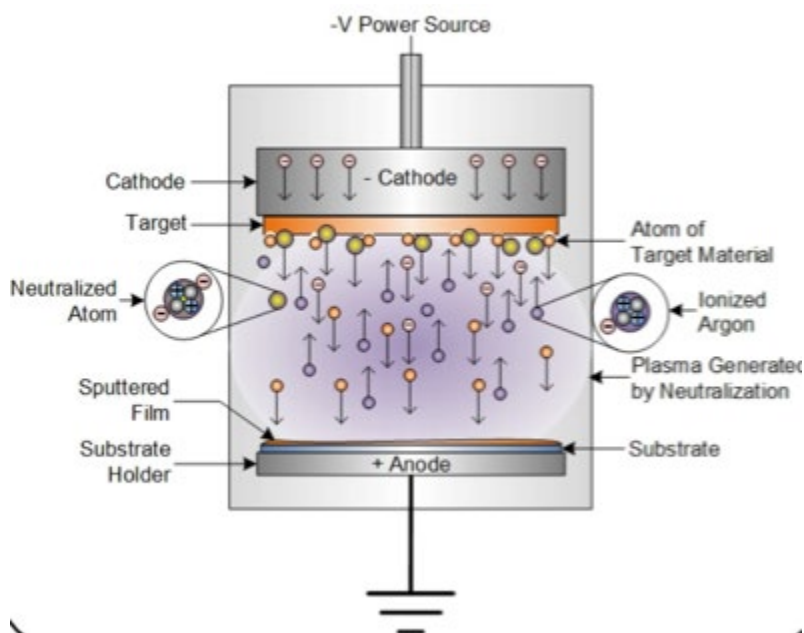
### 3.1.1.2 Radio – Frequency magnetron Sputtering Deposition

Η εναπόθεση με ιοντοβολή (Sputtering Deposition), αφορά την τεχνολογία κατά την οποία το στερεό υλικό που πρόκειται να εναποτεθεί, βομβαρδίζεται από ενεργά σωματίδια, με αποτέλεσμα την εκτόξευση σωματιδίων του υλικού – στόχου, στο υπόστρωμα [31]. Η εναπόθεση με ιοντοβολή γίνεται σε θάλαμο κενού στον οποίο εισάγεται ένα αδρανές αέριο. Στον θάλαμο τοποθετείται το υλικό που πρόκειται να επιστρωθεί, το οποίο ονομάζεται επίσης "υπόστρωμα" (substrate), και το υλικό που θα εφαρμοστεί, το οποίο ονομάζεται επίσης "sputtering target".

Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση για την ανάπτυξη λεπτών υμενίων με εναπόθεση sputter είναι η χρήση πηγής magnetron. Κατά το magnetron sputtering, χρησιμοποιείται πλάσμα για τη δημιουργία ιόντων από αέριο (συνήθως αργό), τα οποία στη συνέχεια επιταχύνονται προς ένα υλικό-στόχο, προκαλώντας την εκτίναξη ατόμων από το στόχο και την εναπόθεση τους σε ένα υπόστρωμα [32]. Το πλάσμα είναι μια κατάσταση της ύλης παρόμοια με αυτή των αερίων, στην οποία όμως ένα μεγάλο μέρος των σωματιδίων είναι ιονισμένα. Πιο συγκεκριμένα, από ορισμένα ή όλα τα άτομα σε ένα πλάσμα έχει αφαιρεθεί ένα ή περισσότερα από τα ηλεκτρόνια τους, αφήνοντάς τα με καθαρό θετικό φορτίο.

Η τεχνική του magnetron sputtering απαιτεί και την προσθήκη χημικών ουσιών στο πλάσμα προκειμένου να γίνει η εναπόθεση. Αυτό ονομάζεται αντιδραστικό αέριο και συχνά αντιδρά ανεπιθύμητα με το υλικό του στόχου, με αποτέλεσμα μια μη γραμμική συμπεριφορά των παραμέτρων εναπόθεσης, ως συνάρτηση της ροής του αντιδραστικού αερίου.

Για την εναπόθεση χαλκού σε KAPTON, στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε Radio – Frequency (RF) magnetron sputtering διαδικασία. Η ιοντοβολή με ραδιοσυχνότητες είναι η τεχνική που περιλαμβάνει την εναλλαγή του ηλεκτρικού δυναμικού του ρεύματος στο περιβάλλον κενού, σε ραδιοσυχνότητες, για την αποφυγή δημιουργίας φορτίου σε ορισμένους τύπους υλικών-στόχων. Η εκτόξευση με μαγνήτη RF χρησιμοποιεί μαγνήτες, για να παγιδεύσει τα ηλεκτρόνια πάνω από το αρνητικά φορτισμένο υλικό-στόχο, ώστε να μην είναι ελεύθερα να βομβαρδίσουν το υπόστρωμα, αρχικά. Με την πάροδο του χρόνου, παράγονται θετικά ιόντα στην επιφάνεια του στόχου, δίνοντάς της θετικό φορτίο. Σε ένα ορισμένο σημείο αυτό το φορτίο συσσωρεύεται και οδηγεί σε πλήρη απόσπαση των ατόμων του στόχου, που εκπέμπονται προς το υπόστρωμα και εναποτίθενται [32], [33].



Σχήμα 3.2 Radio – Frequency magnetron sputtering



### 3.1.1.3 Εναπόθεση Cr – Cu σε υπόστρωμα Kapton

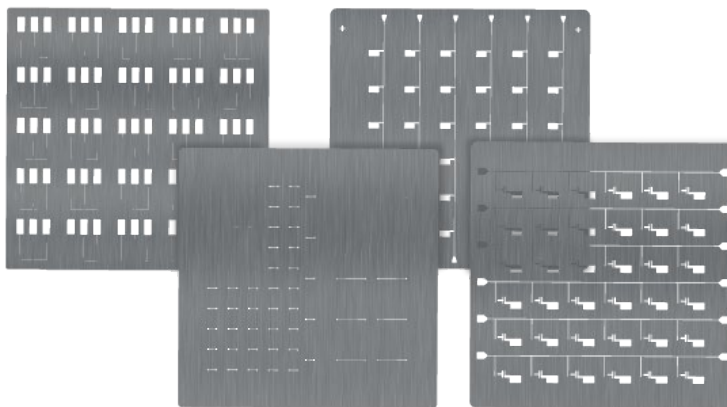
Όταν χρησιμοποιείται υπόστρωμα Kapton και ως υλικό-στόχος ο χαλκός (Cu) στην μέθοδο του RF magnetron sputtering, είναι σύνηθες να εναποτίθεται πρώτα ένα στρώμα χρωμίου (Cr).

Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους αυτό επιλέγεται είναι οι εξής:

- Πρόσφυση: Το στρώμα χρωμίου μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της πρόσφυσης μεταξύ του χαλκού και του Kapton, καθιστώντας το τελικό φιλμ πιο ανθεκτικό και λιγότερο πιθανό να ξεφλουδίσει ή να αποκολληθεί.
- Στρώμα φραγμού: Το στρώμα χρωμίου μπορεί να λειτουργήσει ως φράγμα για την αποφυγή χημικών αντιδράσεων, μεταξύ του υποστρώματος και του φιλμ χαλκού.
- Βελτιωμένη αγωγιμότητα: Ο χαλκός είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού, αλλά αυτό επηρεάζεται όταν έρχεται σε επαφή με ένα διηλεκτρικό, όπως το Kapton. Το στρώμα χρωμίου μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του τελικού φιλμ.
- Βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση: Ο χαλκός είναι επίσης αντιδραστικός με πολλά αέρια, υγρά και στερεά, οπότε η επικάλυψη χρωμίου μπορεί να προστατεύσει το χαλκό από τη διάβρωση.

### 3.1.1.4 Μηχανικές μάσκες εναπόθεσης

Η μάσκα εναπόθεσης είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία εναπόθεσης υλικών σε ένα υπόστρωμα, για τον επιλεκτικό έλεγχο και την δημιουργία μοτίβων ακριβείας, στις επιφάνειες που εναποτίθεται το υλικό. Οι μάσκες εναπόθεσης κατασκευάζονται συνήθως από διάφορα υλικά, όπως μέταλλο, γυαλί, πολυμερή υλικά και άλλα, ανάλογα με τον τύπο της διαδικασίας εναπόθεσης και τις επιθυμητές ιδιότητες της μάσκας. Ανάλογα με την εφαρμογή, μια μάσκα εναπόθεσης μπορεί να επικαλυφθεί με πρόσθετα υλικά για να βελτιωθούν οι ιδιότητές της ή για να καταστεί πιο κατάλληλη για τη διαδικασία εναπόθεσης. Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται ενδεικτικά διαφορετικοί σχεδιασμοί μηχανικών μασκών εναπόθεσης



Σχήμα 3.3 Ενδεικτικά σχέδια μηχανικών μασκών

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους των μασκών, που έχει αντίκτυπο στην διαδικασία εναπόθεσης, είναι το πάχος τους. Το πάχος της μάσκας θα επηρεάσει την ποσότητα του υλικού που μπορεί να περάσει μέσα από τη μάσκα και να εναποτεθεί στο υπόστρωμα. Μια παχύτερη μάσκα θα εμποδίσει περισσότερο υλικό, με αποτέλεσμα λεπτότερη εναπόθεση στο υπόστρωμα, ενώ μια λεπτότερη μάσκα θα επιτρέψει σε περισσότερο υλικό να περάσει και να εναποτεθεί, με αποτέλεσμα παχύτερη εναπόθεση στο υπόστρωμα.

Επιπλέον, το πάχος της μάσκας μπορεί επίσης να επηρεάσει την ανάλυση του μοτίβου που εναποτίθεται. Μια παχύτερη μάσκα θα έχει γενικά ως αποτέλεσμα ένα πιο χονδροειδές μοτίβο, ενώ μια λεπτότερη μάσκα θα έχει ως αποτέλεσμα ένα λεπτότερο μοτίβο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μια παχύτερη μάσκα θα μπλοκάρει περισσότερο από το εισερχόμενο υλικό, καθιστώντας δυσκολότερη τη δημιουργία μικρών ή λεπτομερών χαρακτηριστικών.

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεαστεί από το πάχος της μάσκας είναι η πρόσφυση μεταξύ του εναποτιθέμενου υλικού και του υποστρώματος. Εάν η μάσκα είναι πολύ παχιά, μπορεί να οδηγήσει σε κακή πρόσφυση, καθώς το εναποτιθέμενο υλικό μπορεί να μην είναι σε θέση να έρθει σε καλή επαφή με το υπόστρωμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ασθενέστερους δεσμούς μεταξύ του εναποτιθέμενου υλικού και του υποστρώματος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε κακές μηχανικές ιδιότητες ή κακή απόδοση της διάταξης.

Τέλος, το πάχος της μάσκας μπορεί επίσης να επηρεάσει την ικανότητα εναπόθεσης υλικού σε ορισμένες περιοχές του υποστρώματος, λόγω του φαινομένου σκίασης. Το φαινόμενο της σκίασης, στην εναπόθεση με μάσκα, αναφέρεται στο φαινόμενο όπου η μάσκα εμποδίζει το εισερχόμενο υλικό να εναποτεθεί σε ορισμένες περιοχές του υποστρώματος. Αυτό μπορεί να

συμβεί όταν η μάσκα είναι πολύ παχιά ή όταν η γωνία πρόσπτωσης του εισερχόμενου υλικού είναι πολύ μικρή. Στην περίπτωση των μεθόδων PVD, το φαινόμενο της σκίασης προκαλείται από τη μάσκα που εμποδίζει τον εισερχόμενο ατμό να φτάσει στο υπόστρωμα. Τα σωματίδια ατμού που προσπίπτουν στη μάσκα είτε απορροφώνται, είτε σκεδαζονται είτε ανακλώνται. Τα απορροφημένα και τα σκεδαζόμενα σωματίδια δεν θα φτάσουν στο υπόστρωμα, μειώνοντας τον ρυθμό εναπόθεσης στη σκιασμένη περιοχή. Το φαινόμενο της σκίασης μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφο πάχος ή ελλιπή κάλυψη του υλικού που εναποτίθεται, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε κακή απόδοση ή ελαττώματα στην τελική διάταξη.

Εκτός των ζητημάτων που αφορούν το πάχος της μάσκας, οι μάσκες εναπόθεσης μπορούν να δημιουργήσουν διάφορα προβλήματα στις μεθόδους εναπόθεσης PVD. Οι διεργασίες PVD μπορεί να περιλαμβάνουν υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν παραμόρφωση ή στρέβλωση της μάσκας. Αυτό οδηγεί σε κακή ευθυγράμμιση μεταξύ της μάσκας και του υποστρώματος, οδηγώντας σε ανακριβή σχέδια ή ελαττώματα στο εναποτιθέμενο υλικό. Επιπλέον, οι διεργασίες PVD μπορεί να περιλαμβάνουν σωματίδια ή ακτίνες υψηλής ενέργειας, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση ή ζημιά στη μάσκα με αποτέλεσμα και πάλι ελαττώματα στο εναποτιθέμενο υλικό.

Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται μια μάσκα που είναι κατάλληλη για τη συγκεκριμένη διαδικασία PVD και να συντηρείται και να καθαρίζεται σωστά, ώστε να αποφεύγεται η μόλυνση και η διάβρωση. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ελέγχεται τακτικά η ευθυγράμμιση μεταξύ της μάσκας και του υποστρώματος, ώστε να ελαχιστοποιείται η παραμόρφωση και να διασφαλίζεται η ακριβής μεταφορά του προτύπου.

### **3.1.1.5 Καθαρός χώρος**

Οι διαδικασίες εναπόθεσης πραγματοποιούνται σε καθαρούς χώρους (clean room) για την ελαχιστοποίηση της μόλυνσης και τη διασφάλιση της καθαρότητας και της ποιότητας του εναποτιθέμενου υλικού. Ένα καθαρό δωμάτιο είναι ένα ελεγχόμενο περιβάλλον που έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιεί την παρουσία σωματιδίων και άλλων μολυσματικών παραγόντων. Οι καθαροί χώροι χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα σκόνης, αιωρούμενων σωματιδίων και άλλων μολυσματικών παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του εναποτιθέμενου υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών φίλτρων, αεροφράκτες και άλλα μέτρα για τον έλεγχο του περιβάλλοντος.

Στις διεργασίες εναπόθεσης, ρύποι όπως η σκόνη, τα σωματίδια και οι ακαθαρσίες στον αέρα του περιβάλλοντος μπορούν να εγκατασταθούν στο υπόστρωμα και να επηρεάσουν τη διαδικασία εναπόθεσης, οδηγώντας σε ελαττώματα, κακή πρόσφυση και κακή ηλεκτρική ή οπτική απόδοση. Αυτοί οι ρύποι μπορούν επίσης να προκαλέσουν ζημιά στις δομές, οδηγώντας σε ανακριβή σχέδια και ελαττώματα. Επιπλέον, τα καθαρά δωμάτια παρέχουν ένα ελεγχόμενο περιβάλλον για τη θερμοκρασία, την υγρασία και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία εναπόθεσης. Αυτό να συμβάλει στη διασφάλιση σταθερών αποτελεσμάτων και υψηλής ποιότητας εναποθέσεων.

## **3.2 Μέθοδοι χαρακτηρισμού επιφανειών**

Οι μέθοδοι με την χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, είναι από τα σημαντικότερα εργαλεία στην νανοκατασκευή, καθώς επιτρέπει την μελέτη της δομής των υλικών στην νανοκλίμακα, με υψηλή ανάλυση και αντίθεση. Επιπλέον, διαφορετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και την βελτιστοποίηση της διαδικασίας κατασκευής, με μελέτη της επιφάνειας των διατάξεων, του πάχους την εναπόθεσης, την ομοιομορφία και την επιβεβαίωση σχηματισμού των κατάλληλων μοτίβων σε περιπτώσεις χρήσης μασκών εναπόθεσης.

Οι δύο βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό των αισθητήρων, στην παρούσα διπλωματική εργασία και αναλύονται στις επόμενες ενότητες, είναι το οπτικό μικροσκόπιο και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM).

### **3.2.1 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης**

Το SEM χρησιμοποιείται επίσης για την ανάλυση της επιφάνειας των υλικών και την κατανόηση της σχέσης μεταξύ της μορφολογίας της επιφάνειας και των ιδιοτήτων του υλικού. Για παράδειγμα, στην κατασκευή ημιαγωγών, το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της επιφάνειας ενός υποστρώματος, ώστε να διασφαλιστεί ότι είναι καθαρή και απαλλαγμένη από ρύπους, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη λεπτών υμενίων υψηλής ποιότητας.

Επιπλέον, οι εικόνες SEM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με το σχήμα, το μέγεθος και την κατανομή των σωματιδίων, κάτι που είναι σημαντικό για πολλούς τομείς όπως η επιστήμη των υλικών, η βιολογία και η χημεία. Σε αυτούς

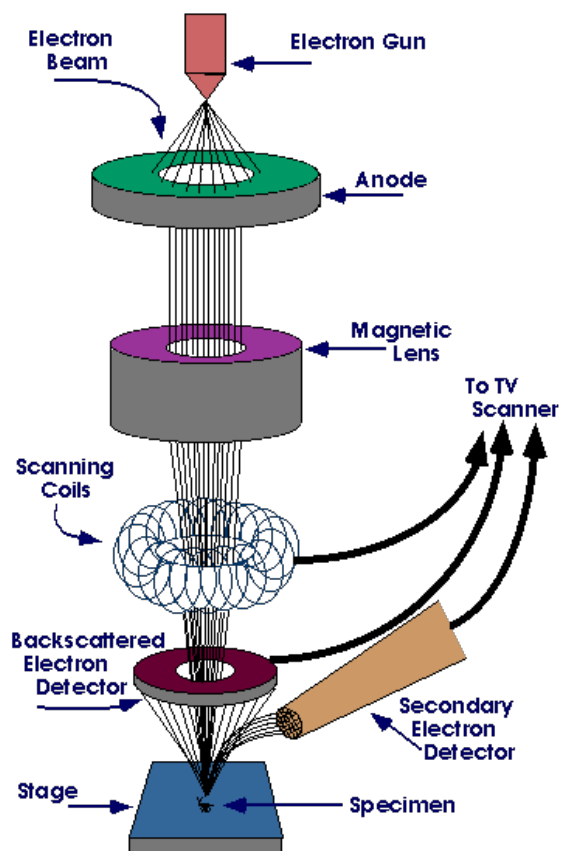
τους τομείς, το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των ιδιοτήτων των μεμονωμένων σωματιδίων και για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) λειτουργεί χρησιμοποιώντας μια δέσμη ηλεκτρονίων για να σαρώσει την επιφάνεια ενός δείγματος και να δημιουργήσει μια εικόνα υψηλής ανάλυσης της τοπογραφίας και της σύνθεσής του. Τα βασικά εξαρτήματα ενός SEM περιλαμβάνουν έναν εκπομπό ηλεκτρονίων (electron gun), το οποίο παράγει τη δέσμη ηλεκτρονίων, μια σειρά φακών και εκτροπέων που διαμορφώνουν και εστιάζουν τη δέσμη, και έναν ανιχνευτή που καταγράφει τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το δείγμα [34], [35]. Το «όπλο» ηλεκτρονίων παράγει μια δέσμη ηλεκτρονίων, θερμαίνοντας ένα νήμα, το οποίο προκαλεί την εκπομπή των ηλεκτρονίων. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από υψηλή τάση και εστιάζονται στο δείγμα, μέσω μιας σειράς φακών και εκτροπέων. Στη συνέχεια, η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνεται στην επιφάνεια του δείγματος σε ένα raster μοτίβο, παρόμοιο με τον τρόπο σάρωσης μιας τηλεοπτικής οθόνης.

Καθώς η δέσμη ηλεκτρονίων αλληλεπιδρά με τα άτομα του δείγματος, προκαλεί την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων, οπισθίως σκεδαζόμενων ηλεκτρονίων και χαρακτηριστικών ακτινών-X. Τα σήματα αυτά ανιχνεύονται και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της εικόνας του δείγματος. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το δείγμα ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρονίων της δέσμης και των ατόμων του δείγματος. Έχουν χαμηλή ενέργεια και εκπέμπονται από την επιφάνεια του δείγματος. Παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία της επιφάνειας του δείγματος. Τα οπισθίως σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (backscattered electrons) είναι ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το δείγμα ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρονίων της δέσμης και των ατόμων του δείγματος. Έχουν υψηλότερη ενέργεια από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια και εκπέμπονται από βαθύτερα μέσα στο δείγμα. Παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση του δείγματος. Οι χαρακτηριστικές ακτίνες-χ είναι ακτίνες-χ που εκπέμπονται από το δείγμα ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρονίων της δέσμης και των ατόμων του δείγματος. Παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση του δείγματος [34].

Τα σήματα από τον ανιχνευτή επεξεργάζονται στη συνέχεια για τη δημιουργία της τελικής εικόνας του δείγματος, η οποία μπορεί να εμφανιστεί σε μια οθόνη ή να εκτυπωθεί. Η τελική

εικόνα είναι μια αναπαράσταση της τοπογραφίας της επιφάνειας και της σύνθεσης του δείγματος σε πολύ υψηλή ανάλυση.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα απεικόνισης βασικών μερών ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)

### 3.2.2 Οπτικό μικροσκόπιο

Στην νανοκατασκευή, η χρήση οπτικών μικροσκοπίων έχει τα ίδια πλεονεκτήματα με την χρήση ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, όπως περιεγράφηκαν παραπάνω, δηλαδή τον ακριβή χειρισμό και χαρακτηρισμό των διατάξεων στη νανοκλίμακα. Η οπτική μικροσκοπία είναι ο τύπος μικροσκοπίας που χρησιμοποιεί διάφορους φακούς και ορατό φως για να μεγεθύνει ένα μικρό δείγμα. Η οπτική απεικόνιση είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος για την απόκτηση μορφολογικών πληροφοριών σχετικά με τα υλικά καθώς μπορούν να συλλεχθούν αληθινές έγχρωμες εικόνες σε πραγματικό χρόνο. Για την παραγωγή μικροφωτογραφίας, η εικόνα που φαίνεται μέσω ενός οπτικού μικροσκοπίου μπορεί να ληφθεί ψηφιακά μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο τρόπος λειτουργίας των οπτικών μικροσκοπίων, βασίζεται στην χρήση φωτός και φακών. Χρησιμοποιείται φως για να φωτιστεί το μελετώμενο δείγμα και ένα σύνολο φακών χρησιμοποιείται για την μεγέθυνση και την μελέτη του. Ο βασικός σχεδιασμός ενός οπτικού μικροσκοπίου αποτελείται από έναν φακό, ο οποίος βρίσκεται κοντά στο αντικείμενο που εξετάζεται, και έναν προσοφθάλμιο φακό, ο οποίος βρίσκεται κοντά στο μάτι του παρατηρητή. Ο φακός κοντά στο αντικείμενο συλλέγει το φως από αυτό και το εστιάζει για να σχηματίσει η εικόνα και ο προσοφθάλμιος φακός την μεγεθύνει, ώστε να μπορεί να την δει ο παρατηρητής. Η ανάλυση του μικροσκοπίου καθορίζεται από την ποιότητα των φακών και το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται. Ένα μικροσκόπιο μπορεί να εξοπλιστεί περαιτέρω με άλλα οπτικά συστήματα, όπως πολωτές, πλέγματα περίθλασης και φίλτρα, τα οποία επιτρέπουν τη λήψη πιο εξειδικευμένων πληροφοριών από τα δείγματα.

### **3.3 Τεχνολογία εύκαμπτων πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων**

Τα εύκαμπτα τυπωμένα κυκλώματα (FPCB) είναι ένας τύπος ηλεκτρονικού κυκλώματος που κατασκευάζεται σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη, με τη χρήση λεπτών και εύκαμπτων υλικών, όπως το φιλμ πολυϊμιδίου (PI) ή πολυεστέρα (PET). Αποτελούνται από ένα υλικό υπόστρωμα στο οποίο χαράσσονται ή εκτυπώνονται αγωγίμες διαδρομές από μέταλλα, όπως ο χαλκός, ο χρυσός ή ο άργυρος. Είναι ελαφριές, συμπαγείς και μπορούν εύκολα να λυγίσουν ή να διπλωθούν για να χωρέσουν σε στενούς χώρους ή να αλλάζουν μορφή βάση της επιφάνειας προσαρμογής τους, χωρίς να καταστρέφονται. Η διαδικασία κατασκευής ενός FPCB ξεκινά συνήθως με τη δημιουργία ενός σχεδίου για το κύκλωμα και ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στο FPC χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η συγκόλληση.

#### **3.3.1 Μεθοδολογία κατασκευής**

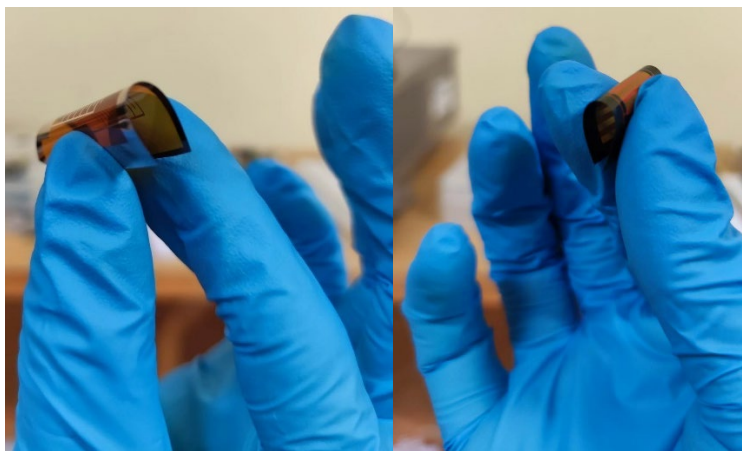
Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες διαδικασιών για την κατασκευή ενός εύκαμπτου τυπωμένου κυκλώματος: η αφαιρετική και η προσθετική. Σε μια αφαιρετική διαδικασία, ξεκινά κανείς με μια στερεή περιοχή μετάλλου και οι ανεπιθύμητες περιοχές μετάλλου αφαιρούνται για να σχηματιστούν τα ίχνη. Σε μια προσθετική διαδικασία, ξεκινάμε με ένα γυμνό διηλεκτρικό στρώμα και τα μεταλλικά ίχνη προστίθενται μόνο όπου χρειάζεται για να σχηματιστεί το κύκλωμα. Το αγωγίμο στρώμα μπορεί να εκτυπωθεί, να επιμεταλλωθεί ή να εναποτεθεί με διάφορους τρόπους.

Η κατασκευή εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων (FPCB) περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων που μετατρέπουν ένα σχέδιο σε μια λειτουργική ηλεκτρονική συσκευή. Πιο συγκεκριμένα:

- Δημιουργία σχεδίου: Το πρώτο βήμα στη διαδικασία κατασκευής είναι η δημιουργία ενός λεπτομερούς σχεδίου που περιλαμβάνει τη διάταξη του κυκλώματος, την τοποθέτηση των εξαρτημάτων και οποιεσδήποτε άλλες απαραίτητες προδιαγραφές. Το σχέδιο αυτό δημιουργείται συνήθως με τη χρήση λογισμικού σχεδίασης (CAD) και μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλά στρώματα, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του κυκλώματος.
- Δημιουργία φωτομάσκας: Μόλις ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός, δημιουργείται μια φωτομάσκα, η οποία είναι μια αρνητική εικόνα της διάταξης του κυκλώματος, συνήθως με φωτολιθογραφία. Η φωτομάσκα χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του κυκλωματικού σχεδίου στο υπόστρωμα. Είναι ζωτικής σημασίας να διασφαλιστεί ότι η φωτομάσκα είναι υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας, καθώς τυχόν σφάλματα στη φωτομάσκα μπορεί να οδηγήσουν σε κακή μεταφορά του κυκλωματικού μοτίβου και ελαττώματα στο τελικό προϊόν.
- Προετοιμασία υποστρώματος: Το υπόστρωμα καθαρίζεται και επικαλύπτεται με ένα φωτοευαίσθητο υλικό που ονομάζεται φωτοανθεκτικό. Η επιφάνεια του υποστρώματος πρέπει να είναι καθαρή, λεία και χωρίς ελαττώματα, καθώς αυτό μπορεί να επηρεάσει την πρόσφυση του φωτοανθεκτικού και την ακρίβεια της μεταφοράς του κυκλωματικού προτύπου.
- Φωτολιθογραφία: Η φωτομάσκα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την έκθεση του υποστρώματος σε υπεριώδες φως. Το φως σκληραίνει τις περιοχές του υποστρώματος που εκτίθενται σε αυτό, δημιουργώντας το σχέδιο κυκλώματος στο υπόστρωμα. Η διαδικασία της φωτολιθογραφίας είναι ένα κρίσιμο βήμα, καθώς η ακρίβεια της μεταφοράς του κυκλωματικού σχεδίου μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του τελικού προϊόντος.
- Χάραξη: Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία φωτολιθογραφίας, το υπόστρωμα χαράσσεται για να αφαιρεθούν οι περιοχές του υποστρώματος που δεν έχουν σκληρύνει από το υπεριώδες φως. Αυτό αφήνει το σχέδιο κυκλώματος στο υπόστρωμα. Η διαδικασία χάραξης πρέπει να ελέγχεται για να διασφαλιστεί η ακρίβεια του κυκλωματικού σχεδίου, καθώς η υπερβολική χάραξη μπορεί να προκαλέσει ζημιά στα ίχνη του κυκλώματος, ενώ η υποχάραξη μπορεί να αφήσει ανεπιθύμητα υπολείμματα.



- Διάτρηση: Η διάτρηση γίνεται μετά τη χάραξη για τη δημιουργία διαμπερών οπών στην πλακέτα.
- Εναπόθεση μετάλλων: Εφαρμόζεται ένα μεταλλικό στρώμα στο υπόστρωμα για να δημιουργηθούν τα αγώγιμα ίχνη του κυκλώματος. Αυτό γίνεται συνήθως με την εφαρμογή ενός μεταλλικού φιλμ, όπως ο χαλκός, στο υπόστρωμα και στη συνέχεια με τη δημιουργία μοτίβου για τη δημιουργία των ιχνών του κυκλώματος. Είναι ζωτικής σημασίας να διασφαλιστεί ότι η διαδικασία εναπόθεσης μετάλλων ελέγχεται για την αποφυγή ελαττωμάτων όπως βραχυκυκλώματα, ανοίγματα ή μη ομοιόμορφο πάχος.
- Έλεγχος: Πραγματοποιούνται ηλεκτρικές δοκιμές για την ανίχνευση τυχόν βραχυκυκλωμάτων που μπορεί να προκαλέσουν αστοχίες στον σχεδιασμό ή τη λειτουργία της πλακέτας αλλά και έλεγχος του γενικού σχεδιασμού της πλακέτας.



*Σχήμα 3.5 Εύκαμπτα δείγματα αισθητήρων αφής*

# Κεφάλαιο 4

## Σχεδιασμός και υλοποίηση αισθητήρα

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται λεπτομερώς ο σχεδιασμός του αισθητήρα αφής, τα χαρακτηριστικά κατασκευής και η δομή του. Ξεκινώντας με μια ανασκόπηση των προδιαγραφών και των απαιτήσεων για τον αισθητήρα αφής, το κεφάλαιο παρουσιάζει τη διαδικασία σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής των υλικών, της επιλογής των κυκλωματικών στοιχείων και της συνολικής αρχιτεκτονικής του αισθητήρα. Επιπλέον, το κεφάλαιο αυτό καλύπτει τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση του αισθητήρα, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών κατασκευής και συναρμολόγησης.

### 4.1 Γεωμετρίες ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν για τον αισθητήρα αφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ακολουθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων (IDE). Το θεωρητικό υπόβαθρο και τα βασικά χαρακτηριστικά των IDE περιεγράφηκαν στην Ενότητα 2.3. Σχεδιάστηκαν 6 διαφορετικές γεωμετρίες, οι οποίες διαφοροποιήθηκαν βάση του επιθυμητού πλάτους  $W$  των IDE και του διάκενου  $G$ , ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς μεταλλικούς αγωγούς (fingers) και φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

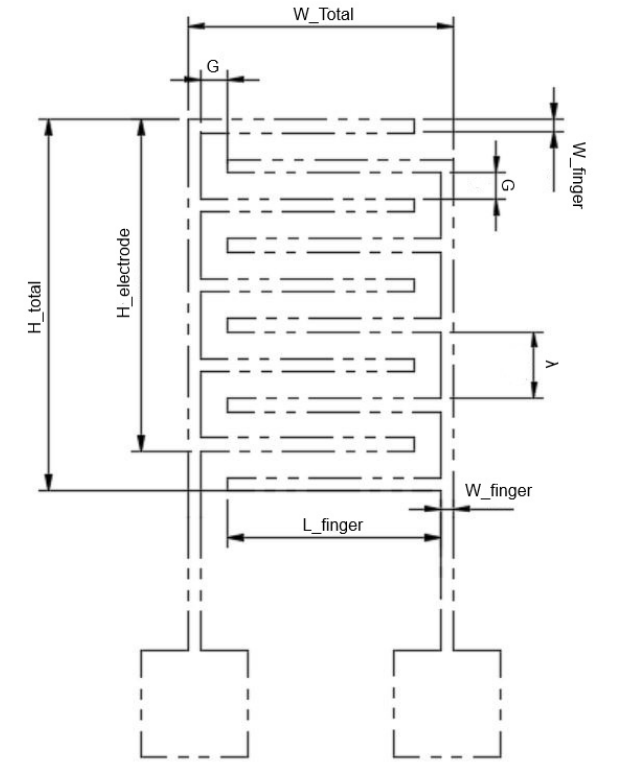
Width ( $\mu\text{m}$ )	Gap ( $\mu\text{m}$ )	Γεωμετρία
350	350	IDE_1
350	1000	IDE_2
500	350	IDE_3
500	1000	IDE_4
1000	350	IDE_5
1000	1000	IDE_6

Πίνακας 4.1 Διαφορετικές γεωμετρίες πεπλεγμένων ηλεκτροδίων

Οι διαστάσεις για το συνολικό μήκος και πλάτος της κάθε διάταξης IDE, προέκυψαν βάση του μεγέθους του δαχτύλου που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές διαδικασίες, βάση της σχεδιαστικής απαίτησης τα ηλεκτρόδια να βρίσκονται εντός της επιφάνειας της 3<sup>ης</sup> φάλαγγας του δαχτύλου, δηλαδή να καλύπτουν πλήρως την επιφάνεια αυτή που έρχεται σε επαφή με τα διαφορετικά υλικά και ανάγλυφα. Υπό την προϋπόθεση ότι τα IDE αποτελούν διατάξεις σε σχήμα παραλληλογράμμου, το μήκος και το πλάτος της επιφάνειας του δαχτύλου (δείκτης) μετρήθηκε 15.5 x 10 mm<sup>2</sup>, και χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς για τον σχεδιασμό του συνολικού μήκους και πλάτους των IDE. Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται αναλυτικά τα διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά για κάθε IDE διάταξη και όσα δεν αναγράφονται μπορούν να υπολογισθούν με συλλογισμούς που προκύπτουν από την βασική γεωμετρικά των IDE, γενικότερα. Για τον σχεδιασμό των IDE που αφορούν το αισθητήρα αφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας ισχύουν οι εξής αναλογίες, η οποίες φαίνονται και στο Σχήμα 4.1:

- Το συνολικό πλάτος σε όλα τα IDE είναι σταθερό και ίσο με 10 mm, ώστε τα ηλεκτρόδια να καλύπτουν την πάνω όψη της επιφάνειας του δαχτύλου και να μην κάμπτονται στα πλαϊνά σημεία, κατά την εφαρμογή του αισθητήρα στο δέρμα.
- Το πλήθος  $N$  των «δαχτύλων» για κάθε ηλεκτρόδιο προέκυψε με διαδοχική προσθήκη μεταλλικών , έως ότου το συνολικό μήκος της διάταξης των IDE να προσεγγίζει τα 15,5 mm, που είναι το όριο μήκους του δαχτύλου, που ορίστηκε ως σημείο αναφοράς. Ο λόγος που το συνολικό μήκος για κάθε IDE δεν παραμένει σταθερό στα 15,5 mm, έγκειται στο γεγονός ότι αλλάζει το πλάτος  $W_{finger}$  και το κενό  $G$ , σε κάθε μία από τις έξι γεωμετρικές, προκειμένου για κάθε «δάχτυλο» τα μεγέθη του πλάτους και του κενού να διατηρηθούν σταθερά.
- Το κενό  $G$  ανάμεσα σε δύο διαδοχικά ηλεκτρόδια είναι ίσο με το κενό ανάμεσα στο άκρο του κάθε «δακτύλου» και του τοιχώματος του άλλου ηλεκτροδίου.
- Η απόσταση  $\lambda$  μεταξύ δύο διαδοχικών «δαχτύλων», του ίδιου ηλεκτροδίου, ακολουθεί την αναλογία  $\lambda = 2 * G + W_{finger}$
- Η κάθετη αγωγή προέκταση μέσω της οποία συνδέονται τα «δάχτυλα» κάθε ηλεκτροδίου είναι σε πλάτος όση και το πλάτος των «δακτύλων», ενώ το μήκος της,  $H_{electrode}$  υπολογίζεται από την παράσταση

$$H_{electrode} = N * W_{finger} + \lambda * (N - 1)$$



Σχήμα 4.1 Γεωμετρικά στοιχεία IDE

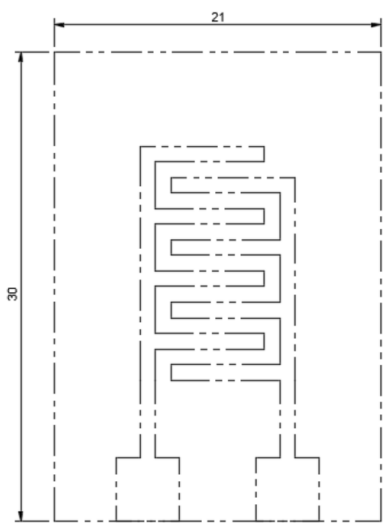
	Πλήθος "δακτύλων" για κάθε ηλεκτρόδιο (N)	Πλάτος ηλεκτροδίων ( $W_{finger}$ , mm)	Κενό διάστημα (G, mm)	Μήκος ηλεκτροδίων ( $L_{finger}$ , mm)	Συνολικό μήκος ( $L_{total}$ , mm)	Συνολικό πλάτος ( $W_{total}$ , mm)
<b>IDE_1</b>	10	0,35	0,35	8,95	13,65	10,00
<b>IDE_2</b>	6	0,35	1,00	8,30	15,20	10,00
<b>IDE_3</b>	8	0,50	0,35	8,65	13,25	10,00
<b>IDE_4</b>	5	0,50	1,00	9,00	14,00	10,00
<b>IDE_5</b>	5	1,00	0,35	7,65	13,15	10,00
<b>IDE_6</b>	4	1,00	1,00	7,00	15,00	10,00

Πίνακας 4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των 6 διαφορετικών γεωμετριών IDE

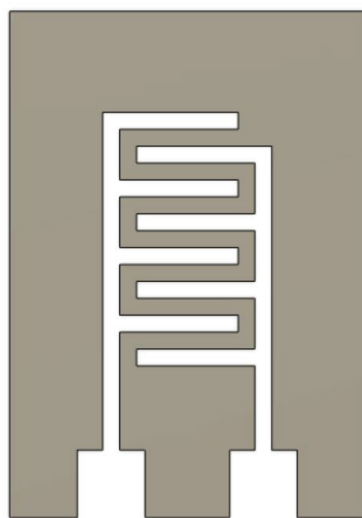
## 4.2 Σχεδίαση μηχανικών μασκών εναπόθεσης

Για την διαδικασία της εναπόθεσης μετάλλων χαλκού (Cu) και αλουμινίου (Al), σε υπόστρωμα Karton, δηλαδή την εναπόθεση των πεπλεγμένων ηλεκτροδίων (IDE) του αισθητήρα αφής στο επιλεγμένο εύκαπτο υπόστρωμα, σχεδιάστηκαν 24 διαφορετικές μηχανικές μάσκες, προκειμένου να ελεγχθεί το μοτίβο εναπόθεσης των IDE στο υπόστρωμα, όπως αναλύθηκε και στην υποενότητα 3.1.1. Ο σχεδιασμός της μορφής των μηχανικών μασκών με ακρίβεια στις διαστάσεις και τις γεωμετρίες και κατ' επέκταση η ακριβής μορφή των IDE και η διάταξη του αισθητήρα, σχεδιάστηκαν με την χρήση του σχεδιαστικού λογισμικού Fusion 360.

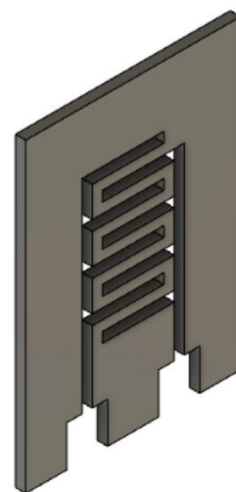
Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4.3 και Σχήμα 4.4, φαίνεται το μοντέλο μίας εκ των εικοσιτεσσάρων μηχανικών μασκών, σχεδιασμένο στο Fusion 360. Εκτός των IDE, στην σχεδίαση του αισθητήρα και των μηχανικών μασκών, συνυπολογίζεται και ένας επαρκής χώρος για την κόλληση των καλωδίων, προκειμένου να γίνει η λήψη και η καταγραφή των σημάτων επαφής του αισθητήρα με τα υλικά. Αυτό τον σκοπό εξυπηρετούν τα δύο όμοια τετράγωνα 4x4 mm (pads), που φαίνονται ως προέκταση των IDE στα σχήματα. Οι διαστάσεις κάθε μάσκας είναι 30 x 21 mm, σύμφωνα με τον σχεδιασμό, που φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Σχέδιο μηχανικής μάσκας (C22) στο λογισμικό Fusion 360



Σχήμα 4.3 Κάτοψη μηχανικής μάσκας (C22) στο λογισμικό Fusion 360



Σχήμα 4.4 Πλάγια όψη μηχανικής μάσκας (C22) στο λογισμικό Fusion 360

Προκειμένου να κατασκευαστεί η κάθε μάσκα, κόπηκε στις επιθυμητές διαστάσεις ανοξείδωτο ατσάλι (INOX) σε μηχάνημα κοπής με σύρμα (Charmilles Technologies, Robofil 290p) , σύμφωνα με τον αντίστοιχο σχεδιασμό. Για κάθε γεωμετρία, κόπηκαν 4 διαφορετικά πάχη μάσκας 500  $\mu\text{m}$ , 1000  $\mu\text{m}$ , 1500  $\mu\text{m}$  και 2000  $\mu\text{m}$ . Οι 24 διαφορετικοί σχεδιασμοί, συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4.3. Επιλέχθηκε να κοπούν μάσκες σε διαφορετικά πάχη ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα και για τις διαδικασίες εναπόθεσης σε μάσκες διαφορετικού πάχους.

DESIGN	WIDTH ( $\mu\text{m}$ )	GAP ( $\mu\text{m}$ )	ΠΑΧΟΣ ΜΑΣΚΑΣ ( $\mu\text{m}$ )
A21	350	1000	500
A22	350	1000	1000
A23	350	1000	1500
A24	350	1000	2000

DESIGN	WIDTH ( $\mu\text{m}$ )	GAP ( $\mu\text{m}$ )	ΠΑΧΟΣ ΜΑΣΚΑΣ ( $\mu\text{m}$ )
A11	350	350	500
A12	350	350	1000
A13	350	350	1500
A14	350	350	2000

B21	500	1000	500
B22	500	1000	1000
B23	500	1000	1500
B24	500	1000	2000

B11	500	350	500
B12	500	350	1000
B13	500	350	1500
B14	500	350	2000

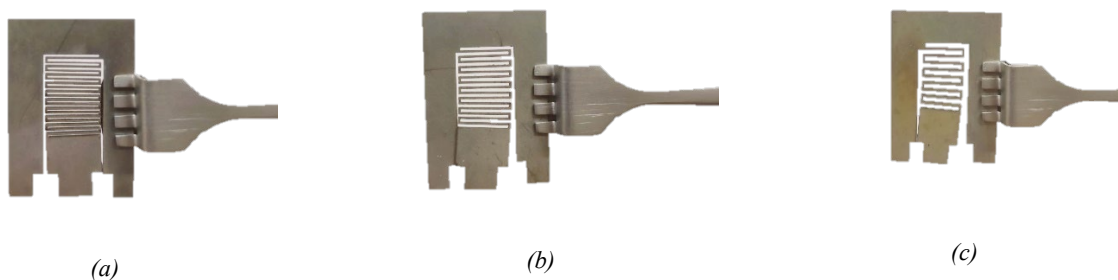
C21	1000	1000	500
C22	1000	1000	1000
C23	1000	1000	1500
C24	1000	1000	2000

C11	1000	350	500
C12	1000	350	1000
C13	1000	350	1500
C14	1000	350	2000

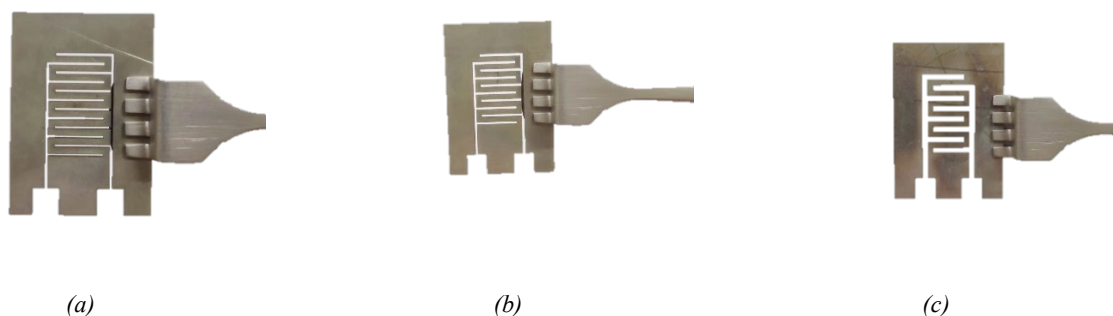
Πίνακας 4.3 Ονοματολογία, διαστάσεις και πάχη μηχανικών μαस्कών εναπόθεσης

Απο τις συνολικά 24 μάσκες που σχεδιάστηκαν και κόπηκαν σε ανοξείδωτο ατσάλι, χρησιμοποιήθηκαν για εναπόθεση μετάλλων μόνο όσες σχεδιάστηκαν με κενό ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ίσο με 1000  $\mu\text{m}$  ( $G = 1000 \mu\text{m}$ ). Όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.5 οι μάσκες με  $G = 350 \mu\text{m}$ , μετά την κοπή του σχεδίου σε INOX, παρουσίασαν παραμορφώσεις με αποτέλεσμα να αλλάξουν οι γεωμετρίες του αρχικού σχεδιασμού και στο στάδιο της εναπόθεσης να μην υπάρξει ακρίβεια στις διαστάσεις του μετάλλου στα αντίστοιχα μοτίβα IDE, πάνω στο υπόστρωμα. Οι παραμορφώσεις αυτές, οφείλονται στις εσωτερικές δυνάμεις του υλικού κατασκευής, οι οποίες είναι ομοιόμορφες κατανεμημένες πριν κοπεί το υλικό και

ελευθερώνονται όταν αυτό κόπτεται με αποτέλεσμα την κάμψη του. Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία EDM μπορεί να προκαλέσουν θερμική καταπόνηση στο υλικό, οδηγώντας σε παραμορφώσεις. Ακόμα, η μορφή του μαιάνδρου που σχηματίζεται από το μέταλλο στην γεωμετρία της μάσκας, μπορεί να δημιουργήσει πρόσθετα σημεία πίεσης και να οδηγήσει σε αυξημένες παραμορφώσεις του υλικού, λόγω των περιοχών όπου η κατεύθυνση της κοπής αλλάζει απότομα. Συνεπώς, οι μάσκες A1<sub>i</sub>, B1<sub>i</sub>, C1<sub>i</sub> με  $i = 1,2,3,4$  δεν χρησιμοποιήθηκαν στα επόμενα στάδια του σχεδιασμού και της υλοποίησης του αισθητήρα αφής, της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται ενδεικτικά οι μάσκες που δεν παρουσίασαν παραμορφώσεις και χρησιμοποιήθηκαν για την εναπόθεση των μετάλλων.



Σχήμα 4.5 Παραμορφωμένες μηχανικές μάσκες (a) A11 (b) B12 (c) C13



Σχήμα 4.6 Μηχανικές μάσκες χωρίς παραμόρφωση (a) A22 (b) B22 (c) C22

### **4.3 Καθαρισμός μηχανικών μασκών**

Το ανοξειδωτο ατσάλι που χρησιμοποιείται στην διαδικασία κοπής του σε μοτίβα, προκειμένου να δημιουργηθούν οι μηχανικές μάσκες εναπόθεσης, έρχεται ως υλικό σε επαφή με ένα ευρύ φάσμα ρύπων και βακτηρίων, όπως γράσο, λάδι, σκόνη, σκουριά, χρωστικές ουσίες και άλλα, καθιστώντας τις μάσκες απαγορευτικές για χρήση σε διαδικασίες εναπόθεσης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι μάσκες καθαρίστηκαν σε λουτρό υπερήχων (Ultra-sonic bath), προκειμένου να είναι κατάλληλες για χρήση. Ο καθαρισμός με υπερήχους λειτουργεί μέσω ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας, που μεταδίδονται μέσω υγρού, για να καθαρίσουν την επιφάνεια των βυθισμένων σε αυτό μεταλλικών στοιχείων. Οι καθαριστές υπερήχων είναι κατάλληλοι για τον καθαρισμό μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, του γυαλιού, του καουτσούκ, των κεραμικών και ορισμένων σκληρών πλαστικών. Ένας καθαριστής εξαρτημάτων με υπερήχους είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την αφαίρεση στενά προσκολλημένων ρύπων από περίπλοκα αντικείμενα με τυφλές οπές, ρωγμές και εσοχές, όπως στο σχήμα του μαιάνδρου που έχουν τα IDE.

Οι μηχανικές μάσκες τοποθετήθηκαν σε πλαστικό δοχείο με επαρκή ποσότητα ακετόνης, ώστε να καλύπτεται η επιφάνεια τους και στο δοχείο του Ultrasonic cleaner τοποθετήθηκε απιονισμένο νερό, σε επαρκή ποσότητα. Το δοχείο που περιείχε τις μάσκες, τοποθετήθηκε στο λουτρό με το απιονισμένο νερό και πραγματοποιήθηκε καθαρισμός με υπέρηχους στα 40 kHz για 30 λεπτά. Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία, οι μάσκες ξεπλύθηκαν με ακετόνη, στην συνέχεια προπανόλη και τέλος με απιονισμένο νερό. Στέγνωσαν πάνω σε ειδικό χαρτί και αποθηκεύτηκαν για χρήση, σε τρυβλίο.

### **4.4 Συνθήκες εναπόθεσης μετάλλων σε εύκαμπτο υπόστρωμα**

Η εναπόθεση μετάλλων στο εύκαμπτο υπόστρωμα Karton, για την κατασκευή του αισθητήρα αφής, σε μοτίβο πεπλεγμένων ηλεκτροδίων και σύμφωνα με τις γεωμετρίες που σχεδιάστηκαν και περιεγράφηκαν στις προηγούμενες υποενότητες, πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικές τεχνικές εναπόθεσης, την ιοντοβολή (sputtering) και την εξάχνωση (e-beam evaporation), των οποίων το θεωρητικό υπόβαθρο αναλύεται στην υποενότητα 3.1.1. Με την διαδικασία της ιοντοβολής εναποτέθηκε χρώμιο (Cr) και χαλκός (Cu) σε πάχος 300 nm, ενώ με την διαδικασία της εξάχνωσης εναποτέθηκε αλουμίνιο (Al), στο ίδιο πάχος. Τα φύλλα Karton που



χρησιμοποιήθηκαν ως υπόστρωμα, πάχους 0.075 mm, κόπηκαν με ψαλίδι που καθαρίστηκε με ακετόνη και προπανόλη, σε όμοια τετράγωνα μεγέθους μεγαλύτερου από αυτό των μηχανικών масκών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση και στην συνέχεια, στην περίπτωση της εναπόθεσης με ιοντοβολή κάθε φύλλο καθαρίστηκε από ρύπους και σκόνη με φουσητήρα αέρα ενώ στην περίπτωση της εναπόθεσης με εξάχνωση, υπό ροή αζώτου. Για την εναπόθεση με ιοντοβολή χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις μηχανικές μάσκες A22, B22, C22 και για την εναπόθεση με εξάχνωση οι πέντε μάσκες A21, A23, A24, B21, C21. Τόσο στην περίπτωση της εναπόθεσης με ιοντοβολή όσο και στην εναπόθεση με εξάχνωση, κατασκευάστηκαν αισθητήρες και για τις τρεις γεωμετρίες IDE\_2, IDE\_4, IDE\_6, ωστόσο τα πάχη των масκών που χρησιμοποιήθηκαν, διαφέρουν για τις δύο διαδικασίες. Στην περίπτωση της εναπόθεσης με ιοντοβολή επιλέχθηκε να γίνει εναπόθεση σε πάχος μάσκας 1000 μm και για τις τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, ενώ στην περίπτωση της εναπόθεσης με εξάχνωση χρησιμοποιήθηκαν μάσκες πάχους 500 μm και για τις τρεις γεωμετρίες και η εναπόθεση με την γεωμετρία IDE\_2 έγινε επιπλέον για πάχος μάσκας 1500 μm και 2000 μm. Συνοπτικά, τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακας 4.4.

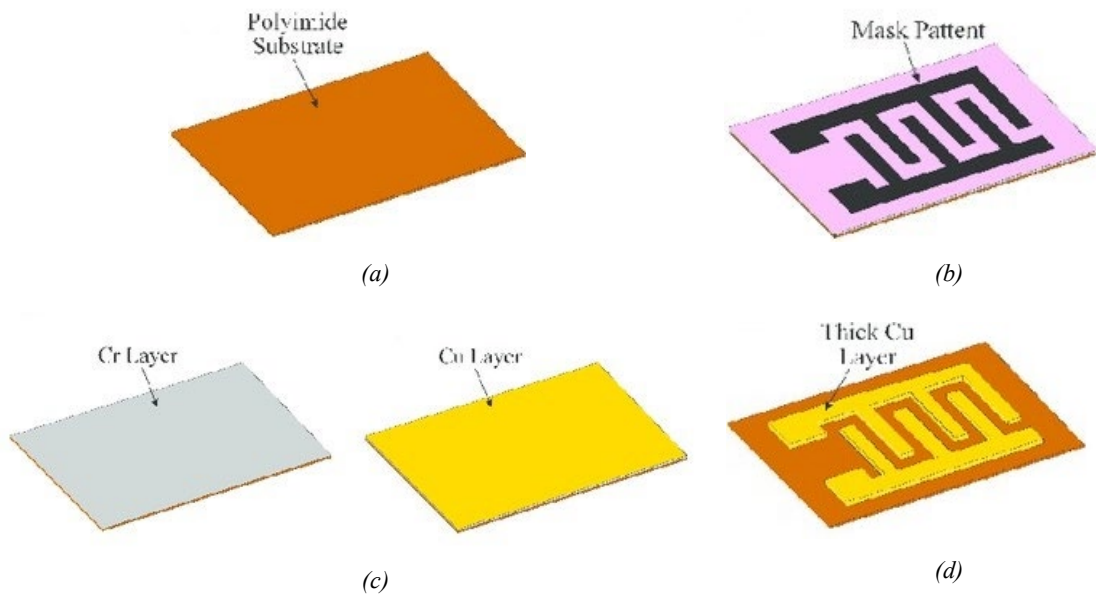
Μάσκες εναπόθεσης	Sputtering			E-beam evaporation				
	A22	B22	C22	A21	A23	A24	B21	C21
Πάχος μάσκας (μm)	1000			500	1500	2000	500	500
Γεωμετρία IDE	IDE_2	IDE_4	IDE_6	IDE_2		IDE_4	IDE_6	
Πάχος εναπόθεσης (nm)	300			300 (Cr)				
Υλικό εναπόθεσης	Al			Cr-Cu				

Πίνακας 4.4 Στοιχεία εναπόθεσης μετάλλων

Η εναπόθεση με ιοντοβολή (Sputtering Σχήμα 4.8) πραγματοποιήθηκε υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Η χαμηλότερη πίεση του θαλάμου πριν τη εναπόθεση (Base pressure) ήταν  $7 * 10^{-6} mbar$  και η πίεση εναπόθεσης  $5 * 10^{-2} mbar$ . Στο πρώτο στάδιο, εναποτέθηκε χρώμιο (Cr), πάχους 16 nm κατά προσέγγιση, στα 250W και χρόνο εναπόθεσης δύο (2) λεπτά και εικοσιπέντε (25) δευτερόλεπτα. Χωρίς την επαναφορά του θαλάμου σε ατμοσφαιρική πίεση, εναποτέθηκε χαλκός (Cu), πάχους 300 nm κατά προσέγγιση, στα 300W, για έξι (6) λεπτά. Όλη η διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η τάση επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων, στην εναπόθεση με εξάχνωση (E-beam evaporation, ) ορίστηκε στα 3000 V, με ένταση 1 Ampere, βάση το υλικό εναπόθεσης. Η πίεση του θαλάμου

κατά την διάρκεια της εναπόθεσης ήταν  $2 * 10^{-6} Torr$  και ο ρυθμός εναπόθεσης ήταν  $5 \text{ \AA/s}$  (Angstrom/second)

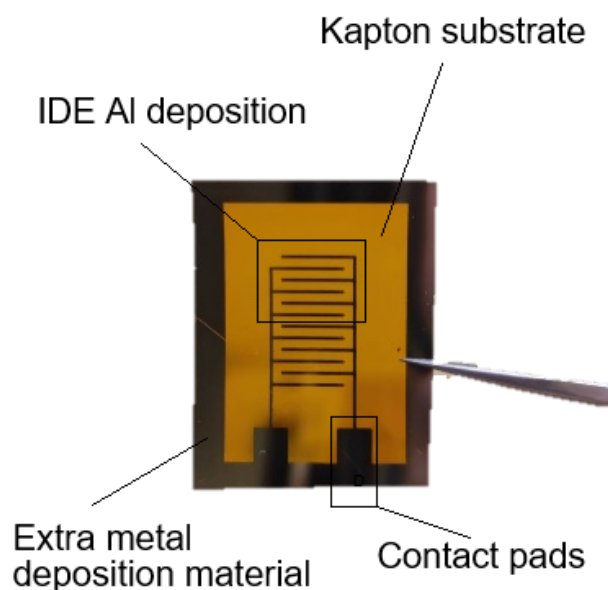


Σχήμα 4.7 Στάδια εναπόθεσης με ιοντοβολή (a) Υπόστρωμα (b) τοποθέτηση μάσκας με το μοτίβο των IDE πάνω από το υπόστρωμα (c) εναπόθεση χρωμίου (Cr) και χαλκού (Cu) (d) τελική εναπόθεση στρώσης Cr-Cu στο υπόστρωμα μετά την αφαίρεση της μάσκας

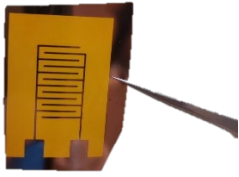
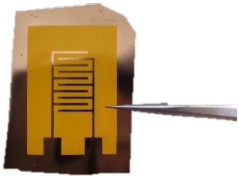
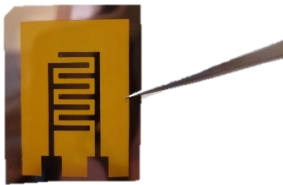


Σχήμα 4.8 Sputtering

Με την ολοκλήρωση των εναποθέσεων, τα δείγματα που προέκυψαν αποθηκεύτηκαν σε τρυβλίο ώστε να κοπούν και να κολληθούν σε κατάλληλες δομές πάνω σε δάχτυλο, στην διαδικασία κατασκευής του αισθητήρα. Στο Σχήμα 4.9 φαίνονται τα χαρακτηριστικά σημεία για ένα δείγμα εναπόθεσης αλουμινίου στα 300 nm και πλάτος «δακτύλου» IDE 350 μm. Εκτός του Kapton υποστρώματος και της εναπόθεσης μετάλλου, σε κάθε δείγμα υπάρχουν τετράγωνα μεταλλικές διατάξεις ως σημεία επαφής των καλωδίων για την λήψη των σημάτων και το επιπλέον μεταλλικό εναποτεθειμένο υλικό που διακρίνεται στα δείγματα προκύπτει καθώς η μάσκα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μικρότερου μεγέθους από το υπόστρωμα. Το επιπλέον υλικό στην συνέχεια αφαιρείται, όπως εξηγείται σε επόμενη ενότητα. Ενδεικτικά τα δείγματα για κάθε μάσκα, στην περίπτωση της εναπόθεσης χρωμίου και χαλκού, με ιοντοβολή, φαίνονται στον Πίνακα 4.5, ώστε να γίνουν αντιληπτές οι διαφορετικές γεωμετρικές των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 4.9 Δείγμα εναπόθεσης αλουμινίου 300 nm με πλάτος μεταλλικού διαδρόμου IDE 350 μm

MASK	Sputtering
A22	
B22	
C22	

Πίνακας 4.5 Εικόνες δειγμάτων

## 4.5 Σχεδιασμός εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων

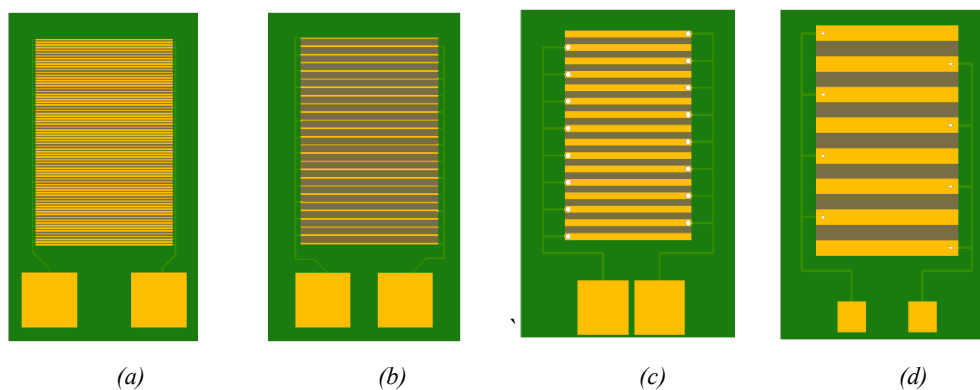
Ο σχεδιασμός εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων επιλέχθηκε για την κατασκευή του αισθητήρα αφής, προκειμένου να μελετηθεί η σύγχρονη τεχνολογία των FPCB και να εξαχθούν συγκριτικά συμπεράσματα με τους αισθητήρες αφής που κατασκευάστηκαν με τις μεθόδους εναπόθεσης. Η κατασκευή των FPCB έγινε από την εταιρία PCBWay, με έδρα την Κίνα. Οι γεωμετρίες που επιλέχθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 4.6. Ο σχεδιασμός έγινε με την χρήση του λογισμικού EAGLE και στο Σχήμα 4.10 φαίνεται το σχέδιο για κάθε πλακέτα ξεχωριστά. Τα τέσσερα σχέδια ενσωματώθηκαν σε μία πλακέτα, διαστάσεων 36 x 51 mm, και τυπώθηκαν ως ένα FPCB, το οποίο στην συνέχεια κόπηκε για την χρήση κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Το σχέδιο της τελικής πλακέτας που κατασκευάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.12, όπου διακρίνονται τέσσερις γεωμετρίες του αισθητήρα.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα για την τύπωση των μοτίβων χαλκού είναι εύκαπτο πολυιμίδιο και το πάχος του FPCB είναι 0.1 mm. Χρησιμοποιήθηκε μάσκα

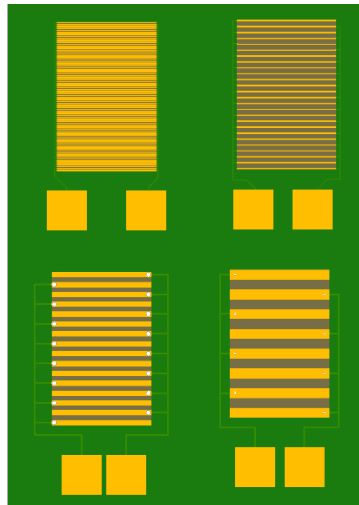
συγκόλλησης (solder mask) σε μαύρο χρώμα και λεπτή στρώση χρυσού για την αποφυγή της οξείδωσης και την βελτίωση της συγκόλλησης των χάλκινων επιφανειών στο υπόστρωμα. Ο χαλκός εναποτέθηκε σε πάχος 18  $\mu\text{m}$  ενώ δεν χρησιμοποιήθηκε σε κανένα σημείο της πλακέτας σκληρυντικό υλικό ώστε να προστεθεί ακαμψία στην πλακέτα.

Γεωμετρία	Πλάτος χαλκού ( $\mu\text{m}$ )	Κενό διάστημα ( $\mu\text{m}$ )	Συνολικό πλάτος ηλεκτροδίων (mm)	Συνολικό μήκος ηλεκτροδίων (mm)	Πλήθος μεταλλικών διαδρόμων
FPCB_1	100	100	10	15	76
FPCB_2	100	500	10	15,1	26
FPCB_3	500	500	10	15,5	16
FPCB_4	1000	1000	10	15	8

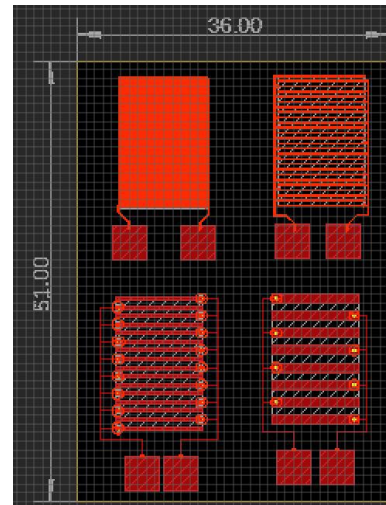
Πίνακας 4.6 Χαρακτηριστικά σχεδιασμού FPCB



Σχήμα 4.10 Σχέδια κατασκευής FPCB (a) FPCB\_1 (b) FPCB\_2 (c) FPCB\_3 (d) FPCB\_4

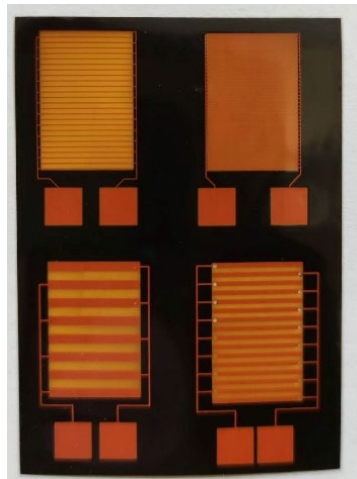


(a)

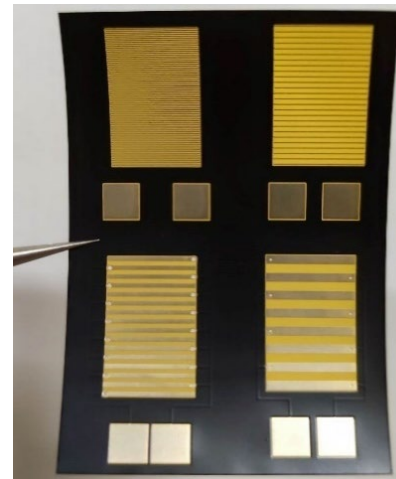


(b)

Σχήμα 4.11 Σχέδια FPCB προς κατασκευή



(a)



(b)

Σχήμα 4.12 Τυπωμένο εύκαμπτο κύκλωμα αισθητήρα (a) όψη υποστρώματος (b) όψη εναπόθεσης μετάλλου (Cu)

## 4.6 Χαρακτηρισμός δειγμάτων με χρήση οπτικού μικροσκοπίου

### 4.6.1 Μηχανικές μάσκες

Οι διατάξεις των διαπλεκόμενων ηλεκτροδίων που αναπτύχθηκαν με τις μεθόδους εναπόθεσης και με την χρήση εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων, προκειμένου να εξαχθούν πληροφορίες για την μορφολογία τους και την ακρίβεια στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, μελετήθηκαν με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου (DP71, Olympus). Το συγκεκριμένο οπτικό μικροσκόπιο παρέχει φακούς μεγέθυνσης 10, 50 και 100 φορές. Οι φωτογραφίες που λήφθηκαν

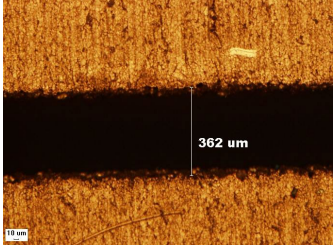
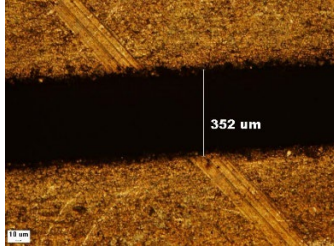
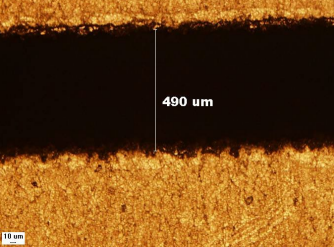
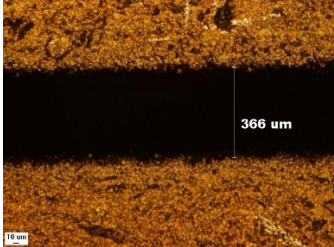
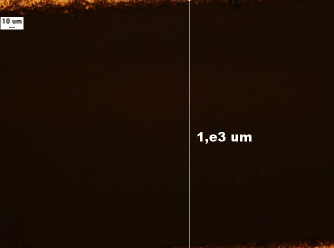
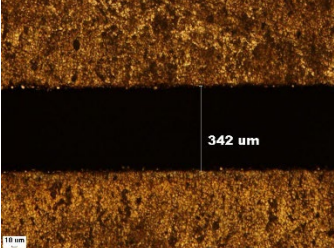
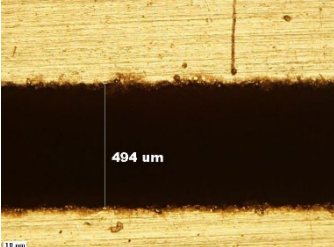
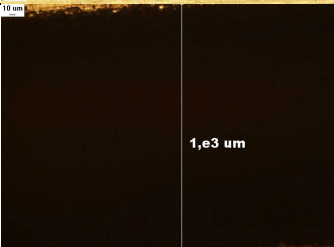
για το χαρακτηρισμό των συγκεκριμένων δειγμάτων είναι μεγεθυμένες κατά 10 φορές. Αρχικά, μετρήθηκε με ακρίβεια το πλάτος κοπής των 8 μηχανικών μασκών, που χρησιμοποιήθηκαν για τις εναποθέσεις με ιοντοβολή και εξάχνωση, προκειμένου να εξαχθούν συγκριτικά συμπεράσματα για την ποιότητα των εναποθέσεων και την ακρίβεια που τηρήθηκε στις γεωμετρίες των δειγμάτων. Στον Πίνακα 4.8 φαίνονται οι εικόνες που λήφθηκαν με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου, για τις 8 διαφορετικές μάσκες εναπόθεσης που χρησιμοποιήθηκαν.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.8 υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στο επιθυμητό πλάτος κοπής της κάθε μάσκας και στο πλάτος της τελικής κοπής, που προέκυψε με την διαδικασία κοπής των INOX επιφανειών με σύρμα, στα μοτίβα IDE. Για τα ελάχιστα πάχη κοπής, στα 350 μm, παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση σε ποσοστό -3.43% για τις μάσκες εναπόθεσης με ιοντοβολή και -4.57% για τις μάσκες εναπόθεσης με εξάχνωση, κάτι που θεωρήθηκε αναμενόμενο καθώς τα 350 μm είναι το ελάχιστο πλάτος κοπής του EDM (electrical discharge machining) που χρησιμοποιήθηκε για την κοπή και αποκλείσεις μερικών μικρών είναι επιτρεπτές, ειδικά στο περίπλοκο σχέδιο του μαιάνδρου, για τα IDE. Επιπλέον, σε τόσο μικρή κλίμακα κοπής, σπινθήρες που δημιουργούνται κατά την διαδικασία της κοπής μπορεί να οδηγήσουν σε μικρές και ακανόνιστες κοπές ή μεγαλύτερες αποκλείσεις καθώς αυξάνεται το πάχος του υλικού. Καθώς το πλάτος κοπής αυξάνεται, και το EDM κόβει σε μεγέθη αρκετά μεγαλύτερα από το ελάχιστο πάχος κοπής, οι αποκλείσεις μειώνονται έως ότου μηδενιστούν, για πάχος κοπής 1000 μm. Στην περίπτωση το μασκών A21, A23 και A24, όπου το πλάτος κοπής παραμένει σταθερό αλλά διαφέρει το πάχος του INOX που χρησιμοποιήθηκε, παρατηρείται πώς η μάσκα με το ελάχιστο πάχος παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση. Επιπλέον, παρατηρούνται αποκλείσεις τόσο θετικές, δηλαδή υπήρξε κοπή μεγαλύτερου πλάτους από αυτή που ορίστηκε στο μηχάνημα, όσο και αρνητικές, δηλαδή υπήρξαν κοπές μικρότερου πλάτους. Βασικοί παράγοντες που προκαλούν αυτές τις αποκλείσεις είναι οι ιδιότητες του INOX ως υλικό, όπως η σκληρότητα του, οι σπινθήρες, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αστάθειες που αφορούν το μηχάνημα κοπής όπως το ρεύμα, η τάση, αποκλείσεις στο πλάτος του σύρματος κοπής και άλλα.

Μάσκα εναπόθεσης	Πλάτος κοπής σύμφωνα με τον σχεδιασμό ( $\mu\text{m}$ )	Πάχος μάσκας ( $\mu\text{m}$ )	Μέτρηση πλάτους κοπής στο οπτικό μικροσκόπιο ( $\mu\text{m}$ )	Ποσοστό απόκλισης (%)
<b>Μάσκες για εναπόθεση Cr-Cu με την μέθοδο της ιοντοβολής</b>				
A22	350	1000	362	-3.43
B22	500	1000	490	2.00
C22	1000	1000	1000	0.00
<b>Μάσκες για εναπόθεση Al με την μέθοδο της εξάχνωσης</b>				
A21	350	500	352	-0.60
A23	350	1500	366	-4.57
A24	350	2000	342	2.29
B21	500	500	494	1.20
C21	1000	500	1000	0.00

Πίνακας 4.7 Συγκριτικά χαρακτηριστικά των διαστάσεων που απαιτούμενων και των τελικών διαστάσεων



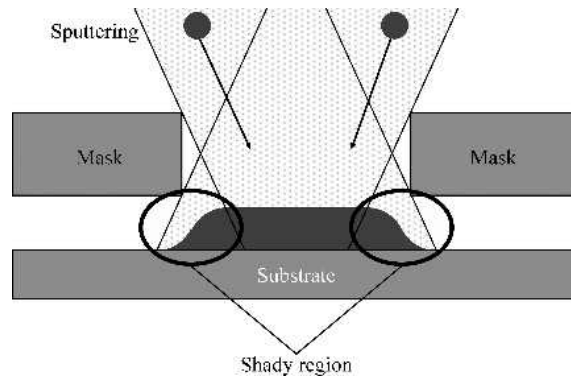
MASK		MASK	
A22		A21	
B22		A23	
C22		A24	
		B21	
		C21	

Πίνακας 4.8 Εικόνες μασκών εναπόθεσης στο οπτικό μικροσκόπιο

## 4.6.2 Μεταλλικά υμένα με ιοντοβολή και εξάχνωση

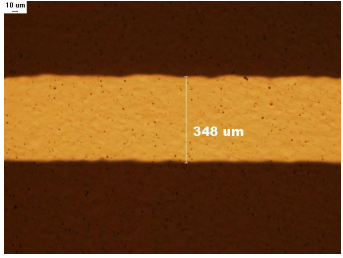
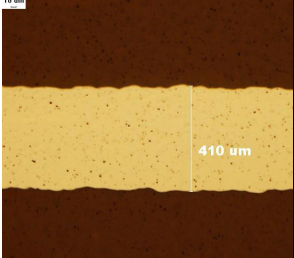
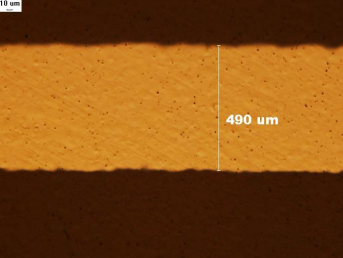
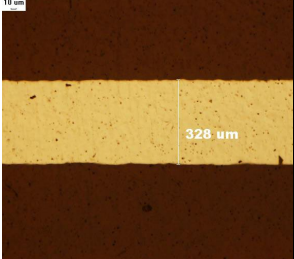

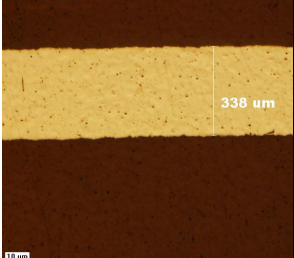
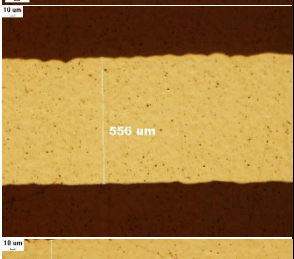
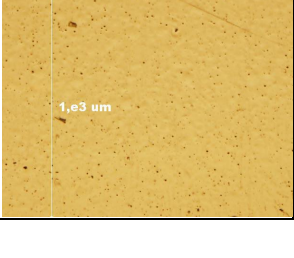
Αφού πραγματοποιήθηκαν οι εναποθέσεις, μελετήθηκαν τα δείγματα στο οπτικό μικροσκόπιο και εξάχθηκαν συγκριτικές παρατηρήσεις του πλάτους των μασκών εναπόθεσης που χρησιμοποιήθηκαν με το πλάτος των τελικών εναποθέσεων χαλκού και αλουμινίου, στο Karton υπόστρωμα. Στον Πίνακας 4.9 φαίνονται οι εικόνες που λήφθηκαν για τα διαφορετικά δείγματα στο οπτικό μικροσκόπιο. Όπως φαίνεται στον Πίνακας 4.10, υπάρχουν αποκλίσεις στο πλάτος κοπής της κάθε μάσκας και στο πλάτος της τελικής εναπόθεσης, τόσο στην περίπτωση του χαλκού όσο και στην περίπτωση του αλουμινίου. Μεγαλύτερες αποκλείσεις, έως και +62 μm, παρουσιάζονται στην περίπτωση της εναπόθεσης με εξάχνωση. Στις περιπτώσεις που το πλάτος της εναπόθεσης είναι το ελάχιστο, δηλαδή 350 μm, παρατηρούνται αυξημένες αποκλείσεις και στις δύο περιπτώσεις εναπόθεσης, οι οποίες μειώνονται καθώς το πλάτος των IDE αυξάνεται. Στο μέγιστο, δηλαδή τα 1000 μm πλάτος μετάλλου, η απόκλιση είναι μηδενική.

Για τα διαφορετικά πάχη μάσκας, αλλά όμοιες γεωμετρίες, παρατηρούνται αποκλίσεις στις εναποθέσεις των μετάλλων. Αυτό οφείλεται μεταξύ άλλων στο φαινόμενο της σκίασης, στην μείωση δηλαδή του υλικού που εναποτίθεται σε περιοχές όπου δεν εκτίθενται άμεσα στην πηγή του υλικού, λόγω της ύπαρξης της μάσκας. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Οι μεγαλύτερες αποκλείσεις που παρουσιάζονται ανάμεσα στο πλάτος κοπής και εναπόθεσης στην περίπτωση της μεθόδου εναπόθεσης με εξάχνωση, οφείλονται στην υψηλή θερμοκρασία που χρησιμοποιείται κατά την εξάχνωση η οποία μπορεί να προκαλέσει την παραμόρφωση της μάσκας, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαφορά μεταξύ του πλάτους της μάσκας και του πλάτους του εναποτιθέμενου υλικού. Επιπλέον, το εξατμιζόμενο υλικό μπορεί να μην είναι απόλυτα ομοιόμορφο, οδηγώντας σε πρόσθετη μεταβλητότητα στο εναποτιθέμενο φιλμ και ενδεχομένως σε μεγαλύτερες αποκλείσεις. Στην περίπτωση της εναπόθεσης με ιοντοβολή οι αποκλίσεις μεταξύ της κοπής της μάσκας και της εναπόθεσης οφείλονται και σε αυτή την περίπτωση σε φαινόμενα σκίασης αλλά και σε παράγοντες όπως η μη ομοιόμορφη εκτόξευση του υλικού, αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων και της μάσκας και σε μεταβολές στην επιφάνεια του υποστρώματος.



Σχήμα 4.13 Φαινόμενο σκίασης κατά την εναπόθεση

Τέλος, μελετήθηκε η απόκλιση που αφορά τον αρχικό σχεδιασμό των γεωμετριών των IDE με το τελικό πλάτος εναπόθεσης των μετάλλων στο υπόστρωμα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.10, εκτός από τις περιπτώσεις όπου το πλάτος των μεταλλικών διαδρόμων των IDE σχεδιάστηκε και εναποτέθηκε στα 1000 μm, σε όλα τα άλλα δείγματα υπάρχουν αποκλίσεις, κυρίως αρνητικές, δηλαδή εναποτέθηκε λιγότερο υλικό από αυτό που όριζε η γεωμετρία των μασκών, για λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω. Στην περίπτωση της εναπόθεσης με ιοντοβολή, τα δείγματα παρουσιάζουν την μικρότερη απόκλιση σχετικά με την επιθυμητή γεωμετρία, με ποσοστά 0.57% και 2.00%, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση της εναπόθεσης με εξάχνωση, με την μέγιστη να φτάνει σε ποσοστό απόκλισης 17.14%, από τον αρχικό σχεδιασμό. Αν και μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο καθώς έχουν ήδη παρατηρηθεί και μελετηθεί αποκλίσεις στον σχεδιασμό των μασκών και των εναποθέσεων για το συγκεκριμένο δείγμα, ενδεχόμενος αυτό να επηρεάσει τα σήματα κατά τις διαδικασίες των μετρήσεων.

Δείγματα Cr-Cu		Δείγματα Al	
1-KA22_3Cu		1-KA21_3Al	
1-KB22_3Cu		1-KA23_3Al	
1-KC22_3Cu		1-KA24_3Al	
		1-KB21_3Al	
		1-KC21_3Al	

Πίνακας 4.9 Εικόνες δειγμάτων εναπόθεσης Cr-Cu και Al με χρήση οπτικού μικροσκοπίου

Μάσκα Εναπόθεσης	Δείγμα	Πλάτος IDE σύμφωνα με τον σχεδιασμό (μm)	Πλάτος κοπής μάσκας (μm)	Πλάτος εναπόθεσης (μm)
A22	1-KA22_3Cu	350	362	348
B22	1-KB22_3Cu	500	490	490
C22	1-KC22_3Cu	1000	1000	1000
A21	1-KA21_3Al	350	352	410
A23	1-KA23_3Al	350	366	328
A24	1-KA24_3Al	350	342	338
B21	1-KB21_3Al	500	494	556
C21	1-KC21_3Al	1000	1000	1000

Απόκλιση πλάτους εναπόθεσης με πλάτος κοπής μάσκας (μm)	Απόκλιση πλάτους τελικής εναπόθεσης με πλάτος σχεδιασμού IDE (μm)	Ποσοστό απόκλισης (%)
-14	-2	0.57
0	-10	2.00
0	0	0.00
<b>+58</b>	<b>+60</b>	<b>-17.14</b>
-38	-22	6.29
-4	-12	3.43
+62	+56	-11.20
0	0	0,00

Πίνακας 4.10 Συγκριτικά χαρακτηριστικά πλάτους κοπής μάσκας και πλάτους εναπόθεσης

### 4.6.3 Εύκαμπτα τυπωμένα κυκλώματα

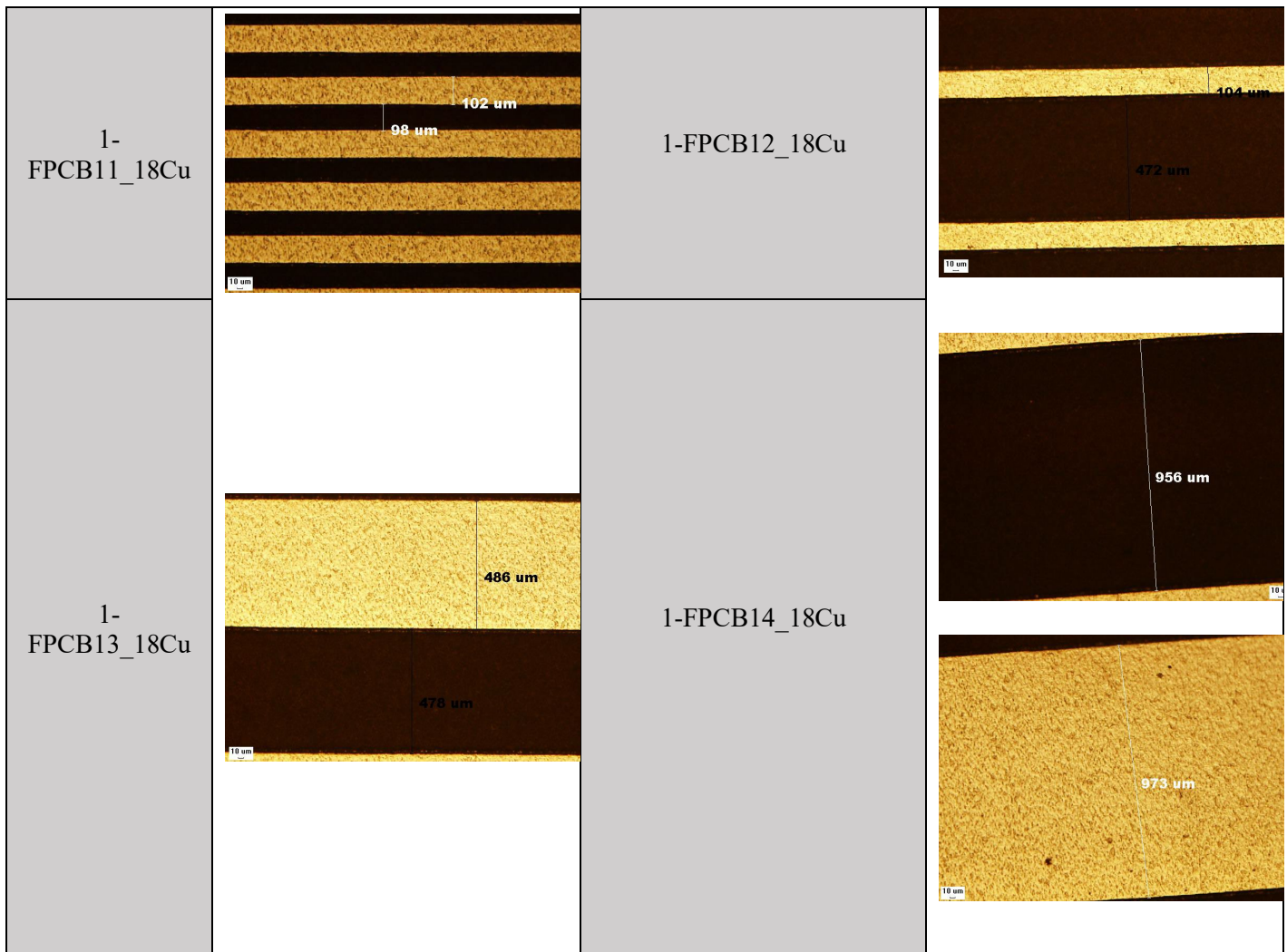
Με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου, μελετήθηκαν και τυχόν αποκλίσεις στην κατασκευή των FPCB, από την κατασκευάστρια εταιρία, καθώς και σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία κατασκευή ενδέχεται να εισάγει παραμέτρους που επηρεάζουν τα πλάτη των τελικών εναποθέσεων του χαλκού, στο εύκαμπο υπόστρωμα. Στον Πίνακα 4.12 φαίνονται οι εικόνες που λήφθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο για τα διαφορετικά δείγματα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.11, παρατηρήθηκαν αποκλίσεις στις γεωμετρικές απαιτήσεις των FPCB, παρόμοιου μεγέθους με αυτές στην περίπτωση των εναποθέσεων με ιοντοβολή και εξάχνωση. Παρατηρείται ότι καθώς το πλάτος του χαλκού αυξάνεται, αυξάνεται και η απόκλιση από τον αρχικό σχεδιασμό. Σε αυτή την μέθοδο κατασκευής οι αποκλίσεις μπορούν να θεωρηθούν με ασφάλεια αμελητέες και δεν επηρεάζουν με κάποιο τρόπο την τελική απόδοση του αισθητήρα, καθώς είναι στην τάξη των μερικών μικρών. Πιθανές αιτίες για την αποκλίσεις, προκύπτουν συνήθως κατά την φάση

κατασκευής των κυκλωμάτων και αναμενόμενες, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η ροή του υλικού αλλά και παράμετροι επεξεργασίας όπως ανομοιόμορφη επιφάνεια υποστρώματος και διακυμάνσεις στο πάχος του εφαρμοζόμενου υλικού.

Συγκρίνοντας τις διάφορες αποκλίσεις που μελετήθηκαν για τις μεθόδους εναπόθεσης και την κατασκευή των FPCB, για την κατασκευή του αισθητήρα αφής με IDE, εξάγονται κάποια βασικά συμπεράσματα, τα οποία ωστόσο δεν αναδεικνύουν εμφανώς πια μέθοδο υπερισχύει, μελετώντας αποκλειστικά της αποκλίσεις των εναποθέσεων, για την κατασκευή του αισθητήρα αφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στην περίπτωση της κατασκευής του αισθητήρα με τις μεθόδους εναπόθεσης, το ελάχιστο πλάτος των IDE είναι 350  $\mu\text{m}$ , καθώς δεν ήταν εφικτό να κατασκευαστεί μάσκα με μικρότερο πλάτος κοπής. Αντίθετα, η κατασκευή του αισθητήρα ως FPCB, δεν εισάγει αυτόν τον περιορισμό και είναι εφικτή η κατασκευή γεωμετρικών IDE με μικρότερα πλάτη. Επιπλέον, στην περίπτωση των μεθοδολογιών εναπόθεσης η χρήση μασκών εισάγει ενδιάμεσες αποκλίσεις που προκύπτουν από την κοπή της μάσκας, μέχρι να γίνει η τελική εναπόθεση, που εισάγει ούτως η άλλως κάποια απόκλιση. Αυτό αποφεύγεται στην περίπτωση των FPCB, καθώς το επιθυμητό πεπλεγμένο μοτίβο, τυπώνεται κατευθείαν πάνω στο υπόστρωμα βάση του σχεδιασμού.

Γεωμετρία	Δείγμα	Πλάτος χαλκού βάση σχεδιασμού ( $\mu\text{m}$ )	Πλάτος εναπόθεσης ( $\mu\text{m}$ )	Απόκλιση εναπόθεσης ( $\mu\text{m}$ )	Ποσοστό Απόκλισης (%)
<b>FPCB_1</b>	1-FPCB11_18Cu	100	102	+2	-2.00
<b>FPCB_2</b>	1-FPCB12_18Cu	100	104	-4	-4.00
<b>FPCB_3</b>	1-FPCB13_18Cu	500	486	-14	2.80
<b>FPCB_4</b>	1-FPCB14_18Cu	1000	973	-27	2.70

Πίνακας 4.11 Συγκριτικά χαρακτηριστικά και αποκλίσεις δειγμάτων εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων



Πίνακας 4.12 Εικόνες δειγμάτων FPCB με χρήση οπτικού μικροσκοπίου

#### 4.6.4 Ποιοτικός έλεγχος δειγμάτων και υποστρώματος

Ο ποιοτικός έλεγχος των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου και αφορά την οπτική θεώρηση των δειγμάτων. Σκοπός είναι να εντοπιστούν ατέλειες στην εναπόθεση των μετάλλων και γενικότερα σημεία που μπορεί να επηρεάζουν την αγωγιμότητα των ηλεκτροδίων και να δημιουργήσουν δυσλειτουργίες στις πειραματικές μετρήσεις. Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται μεγεθυμένο κατά 10 φορές Karton υλικό, που χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα για τις εναποθέσεις με ιοντοβολή και εξάχνωση. Διαπιστώνεται η πορώδης επιφάνεια του Karton που προκύπτει κυρίως από την διαδικασία κατασκευής του υλικού, αλλά και ως αποτέλεσμα της έκθεσης του σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμότητα και υγρασία. Η πορώδης επιφάνεια του Karton, είναι εμφανής και στα σημεία που

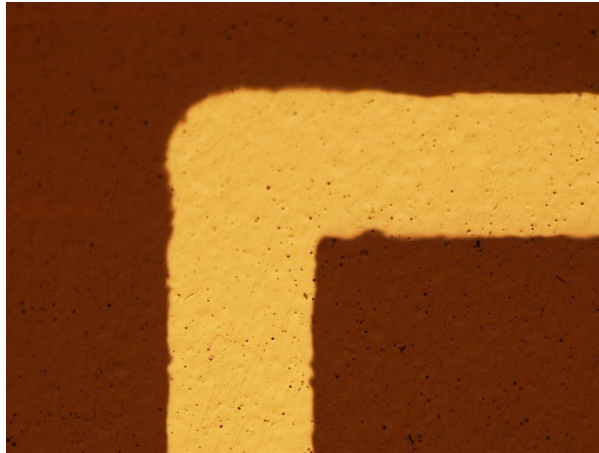
υπάρχει εναποτιθέμενο μέταλλο, όπως φαίνεται στις διάφορες εικόνες, παρακάτω. Η πορώδης επιφάνεια μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην πρόσφυση και την ομοιομορφία του εναποτιθέμενου υλικού, καθώς και στη μορφολογία και τη δομή της εναπόθεσης. Οι πόροι στην επιφάνεια του υποστρώματος μπορούν να λειτουργήσουν ως παγίδες για το εναποτιθέμενο υλικό, μειώνοντας τη συνολική πρόσφυση του στο υπόστρωμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ασθενέστερους δεσμούς και σε μια πιο πορώδη εναπόθεση που είναι επιρρεπής σε αποκόλληση ή ρωγμές. Στις εναποθέσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για την παρούσα διπλωματική εργασία το εναποτιθέμενο μέταλλο δεν έχει γεμίσει πλήρως τους πόρους του υποστρώματος, με αποτέλεσμα μια πιο πορώδη δομή της επιφάνειας των δειγμάτων που έχουν κατασκευαστεί με εναπόθεση ιοντοβολής και εξάχνωσης.



*Σχήμα 4.14 Υπόστρωμα Karton μεγεθυμένο 10 φορές στο οπτικό μικροσκόπιο*

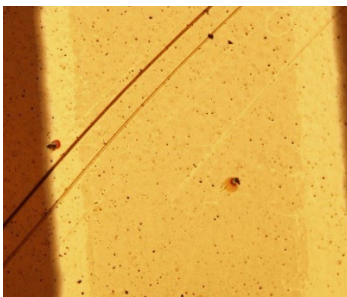
Η επόμενη παρατήρηση που εξάγεται από την διαδικασία του ποιοτικού ελέγχου αφορά την παρατήρηση που φαίνεται και στο Σχήμα 4.15, ότι οι ακμές ενός εναποτιθέμενου μετάλλου είναι στρογγυλεμένες και όχι γωνιώδεις, σύμφωνα με την μάσκα εναπόθεσης ενώ όπως είναι εμφανές σε όλες τις εικόνες που έχουν παρουσιαστεί, οι γραμμές των IDE δεν είναι ευθείες αλλά παρουσιάζουν κυματώσεις. Αυτή μορφολογική διαφορά επηρεάζεται από παραμέτρους όπως ο ρυθμός της εναπόθεσης, καθώς ένας βραδύτερος ρυθμός μπορεί να δώσει περισσότερο χρόνο στο εναποτιθέμενο μέταλλο να απλωθεί και να σχηματίσει μια στρογγυλεμένη ακμή και η κινητική ενέργεια των μεταλλικών ιόντων, καθώς συγκρούονται και απλώνονται στην επιφάνεια του υποστρώματος, κατά την εναπόθεση.



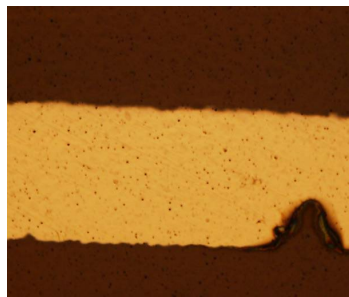


*Σχήμα 4.15 Δείγμα με στρογγυλεμένες άκρες*

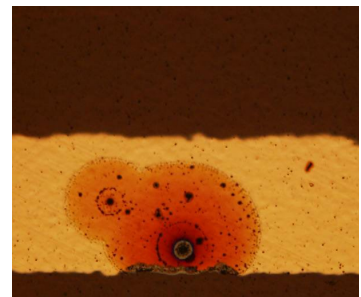
Η παρατήρηση των δειγμάτων, ώστε να μελετηθεί η ποιότητα της εναπόθεσης του μετάλλου των IDE, είναι σημαντική καθώς εξάγονται συμπεράσματα για την συνέπεια του υλικού κατά μήκος των μεταλλικών διαδρομών, σε ό,τι αφορά της διασφάλιση ότι το υλικό που έχει εναποτεθεί δεν περιέχει ρωγμές, αποφλοιωμένα σημεία ή διαβρώσεις, που μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργικότητα των IDE. Στο Σχήμα 4.16 φαίνονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις δειγμάτων όπου ο ποιοτικός έλεγχος ανέδειξε ρωγμές στην εναπόθεση, σημεία χωρίς εναποτιθέμενο υλικό και σημεία όπου το μέταλλο δεν έχει εναποτεθεί επιτυχώς στο υπόστρωμα.



*(a)*



*(b)*



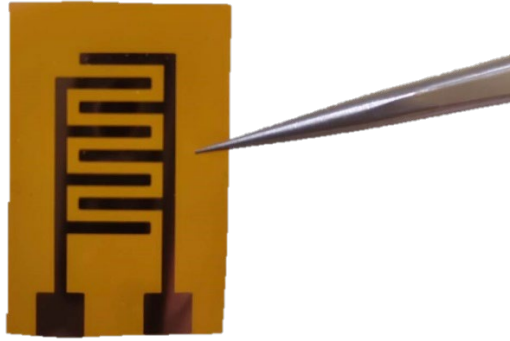
*(c)*

*Σχήμα 4.16 Εναποθέσεις με προβληματικά χαρακτηριστικά*

## 4.7 Κατασκευή και τελική δομή του αισθητήρα

Με την ολοκλήρωση των διαδικασιών εναπόθεσης των μετάλλων αλουμινίου και χαλκού, στο εύκαπτο υπόστρωμα Karton και την κατασκευή των εύκαμπτων τυπωμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων, τα δείγματα κόπηκαν περιμετρικά, ώστε να αφαιρεθεί το περιττό εναποτεθειμένο υλικό στο υπόστρωμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17, ενδεικτικά για ένα δείγμα. Στην περίπτωση των FPCB, η πλακέτα με τα τέσσερα διαφορετικά δείγματα κόπηκε με ψαλίδι καθαρισμένο σε προπανόλη και ακετόνη και διαχωρίστηκαν τα δείγματα. Συγκεντρώθηκαν δώδεκα (12) διαφορετικές γεωμετρικές αισθητήρων οι οποίες δομήθηκαν και κολλήθηκαν σε ανθρώπινο δάκτυλο, μεμονωμένα. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως υπόστρωμα για τις διαφορετικές εναποθέσεις, karton και πολυιμίδιο, στην δομή του αισθητήρα αποτέλεσαν την επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το ανθρώπινο δάκτυλο. Προκειμένου να περιοριστούν φαινόμενα φόρτισης και ανταλλαγής ηλεκτρικών φορτίων του ανθρώπινου δέρματος με τον αισθητήρα, το δάκτυλο καλύφθηκε με γάντι νιτριλίου και τα υποστρώματα κολλήθηκαν σε αυτό με βιοσυμβατή ταινία διπλής όψεως. Το υλικό επαφής του αισθητήρα με τις διαφορετικές επιφάνειες υλικών και υφών που μελετήθηκαν στις πειραματικές διαδικασίες, τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος των ηλεκτροδίων, καλύπτοντας τα, και κολλήθηκε με το υπόστρωμα, με μη αγώγιμη ταινία karton. Ως υλικά επαφής, χρησιμοποιήθηκαν φύλλα karton 0.075 mm, τα οποία κόπηκαν με ψαλίδι και καθαρίστηκαν από ρύπους και σκόνη με φυσητήρα αέρα, πριν την κόλληση τους στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Κάθε βήμα για την διαδικασία δομής και κόλλησης του αισθητήρα στο ανθρώπινο δάκτυλο φαίνεται στο Σχήμα 4.19. Η διάταξη σε σχηματικό τομής, φαίνεται στο Σχήμα 4.18.

Οι τετράγωνες μεταλλικές διατάξεις (pads) που σχεδιάστηκαν ως συνέχεια των IDE και φαίνονται στα διάφορα σχέδια, χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να κολληθούν σε αυτά χάλκινοι αγώγιμοι διάδρομοι ως επεκτάσεις και να καταγραφεί η ροή των ηλεκτρικών φορτίων μεταξύ των IDE και σύμφωνα με το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά την επαφή του αισθητήρα με τα διαφορετικά υλικά και τις διαφορετικές υφές Braille, ώστε να μελετηθούν τα τριβοηλεκτρικά σήματα που προκύπτουν. Για την καταγραφή του σήματος σε παλμογράφο, κολλήθηκε ταινία χαλκού πάχους 50 μm στα pad, καλυμμένη από μη αγώγιμη ταινία karton για την μείωση του θορύβου και στο άκρο της τοποθετήθηκε εύκαπτο καλώδιο, με κόλληση.



Σχήμα 4.17 Περιμετρικά κομμένο δείγμα C21



Σχήμα 4.18 Τομή δομής αισθητήρα

-  Δέρμα
-  Γάντι νιτρίλιου
-  Double side tape
-  IDE fingers
-  KAPTON TAPE

(a) Μπροστινή και πίσω όψη FPCB με τους χάλκινους διαδρόμους καλυμμένους από φύλλο Karton, συγκρατούμενο με μη αγώγιμη ταινία Karton



(b) Κόλληση του αισθητήρα με βιοσυμβατή ταινία διπλής όψεως, σε ανθρώπινο δάχτυλο καλυμμένο με γάντι νιτριλίου



(c) Κόλληση ταινίας χαλκού και καλωδίου μικρού μήκους, προκειμένου να καταγραφούν τα τριβοηλεκτρικά σήματα του αισθητήρα κατά την επαφή του με τις διαφορετικές επιφάνειες και κόλληση μη αγώγιμης ταινίας Karton στα σημεία που υπάρχει εκτεθειμένα αγώγιμα μεταλλικά στοιχεία, για μείωση του θορύβου.



(d) Πάχος του αισθητήρα στην επιφάνεια του δαχτύλου



Σχήμα 4.19 Στάδια δομής αισθητήρα πάνω στο ανθρώπινο δάχτυλο

## 4.8 Κατάλογος δειγμάτων και ονοματολογία αισθητήρων

Στην παρούσα ενότητα παρατίθεται ο πλήρης κατάλογος των δειγμάτων και των αισθητήρων που δομήθηκαν και μελετήθηκαν, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών τους, στον Πίνακα 4.7. Σκοπός είναι η ενότητα αυτή να αποτελέσει σημείο αναφοράς για το επόμενο κεφάλαιο.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ	ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ	ΥΛΙΚΟ ΕΠΑΦΗΣ	ΜΑΣΚΑ	ΜΕΤΑΛΛΟ	ΠΑΧΟΣ
1-KA22_3Cu	Kapton	Kapton	A22	Cu	300 nm
1-KB22_3Cu	Kapton	Kapton	B22	Cu	300 nm
1-KC22_3Cu	Kapton	Kapton	C22	Cu	300 nm
1-KA21_3Al	Kapton	Kapton	A21	Al	300 nm
1-KA23_3Al	Kapton	Kapton	A23	Al	300 nm
1-KA24_3Al	Kapton	Kapton	A24	Al	300 nm
1-KB21_3Al	Kapton	Kapton	B21	Al	300 nm
1-KC21_3Al	Kapton	Kapton	C21	Al	300 nm
1-FPCB11_18Cu	PI	Kapton		Cu	18 μm
1-FPCB12_18Cu	PI	Kapton		Cu	18 μm
1-FPCB13_18Cu	PI	Kapton	-	Cu	18 μm
1-FPCB14_18Cu	PI	Kapton		Cu	18 μm

Πίνακας 4.13 Ονοματολογία αισθητήρων

# Κεφάλαιο 5

## Πειραματική διαδικασία και χαρακτηρισμός

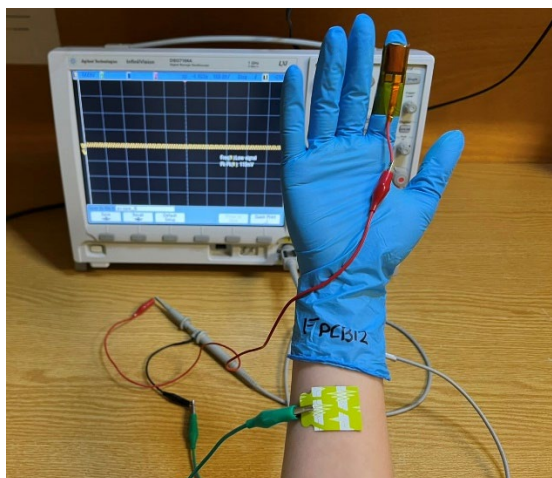
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής περιγραφή των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και των μετρήσεων που έγιναν, συμπεριλαμβανομένης της διάταξης, των συνθηκών και των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και μελετήθηκαν. Αναλύονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, επισημαίνοντας τα βασικά ευρήματα, με στόχο να εξαχθούν συμπεράσματα για την λειτουργία του αισθητήρα αφής και να γίνουν συγκρίσεις πάνω στα διαφορετικά υλικά εναπόθεσης και τις διαφορετικές γεωμετρικές των ηλεκτροδίων. Στόχος είναι να υπάρξει μια ενδελεχής και ολοκληρωμένη κατανόηση της απόδοσης του αισθητήρα και να καταδειχθούν οι δυνατότητές του για πρακτικές εφαρμογές.

### 5.1 Πειραματική διάταξη

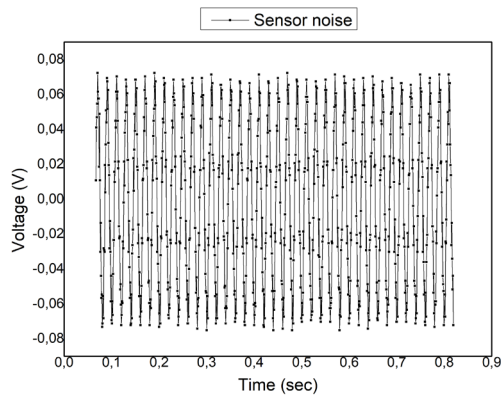
Η πειραματική διάταξη για την μέτρηση της απόδοσης του τριβηλεκτρικού αισθητήρα αφής σχεδιάστηκε έτσι ώστε τα διαφορετικά δείγματα αισθητήρων που κατασκευάστηκαν, να αξιολογηθούν υπό ελεγχόμενες συνθήκες, στον μέγιστο δυνατό βαθμό. Για την οπτική αναπαράσταση των ηλεκτρικών σημάτων που παράγονται από την επαφή του αισθητήρα με τις διαφορετικές επιφάνειες, χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος (Keysight (Agilent) DSO7104A), του οποίου η συνδεσμολογία με τον αισθητήρα αφής φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Η απευθείας σύνδεση του αισθητήρα στον ανιχνευτή παλμών του παλμογράφου εισάγει θόρυβο στα ληφθέντα σήματα, λόγω της γραμμής τροφοδοσίας του και των λοιπών εργαστηριακών οργάνων που βρίσκονται συνδεδεμένα σε αυτήν, σε συχνότητα 50 Hz. Λόγω και του μήκους των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν, κατά την συνδεσμολογία, ώστε να υπάρχει άνεση κινήσεων για τις διαφορετικές μετρήσεις του αισθητήρα με τις επιφάνειες, το πλάτος του θορύβου ενδεικτικά για έναν αισθητήρα, μετρήθηκε στα 230 mV<sub>pp</sub> και φαίνεται στο Σχήμα 5.2 (α). Αυτό το φαινόμενο, απαιτήθηκε να περιοριστεί, καθώς ορισμένα από τα ληφθέντα σήματα παρουσίαζαν μέγιστης τιμή, της τάξης των mV, με αποτέλεσμα ο θόρυβος να εμποδίζει την καταγραφή τους. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρόδια (F-3001), αντίστοιχα με αυτά που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρομυογραφήματα και κολλήθηκαν στην επιφάνεια του δέρματος, όπως φαίνεται στο

Σχήμα 5.1. Η συγκολλητική τους πλευρά αποτελείται από μη τοξική και υποαλλεργική ουσία. Ως αποτέλεσμα το πλάτους του θορύβου μειώθηκε στα 30 mV<sub>pp</sub>, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 (β).

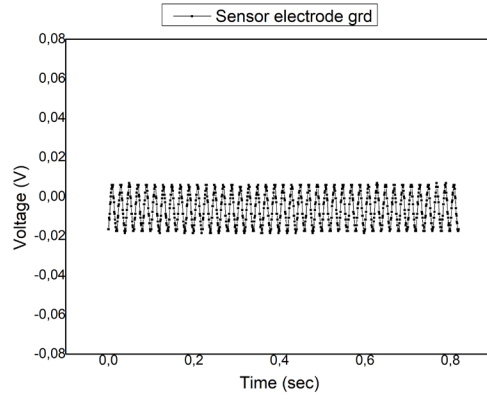
Οι διαφορετικοί αισθητήρες αφής, μελετήθηκαν ως προς την ικανότητα τους να επιστρέφουν ένα ηλεκτρικό σήμα, ύστερα από την κάθετη επαφή τους με το προς μελέτη υλικό και την απομάκρυνση τους από αυτό (tapping) και ως προς την ικανότητα τους να ανιχνεύουν ανωμαλίες σε επιφάνειες, ολισθαίνοντας σε αυτές, για μερικά δευτερόλεπτα. Η ενεργοποίηση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου με την μέθοδο του «χτύπηματος» των υλικών, επιλέχθηκε να μελετηθεί για τις εξής επιφάνειες: Γυαλί, ξύλο, χαρτί, χαλκό και δέρμα, ενώ για την ανίχνευση της υφής των επιφανειών, χρησιμοποιήθηκαν παραδείγματα ανάγλυφων γραμμάτων και αριθμών, από την γραφή Braille. Η γραφή των συμβόλων Braille, έγινε σε πλαστικές διαφάνειες εκτύπωσης καθώς η φθορά που προκαλείται στο χαρτί από το χτύπημα και την ολίσθηση των αισθητήρων, αλλοιώνει το ανάγλυφο και τα καταγραφόμενα σήματα δεν δύναται να θεωρηθούν έγκυρα. Στο Σχήμα 5.3 φαίνονται οι επιφάνειες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και στο Σχήμα 5.4 φαίνεται μια ενδεικτική τύπωση γραφής Braille, σε πλαστικό φύλλο.



Σχήμα 5.1 Συνδεσμολογία αισθητήρα με τον παλμογράφο



(α)



(β)

Σχήμα 5.2 Σήματα εμφάνισης θόρυβο χωρίς την χρήση ηλεκτροδίου για γείωση (α) και σήμα ύστερα απο την σύνδεση της γείωσης του παλμογράφου με ηλεκτροδίου τοποθετημένο στο ανθρώπινο δέρμα (β)



Σχήμα 5.3 Επιφάνειες υλικών





Σχήμα 5.4 Ανάγλυφο επιφάνειας γραφής Braille τυπωμένη σε πλαστικό φύλλο

## 5.2 Χαρακτηρισμός αισθητήρων σε επιφάνειες με κάθετη επαφή και διαχωρισμό

Οι διαφορετικοί αισθητήρες που κατασκευάστηκαν, μελετήθηκαν ως προς το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται όταν έρχονται σε επαφή με υλικά που συναντώνται σε επιφάνειες με τις οποίες ο άνθρωπος έρχεται σε επαφή καθημερινά, όπως είναι το χαρτί και το ξύλο. Ο χαρακτηρισμός αυτός πραγματοποιήθηκε με την κάθετη επαφή του αισθητήρα στην επιφάνεια και τον διαχωρισμό από αυτής, δηλαδή την λειτουργία του «χτυπήματος» (tapping), όπως περιεγράφηκε στην ενότητα που αφορά τις τριβηλεκτρικές νανογεννήτριες. Η επαφή του αισθητήρα με την επιφάνεια ενεργοποιεί την εμφάνιση του τριβηλεκτρικού φαινομένου, παράγοντας ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό το φορτίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της επιφάνειας, όπως η σκληρότητα, η τραχύτητα και η πρόσφυση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα ηλεκτρικά σήματα που έχουν καταγραφεί μελετήθηκαν προκειμένου να είναι εφικτός ο διαχωρισμός των υλικών και η αναγνώριση του υλικού κάθε επιφάνειας, με βάση την μορφολογία του σήματος και την μέγιστη τιμή του. Η συχνότητα του χτυπήματος και η πίεση της επαφής του αισθητήρα με τις επιφάνειες ρυθμίζονται από τον άνθρωπο που χρησιμοποιεί τον αισθητήρα αφής, ώστε να έρθει σε επαφή με την εκάστοτε επιφάνεια. Διαφορετικές συνθήκες αφής οδηγούν στην λήψη διαφορετικού τύπου πληροφοριών σχετικά με την επιφάνεια που ανιχνεύεται. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τον σαφή διαχωρισμό και την αναγνώριση των επιφανειών αλλά και σε πιο σύνθετες εφαρμογές, όπως η δημιουργία χάρτη της επιφάνειας, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως ο ποιοτικός έλεγχος στην κατασκευή, η ανάλυση επιφάνειας στην επιστημονική έρευνα ή η αναγνώριση υφής στη ρομποτική.

## 5.2.1 Ανίχνευση υλικού επαφής και μελέτη παραμέτρων των επιφανειών

Για τους δώδεκα αισθητήρες που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν, λήφθηκαν και μελετήθηκαν τα τριβηλεκτρικά σήματα που προκύπτουν από την επαφή του κάθε αισθητήρα με τις διαφορετικές επιφάνειες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, το τριβηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει όταν δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή και στη συνέχεια διαχωρίζονται, προκαλώντας μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου και με αποτέλεσμα ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα. Στα σχήματα που ακολουθούν, τα διαφορετικά αυτά ηλεκτρικά σήματα αναλύθηκαν ως προς την διαφορετική κυμάτωση που παρουσιάζουν, ώστε να διαπιστωθεί εάν είναι εφικτό με τους αισθητήρες αφής, να διαχωριστούν οι επιφάνειες μεταξύ τους. Επιπλέον, εξάχθηκαν συμπεράσματα για τις μέγιστες τιμές τάσης, βάση της μορφολογίας κάθε επιφάνειες και της αγωγιμότητας της. Οι δώδεκα διαφορετικοί αισθητήρες ομαδοποιήθηκαν προς μελέτη σε τρεις κατηγορίες:

- Αισθητήρες με εναπόθεση Cr-Cu
- Αισθητήρες με εναπόθεση Al
- FPCB

Βασική παράμετρος που μελετάται προκειμένου να μελετηθούν στην συνέχεια τα τριβηλεκτρικά σήματα επαφής, είναι η τραχύτητα των επιφανειών που έχουν επιλεγθεί. Μελετώντας μικροσκοπικά τις διαφορετικές επιφάνειες, είναι γνωστό ότι η επιφανειακή τους ομαλότητα δεν είναι λεία όπως ενδέχεται να φαίνεται μακροσκοπικά, όπως παραδείγματος χάριν στο γυαλί. Κάθε επιφάνεια παρουσιάζει ένα επίπεδο τραχύτητας, το οποίο η επαφή με τον αισθητήρα ανιχνεύει και αποτυπώνεται στα τριβηλεκτρικά σήματα. Ένα υλικό θεωρείται ότι έχει τραχιά επιφάνεια όταν η υφή του είναι ακανόνιστη και ανομοιόμορφη, με μεγάλο αριθμό μικρών εξογκωμάτων, κοιλάδων και άλλων επιφανειακών χαρακτηριστικών ορατών σε μακροσκοπική κλίμακα. Μία στατική παράμετρος που χρησιμοποιείται προκειμένου να χαρακτηριστεί η τραχύτητα μίας επιφάνειας είναι ο μέσος όρος τραχύτητας (Roughness Average, Ra). Το Ra είναι ένα μέτρο της μέσης υψομετρικής διαφοράς μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου της επιφάνειας ενός υλικού για ένα συγκεκριμένο μήκος. Ο μέσος όρος τραχύτητας (Ra) του χαρτιού, του ανθρώπινου δέρματος, του χαλκού, του γυαλιού και του ξύλου

μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το συγκεκριμένο δείγμα και τις συνθήκες. Ωστόσο υπάρχουν κάποιες γενικές παρατηρήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων στην συνέχεια, όπως ότι το γυαλί είναι πιο λείο από το ξύλο και λοιπά.

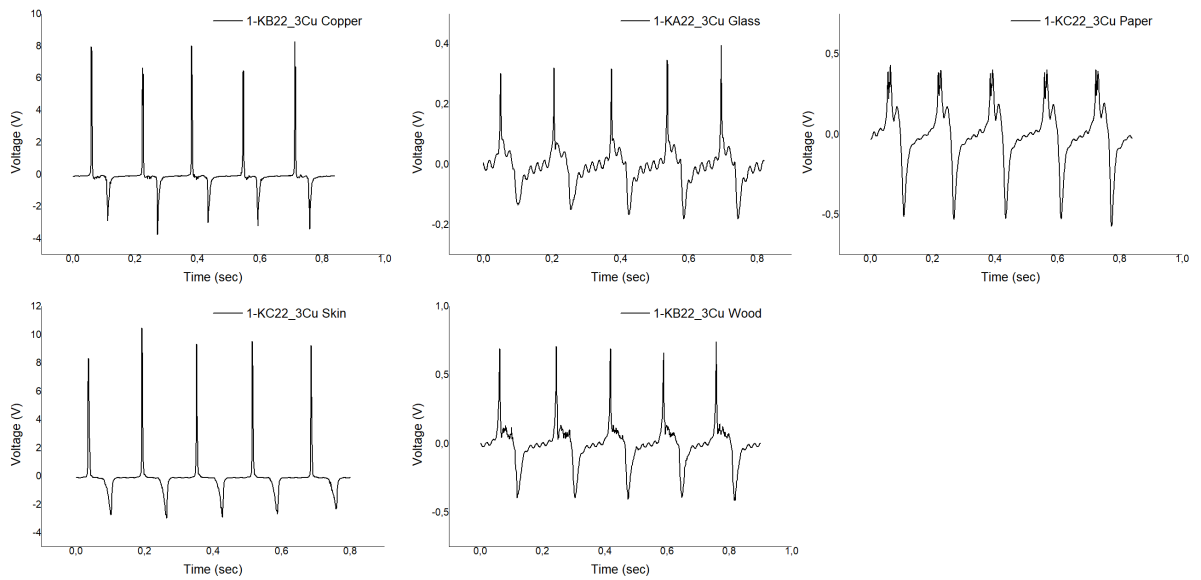
### **5.2.1.1 Αισθητήρες με εναπόθεση Cr-Cu**

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται ένα αντιπροσωπευτικό σήμα για κάθε υλικό σε επαφή με αισθητήρα εναπόθεσης μετάλλου ηλεκτροδίου Cr – Cu. Για τις τρεις διαφορετικές γεωμετρίες αισθητήρων εναπόθεσης Cr – Cu, η μορφολογία του σήματος, δηλαδή ο τρόπος κυμάτωσης των παλμών, αντιπροσωπεύεται από τα σήματα που φαίνονται στο Σχήμα 5.5. Οι παλμοί που φαίνονται στα διαφορετικά σήματα, περιλαμβάνουν θετικές και αρνητικές αιχμές τάσης που υποδηλώνουν την στιγμή της επαφής του αισθητήρα με την επιφάνεια και στην συνέχεια την απομάκρυνση του από αυτήν. Ο τρόπος με τον οποίο το σήμα μεταπίπτει από την θετική ακμή στην αρνητική και η μέγιστη τιμή τάσης του σήματος, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για το κάθε υλικό και συμβάλουν στον διαχωρισμό των επιφανειών, ενώ μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την δύναμη που ασκήθηκε στην επιφάνεια και την διάρκεια επαφής.

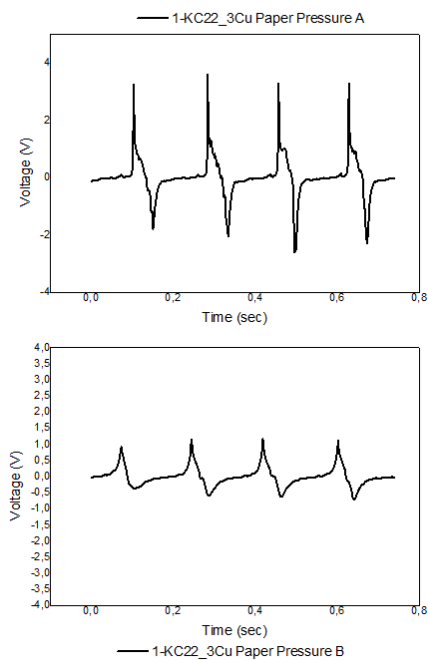
Γίνεται άμεσα αντιληπτό, παρατηρώντας τα σήματα οπτικά, ότι κάθε επιφάνεια μπορεί να διαφοροποιηθεί από την άλλη, καθώς κάθε υλικό επιστρέφει ως ηλεκτρικό σήμα το δικό του μοναδικό αποτύπωμα, όταν ο αισθητήρας αφήνεται σε επαφή με την επιφάνεια του. Σύμφωνα με την τριβοηλεκτρική σειρά, στην περίπτωση επαφής του karton υλικού επαφής των αισθητήρων με τις προς ανίχνευση επιφάνειες του χαλκού, του χαρτιού και του ξύλου, θα φορτιστεί αρνητικά και για τα υπόλοιπα υλικά θετικά. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών φαίνεται να επηρεάζει την μέγιστη τιμή των σημάτων. Στην περίπτωση των υλικών που είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί, όπως ο χαλκός και το ανθρώπινο δέρμα, οι κορυφές των σημάτων που αντιστοιχούν στην επαφή του αισθητήρα με τα υλικά, παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη τιμή τάσης από αυτή των υλικών που δεν είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί. Αυτό συμβαίνει διότι τα υλικά που είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί έχουν χαμηλή αντίσταση στη ροή των ηλεκτρονίων και μπορούν να μεταφέρουν αποτελεσματικά ηλεκτρόνια μεταξύ διαφορετικών υλικών. Ως αποτέλεσμα, όταν ο τριβοηλεκτρικός αισθητήρας έρθει σε επαφή με καλούς ηλεκτρικούς αγωγούς, υπάρχει μεγάλη ροή ηλεκτρονίων, που οδηγεί σε υψηλή τιμή τάσης και αντίθετα για τους κακούς ηλεκτρικούς αγωγούς, όπως το ξύλο, το χαρτί και το γυαλί. Υψηλότερη τιμή τάσης υποδηλώνει ισχυρότερο τριβοηλεκτρικό φαινόμενο και μια χαμηλότερη τιμή τάσης υποδηλώνει

ασθενέστερο τριβοηλεκτρικό φαινόμενο. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες τιμές τάσης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως οι συνθήκες και η διάρκεια της επαφής, η υγρασία και η θερμοκρασία.

Κάθε επιφάνεια, όπως έχει ήδη αναφερθεί παρουσιάζει διαφορετική τραχύτητα και κάθε δείγμα υλικού που έχει χρησιμοποιηθεί για την λήψη των σημάτων έχει μια μοναδική επιφανειακή εικόνα από ανομοιομορφίες. Η επιφάνεια κάθε υλικού, αποτυπώνεται στα ληφθέντα σήματα, καθώς ο αισθητήρας παραμορφώνεται σύμφωνα με την εκάστοτε μορφολογία. Στην περίπτωση των επιφανειών με μεγαλύτερη τραχύτητα, όπως το ξύλο, συγκριτικά με το γυαλί, στο διάστημα που μεσολαβεί από την επαφή στην απομάκρυνση του αισθητήρα, παρατηρούνται πιο πυκνές κορυφές στην μορφή του σήματος, καθώς είναι πιο έντονη και η τραχύτητα του υλικού. Καθώς η επιφάνεια του υλικού γίνεται πιο λεία, όπως το γυαλί, ο αισθητήρας έρχεται σε επαφή με μεγαλύτερο μέρος της, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ανταλλαγή φορτίων και άρα μεγαλύτερη τιμή τάσης. Ωστόσο, αυτή η παρατήρηση εξαρτάται άμεσα και από την πίεση που ασκείται σε κάθε επιφάνεια. Η αύξηση της πίεσης που ασκείται από τον αισθητήρα αυξάνει την επιφάνεια επαφής, με αποτέλεσμα υψηλότερο τριβοηλεκτρικό σήμα. Αυτή η αύξηση της επιφάνειας επαφής αυξάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο υλικών, η οποία με τη σειρά της αυξάνει τη μέγιστη τιμή τάσης του τριβοηλεκτρικού σήματος. Συνεπώς, ενώ η μορφή του αποτύπωματος που αφήνει η επαφή των υλικών ως σήμα δεν διαφοροποιείται, η αύξηση της πίεσης που ασκείται από το ανθρώπινο δάχτυλο στην επιφάνεια του υλικού, οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης τιμής τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6, όπου η πίεση Α που έχει ασκηθεί από το ανθρώπινο δάχτυλο είναι μεγαλύτερη της πίεσης Β. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση στην περίπτωση Α είναι στα 3.6 V, ενώ στην Β είναι στο 1.1 V, χωρίς να αλλάζει το αποτύπωμα του σήματος. Οι μικρές διαφορές που εμφανίζονται στο σήμα πριν διαχωριστούν οι επιφάνειες, έγκειται στο γεγονός ότι η μεγαλύτερη πίεση ανιχνεύει επιπλέον ανωμαλίες στη τραχύτητα του χαρτιού κι αυτό είναι εμφανές με τις μικρές κυματώσεις που φαίνονται ανάμεσα στην κορυφή επαφής και διαχωρισμούς και οι οποίες δεν είναι ορατές στην πίεση Β.



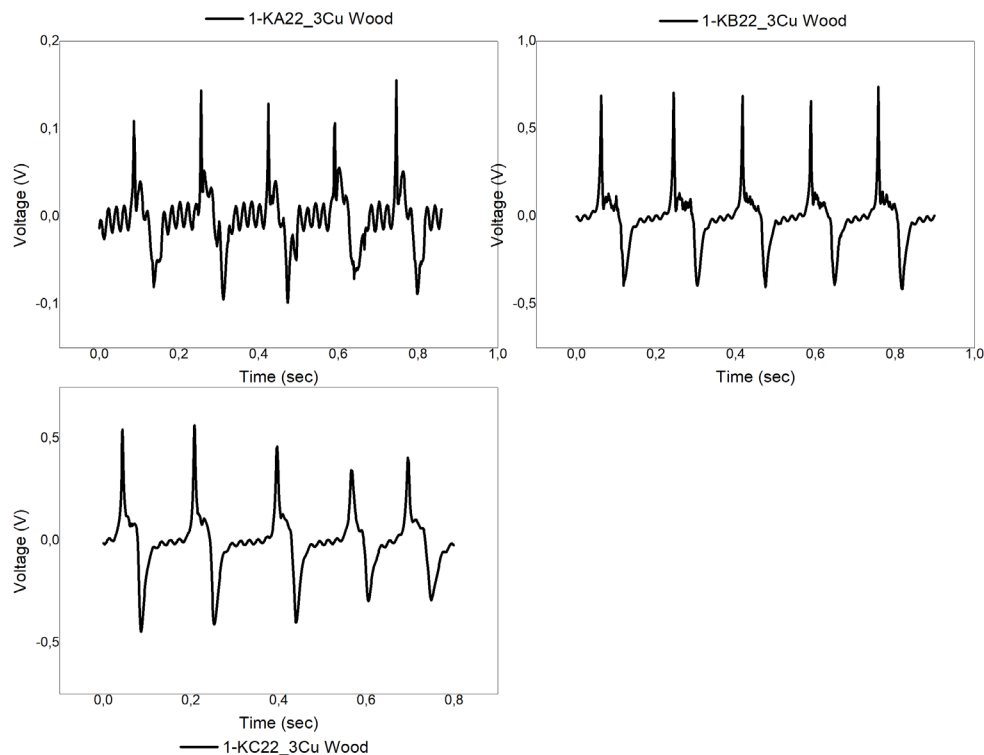
Σχήμα 5.5 Αντιπροσωπευτικά σήματα για κάθε υλικό σε επαφή με αισθητήρα εναπόθεση μετάλλου Cr-Cu



Σχήμα 5.6 Αποτύπωμα σήματος επαφής αισθητήρα 1-KC22\_3Cu με χαρτί, υπό διαφορετική ασκούμενη πίεση στην επιφάνεια

Μελετώντας τους αισθητήρες αφής Cr – Cu, βάση των διαφορετικών γεωμετριών που ορίζονται από τον σχεδιασμό των IDE, εξάγονται επιπλέον συμπεράσματα. Καθώς το πλάτος των μεταλλικών αγωγών (fingers) των IDE αυξάνεται, η λεπτομέρεια των πληροφοριών σχετικά με την επιφάνεια μειώνεται. Στο Σχήμα 5.7 φαίνονται τα ηλεκτρικά σήματα που λήφθηκαν για

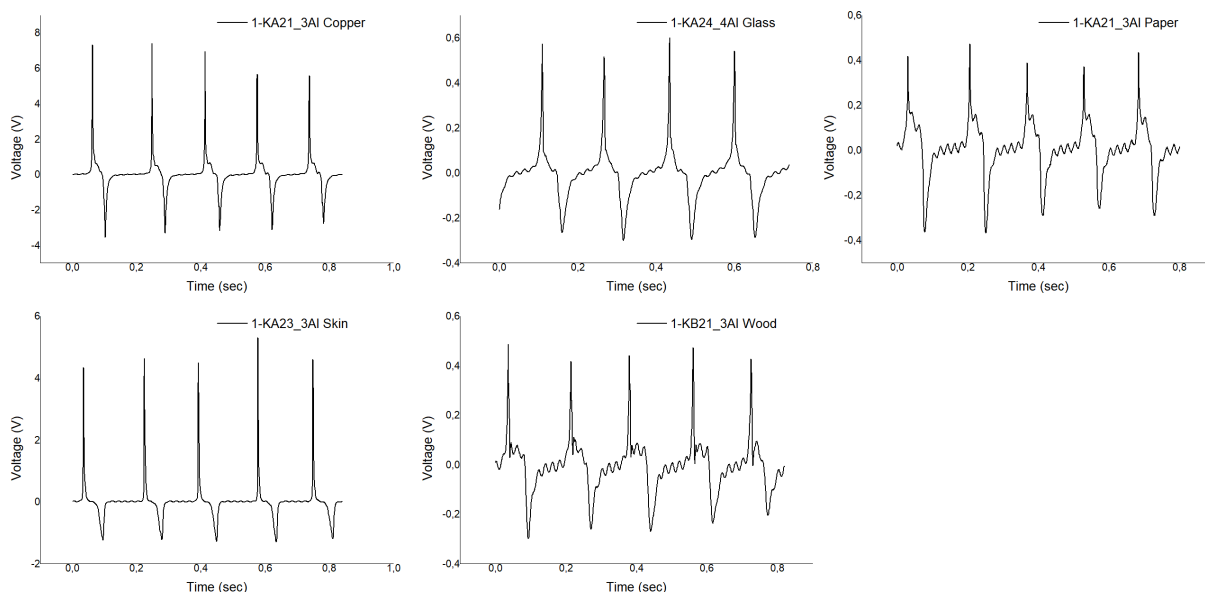
τρεις διαφορετικούς αισθητήρες Cr – Cu, με αυξανόμενο πλάτος «δακτύλων» των IDE, για την επαφή τους με ξύλινη επιφάνεια. Το σήμα του γραφήματος “1-KA22\_3Cu Wood”, αφορά τον αισθητήρα με το μικρότερο πλάτος «δακτύλων» και όπως διαπιστώνεται οπτικά, οι κορυφές που σχηματίζονται μεταξύ της κορυφής επαφής και την κορυφής απομάκρυνσης, καταγράφουν έντονα τις λεπτομέρειες την επιφανειακής τραχύτητας του ξύλου. Καθώς το πλάτος των «δακτύλων» αυξάνεται στα 500 μm στο γράφημα “1-KB22\_3Cu Wood” και στα 1000 μm στο “1-KC22\_3Cu Wood”, οι λεπτομέρειες που αφορούν την τραχύτητα της επιφάνειας δεν είναι πλέον ορατές, με την κορύφωση του φαινομένου στα μεγαλύτερα ηλεκτρόδια των 1000 μm, όπου η πληροφορίες για την τραχύτητα του ξύλου δεν είναι ορατές. Όσο μεγαλύτερα είναι τα ηλεκτρόδια, τόσο χαμηλότερη είναι η χωρική ανάλυση του αισθητήρα αφής, πράγμα που σημαίνει ότι ο αισθητήρας είναι λιγότερο ικανός να ανιχνεύσει μικρές αλλαγές στα φορτία, λόγω του τριβοηλεκτρικού φαινομένου, που προκύπτουν από λεπτομέρειες στην επιφάνεια του αντικειμένου που αγγίζεται. Επιπλέον, η επιφάνεια επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων και του υλικού σχετίζεται άμεσα με την ευαισθησία του τριβοηλεκτρικού σήματος. Με τη μείωση της επιφάνειας επαφής, μειώνεται η ποσότητα μεταφοράς φορτίου μεταξύ των ηλεκτροδίων και του υλικού, με αποτέλεσμα τη μείωση του σήματος. Συνεπώς, ο αισθητήρας 1-KC22\_3Cu, με IDE που διαθέτουν μεγαλύτερη επιφάνεια, λόγω μεγαλύτερου πλάτους των «δακτύλων», παρουσιάζει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή τάσης, για την ίδια πίεση, σε σύγκριση με τον αισθητήρα 1-KA22\_3Cu, που η επιφάνεια των δακτύλων είναι μικρότερη.



Σχήμα 5.7 Αποτύπωμα ηλεκτρικού σήματος απο την επαφή των τριών αισθητήρων Cr-Cu με διαφορετική γεωμετρία IDE, με ξύλο

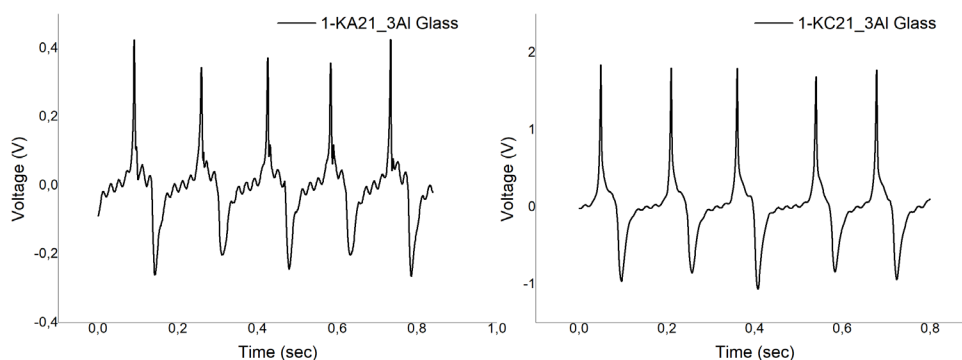
### 5.2.1.2 Αισθητήρες με εναπόθεση Al

Η γενική παρατήρηση ότι κάθε επιφάνεια που αγγίζεται από τον αισθητήρα, αποτυπώνεται με την μορφή ηλεκτρικού σήματος, ως ένα μοναδικό δακτυλικό αποτύπωμα του υλικού, επιβεβαιώνεται και στην περίπτωση των αισθητήρων με εναπόθεση αλουμίνιου ως μέταλλο των IDE. Στο Σχήμα 5.8, φαίνεται το αντιπροσωπευτικό σήμα για κάθε επιφάνεια και όπως διαπιστώνεται, διαφέρουν ως προς την μορφή και τις μέγιστες τιμές τάσης. Τα συμπεράσματα που αφορούν την πίεση που ασκείται στις επιφάνειες, την τραχύτητα και το μέγεθος των ηλεκτροδίων ισχύουν ομοίως και για τους αισθητήρες Al.



Σχήμα 5.8 Αντιπροσωπευτικά σήματα για κάθε υλικό σε επαφή με αισθητήρα εναπόθεση μετάλλου Al

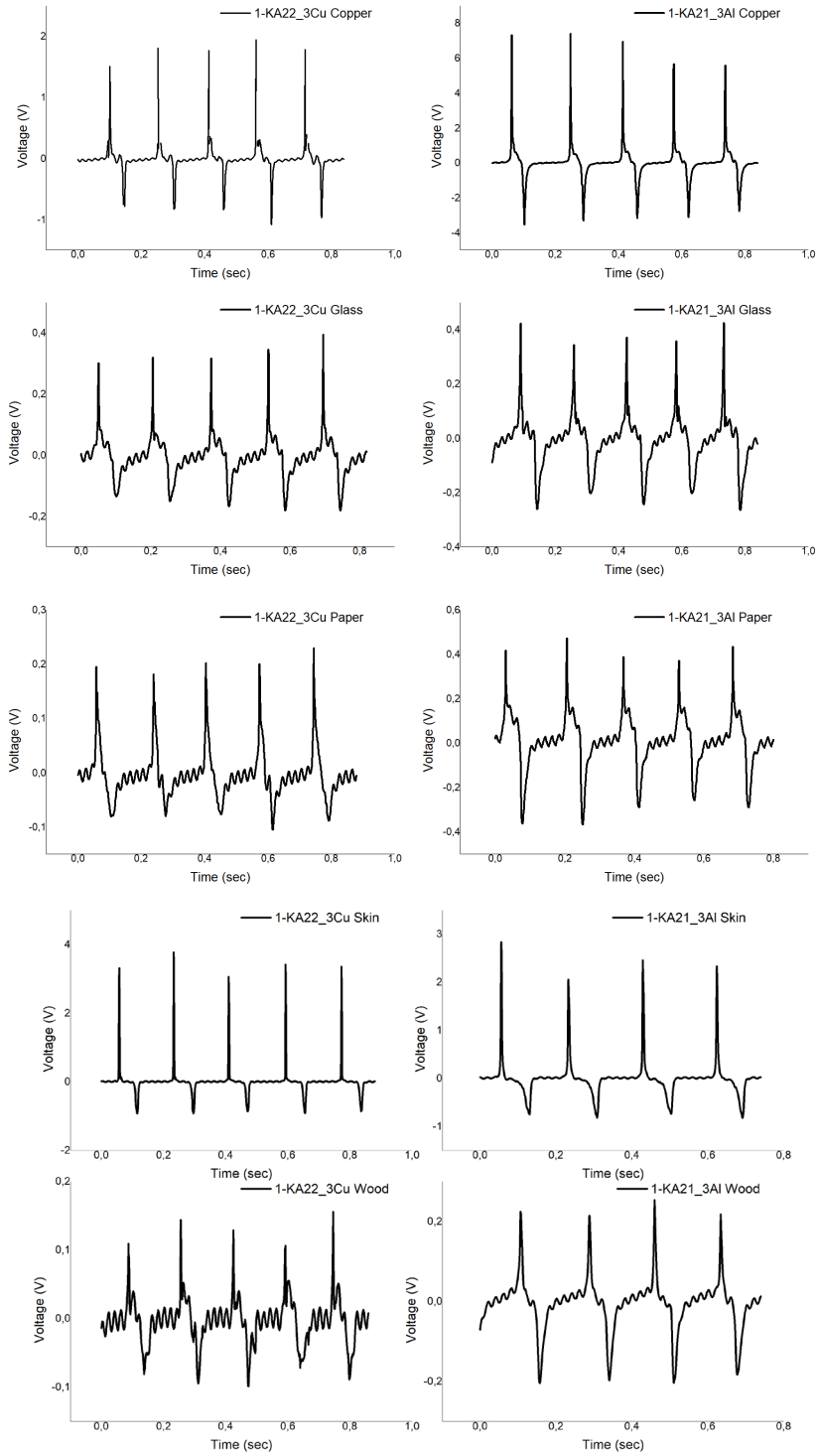
Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται ενδεικτικά τα τριβηλεκτρικά σήματα που προκύπτουν από την επαφή του αισθητήρα 1-KA21\_3Al, με το μικρότερο πλάτος «δακτύλων» IDE, και του 1-KC21\_3Al, με το μεγαλύτερο πλάτος «δακτύλων», με γυάλινη επιφάνεια. Όπως είναι εμφανές, και εξηγήθηκε αναλυτικά στους αισθητήρες Cr – Cu, στην περίπτωση των εναποθέσεων με Al, ο αισθητήρας 1-KA21\_3Al εισάγει στο σήμα λεπτομέρειες για την επιφάνεια του γυαλιού ενώ ο αισθητήρας 1-KC21\_3Al επιστρέφει σήμα μεγαλύτερης μέγιστης τιμής τάσης, λόγω της αύξησης της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, αλλά μειωμένης λεπτομέρειας για την τραχύτητα.



Σχήμα 5.9 Αποτύπωμα ηλεκτρικού σήματος από την επαφή των αισθητήρων μικρότερου και μεγαλύτερου πλάτους μεταλλικών διαδρόμων IDE, με χαρτί



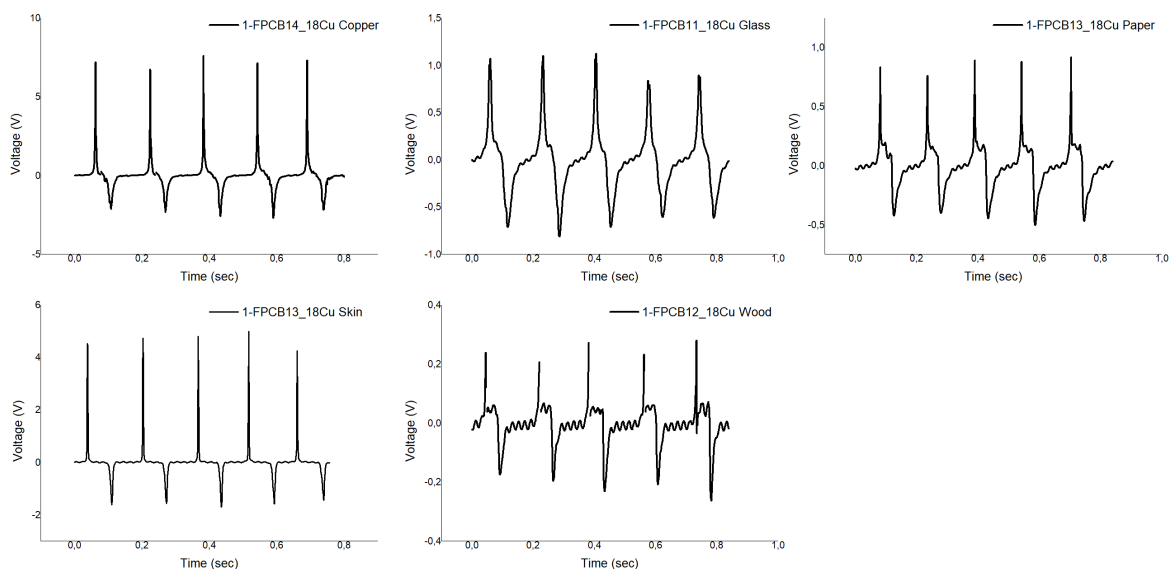
Συγκρίνοντας τα αποτυπώματα των διαφορετικών υλικών για διαφορετικά υλικά εναπόθεσης, διατηρώντας τις παραμέτρους της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων όμοιες, παρατηρούνται μεταξύ ορισμένων υλικών διαφορές. Στο Σχήμα 5.10, φαίνεται η σύγκριση για τους αισθητήρες με IDE αλουμινίου και χαλκού, για την γεωμετρία του μικρότερου πλάτους μεταλλικών διαδρόμων και στις δύο περιπτώσεις. Στα υλικά του χαλκού, του γυαλιού και του δέρματος δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο και μικρές αλλαγές στην κυμάτωση των σημάτων δικαιολογούνται από μικροδιαφορές στην κατασκευή και την δομή των αισθητήρων. Ωστόσο, στην περίπτωση του χαρτιού και του ξύλου, παρατηρούνται διαφορές που αλλάζουν το αποτύπωμα του υλικού, κυρίως στην περίπτωση του ξύλου. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μέταλλο των IDE μπορεί να επηρεάσει το ηλεκτρικό σήμα εξόδου του αισθητήρα όταν έρχεται σε επαφή με κάποιες επιφάνειες, ενώ είναι σημαντικό να προστεθεί σε αυτό το σημείο ότι παράγοντες όπως η διάβρωση του χαλκού σε ορισμένα περιβάλλοντα, μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του αισθητήρα.



Σχήμα 5.10 Συγκριτικά ηλεκτρικά σήματα για ηλεκτρόδια χαλκού και αλουμινίου για όμοιες γεωμετρίες αισθητήρων

### 5.2.1.3 Αισθητήρες εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων

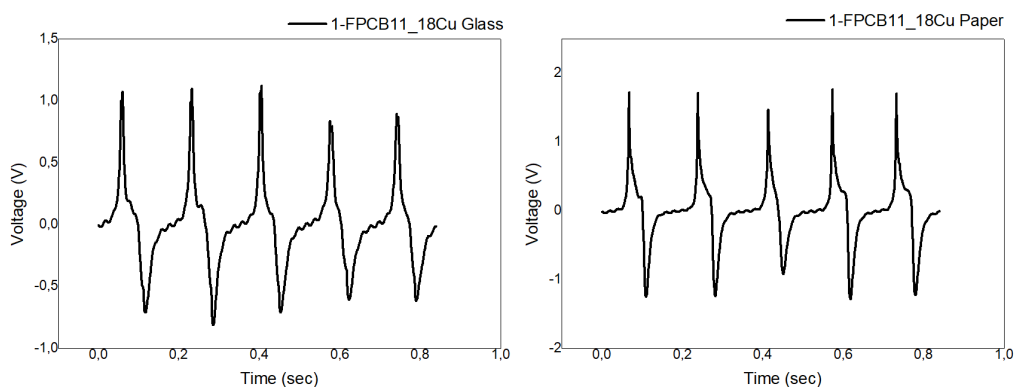
Ο τρίτος τρόπος κατασκευής των αισθητήρων, που αφορά την κατασκευή εύκαμπτων τυπωμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων, επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν και για τις δύο προηγούμενες μεθόδους κατασκευής, με εναπόθεση. Στο Σχήμα 5.11, όπου παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σήμα για κάθε επιφάνεια, φαίνεται ότι και στην περίπτωση των FPCB, κάθε επιφάνεια υλικού επιστρέφει ένα ηλεκτρικό σήμα ως μοναδικό αποτύπωμα της επαφής του αισθητήρα με αυτήν. Ομοίως φαινόμενα που αφορούν την ασκούμενη πίεση στο υλικό και οδηγούν σε αύξηση της τιμής τάσης κατά την επαφή του αισθητήρα με την επιφάνεια, χωρίς να αλλάζει η μορφή του παλμού επαφής, παρατηρούνται και στην περίπτωση των FPCB αισθητήρων.



Σχήμα 5.11 Αντιπροσωπευτικά σήματα για κάθε υλικό σε επαφή με αισθητήρα FPCB

Ο αισθητήρας FPC11-18Cu, παρουσιάζει την μικρότερη γεωμετρία που έχει μελετηθεί με των πλάτος των μεταλλικών διαδρόμων των IDE να προσεγγίζει τα 100  $\mu\text{m}$ . Σύμφωνα με τις έως τώρα παρατηρήσεις αυτό θα έπρεπε να εισάγει στο σήμα τις περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την τραχύτητα της επιφανείας των υλικών. Ωστόσο, αυτό δεν επιβεβαιώνεται στην περίπτωση του FPCB11-18Cu, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.12, όπου η τραχύτητα των επιφανειών του γυαλιού και του χαρτιού δεν γίνονται εμφανώς διακριτές στα σήματα, όπως ήταν στους αισθητήρες που κατασκευάστηκαν με εναπόθεση ιοντοβολής και εξάχνωσης. Μια ενδεχόμενη αιτιολογία για αυτό το φαινόμενο είναι ότι καθώς πλέον η επιφάνεια των «δαχτύλων» και το

κενό μεταξύ των διαδοχικών «δαχτύλων» έχει μειωθεί σημαντικά, δεν γίνεται εκμετάλλευση της γεωμετρίας των IDE ως διαδοχικά πεπλεγμένα ηλεκτρόδια που ανιχνεύουν την τραχύτητα της επιφάνειας, μέσω των διαφορετικών συμβάντων επαφής, λόγω των διαφορετικών κορυφών που δημιουργεί η τραχύτητα των υλικών, και ανιχνεύονται από τα «δάχτυλα» των ηλεκτροδίων. Συνεπώς, είναι πιθανό να υπάρχει ένα κατώφλι στον σχεδιασμό στην επιφάνεια κάθε μεταλλικού διαδρόμου στα IDE, προκειμένου η ύπαρξη του τριβηηλεκτρικού φαινομένου να επιστρέφει πληροφορίες στο σήμα εξόδου, για την τραχύτητα της επιφάνειας. Σε κάθε περίπτωση, παράγοντες όπως η δομή του αισθητήρα και ο τρόπος επαφής του αισθητήρα με τις επιφάνειες, επηρεάζει το εξαγόμενο αποτύπωμα του υλικού επαφής.

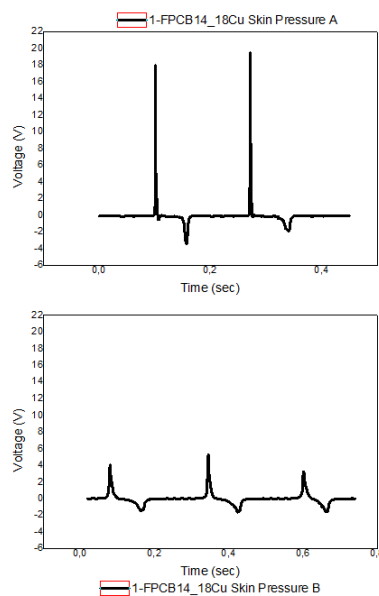


Σχήμα 5.12 Σήματα επαφής του αισθητήρα μικρότερου πλάτους μεταλλικών διαδρόμων IDE, για επαφή με γυαλί και χαρτί

Μία σημαντική διαφορά των FPCB αισθητήρων με τους αισθητήρες που εναποτέθηκε αλουμίνιο και χαλκός με ιοντοβολή και εξάχνωση, είναι το πάχος των IDE. Στην περίπτωση των FPCB είναι 18μm ενώ στις άλλες δυο μεθόδους κατασκευής 300 nm, προσεγγιστικά. Ένα παχύτερο ηλεκτρόδιο παρέχει ισχυρότερο ηλεκτρικό σήμα, ωστόσο αυτό επηρεάζει την ακρίβεια του σήματος. Αυτό ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα την εξομάλυνση ή την εμφάνιση μίας μέσης τιμής του σήματος εξόδου, μειώνοντας την ποσότητα λεπτομέρειας και πληροφοριών σχετικά με την τραχύτητα του υλικού. Επιπλέον, ένα παχύτερο ηλεκτρόδιο μπορεί επίσης να αυξήσει τον χρόνο απόκρισης του αισθητήρα, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την ικανότητά του να καταγράφει με ακρίβεια τις ταχείες αλλαγές στην τραχύτητα της επιφάνειας.

Η αύξηση της ασκούμενης πίεσης με τους αισθητήρες FPCB, αυξάνει σημαντικά την τιμή τάσης κατά την επαφή του αισθητήρα με την επιφάνεια και σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από αυτές

των άλλων τρόπων κατασκευής. Όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 5.13, η αύξηση της πίεσης επαφής με το ανθρώπινο δέρμα, επέστρεψε το αποτύπωμα του σήματος έως και 20 V τιμή τάσης, συγκριτικά με τις μέγιστες τάσεις που παρατηρήθηκαν για αυξημένη πίεση στους άλλους αισθητήρες. Αυτό δικαιολογείται καθώς το πάχος του χάλκινου ηλεκτροδίου των FPCB είναι παχύτερο από τις άλλες μεθόδους κατασκευής, παρέχοντας ισχυρότερο ηλεκτρικό σήμα. Στην περίπτωση του FPCB14, το παχύτερο ηλεκτρόδιο σε πλάτος και πάχος έχει μεγαλύτερη επιφάνεια διαθέσιμη για τριβοηλεκτρική φόρτιση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο μέγεθος μεταφοράς ηλεκτρικού φορτίου. Αυτή η αύξηση της μεταφοράς φορτίου οδηγεί σε ισχυρότερο σήμα εξόδου. Αυτό, καθιστά τον αισθητήρα πιο ανθεκτικό στο θόρυβο και πιο ανθεκτικό σε δύσκολα περιβάλλοντα, ωστόσο αρχίζουν να έγκειται προβληματισμοί σχετικά με την ευκαμψία και την ακρίβεια του αισθητήρα για αυτό και είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η επιλογή των γεωμετριών και τον χαρακτηριστικών κατασκευής, οφείλουν να συμβιβάζονται με τις ανάγκες και την εκάστοτε εφαρμογή του αισθητήρα αφής.

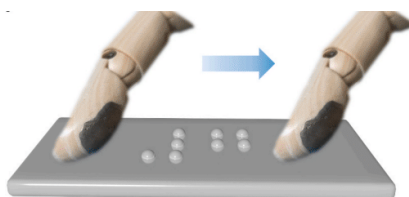


Σχήμα 5.13 Αποτύπωμα σήματος επαφής αισθητήρα 1-FPCB14\_18Cu σε δέρμα, υπό διαφορετική ασκούμενη πίεση στην επιφάνεια ( $A > B$ )

## 5.3 Χαρακτηρισμός αισθητήρων για την ανίχνευση ανωμαλιών με ολίσθηση

Η ικανότητα των αισθητήρων να διαχωρίζουν τις επιφάνειες μεταξύ τους και να ανιχνεύουν λεπτομέρειες στην τραχύτητα των υλικών, οδήγησαν σε επόμενα πειράματα, προκειμένου να διαπιστωθεί η συμπεριφορά τους κατά την κάθετη ολίσθηση του ανθρώπινου δαχτύλου σε επιφάνειες με συγκεκριμένη υφή, όπως φαίνεται σχεδιαστικά στο Σχήμα 5.14. Στόχος αυτών των πειραμάτων ήταν να αξιολογηθεί η ικανότητα εφαρμογής των αισθητήρων αφής, για την ανάγνωση ανάγλυφων κωδικοποιήσεων σε μορφή κουκίδων Braille. Για την λήψη των διαφορετικών σημάτων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτυπώθηκαν ανάγλυφες κωδικοποιήσεις Braille σε τυπικό πλαστικό φύλλο εκτύπωσης, κατασκευασμένες από πολυεστέρα (PET).

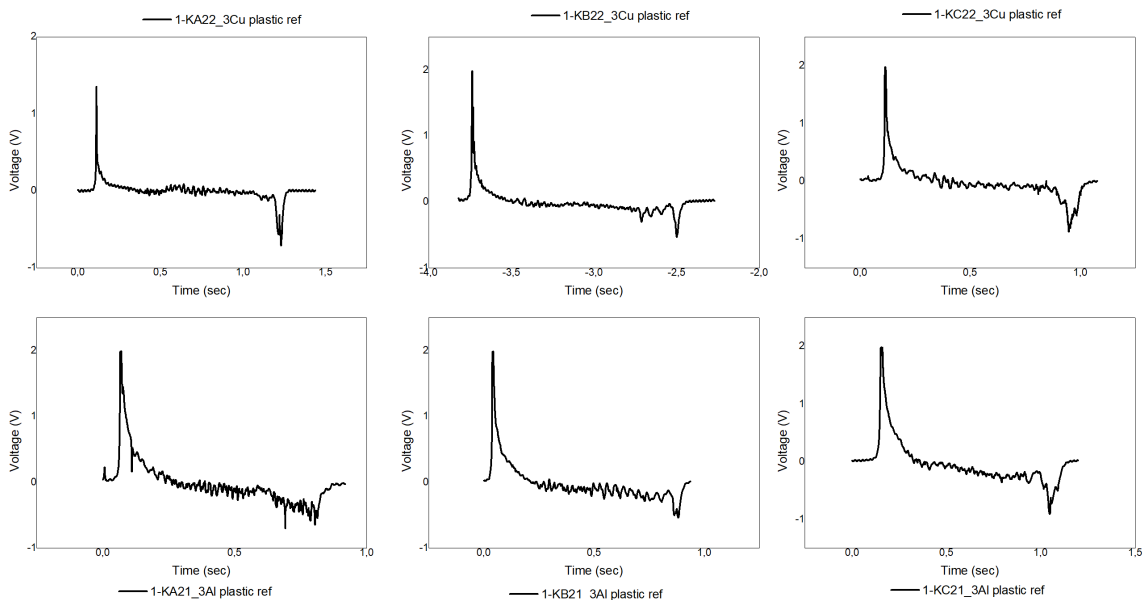
Ο ελεύθερος τρόπος ολίσθησης του αισθητήρα στην μελετώμενη επιφάνεια, δημιουργεί αλλαγές στις κατανομές φορτίου, στα διαδοχικά «δάκτυλα» των IDE και καθώς το ανθρώπινο δάχτυλο ψηλαφίζει την επιφάνεια ανάγνωσης, η αλλαγή της σχετικής θέσης του αισθητήρα πάνω στο αντικείμενο ανίχνευσης οδηγεί στην μεταφορά φορτίου από το αριστερό στο δεξί ηλεκτρόδιο, διαδοχικά μέσω των «δακτύλων». Ως αποτέλεσμα, οι κατανομές ηλεκτρικού φορτίου των ηλεκτροδίων αλλάζουν, ανάλογα με την αλλαγή της σχετικής θέσης του αισθητήρα πάνω στην προς ανίχνευση υφής και η διαφορά αυτή μεταξύ γειτονικών ηλεκτροδίων οδηγεί στην ηλεκτρική έξοδο.



Σχήμα 5.14 Κάθετη ολίσθηση αισθητήρα αφής σε ανάγλυφη κωδικοποίηση Braille

### 5.3.1 Μελέτη ανίχνευσης ανάγλυφου μεμονωμένης κουκίδας

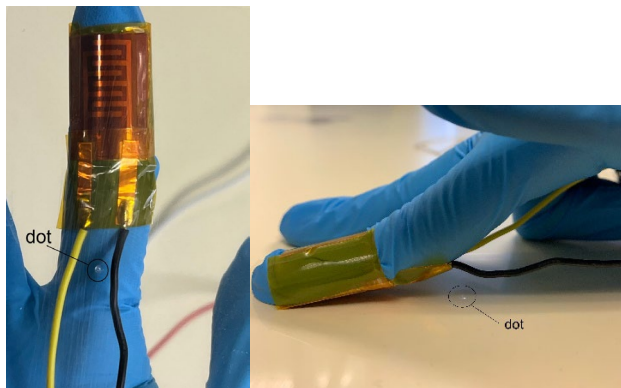
Οι αισθητήρες αφής, υποβλήθηκαν αρχικά σε πειράματα που αφορούν την ανίχνευση της παρουσίας και της θέσης μιας υπερυψωμένης κουκίδας, ώστε να διαπιστωθεί πρωτίστως η ικανότητα του αισθητήρα να παράγει ένα μετρήσιμο και παρατηρήσιμο ηλεκτρικό σήμα όταν υποβάλλεται σε μηχανική καταπόνηση, λόγω του ανάγλυφου της υφής. Στο Σχήμα 5.15, φαίνονται τα ηλεκτρικά σήματα που προέκυψαν από την ολίσθηση των έξι αισθητήρων που μελετήθηκαν, στην επιφάνεια του πλαστικού φύλλου, χωρίς να υπάρχει στην επιφάνεια του ανάγλυφο κωδικοποίηση σε μορφή κουκίδας. Αυτά τα σήματα χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία αναφοράς για τις μετρήσεις με κουκίδες, ώστε να διαπιστώνεται κάθε φορά η αλλαγή που εμφανίζεται στο σήμα, όταν ο αισθητήρας παραμορφώνεται μηχανικά από το ανάγλυφο.



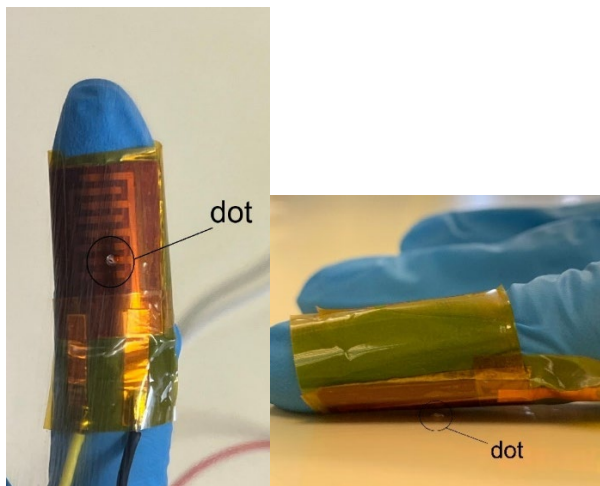
Σχήμα 5.15 Σήματα αναφοράς ολίσθησης αισθητήρων στην πλαστική διαφάνεια χωρίς ανάγλυφο κωδικοποίηση

Στην συνέχεια, πιέστηκε στο πλαστικό φύλλο μια κουκίδα Braille διαμέτρου 1.4 mm και ύψους 0.02 mm, με χρήση πινακίδας, και βάση των τυπικών διαστάσεων που ακολουθούνται στην γραφή Braille. Για κάθε αισθητήρα προσαρμοσμένο σε ανθρώπινο δάχτυλο, πραγματοποιήθηκε ολίσθηση προσεγγιστικά για ένα δευτερόλεπτο πάνω στο ανάγλυφο, ξεκινώντας από επιφάνεια υλικού χωρίς ανάγλυφο, προσεγγίζοντας και αγγίζοντας την κουκίδα και τέλος χάνοντας την επαφή με το υλικό. Τα στάδια ολίσθησης, φαίνονται στον Πίνακα 5.1 και χωρίζονται σε τρεις χρονικές στιγμές, την φάση που ο αισθητήρας έρχεται σε επαφή με το

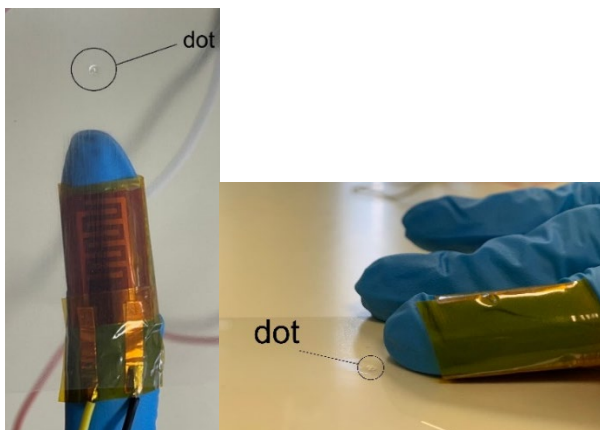
υλικό στο πάνω μέρος της κουκίδας και ολισθαίνει προς το ανάγλυφο (α), την στιγμή που αγγίζει το ανάγλυφο (β), και την φάση που ολισθαίνει ύστερα από την κουκίδα, έως το διαχωρισμό του με την επιφάνεια (γ). Τα σήματα που λήφθηκαν από την επανάληψη αυτής της διαδικασίας για τους έξι αισθητήρες που μελετήθηκαν σε αυτή την πειραματική διαδικασία, φαίνονται στο Σχήμα 5.16.



(α) Επαφή του αισθητήρα στο πλαστικό φύλλο και ολίσθηση προς το ανάγλυφο της κουκίδας



(β) Επαφή του αισθητήρα με το ανάγλυφο της κουκίδας

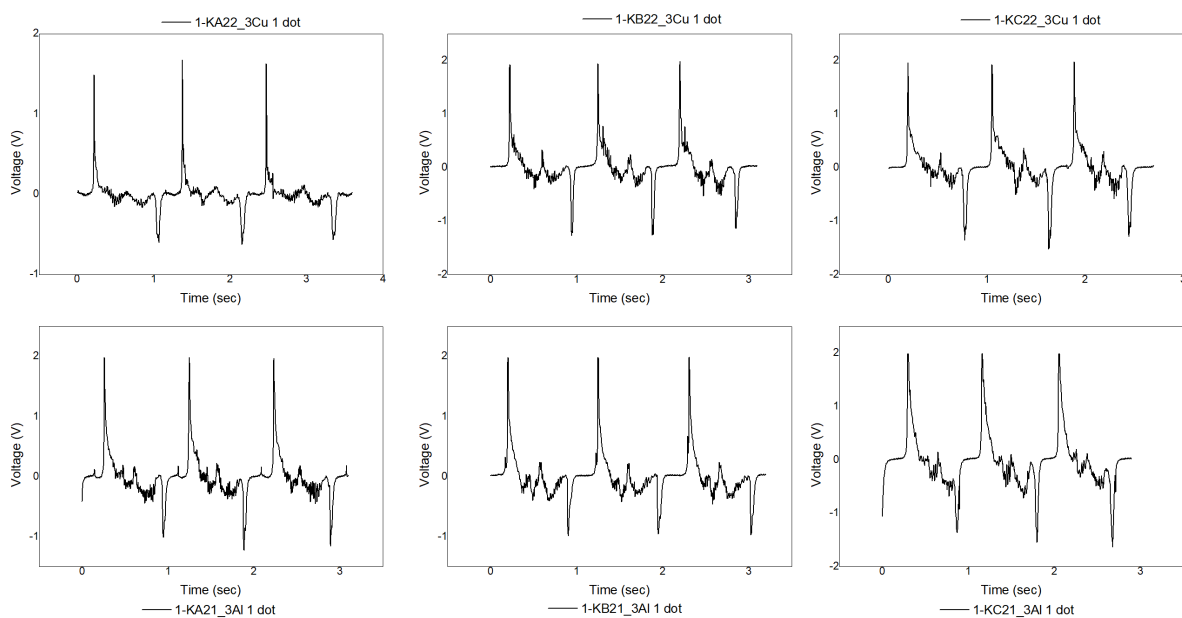


(γ) Φάση ολίσθησης στο πλαστικό φύλλο, ύστερα από την επαφή με την κουκίδα

Πίνακας 5.1 Στάδια ολίσθησης αισθητήρα σε πλαστικό φύλλο με ανάγλυφη κουκίδα



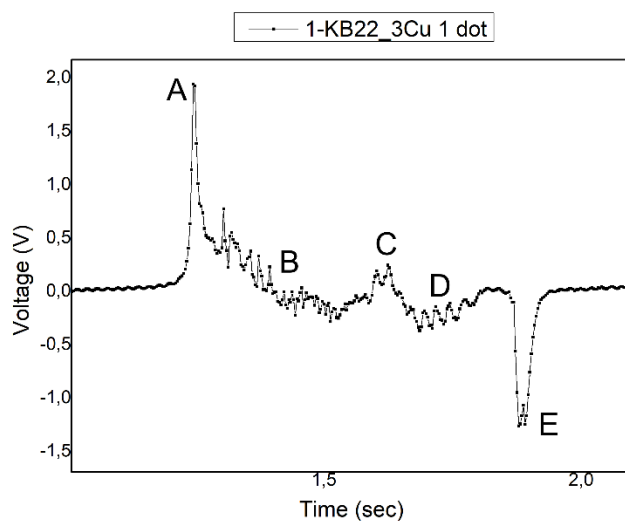
Σε κάθε περίπτωση αισθητήρα, απεικονίζονται τρεις ολισθήσεις, δηλαδή τρεις κύκλοι επαφής με το υλικό, ολίσθησης στο ανάγλυφο και διαχωρισμό του ανθρώπινου δακτύλου από την επιφάνεια. Σε κάθε επανάληψη, για τους έξι αισθητήρες είναι εμφανώς αναγνωρίσιμες οι κορυφές στην κυμάτωση του σήματος που αντιστοιχούν στην στιγμή ολίσθησης του αισθητήρα πάνω από την ανάγλυφη κουκίδα. Η μηχανική παραμόρφωση που δημιουργεί στον αισθητήρα η υπερυψωμένη κουκίδα στο πλαστικό, οδηγεί στην αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου που μετράται μέσω των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση να δημιουργείται η κορυφή που φαίνεται στα σήματα, μεταξύ της ακμής επαφής και της ακμής διαχωρισμού. Ερμηνεύοντας την παρατήρηση βάση του τριβηηλεκτρικού φαινομένου, η αυξημένη επιφάνεια της τελείας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μεταφορά ηλεκτρονίων, δηλαδή μεγαλύτερο ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό το αυξημένο φορτίο αντανακλάται σε υψηλότερη τιμή τάσης και στην αντίστοιχη κορυφή στο σήμα εξόδου του αισθητήρα αφής.



Σχήμα 5.16 Σήματα ανάγλυφου μίας κουκίδας για τους διαφορετικούς αισθητήρες

Μεγεθύνοντας ενδεικτικά έναν παλμό ολίσθησης, για τον αισθητήρα 1-KB22\_3Cu τα χαρακτηριστικά σημεία φαίνονται στο Σχήμα 5.17. Το σημείο A αντιπροσωπεύει την στιγμή που το ανθρώπινο δάχτυλο με τον προσαρμοσμένο αισθητήρα, ήρθε σε επαφή με το πλαστικό φύλλο εκτύπωσης, δίνοντας τιμή τάσης 1.92V και πυροδοτώντας με αυτή την κορυφή την έναρξης της

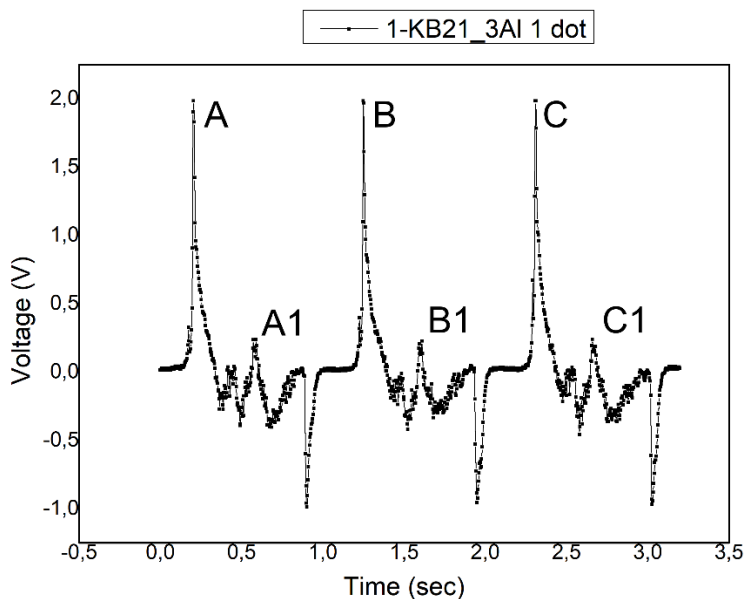
ανάγνωσης της κουκίδας. Οι κορυφές που περικλείονται στην διάρκεια του σημείου B, αφορούν τον χρόνο που το ανθρώπινο δάχτυλο ολισθαίνει στο πλαστικό φύλλο προσεγγίζοντας την κουκίδα, χωρίς να έχει έρθει ακόμα σε επαφή με αυτήν. Οι μικρές κορυφές που παρατηρούνται στην διάρκεια του σημείου B και εμφανίζονται ως ένα είδος δόνησης στο σήμα, αντιστοιχούν στην τραχύτητα του PET υλικού και στα ανάγλυφα της επιφανειακής του τραχύτητας, που παραμορφώνουν τον αισθητήρα, καθώς ολισθαίνει και καταγράφονται στο σήμα ως ηλεκτρικό φορτίο. Η στιγμή C είναι αυτή που ο αισθητήρας αγγίζει την κουκίδα. Αυτή η επαφή δημιουργεί παραμόρφωση στον αισθητήρα μεγαλύτερη από αυτή που δημιουργεί η τραχύτητα του υλικού και παρουσιάζει τιμή τάσης 0.24 V. Η φάση D αφορά της συνέχεια της ολίσθησης του αισθητήρα στο πλαστικό φύλλο, αφού έχει απομακρυνθεί πλήρως από το ανάγλυφο της κουκίδας και στην στιγμή E πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του δακτύλου από την επιφάνεια.



Σχήμα 5.17 Μεγέθυνση σήματος αισθητήρα 1-KB22\_3Cu για ολίσθηση σε ανάγλυφο μίας κουκίδας

Επιπλέον, τα ηλεκτρικά σήματα κάθε παλμού, εισάγουν πληροφορίες που αφορούν την χρονική διάρκεια της ολίσθησης και τις χρονικές στιγμές κάθε συμβάντος, κάτι που είναι σημαντικό για διαφορετικές εφαρμογές του αισθητήρα. Μελετώντας ενδεικτικά το σύνολο των παλμών του αισθητήρα 1-KB21\_3A1, ως προς τις πληροφορίες που αφορούν τον χρόνο, διαπιστώνεται ότι είναι εφικτό να αναγνωριστεί η ακριβής χρονική στιγμή που ο αισθητήρας ξεκίνησε και ολοκλήρωσε την επαφή του με την κουκίδα, η χρονική διάρκεια κάθε ολίσθησης

και η χρονική διάρκεια επαφής του αισθητήρα με το πλαστικό φύλλο, πριν και μετά την επαφή του με το ανάγλυφο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18, για το συγκεκριμένο πείραμα, το ανθρώπινο δάχτυλο με τον προσαρμοσμένο σε αυτόν αισθητήρα, πραγματοποίησε τρεις ολισθήσεις σε διάστημα τριών δευτερολέπτων και πυροδοτήθηκαν με τις κορυφές A, B και C, αντίστοιχα. Η πρώτη ολίσθηση (A) διήρκησε 0.9 δευτερόλεπτα, η δεύτερη (B) 0.35 δευτερόλεπτα αργότερα, στα 1.25 δευτερόλεπτα και ολοκληρώθηκε στα 1.94 δευτερόλεπτα, δηλαδή διήρκησε 0.69 δευτερόλεπτα και η τρίτη (C) 0.7 δευτερόλεπτα. Επιπλέον, μέσω την μελέτης του χρονικού άξονα συναρτήσε των γεγονότων που απεικονίζονται στο σήμα, καταγράφεται ότι ο αισθητήρας στην ολίσθηση (A) ήρθε σε επαφή με την κουκίδα στα 0.5 δευτερόλεπτα από την έναρξη της ολίσθησης, στο σημείο A1 ενώ στην (B) και στην (C) στα 0.35 δευτερόλεπτα, στα σημεία B1 και C1, αντίστοιχα. Η διαφορά αυτή, υποδηλώνει ότι στην περίπτωση της ολίσθησης A διήρκησε περισσότερο η ολίσθηση στην επιφάνεια του πλαστικού, προσεγγίζοντας την κουκίδα. Με αυτές τις τιμές υπολογίζονται και επιπλέον πληροφορίες, όπως το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την μια ολίσθηση στην επόμενη και το χρονικό διάστημα που ο αισθητήρας ήταν σε επαφή με το πλαστικό φύλλο, χωρίς να παρέχει πληροφορίες για το ανάγλυφο αλλά για την επιφάνεια του PET.



Σχήμα 5.18 Σύνολο τριών ολισθήσεων του αισθητήρα 1-KB21\_3Al για ανάγλυφο μίας κουκίδας

Στον Πίνακα 5.2 συνοψίζονται οι τιμές τάσης των έξι αισθητήρων για την κορυφή που προκύπτει κατά την επαφή τους με την ανάγλυφη κουκίδα, για κάθε ένας από τους τρεις παλμούς

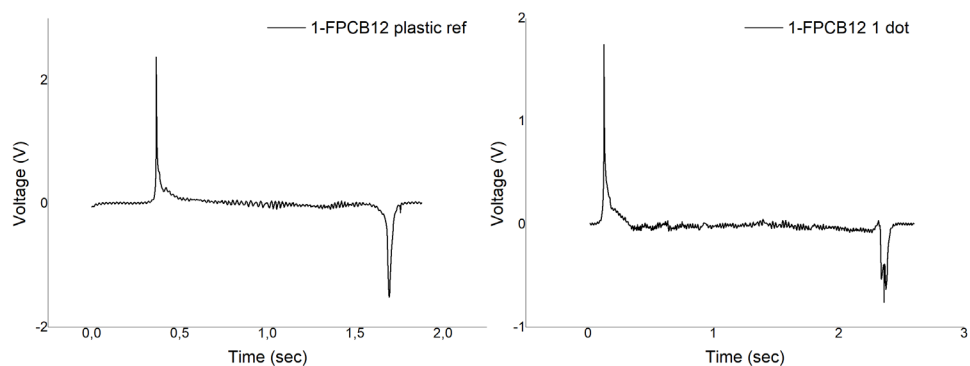
που φαίνονται στα ηλεκτρικά σήματα του Σχήματος 5.21. Παρατηρώντας τους μέσους όρους διαπιστώνεται ότι καθώς αυξάνεται το πλάτος των «δακτύλων» των IDE, αυξάνεται η τιμή της τάσης που αντιστοιχεί στην επαφή του αισθητήρα με την κουκίδα, στην περίπτωση των αισθητήρων με εναπόθεση Cr – Cu. Η ελάχιστη διάσταση πλάτους 350 μm, προσεγγιστικά δίνει 0.08 V τιμή τάσης ενώ η μέγιστη διάσταση πλάτους 1000 μm, δίνει τιμή τάσης 0.31 V. Αυτό έχει ήδη ερμηνευτεί σε προηγούμενες παρατηρήσεις και επιβεβαιώνεται και σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή ότι η μεγαλύτερη επιφάνεια του ηλεκτροδίου έχει μεγαλύτερη επιφάνεια διαθέσιμη για τριβοηλεκτρική φόρτιση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο μέγεθος μεταφοράς ηλεκτρικού φορτίου άρα σε ισχυρότερο σήμα εξόδου. Στην περίπτωση των αισθητήρων με εναπόθεση αλουμινίου δεν παρατηρείται η ίδια αύξηση της τιμής τάσης κατά την επαφή με την ανάγλυφη κουκίδα, καθώς αυξάνεται το πλάτος των «δακτύλων» των IDE, για τον αισθητήρα 1-KC21\_3Al. Αυτή η συμπεριφορά ενδέχεται να οφείλεται σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης που εφαρμόστηκαν κατά την ολίσθηση του ανθρώπινου δαχτύλου, και αποτυπώθηκαν στο σήμα με μειωμένη τιμή τάσης, δηλαδή μικρότερη μηχανική παραμόρφωση του αισθητήρα.

	Παλμός A (V)	Παλμός B (V)	Παλμός C (V)	Μέσος όρος (V)
1-KA22_3Cu	0,04	0,08	0,11	0,08
1-KB22_3Cu	0,33	0,21	0,14	0,23
1-KC22_3Cu	0,27	0,36	0,30	0,31
1-KA21_3Al	0,16	0,22	0,18	0,19
1-KB21_3Al	0,23	0,22	0,23	0,23
1-KC21_3Al	0,14	0,10	0,08	<b>0,11</b>

Πίνακας 5.2 Τιμή τάσης κατά την επαφή των αισθητήρων με την κουκίδα για τους τρεις παλμούς και μέση τιμή

Στο Σχήμα 5.19 φαίνονται τα ηλεκτρικά σήματα που προέκυψαν από την διεξαγωγή του ίδιου πειράματος, με την ανάγλυφη επιφάνεια μίας κουκίδας, ενδεικτικά για έναν αισθητήρα FPCB (1-FPCB12\_18Cu). Όπως διαπιστώνεται, το σήμα που προκύπτει από την ολίσθηση του αισθητήρα στην κουκίδα, δεν διαφοροποιείται εμφανώς από αυτό που προκύπτει από την ολίσθηση του αισθητήρα στην επιφάνεια αναφοράς, του πλαστικού φύλλου. Η ίδια παρατήρηση καταγράφηκε και για τις υπόλοιπες γεωμετρίες των FPCB, που κατασκευάστηκαν στην παρούσα διπλωματική. Αυτό το φαινόμενο αιτιολογείται βάση του αυξημένου πάχους του εναποτιθέμενου χαλκού στα 18 μm, συγκριτικά με το πάχος των εναποθέσεων με ιοντοβολή και εξάχνωση, στα 300 nm. Τα λεπτότερα ηλεκτρόδια έχουν μεγαλύτερη αναλογία επιφάνειας προς όγκο, γεγονός

που αυξάνει την ευαισθησία του αισθητήρα σε μικρές μεταβολές του ηλεκτρικού φορτίου. Επιπλέον, τα παχύτερα ηλεκτρόδια, εισάγουν αυξημένο θόρυβο στο σήμα, υπερκαλύπτοντας τις κορυφές που δημιουργεί το ανάγλυφο της κουκίδας. Συνεπώς, η μέθοδος κατασκευής των αισθητήρων με την μορφή των εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων (FPCB), δεν κρίθηκε κατάλληλη προς μελέτη για πειράματα που αφορούν την αναγνώριση ανάγλυφης Braille κωδικοποίησης, σύμφωνα με τον σχεδιασμό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



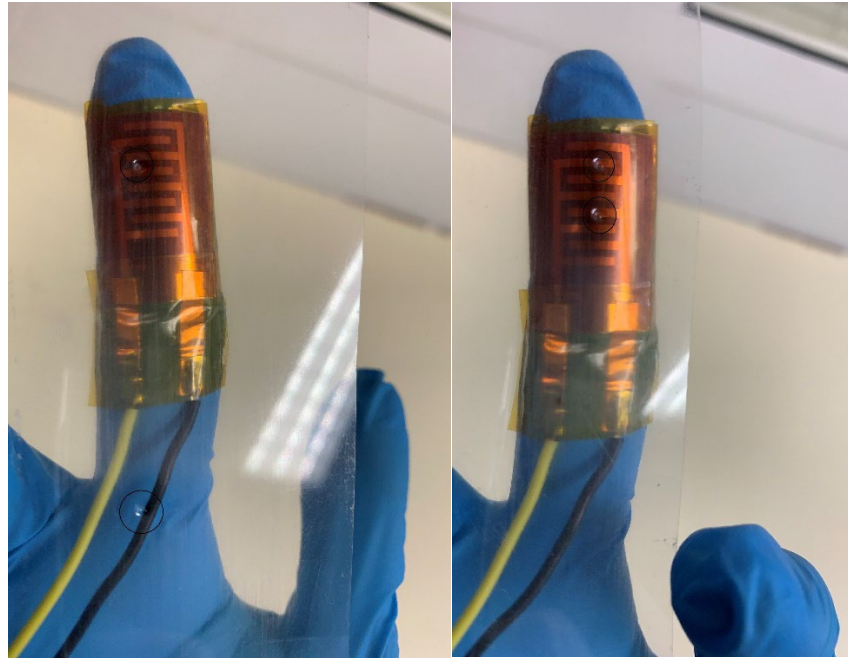
Σχήμα 5.19 Σήματα ολίσθησης σε πλαστικό φύλλο αναφοράς και σε ανάγλυφη τελεία για αισθητήρα FPCB

### 5.3.2 Μελέτη ανίχνευσης ανάγλυφου για κάθετα διαδοχικές κουκίδες

Έχοντας εξασφαλίσει ότι η αναγνώριση του ανάγλυφου μίας κουκίδας είναι εφικτή για τους αισθητήρες αφής με εναπόθεση Cr – Cu και Al, τα πειράματα που ακολουθούν αφορούν την μελέτη της αναγνώρισης κάθετα διαδοχικών κουκίδων, κατά την ολίσθηση. Το πείραμα διεξάχθηκε για τέσσερις διαφορετικές μορφολογίες επιφάνειας, με δύο διαδοχικές κουκίδες σε αποστάσεις 45, 30, 20 και 5 mm. Τα αποτελέσματα των σημάτων που λήφθηκαν για τους έξι μελετώμενους αισθητήρες, είναι αντιπροσωπευτικά αυτών του Σχήματος 5.25, για τον αισθητήρα 1-KB22\_3Cu. Η ύπαρξη κορυφής τάσης είναι η ένδειξη ανίχνευσης της κουκίδας και όπως φαίνεται στα γραφήματα των 45, 30 και 20 mm είναι εμφανώς παρατηρήσιμες οι δύο κορυφές που αντιστοιχούν στις δύο κουκίδες, που συναντά ο αισθητήρας, στην κάθετη πορεία ολίσθησής του. Η απόσταση ανάμεσα στις δύο διαδοχικές κορυφές τάσης A1 και A2 είναι μεγαλύτερη καθώς οι δύο κουκίδες απέχουν το μέγιστο, σε σχέση με τα επόμενα δύο πειράματα των 30 mm,

που το κενό ανάμεσα στην κορυφές μειώνεται ενώ στην περίπτωση των 20 mm απόσταση οι κορυφές είναι διαδοχικές. Αυτό ερμηνεύεται βάση του μήκος των IDE διατάξεων του αισθητήρα, το οποίο στην περίπτωση του αισθητήρα K-B22\_3Cu σχεδιάστηκε στα 14 mm. Καθώς ο αισθητήρας ολισθαίνει στην επιφάνεια και συναντά την πρώτη κουκίδα, γνωρίζοντας ότι η απόσταση έως την επόμενη είναι 45 mm, δεν θα υπάρχει σημείο στην ολίσθηση όπου ο αισθητήρας θα είναι σε επαφή και με τις δύο κουκίδες, σε κανένα σημείο της επιφάνειας του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1 (α). Συνεπώς, θα αγγίξει την πρώτη κουκίδα, θα διανύσει ένα μήκος πλαστικού φύλλου και μετά θα συναντήσει την επόμενη κουκίδα, ώστε να σχηματιστεί η δεύτερη κορυφή ανίχνευσης του ανάγλυφου. Ομοίως και στις περιπτώσεις των 30 και 20 mm. Γενικεύοντας την παρατήρηση, όσο η απόσταση των κουκίδων είναι μεγαλύτερη από το συνολικό μήκος των IDE του αισθητήρα, οι κουκίδες που συναντά ο αισθητήρα στην πορεία της ολίσθησής του, θα φαίνονται με ξεχωριστές κορυφές τάσης, στο αποτύπωμα ηλεκτρικού σήματος της επιφάνειας. Καθώς η απόσταση των κουκίδων πλησιάζει σε μέγεθος το μήκος των ηλεκτροδίων, οι κορυφές πυκνώνουν διότι η επιφάνεια των IDE συναντά άμεσα το επόμενο ανάγλυφο.

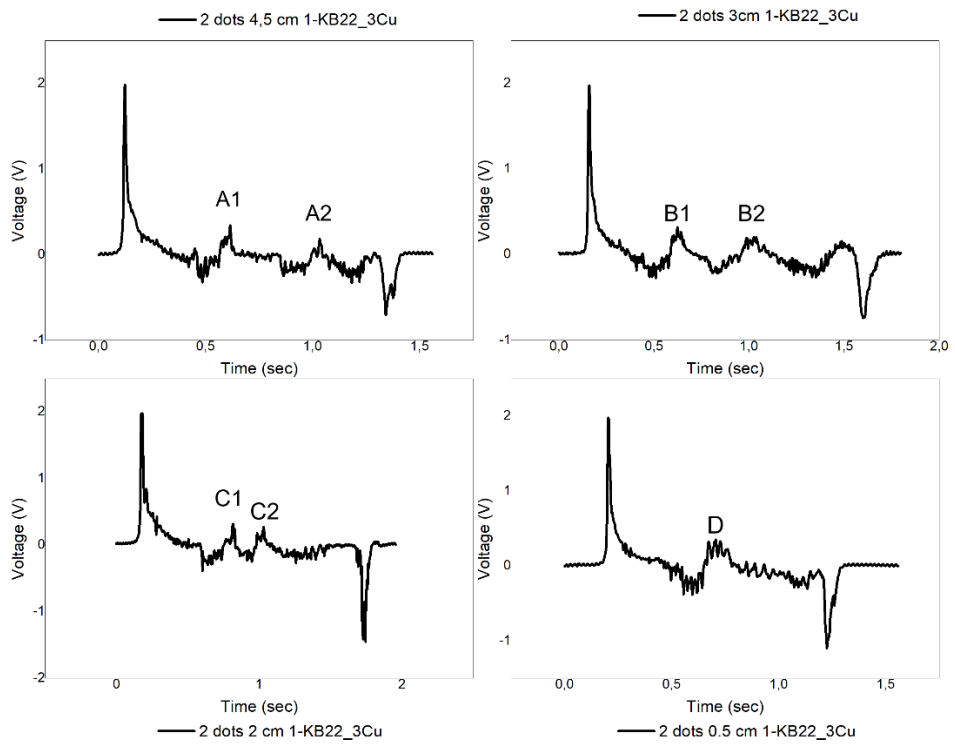
Η περίπτωση που η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κουκίδες είναι μικρότερη του μήκους των IDE ηλεκτροδίων του αισθητήρα, παρουσιάζεται στο γράφημα “2 dot 0.5 cm 1-KB22\_2Cu”. Σε αυτή την διάταξη, όταν ο αισθητήρας ολισθαίνει στο ανάγλυφο της πρώτης κουκίδας, συναντά παράλληλα και την δεύτερη κουκίδα, πριν ολοκληρώσει της ολίσθηση στην πρώτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1 (β). Ως αποτέλεσμα αυτού, δεν είναι εμφανής οι δύο κορυφές που αντιστοιχούν στην ύπαρξη δύο ανάγλυφων κουκίδων στην επιφάνεια των πλαστικού φύλλου. Ωστόσο, η τιμή τάσης της κορυφής που δημιουργεί η μηχανική παραμόρφωση από δύο ανάγλυφα σημεία είναι αυξημένη, προδίδοντας έτσι την ύπαρξη παραπάνω του ενός ανάγλυφου τμήματος, στην διαδικασία ολίσθησης, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.3, αντιπροσωπευτικά για δύο αισθητήρες.



(α)

(β)

Εικόνα 5.1 Διαδοχικές αποστάσεις κουκίδων 45mm και 0.5 mm

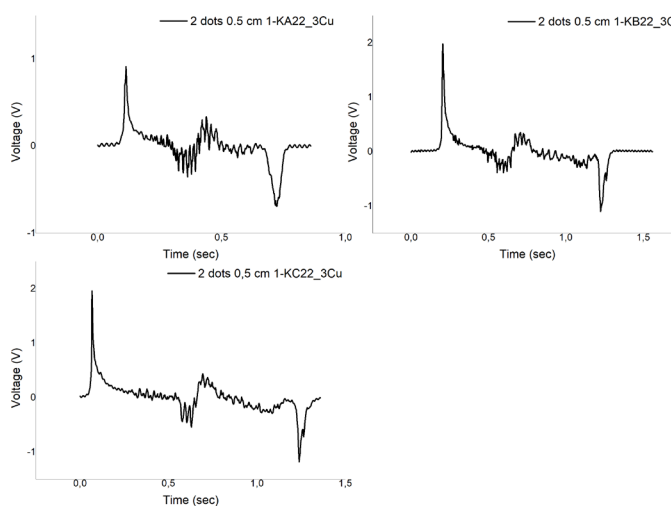


Σχήμα 5.20 Σήματα αισθητήρα 1-KB22\_3Cu για την αναγνώριση κάθετη διαδοχικών κουκίδων

Απόσταση (cm)	Κουκίδα 1 (V)	Κουκίδα 2 (V)	Μέσος όρος ( V)	
4.5	0,34	0,18	0,26	1-KB22_3Cu
3	0,32	0,19	0,26	
2	0,31	0,23	0,27	
0.5		0,34		
4.5	0,51	0,27	0,39	1-KC21_3Al
3	0,19	0,10	0,15	
2	0,20	0,10	0,15	
0.5		0,43		

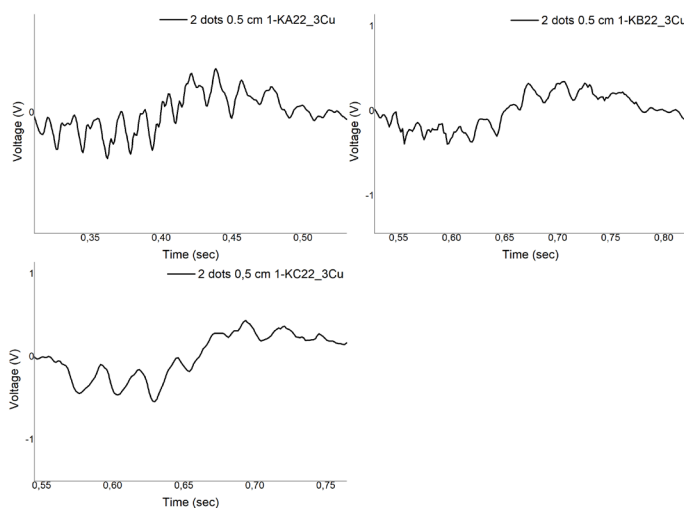
Πίνακας 5.3 Υπολογισμός μέσου όρου μέγιστης τάσης για κάθε ανάγλυφη κουκίδα και σύγκριση με την τιμή τάσης για την ελάχιστη απόσταση κουκίδων όπου ο αισθητήρας ολισθαίνει ταυτόχρονα και στις δύο

Το Σχήμα 5.22 είναι κατάλληλο ώστε να παρουσιαστεί ο τρόπος που το πλήθος των μεταλλικών διαδρομών αποτυπώνεται στο σήμα, κατά την ολίσθηση στα διαφορετικά ανάγλυφα. Στο Σχήμα 5.21 διαπιστώνεται πως κατά την ολίσθηση στις ανάγλυφες κουκίδες, σχηματίζονται διαδοχικές μικρές κορυφές οι οποίες είναι πυκνότερες για τον αισθητήρα που διαθέτει το μικρότερο πλάτος μεταλλικών διαδρομών, άρα και μεγαλύτερο πλήθος «δακτύλων», ενώ αραιώνουν καθώς το πλάτος των «δακτύλων» αυξάνεται και αντίστροφα το πλήθος τους μειώνεται. Μεγεθύνοντας το σημείο όπου συμβαίνει η ολίσθηση του αισθητήρα στην επιφάνεια των κουκίδων, γίνεται ακόμα πιο εμφανές ότι οι κορυφές τάσης που εμφανίζονται στα σήματα είναι ανάλογες του πλήθους των δακτύλων που διαθέτει κάθε αισθητήρας, για όμοια τιμή μέγιστης τάσης προσεγγιστικά στα 0.33 V.



Σχήμα 5.21 Σήματα ανίχνευσης ανάγλυφου δύο κουκίδων απόστασης 0.5 cm για τον αισθητήρα 1-KA22\_3Cu

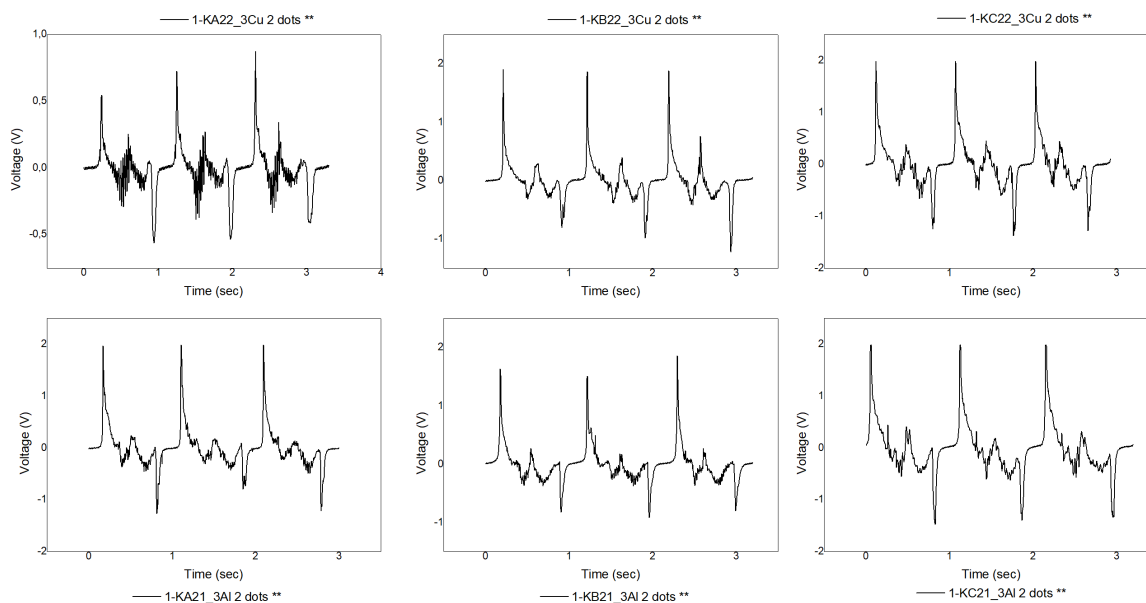




Σχήμα 5.22 Μεγέθυνση των σημάτων όπου υπάρχει ανίχνευση των κουκίδων, ώστε να παρατηρηθεί η αποτύπωση του πλήθους των μεταλλικών διαδρόμων σε κάθε περίπτωση γεωμετρίας IDE.

### 5.3.3 Μελέτη ανίχνευσης ανάγλυφου οριζόντια διαδοχικών κουκίδων

Οι εώς τώρα παρατηρήσεις και διαπιστώσεις για τον τρόπο που ανιχνεύονται τα διαφορετικά ανάγλυφα από τους αισθητήρες αφής, επιβεβαιώνονται και στην περίπτωση όπου οι τελείες βρίσκονται διαδοχικά οριζόντια σε απόσταση μικρότερη του μήκους των IDE, δηλαδή των 10 mm. Καθώς ο αισθητήρας ολισθαίνει ταυτόχρονα και στις δύο κουκίδες, το κάθε «δάχτυλο» των ηλεκτροδίων, παρουσιάζει μεγαλύτερο φορτίο καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια επαφής μεταξύ των υλικών, τόσο περισσότερο φορτίο μεταφέρεται, οδηγώντας σε υψηλότερη τάση εξόδου. Συνεπώς, ενώ η κορυφή τάσης του σήματος είναι μοναδική, σαν να έχει ανιχνευτεί στο ανάγλυφο μια μοναδική κουκίδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.23, η μελέτη της τιμής τάσης της κορυφής επιβεβαιώνει την ύπαρξη και δεύτερης κουκίδας στην επιφάνεια. Αυτό φαίνεται στον Πίνακα 5.4, όπου συγκρίνονται οι τάσεις των κορυφών για μια κουκίδα και δύο κουκίδες αντίστοιχα. Στην περίπτωση των αισθητήρων εναπόθεσης Cr – Cu τα αποτελέσματα είναι εμφανώς σύμφωνα με την θεωρία, ενώ στην περίπτωση των αισθητήρων εναπόθεσης Al παρατηρούνται μικρότερες αυξήσεις της τάσης.



Σχήμα 5.23 Σήματα ανίχνευσης δύο κουκίδων σε οριζόντια διάταξη μεταξύ τους

	1 κουκίδα - Μέσος όρος παλμών (V)	2 κουκίδες οριζόντια διαδοχικές			
		Παλμός A (V)	Παλμός B (V)	Παλμός C (V)	Μέσος όρος (V)
1-KA22_3Cu	0,08	0,25	0,27	0,34	0,29
1-KB22_3Cu	0,23	0,29	0,36	0,75	0,47
1-KC22_3Cu	0,31	0,37	0,45	0,44	0,42
1-KA21_3Al	0,19	0,22	0,17	0,13	0,17
1-KB21_3Al	0,23	0,26	0,17	0,27	0,23
1-KC21_3Al	0,11	0,4	0,19	0,31	0,30

Πίνακας 5.4 Συγκριτικός πίνακας τιμών τάσης ανίχνευσης μίας και δύο κουκκίδων σε οριζόντια απόσταση μεταξύ τους

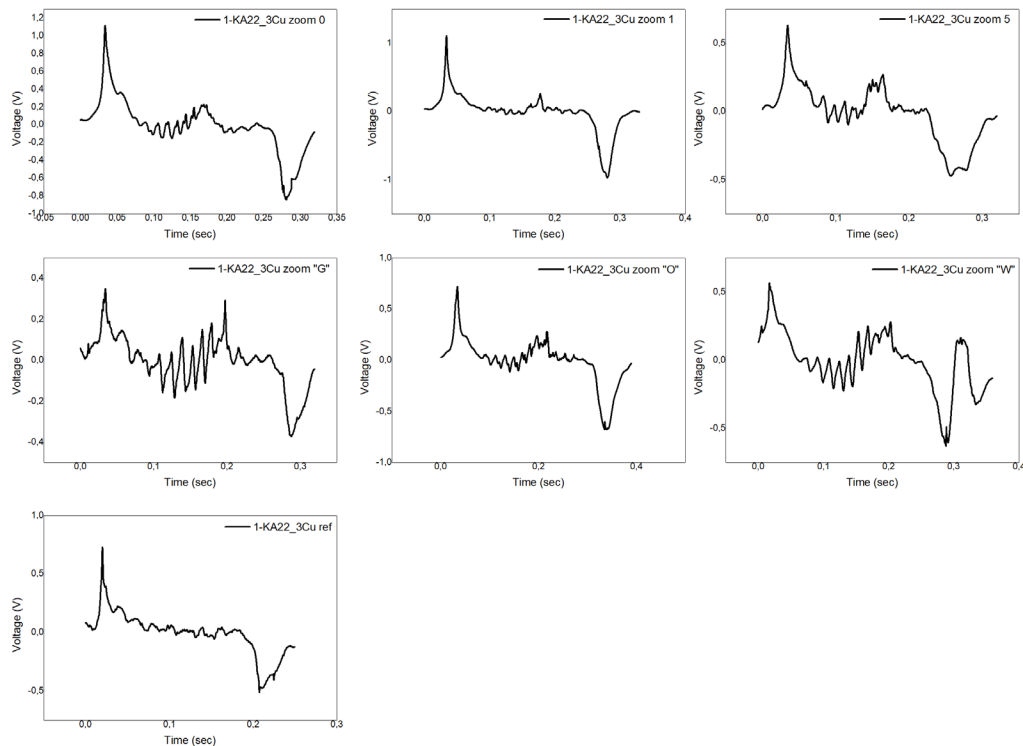
## 5.4 Αναγνώριση ανάγλυφων κωδικοποιήσεων γραφής Braille

Η γραφή Braille είναι ένα σύστημα ανάγλυφων σημείων που χρησιμοποιείται ως τρόπος ανάγνωσης και γραφής κυρίως από άτομα με προβλήματα όρασης. Αποτελείται από 63 διαφορετικούς χαρακτήρες, ο καθένας από τους οποίους αντιπροσωπεύεται από έναν μοναδικό

συνδυασμό έξι σημείων τοποθετημένων σε έναν πίνακα δύο επί τρία. Αυτές οι κουκκίδες μπορούν να γίνουν αισθητές με την αφή και να ερμηνευθούν από τον αναγνώστη για να συλλαβίσουν γράμματα, αριθμούς, σημεία στίξης και άλλα.

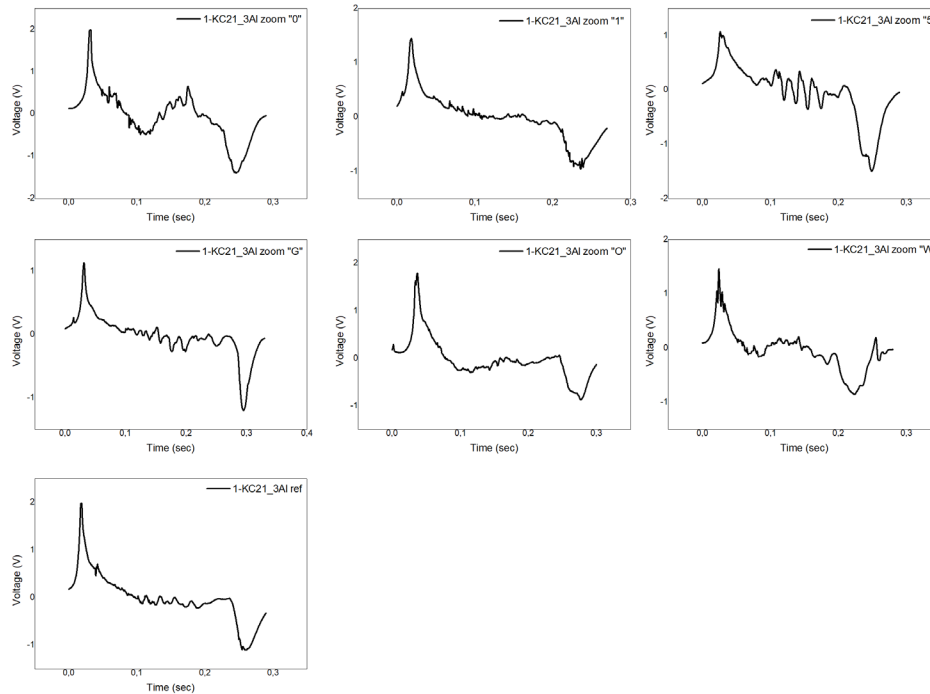
Οι παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα των διαφορετικών πειραμάτων που προέκυψαν από την μελέτη της συμπεριφοράς των τριβοηλεκτρικών αισθητήρων αφής, σε επιφάνειες με ανάγλυφες κουκκίδες, συνοψίζουν ότι είναι εφικτό να αποτυπωθούν με την μορφή ηλεκτρικών σημάτων οι διαφορετικές ανάγλυφες κωδικοποιήσεις της γραφής Braille. Έχοντας αποδείξει ότι οι κάθετα διαδοχικές τελείες αποτυπώνονται στο σήμα με κορυφές τάσης ανάμεσα στις ακμές επαφής και διαχωρισμού του αισθητήρα αφής, ενώ οι διαδοχικές οριζόντια τελείες ανιχνεύονται στην κάθε ακμή από την αύξηση της τιμής τάσης, συγκριτικά με την παρουσία ανάγλυφου μίας κουκκίδας, κάθε συνδυασμός στον πίνακα δύο επί τρία ενώ Braille χαρακτήρα μπορεί να αποτυπωθεί. Φυσικά, αυτό συνεπάγεται ότι η γεωμετρία των ηλεκτροδίων και γενικότερα του αισθητήρα θα πρέπει να είναι μικρότερη από την απόσταση, ανάμεσα σε δύο κάθετα διαδοχικές τελείες ή ότι η γραφή θα γίνεται με μεγαλύτερη απόσταση ανάμεσα σε κάθε γραμμή του πίνακα σχεδιασμού, του ανάγλυφου συμβούλου.

Επιπλέον των παρατηρήσεων που αφορούν την εμφανή αποτύπωση του ανάγλυφου στο ηλεκτρικό σήμα, για την παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε και η περίπτωση σημάτων όπου κάθε ανάγλυφο της γραφής Braille, επιστρέφει ένα ξεχωριστό αποτύπωμα ως ηλεκτρικό σήμα. Αυτό καθιστά ικανό τον διαχωρισμό των διαφορετικών συμβόλων, λόγω την διαφορετικής κυματομορφής του σήματος, χωρίς να ορίζεται με ακρίβεια η θέση κάθε τελείας στον αισθητήρα, αλλά μελετώντας συνολικά το αποτύπωμα της ολίσθησης στο ανάγλυφο, ως ηλεκτρικό σήμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.24, ενδεικτικά για τον αισθητήρα 1-KA22\_3Cu, η ολίσθηση σε έξι διαφορετικά ανάγλυφα Braille, τρεις αριθμούς (0, 1, 5) και τρία γράμματα (G, O, W), κάθε ένα επιστρέφει το δικό του μοναδικό αποτύπωμα, ως ηλεκτρικό σήμα. Φυσικά το αποτύπωμα, εξαρτάται άμεσα από το πλήθος και την θέση των κουκκίδων στην κωδικοποίηση, αλλά δεν μπορεί να γίνει ακριβής προσδιορισμός. Ενδεικτικά, η κωδικοποίηση του αριθμού 1 περιλαμβάνει μία τελεία, ενώ η κωδικοποίηση του W περιλαμβάνει τέσσερις. Αυτό αποτυπώνεται στα διαφορετικά σήματα, όπως έχει ήδη περιγραφή με αύξηση των κορυφών τάσης και αύξηση του φορτίου, ωστόσο δεν μπορεί να προσδιοριστεί η ακριβής θέση των κουκκίδων, λόγω των μικρών αποστάσεων του κάθε ανάγλυφου.



Σχήμα 5.24 Διαφοροποίηση ανάγλυφων κωδικοποιήσεων γραφής Braille για τον αισθητήρα 1-KA22\_3Cu

Σε αυτή την περίπτωση μελέτης, λαμβάνονται υπόψιν όλες οι παρατηρήσεις που αφορούν την συμπεριφορά των αισθητήρων βάση της γεωμετρίας των IDE, της ασκούμενης πίεσης και την ταχύτητας ολίσθησης. Όπως έχει ήδη διαπιστωθεί, στην περίπτωση μελέτης των σημάτων με βάση το αποτύπωμα που επιστρέφουν ως ηλεκτρικό σήμα, οι αισθητήρες μεγάλου πλάτους ηλεκτροδίων δεν εισάγουν επαρκής λεπτομέρειες για το ανάγλυφο στο σήμα, ώστε να είναι σαφής ο διαχωρισμός. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.25, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ίδιου πειράματος για αισθητήρα εναπόθεσης Al, με IDE πλάτους 1000 μm. Είναι οπτικά παρατηρήσιμο ότι οι διαφορές δεν είναι τόσο εμφανής ανάμεσα στις διαφορετικές Braille κωδικοποιήσεις, ενώ συγκρίνοντας τα σήματα με τα όμοια του Σχήματος 5.29, διαπιστώνεται για άλλη μια φορά η λεπτομέρεια που εισάγουν τα IDE μικρότερου πλάτους, καθώς όταν μειώνεται το πλάτος των ηλεκτροδίων, επιτρέπεται η τοποθέτηση περισσότερων «δακτύλων» σε μια δεδομένη περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη χωρική ανάλυση του ανάγλυφου, επιτρέποντας την ανίχνευση μοτίβων στην επιφάνεια, με λεπτομέρεια.



Σχήμα 5.25 Διαφοροποίηση ανάγλυφων κωδικοποιήσεων γραφής Braille για τον αισθητήρα 1-KC21\_3AI

## 5.5 Μελέτη με χρήση συνελκτικών νευρωνικών δικτύων

Οι αισθητήρες αφής και η διεπαφή ανθρώπου-μηχανής αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται και να διαδραματίζει μεγαλύτερο ρόλο στην καθημερινή ζωή. Τα ηλεκτρικά σήματα που παράγουν οι τριβοηλεκτρικοί αισθητήρες αφής μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τις επιφάνειες επαφής και χαρακτηριστικά της επαφής, όπως η διάρκεια, η πίεση και άλλα. Συνδυάζοντας τις δυνατότητες των αισθητήρων αφής με τα νευρωνικά δίκτυα, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν συστήματα διεπαφής ανθρώπου-μηχανής, με σκοπό να προκύψουν εφαρμογές που βελτιώνουν την ποιότητα ζωής των ατόμων με ειδικές ανάγκες και περιορισμούς και σε άλλες εφαρμογές σε τομείς όπως η ρομποτική και το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of things, IoT).

Στον ιατρικό τομέα, οι αισθητήρες αφής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συσκευές προσθετικής και αποκατάστασης για την παροχή αισθητηριακής ανατροφοδότησης και τη

βελτίωση της λειτουργικότητας. Για παράδειγμα, ένα προσθετικό χέρι εξοπλισμένο με αισθητήρες αφής μπορεί να επιτρέψει στον χρήστη να αισθάνεται την αφή και την πίεση, βελτιώνοντας την ικανότητά του να εκτελεί καθημερινές εργασίες. Στον τομέα της ρομποτικής, αισθητήρες αφής μπορούν να ενσωματωθούν σε ρομπότ για να παρέχουν αισθητηριακή ανατροφοδότηση και να βελτιώσουν την απόδοση. Για παράδειγμα, αισθητήρες στα άκρα των δακτύλων του ρομπότ μπορούν να του επιτρέψουν να ανιχνεύει και να ανταποκρίνεται στη φυσική αφή, βελτιώνοντας την ικανότητά του να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την αναγνώριση των διαφορετικών επιφανειών που αγγίζει ο χρήστης με το δάχτυλο που διαθέτει τον προσαρμοσμένο αισθητήρα αφής με χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης, σχεδιάστηκε δισδιάστατο συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (2 Dimensional Convolutional Neural Network, 2D CNN), ένας τύπος μοντέλου βαθιάς μάθησης για επεξεργασία δισδιάστατων δεδομένων, όπως εικόνες. Τα διαφορετικά τριβοηλεκτρικά σήματα που προκύπτουν από την επαφή, αποθηκεύτηκαν υπό μορφή εικόνας, σε βάση δεδομένων που σχεδιάστηκε για συγκεκριμένο αισθητήρα και συγκεκριμένα υλικά. Στην συνέχεια, με αυτό το σύνολο δεδομένων εκπαιδεύτηκε το μοντέλο μηχανικής μάθησης που σχεδιάστηκε και τα αποτελέσματα αναγνώρισης παρουσιάζονται σε πίνακες σύγχυσης (confusion matrix).

### **5.5.1 Αρχιτεκτονική Δισδιάστατου Συνελκτικού Νευρωνικού Δικτύου**

Στην ταξινόμηση σημάτων, τα 2D-CNN χρησιμοποιούνται για την αυτόματη εκμάθηση και ταξινόμηση διαφορετικών τύπων σημάτων σε μορφή εικόνας, με βάση τα μοναδικά χαρακτηριστικά και μοτίβα τους. Η αρχιτεκτονική των 2D-CNN, όπως παρουσιάζεται και στην ενότητα 2.4.3, του θεωρητικού υποβάθρου, αποτελείται από το Συνελκτικό επίπεδο (Convolutional Layer), το επίπεδο συγκέντρωσης (Pooling Layer) και το πλήρως συνδεδεμένο επίπεδο (Fully Connected Layer).

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ανήκει στην κατηγορία των αλγορίθμων επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης με ταξινόμηση. Σε αυτή την κατηγορία αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, τα δεδομένα χωρίζονται σε κλάσεις – ετικέτες

(labels) και ο αλγόριθμος ταξινομεί βάση της εκπαίδευσης του τα δεδομένα εισόδου σε κατηγορίες. Για το πρόβλημα ταξινόμησης που αφορά την αναγνώριση των υλικών που άγγιξε ο αισθητήρας, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις κλάσεις: γυαλί, ξύλο, ανθρώπινο δέρμα και τυπικό φύλλο χαρτιού εκτύπωσης.

Ο σχεδιασμός του συνελκτικού νευρωνικού δικτύου περιλαμβάνει δύο (2) επίπεδα συνέλιξης και δύο (2) επίπεδα συγκέντρωσης με χρήση max pooling τεχνικής, ακολουθούμενα από το πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο, δηλαδή πέντε (5) κρυφά επίπεδα. Πιο αναλυτικά, η περίληψη του μοντέλου που σχεδιάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.26. Το μοντέλο μηχανικής μάθησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιήθηκε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python (έκδοση 3.9) και της βιβλιοθήκης Keras 2.10.0. Το Keras είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη βιβλιοθήκη βαθιάς μάθησης ανοικτού κώδικα, που παρέχει μία υψηλού επιπέδου Διασύνδεση Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interface, API), κατάλληλη για τη δημιουργία και την εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Για την εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX1060 6GB (GPU driver 528.33) με τις απαραίτητες για την λειτουργία του μοντέλου βιβλιοθήκες CUDA toolkit 11.2 και cuDNN 8.1.0, οι οποίες εγκαταστάθηκαν μέσω του περιβάλλοντος Miniconda 3.

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv2d (Conv2D)	(None, 223, 223, 16)	1216
activation (Activation)	(None, 223, 223, 16)	0
max_pooling2d (MaxPooling2D)	(None, 111, 111, 16)	0
batch_normalization (Batch Normalization)	(None, 111, 111, 16)	64
dropout (Dropout)	(None, 111, 111, 16)	0
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 107, 107, 32)	12832
activation_1 (Activation)	(None, 107, 107, 32)	0
max_pooling2d_1 (MaxPooling2D)	(None, 53, 53, 32)	0
batch_normalization_1 (Batch Normalization)	(None, 53, 53, 32)	128
dropout_1 (Dropout)	(None, 53, 53, 32)	0
flatten (Flatten)	(None, 89888)	0
dense (Dense)	(None, 64)	5752896
dropout_2 (Dropout)	(None, 64)	0
dense_1 (Dense)	(None, 4)	260
Total params: 5,767,396		
Trainable params: 5,767,300		
Non-trainable params: 96		

Σχήμα 5.26 Περίληψη αρχιτεκτονικής μοντέλου 2D-CNN που σχεδιάστηκε για την αναγνώριση των επιφανειών που αγγίζει ο αισθητήρας αφής

Ως συνάρτηση ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση ενεργοποίησης ανορθωτή (Rectified Linear Unit, ReLU). Η ReLU χρησιμοποιείται ευρέως σε δίκτυα βαθιάς μάθησης και ορίζεται ως εξής:  $f(x) = \max(0, x)$ . Η συνάρτηση ενεργοποίησης στην μηχανική μάθηση, είναι μια μαθηματική συνάρτηση που εφαρμόζεται στην έξοδο κάθε κόμβου ή νευρώνα του δικτύου και σκοπός είναι να εισάγει μη γραμμικότητα στην έξοδο του κόμβου, επιτρέποντας στο νευρωνικό δίκτυο να μοντελοποιεί μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων. Η συνάρτηση ενεργοποίησης ReLU χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της απλότητας και της υπολογιστικής αποδοτικότητας που προσφέρει, ενώ είναι απαραίτητη στα βαθιά νευρωνικά δίκτυα για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων μη γραμμικών σχέσεων μεταξύ εισόδων και εξόδων.

Ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ο Adam (Adaptive Moment Estimation). Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης απωλειών στη μηχανική μάθηση και τη βαθιά μάθηση. Προσαρμόζει τις παραμέτρους του μοντέλου για να βρει τις βέλτιστες τιμές που ελαχιστοποιούν την απώλεια, ώστε το μοντέλο να μπορεί να κάνει ακριβείς προβλέψεις.



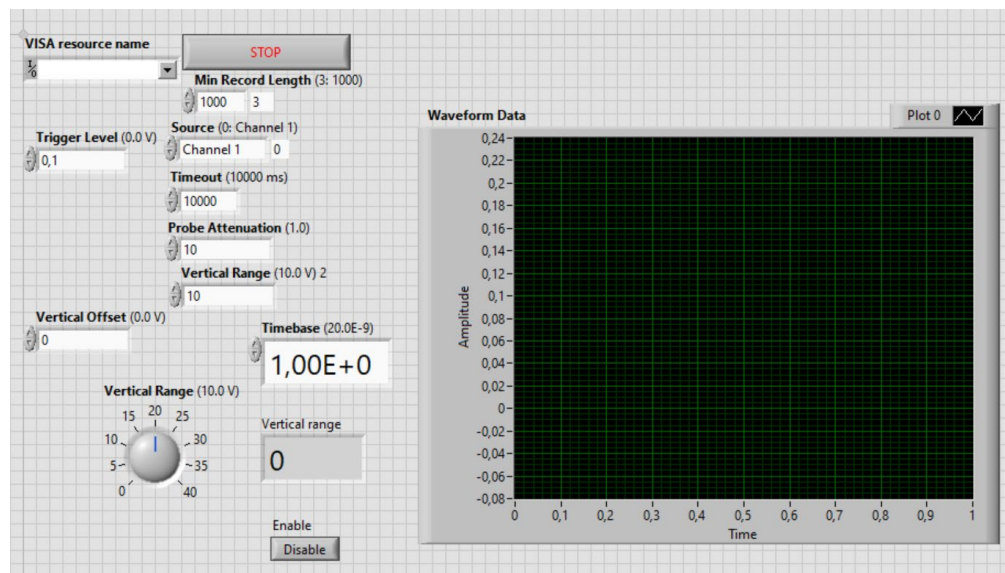
Ως υπερπαράμετροι ορίστηκαν ο αριθμός των εποχών εκπαίδευσης (epochs), το batch size και ο ρυθμός εκμάθησης (Learning rate - LR). Μια εποχή είναι μια πλήρης επανάληψη μέσω του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης. Κατά τη διάρκεια μιας εποχής, το μοντέλο εκπαιδεύεται σε όλα τα δεδομένα εκπαίδευσης και τα βάρη του μοντέλου ενημερώνονται με βάση την απώλεια που υπολογίζεται σε ολόκληρο το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Ο αριθμός των εποχών είναι μια υπερπαράμετρος που καθορίζει πόσες φορές το μοντέλο θα δει ολόκληρο το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Το μοντέλο εκπαιδεύεται σε μια παρτίδα παραδειγμάτων και οι κλίσεις υπολογίζονται με βάση την απώλεια για τη συγκεκριμένη παρτίδα. Το μέγεθος παρτίδας είναι μια υπερπαράμετρος που επηρεάζει τη χρήση μνήμης του μοντέλου και την ταχύτητα εκπαίδευσης. Ο ρυθμός μάθησης είναι μια υπερπαράμετρος που καθορίζει το μέγεθος των ενημερώσεων που εφαρμόζονται στα βάρη του μοντέλου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης.

Για το επίπεδο εξόδου επιλέχθηκε η συνάρτηση ενεργοποίησης Softmax, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ενεργοποίησης στα CNN για προβλήματα ταξινόμησης πολλαπλών κλάσεων. Η συνάρτηση Softmax είναι κατάλληλη για την αναπαράσταση μιας κατανομής πιθανότητας, όπου κάθε στοιχείο του διανύσματος εξόδου αντιπροσωπεύει την πιθανότητα η είσοδος να ανήκει σε μια συγκεκριμένη κλάση. Σε ένα πρόβλημα ταξινόμησης πολλαπλών κλάσεων, το στρώμα εξόδου του CNN αποτελείται από πολλαπλούς νευρώνες, καθένας από τους οποίους αντιπροσωπεύει μια διαφορετική κλάση. Η συνάρτηση ενεργοποίησης Softmax εφαρμόζεται στις εξόδους αυτών των νευρώνων για την παραγωγή ενός διανύσματος πιθανοτήτων κλάσης. Η τελική πρόβλεψη του μοντέλου είναι η κλάση με την υψηλότερη πιθανότητα.

Στην έξοδο κάθε επιπέδου μετά τη συνάρτηση ενεργοποίησης, εφαρμόζεται Batch Normalization ενώ σε κάθε επίπεδο χρησιμοποιείται συνάρτηση απομάκρυνσης (Dropout), προκειμένου να καθοριστεί το ποσοστό των ενεργοποιήσεων που θα εγκαταλείπονται κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης εκπαίδευσης. οπότε το μοντέλο δεν αναγκάζεται να μάθει πολλαπλές, περιττές αναπαραστάσεις των δεδομένων εισόδου. Χρησιμοποιήθηκε ποσοστό απόρριψης 0.2, δηλαδή το 20% των ενεργοποιήσεων θα εγκαταλειφθούν τυχαία σε κάθε πέρασμα προς τα εμπρός κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης.

## 5.5.2 Σύνολο δεδομένων υλικών επαφής

Το CNN μοντέλο που σχεδιάστηκε, προκειμένου να μελετηθεί η ικανότητα αναγνώρισης του υλικού, εκπαιδεύτηκε σε ένα σύνολο δεδομένων με την μορφή εικόνων που αποτυπώνουν τα διαφορετικά σήματα που προκύπτουν από το άγγιγμα του αισθητήρα σε επιφάνεια γυαλιού, ξύλου, χαρτιού και σε ανθρώπινο δέρμα. Προκειμένου να ληφθεί επαρκής ποσότητα δεδομένων, ώστε το μοντέλο να εκπαιδευτεί με όσο το δυνατόν περισσότερες εικόνες από τα διαφορετικά σήματα, ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε κατά τις πειραματικές διαδικασίες, συνδέθηκε ως διεπαφή χρήστη σε υπολογιστή, με χρήση του λογισμικού LabView. Το εικονικό όργανο που δημιουργήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.27



Σχήμα 5.27 Virtual Instrument παλμογράφου - LabView

Κάθε χρονική στιγμή που ο αισθητήρας αγγίζει μια επιφάνεια, η διεπαφή χρήστη του παλμογράφου πραγματοποιεί δειγματοληψία χιλίων σημείων του σήματος, αποθηκεύοντας τα δεδομένα σε διαδοχικά αρχεία μορφής LabVIEW Measurement (.lvm). Παράλληλα, εκτελείται σενάριο (script), σε γλώσσα Python, όπου μετατρέπει κάθε νέο αρχείο .lvm που αποθηκεύεται για κάθε επόμενο άγγιγμα του αισθητήρα, σε αρχείο τιμών διαχωρισμένο με κόμμα (.csv), και στην συνέχεια τα δεδομένα κάθε αρχείου σε εικόνες, με χρήση της βιβλιοθήκης matplotlib, εντός της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση. Η μετατροπή σε αρχεία .csv πραγματοποιήθηκε λόγω συμβατότητας καθώς τα αρχεία .csv μπορούν εύκολα να υποβληθούν σε επεξεργασία από ένα ευρύ φάσμα λογισμικών και επιπλέον είναι αποδοτικά ως προς τον

χώρο. Το σύνολο των δεδομένων που συλλέχθηκαν αποτελείται συνολικά από 5043 εικόνες στο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, 558 στο σύνολο δεδομένων επικύρωσης και 702 στο σύνολο δεδομένων ελέγχου.

### 5.5.3 Πίνακες σύγχυσης και παρουσίαση αποτελεσμάτων ταξινόμησης

Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός μοντέλου ταξινόμησης. Εμφανίζει τον αριθμό των περιπτώσεων που ταξινομήθηκαν σωστά και λανθασμένα για κάθε κλάση, ενώ οι γραμμές του πίνακα αντιστοιχούν στις πραγματικές ετικέτες κλάσης και οι στήλες αντιστοιχούν στις προβλεπόμενες ετικέτες κλάσης. Για την παρούσα διπλωματική εργασία, οι κλάσεις αντιστοιχούν στα υλικά που εκπαιδεύεται το μοντέλο να αναγνωρίσει, δηλαδή ξύλο, γυαλί, χαρτί και ανθρώπινο δέρμα. Ο πίνακας σύγχυσης είναι ένα εργαλείο μέτρησης της απόδοσης που χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση μοντέλων ταξινόμησης και αποτελεί μια οπτική αναπαράσταση των ποσοστών ακρίβειας και σφάλματος ενός μοντέλου, ενώ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό επιπλέον μετρικών αξιολόγησης. Τα διαγώνια κελιά του πίνακα σύγχυσης αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των περιπτώσεων που έχουν τις ίδιες αληθείς και προβλεπόμενες ετικέτες κλάσης και, επομένως, ταξινομούνται σωστά από το μοντέλο. Τα εκτός διαγώνιου κελιά αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των περιπτώσεων που έχουν διαφορετικές αληθείς και προβλεπόμενες ετικέτες κλάσης και επομένως ταξινομούνται εσφαλμένα από το μοντέλο.

Στο Σχήμα 5.28, φαίνεται ένα παράδειγμα δυαδικού πίνακα σύγχυσης όπου ισχύει:

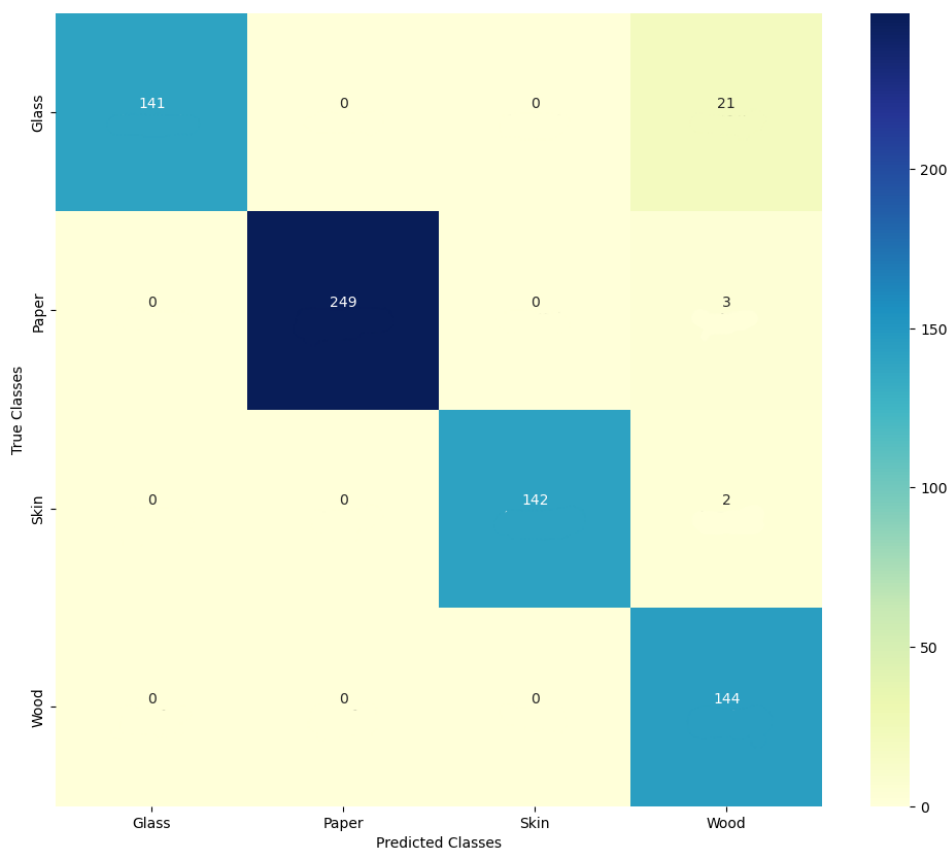
- TP (True Positive): Περιπτώσεις που ταξινομήθηκαν σωστά ως θετικές.
- FP (False Positive): Περιπτώσεις που ταξινομήθηκαν εσφαλμένα ως θετικές.
- FN (False Negative): Περιπτώσεις που ταξινομήθηκαν εσφαλμένα ως αρνητικές.
- TN (True Negative): Περιπτώσεις που ταξινομήθηκαν σωστά ως αρνητικές.

Στο Σχήμα 5.29, παρουσιάζεται ο πίνακας σύγχυσης που προέκυψε από την ταξινόμηση των σημάτων που εξάχθηκαν ως μοναδικό αποτύπωμα των επιφανειών που άγγιξε ο αισθητήρας αφής. Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης είναι πλήρως ικανοποιητικά για κάθε επιφάνεια, με ελάχιστες λανθασμένες ταξινομήσεις σε κάθε κλάση. Ο μεγαλύτερος αριθμός λανθασμένων ταξινομήσεων παρουσιάζεται στο γυαλί, με 21 σήματα να μην έχουν αναγνωρισθεί ορθά, ενώ για τις υπόλοιπες επιφάνειες ο αριθμός λανθασμένης αναγνώρισης του αποτυπώματος του υλικού

που άγγιξε ο αισθητήρας, δηλαδή της επιφάνειας, είναι ελάχιστες. Συνολικά, το μοντέλο παρουσιάζει ακρίβεια (accuracy) 97%. Η ακρίβεια ορίζεται ως ο αριθμός των σωστών προβλέψεων που έγιναν από το μοντέλο διαιρεμένος με τον συνολικό αριθμό των προβλέψεων που έγιναν από το μοντέλο και μετρά τη συνολική ορθότητα του μοντέλου.

		Actual	
		Positive	Negative
Predicted	Positive	True Positive TP	False Positive FP
	Negative	False Negative FN	True Negative TN

Σχήμα 5.28 Διαδικός πίνακας σύγχυσης



Σχήμα 5.29 Πίνακας σύγχυσης μοντέλου 2D-CNN για τον αισθητήρα 1-KA22\_3Cu

#### 5.5.4 Μετρικές αξιολόγησης της απόδοσης του μοντέλου

Μέσω της μελέτης του πίνακα σύγχυσης, μπορούν να εξαχθούν ποσοστά μετρικών για την περαιτέρω αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου ταξινόμησης παρέχοντας λεπτομέρειες σχετικά με την ποιότητα της ταξινόμησης αλλά και τον εντοπισμό προβλημάτων στο μοντέλο και τις προβλέψεις. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ακρίβεια (precision), ανάκληση (recall) και το μέτρο F1 (F1-score). Τα ποσοστά, όπως εξάχθηκαν από το μοντέλο φαίνονται στο Σχήμα 5.30.

Αρχικά η ακρίβεια (accuracy) για κάθε κλάση σε ένα μοντέλο 2D-CNN αναφέρεται στο μέτρο του πόσο καλά το μοντέλο είναι σε θέση να προβλέψει σωστά την κλάση ενός συγκεκριμένου δείγματος εισόδου. Εκφράζεται σε ποσοστό και υπολογίζεται με τον τύπο: Ακρίβεια κλάσης = (αριθμός σωστά ταξινομημένων δειγμάτων από την κλάση) / (συνολικός αριθμός δειγμάτων από την κλάση) \* 100%. Ενδεικτικά η ακρίβεια του χαρτιού είναι  $249/(249+3) = 0.98$  ή 98%. Δηλαδή το μοντέλο ταξινομεί σωστά ένα ηλεκτρικό σήμα ως αποτύπωμα γυαλιού, στο 98% των περιπτώσεων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ακρίβεια κλάσης μπορεί μερικές φορές να είναι παραπλανητική εάν οι κλάσεις είναι ιδιαίτερα ανισόρροπες, δηλαδή εάν μια κλάση έχει σημαντικά περισσότερα δείγματα από άλλες, καθώς το μοντέλο θα μπορούσε να επιτύχει υψηλή ακρίβεια απλά προβλέποντας πάντα την πλειοψηφούσα κλάση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι συχνά πιο ουσιαστικό να αξιολογείται το μοντέλο χρησιμοποιώντας άλλες μετρικές όπως η ανάκληση και η βαθμολογία F1, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τον αριθμό των ψευδώς θετικών και ψευδώς αρνητικών προβλέψεων που έκανε το μοντέλο.

Η ανάκληση (recall) για κάθε κλάση σε ένα μοντέλο 2D-CNN, μετρά το ποσοστό των θετικών δειγμάτων που αναγνωρίζονται σωστά ως θετικά από το μοντέλο, για μια συγκεκριμένη κλάση. Ο τύπος για την ανάκληση για την κλάση c σε ένα πρόβλημα ταξινόμησης πολλαπλών κλάσεων είναι: Ανάκληση κλάσης A = (Σωστά θετικά για την κλάση A) / (Σωστά θετικά για την κλάση A + Λάθος αρνητικά για την κλάση A). Για το παρόν μοντέλο, το χαμηλότερο ποσοστό ανάκλησης διαθέτει το ξύλο ενώ παρουσιάζεται για το δέρμα τιμή ανάκλησης 1. Μια υψηλή τιμή ανάκλησης για μια συγκεκριμένη κλάση υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι σε θέση να αναγνωρίσει σωστά τα περισσότερα θετικά δείγματα για τη συγκεκριμένη κλάση. Μια χαμηλή τιμή ανάκλησης, από την άλλη πλευρά, υποδηλώνει ότι το μοντέλο λανθάνει σε πολλά θετικά

δείγματα για τη συγκεκριμένη κλάση και επομένως δυσχεραίνει στον εντοπισμό τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μια τιμή ανάκλησης 1 στα δεδομένα εκπαίδευσης μπορεί να αποτελεί ένδειξη υπερπροσαρμογής, ιδίως εάν η τιμή ανάκλησης πέφτει σημαντικά στα δεδομένα επικύρωσης ή δοκιμής. Ωστόσο, μια τιμή ανάκλησης 1 θα μπορούσε επίσης να επιτευχθεί από ένα μοντέλο που είναι σε θέση να γενικεύει καλά σε νέα δεδομένα.

Η ακρίβεια (precision) μετρά το ποσοστό των θετικών προβλέψεων που είναι πραγματικά σωστές και παρουσιάζεται μαθηματικά ως εξής:  $\text{Ακρίβεια} = \frac{\text{Αληθινά Θετικά}}{\text{Αληθινά Θετικά} + \text{Ψευδώς Θετικά}}$ . Μια υψηλή ακρίβεια υποδηλώνει ότι το μοντέλο κάνει πολύ λίγες ψευδώς θετικές προβλέψεις, δηλαδή δεν χαρακτηρίζει πολλά αρνητικά δείγματα ως θετικά. Ένα μοντέλο υψηλής ακρίβειας μπορεί να έχει χαμηλή ανάκληση, όπως στην περίπτωση του ξύλου, πράγμα που σημαίνει ότι είναι πολύ καλό στον εντοπισμό θετικών δειγμάτων, αλλά του διαφεύγουν πολλά θετικά δείγματα που ταξινομούνται εσφαλμένα ως αρνητικά. Το παρόν μοντέλο, παρουσιάζει σε όλες τις κλάσεις, εκτός του ξύλου precision 1. Στην περίπτωση της ακρίβειας, η τιμή 1 στα δεδομένα εκπαίδευσης μπορεί να υποδηλώνει ότι το μοντέλο κάνει σωστή ταξινόμηση θετικών δειγμάτων στα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά δεν σημαίνει απαραίτητα ότι θα έχει καλή απόδοση στα νέα δεδομένα. Για να προσδιοριστεί αν υπάρχει υπερπροσαρμογή, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί η απόδοση του μοντέλου σε ένα κρατημένο σύνολο επικύρωσης ή σε ένα σύνολο δοκιμής και να συγκριθεί η απόδοση στα δεδομένα εκπαίδευσης με την απόδοση στα δεδομένα επικύρωσης/δοκιμής.

Το F1-score είναι μια σύνθετη μετρική που εξισορροπεί την ακρίβεια και την ανάκληση λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ψευδώς θετικές όσο και τις ψευδώς αρνητικές προβλέψεις που γίνονται από το μοντέλο. Το F1-score ορίζεται ως ο αρμονικός μέσος όρος της ακρίβειας και της ανάκλησης ως εξής:  $\text{F1-score} = 2 * (\text{Ακρίβεια} * \text{Ανάκληση}) / (\text{Ακρίβεια} + \text{Ανάκληση})$ . Το F1-score παρέχει μια ενιαία τιμή που συνοψίζει την απόδοση του μοντέλου για κάθε κλάση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον αριθμό των ψευδώς θετικών όσο και των ψευδώς αρνητικών προβλέψεων.

	precision	recall	f1-score
Glass	1.00	0.87	0.93
Paper	1.00	0.99	0.99
Skin	1.00	0.99	0.99
Wood	0.85	1.00	0.92
accuracy			0.96

Σχήμα 5.30 Τιμές μετρικών αξιολόγησης μοντέλου ταξινόμησης υλικών που άγγιξε ο αισθητήρας αφής I-KA22\_3Cu

### 5.5.5 Αναγνώριση επιφάνειας

Αφού το μοντέλο εκπαιδεύτηκε και αξιολογήθηκε η απόδοσή του, δοκιμάστηκε η ικανότητά του να αναγνωρίζει τις επιφάνειες που αγγίζει ο χρήστης, σε πραγματικό χρόνο. Αυτό περιλαμβάνει την εκτέλεση του μοντέλου σε μια σειρά δοκιμών επαφής και προβλέψεων με βάση τις αισθητηριακές εισροές που λάμβανε ο αισθητήρας. Αυτό ήταν ένα κρίσιμο βήμα για την αξιολόγηση της ικανότητας του μοντέλου να εκτελεί αναγνώριση σε πραγματικό χρόνο, καθώς παρείχε ένα μέτρο της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του σε πρακτικές εφαρμογές. Οι δοκιμές έδειξαν ότι το μοντέλο ήταν σε θέση να αναγνωρίσει με ακρίβεια τα διάφορα υλικά και να εκφωνήσει το είδος του υλικού στον χρήστη, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά του ως εργαλείο για την αναγνώριση υλικών σε πραγματικό χρόνο. Το αποτέλεσμα αυτό αποτέλεσε σημαντικό ορόσημο για την ανάπτυξη του μοντέλου και έδειξε τη δυνατότητα χρήσης του σε πρακτικές εφαρμογές υποβοήθησης ατόμων με ειδικές ανάγκες αλλά και άλλες εφαρμογές στην ρομποτική και την βιομηχανία.

# Κεφάλαιο 6

## Σύνοψη και μελλοντικές επεκτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα και επίλογος

Η αίσθηση της αφής είναι ζωτικής σημασίας καθώς παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το περιβάλλον, επιτρέποντας τον αποτελεσματικό χειρισμό και την αλληλεπίδραση με αντικείμενα. Η πρόοδος της τεχνολογίας σε τομείς όπως η Νανοτεχνολογία, η μηχανική μάθηση και τα εύκαμπτα ηλεκτρονικά, θέτει τα θεμέλια ώστε να αναπτυχθούν πιο ευαίσθητοι, ακριβείς και εύκαμπτοι αισθητήρες αφής που μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ευρύ φάσμα συσκευών και συστημάτων. Μέσω της τεχνολογίας των αισθητήρων, η επιστροφή της αίσθησης της αφής σε άτομα που την έχουν χάσει λόγω τραυματισμού ή ασθένειας αποτελεί σημαντική πτυχή της αποκατάστασης και της βελτίωσης της ποιότητας ζωής τους. Εκτός από τις χρήσεις της στην αποκατάσταση και τις απτικές διεπαφές, η αίσθηση αφής παίζει επίσης σημαντικό ρόλο σε τομείς όπως η ρομποτική και η αυτοματοποίηση, όπου χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των ρομπότ και των αυτοματοποιημένων συστημάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναπτύχθηκε μια σειρά τριβοηλεκτρικών αισθητήρων αφής με σκοπό να συγκριθεί η απόδοση διαφορετικών τεχνικών εναπόθεσης και γεωμετριών ηλεκτροδίων, η οποία βασίστηκε σε πεπλεγμένα ηλεκτρόδια (IDE). Τα πεπλεγμένα ηλεκτρόδια εναποτέθηκαν σε εύκαμπτο υπόστρωμα Kapton και πάχος 300 nm με τεχνικές εναπόθεσης ιοντοβολής, όπου ως μέταλλο εναποτέθηκε χαλκός, και εξάχνωσης όπου εναποτέθηκε αλουμίνιο, ενώ μελετήθηκε και η απόδοση αισθητήρων αφής σε μορφή εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων (FPCB). Επιπλέον, σχεδιάστηκαν και εναποτέθηκαν ηλεκτρόδια σε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τον βαθμό που αυτές επηρεάζουν την ευαισθησία των αισθητήρων στα διαφορετικά πειράματα. Οι επιδόσεις κάθε αισθητήρα αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν όσον αφορά την ικανότητα τους να διαχωριστούν το υλικό κάθε επιφάνειας βάση του τριβοηλεκτρικού σήματος που παράγεται από την επαφή ως αποτύπωμα του υλικού, να ανιχνεύουν την τραχύτητα των επιφανειών, και να εξάγουν πληροφορίες μέσω της μορφής των σημάτων για την πίεση που ασκείται στην επιφάνεια, την διάρκεια της αφής και



άλλα. Επιπλέον μελετήθηκαν περιπτώσεις ανίχνευσης ανάγλυφων σε επιφάνειες με σκοπό να τεθούν οι βάσεις ώστε να μελετηθεί η ικανότητα των αισθητήρων να διαχωρίζουν κωδικοποιήσεις κουκίδων, της γραφής Braille.

Η εκμετάλλευση του τριβηλεκτρικού φαινομένου στους αισθητήρες πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τύπων αισθητήρων αφής. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι το χαμηλό κόστος και η απλότητα της κατασκευής του. Σε αντίθεση με άλλους τύπους αισθητήρων αφής, οι οποίοι συχνά απαιτούν πολύπλοκες και δαπανηρές διαδικασίες κατασκευής, οι τριβηλεκτρικοί αισθητήρες αφής μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα χρησιμοποιώντας άμεσα διαθέσιμα υλικά και απλές τεχνικές κατασκευής, ενώ είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι και μπορούν να ανιχνεύσουν ένα ευρύ φάσμα ερεθισμάτων. Επιπλέον, η λεπτότητα σχεδιασμού καθώς και η ευκαμψία σε συνδυασμό με την απλότητα των υλικών καθιστά τους τριβηλεκτρικούς αισθητήρες ασφαλή για χρήση σε επαφή με το ανθρώπινο δέρμα και τους ιστούς.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των τριβηλεκτρικών σημάτων που παράγει η επαφή κάθε αισθητήρα με τις διαφορετικές επιφάνειες και τα ανάγλυφα, έδειξαν ότι κάθε τεχνική εναπόθεση είχε μοναδικό αντίκτυπο στις επιδόσεις των αισθητήρων, με ορισμένες εναποθέσεις να αποδίδουν σημαντικά καλύτερα από άλλες. Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε πως η γεωμετρία των ηλεκτροδίων με διακλάδωση επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των αισθητήρων καθώς τα λεπτότερα πάχη των μεταλλικών διαδρόμων των IDE, επιστρέφουν στο ηλεκτρικό σήμα ακριβέστερες πληροφορίες σχετικά με την υφή και το ανάγλυφο των επιφανειών. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη δεν αναδεικνύεται από την σύγκριση των διαφορετικών αισθητήρων μια μοναδική επιλογή πάχους εναπόθεσης, υλικού και γεωμετρίας αλλά μια σειρά συμπερασμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα, με βάση τις ειδικές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

Η μελέτη των διαφορετικών τριβηλεκτρικών σημάτων με τη χρήση νευρωνικών δικτύων είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση των δυνατοτήτων των αισθητήρων αφής σε διεπαφές ανθρώπου-μηχανής. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι ισχυροί αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης που μπορούν να αναγνωρίζουν μοτίβα και να ταξινομούν δεδομένα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σχεδιάστηκε και εκπαιδεύτηκε σε εικόνες σημάτων από επιφάνειες υλικού ξύλου, γυαλιού, χαρτιού και ανθρώπινου δέρματος, ένα δυσδιάστατο συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο ώστε να προσδιοριστεί αν τα υλικά που αγγίζει ο αισθητήρας μπορούν να αναγνωριστούν με

ακρίβεια. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ποσοστό ακρίβειας αναγνώρισης του υλικού 97%. Αυτό έχει τη δυνατότητα να οδηγήσει στην ανάπτυξη τριβοηλεκτρικών αισθητήρων αφής για την ταξινόμηση υλικών, με πολυάριθμες εφαρμογές, εκτός της υποβοήθησης ατόμων με ειδικές ανάγκες, σε τομείς όπως ο ποιοτικός έλεγχος, η ταυτοποίηση προϊόντων, η χαρτογράφηση επιφανειών και η βιομηχανία, γενικότερα.

## 6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Μια πιθανή μελλοντική επέκταση για τον αισθητήρα αφής είναι η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών υλικών επαφής στην ακρίβεια των μετρήσεων, εκτός του Karton. Μελετώντας την αλληλεπίδραση διαφορετικών υλικών με διάφορες επιφάνειες, όπως το PET, ενδεχομένως να εντοπιστούν υλικά που παρέχουν ακριβέστερες ενδείξεις για συγκεκριμένες επιφάνειες, όπως υλικά που ενδέχεται να παρέχουν καλύτερες ενδείξεις σε τραχιές ή με υφή επιφάνειες, ενώ άλλα σε λείες επιφάνειες.

Μια πολλά υποσχόμενη μελλοντική επέκταση για τον αισθητήρα αφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σε ότι αφορά την ικανότητα του να ανιχνεύει Braille ανάγλυφα, είναι η διαίρεσή του σε μικρότερα τμήματα, ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια η θέση και η κατεύθυνση κάθε μεμονωμένης κουκκίδας σε έναν χαρακτήρα Braille. Αυτό θα επέτρεπε μια πιο λεπτομερή και ακριβή ανάλυση των χαρακτήρων Braille, καθώς και θα παρείχε έναν τρόπο μελέτης της διαδικασίας ανάγλυφου για την ανάγνωση Braille. Αυτή η επέκταση θα έφερνε τον αισθητήρα αφής πιο κοντά στο να γίνει ένα εργαλείο που μπορεί να παρέχει αξιόπιστη και ακριβή αναγνώριση Braille, και έτσι να έχει σημαντικό αντίκτυπο στη ζωή των ατόμων με προβλήματα όρασης.

Τέλος, η περαιτέρω ανάπτυξη του μοντέλου νευρωνικού δικτύου θα επιτρέψει όχι μόνο την αναγνώριση των υλικών που αγγίζονται βάση της μοναδικής υπογραφής που αφήνουν με την μορφή τριβοηλεκτρικού σήματος, αλλά και την εξαγωγή πληροφοριών από αυτά. Για παράδειγμα, το νευρωνικό δίκτυο θα μπορούσε να προσδιορίσει τη πίεση που ασκείται στο υλικό, βάση της μέγιστης τιμής τάσης ή τον χρόνο επαφής βάση της χρονικής διαφοράς των κορυφών επαφής και διαχωρισμού, του τριβοηλεκτρικού σήματος. Αυτές οι πληροφορίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ανατροφοδότησης σε ένα ρομπότ ή ένα προσθετικό μέλος επιτρέποντάς στον χρήστη να εκτελεί πιο ακριβείς και περίπλοκες εργασίες.

# Βιβλιογραφία

- [1] R. S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, and G. Sandini, “Tactile sensing-from humans to humanoids,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 1, pp. 1–20, Feb. 2010, doi: 10.1109/TRO.2009.2033627.
- [2] G. Lee *et al.*, “Fingerpad-Inspired Multimodal Electronic Skin for Material Discrimination and Texture Recognition,” *Advanced Science*, vol. 8, no. 9, May 2021, doi: 10.1002/advs.202002606.
- [3] J. Dargahi and S. Najarian, “Human tactile perception as a standard for artificial tactile sensing - a review,” *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 01, no. 01, p. 23, 2004, doi: 10.1581/mrcas.2004.010109.
- [4] N. Bowers, “MEMS technology for your senses,” Sep. 2015.
- [5] M. Javaid, A. Haleem, S. Rab, R. Pratap Singh, and R. Suman, “Sensors for daily life: A review,” *Sensors International*, vol. 2. KeAi Communications Co., Jan. 01, 2021. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100121.
- [6] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, S. Rab, and R. Suman, “Exploring the potential of nanosensors: A brief overview,” *Sensors International*, vol. 2. KeAi Communications Co., Jan. 01, 2021. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100130.
- [7] S. Prajapati, B. Padhan, B. Amulyasai, and A. Sarkar, “Nanotechnology-based sensors,” in *Biopolymer-Based Formulations: Biomedical and Food Applications*, Elsevier, 2020, pp. 237–262. doi: 10.1016/B978-0-12-816897-4.00011-4.
- [8] P. Zhu, H. Peng, and A. Y. Rwei, “Flexible, wearable biosensors for digital health,” *Medicine in Novel Technology and Devices*, vol. 14. Elsevier B.V., Jun. 01, 2022. doi: 10.1016/j.medntd.2022.100118.
- [9] X. Nan *et al.*, “Review of Flexible Wearable Sensor Devices for Biomedical Application,” *Micromachines*, vol. 13, no. 9. MDPI, Sep. 01, 2022. doi: 10.3390/mi13091395.

- [10] W. Gao, H. Ota, D. Kiriya, K. Takei, and A. Javey, “Flexible Electronics toward Wearable Sensing,” *Acc Chem Res*, vol. 52, no. 3, pp. 523–533, Mar. 2019, doi: 10.1021/acs.accounts.8b00500.
- [11] S. Prajapati, B. Padhan, B. Amulyasai, and A. Sarkar, “Nanotechnology-based sensors,” in *Biopolymer-Based Formulations: Biomedical and Food Applications*, Elsevier, 2020, pp. 237–262. doi: 10.1016/B978-0-12-816897-4.00011-4.
- [12] S. Mahmud, X. Lin, and J. H. Kim, “Interface for Human Machine Interaction for assistant devices: A Review,” in *2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC 2020*, Jan. 2020, pp. 768–773. doi: 10.1109/CCWC47524.2020.9031244.
- [13] R. Yin, D. Wang, S. Zhao, Z. Lou, and G. Shen, “Wearable Sensors-Enabled Human–Machine Interaction Systems: From Design to Application,” *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 11. John Wiley and Sons Inc, Mar. 01, 2021. doi: 10.1002/adfm.202008936.
- [14] X. Zhao *et al.*, “Fingerprint-inspired electronic skin based on triboelectric nanogenerator for fine texture recognition,” *Nano Energy*, vol. 85, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106001.
- [15] Z. Song *et al.*, “A flexible triboelectric tactile sensor for simultaneous material and texture recognition,” *Nano Energy*, vol. 93, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106798.
- [16] Z. Lin, W. Long, L. J. Chen, S. Niu, and Y. Zi, “Green Energy and Technology Triboelectric Nanogenerators.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/8059>
- [17] B. Bera and K. Wang, “Literature Review on Triboelectric Nanogenerator,” *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, vol. 2, no. 10, 2016.
- [18] O. Molnar, V. Gerasimov, and I. P. Kurytnik, “Triboelectricity and construction of power generators based on it”vol. 94, no. 1, pp. 167–171, 2018, doi: 10.15199/48.2018.01.41.
- [19] B. Bera and K. Wang, “Literature Review on Triboelectric Nanogenerator,” *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, vol. 2, no. 10, 2016.

- [20] X. Pu *et al.*, “A P L I E D S C I E N C E S A N D E N G I N E R I N G Eye motion triggered self-powered mechnosensational communication system using triboelectric nanogenerator,” 2017. [Online]. Available: <http://advances.sciencemag.org/>
- [21] H. Zhou *et al.*, “Bionic Ultra-Sensitive Self-Powered Electromechanical Sensor for Muscle-Triggered Communication Application,” *Advanced Science*, vol. 8, no. 15, Aug. 2021, doi: 10.1002/advs.202101020.
- [22] C. M. Chiu, S. W. Chen, Y. P. Pao, M. Z. Huang, S. W. Chan, and Z. H. Lin, “A smart glove with integrated triboelectric nanogenerator for self-powered gesture recognition and language expression,” *Sci Technol Adv Mater*, vol. 20, no. 1, pp. 964–971, Dec. 2019, doi: 10.1080/14686996.2019.1665458.
- [23] IEEE Malaysia Section. Electron Devices Chapter, University Kembangan Malaysia. Institute of Microengineering and Nanoelectronics, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2014 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE): proceedings: 27-29 August 2014, Berjaya Times Square, Kuala Lumpur, Malaysia.*
- [24] R. Igreja and C. J. Dias, “Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 112, no. 2–3, pp. 291–301, May 2004, doi: 10.1016/j.sna.2004.01.040.
- [25] N. Afsarimanesh, A. Nag, M. E. E. Alahi, T. Han, and S. C. Mukhopadhyay, “Interdigital sensors: Biomedical, environmental and industrial applications,” *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 305. Elsevier B.V., Apr. 15, 2020. doi: 10.1016/j.sna.2020.111923.
- [26] “Artificial Intelligence A Modern Approach Third Edition.”
- [27] S. Haykin, *Νευρωνικά Δίκτυα & Μηχανική Μάθηση*, 3rd ed., vol. 946. 2010.
- [28] A. Sarangan, “Nanofabrication,” in *Fundamentals and Applications of Nanophotonics*, Elsevier Inc., 2016, pp. 149–184. doi: 10.1016/B978-1-78242-464-2.00005-1.
- [29] A. S. Tuncer, “Nanofabrication Series: Deposition,” Aug. 04, 2021.
- [30] M. Hughes, “E-Beam Evaporation: Overview,” Jan. 15, 2016.

- [31] D. Depla, S. Mahieu, and J. E. Greene, “Sputter Deposition Processes,” in *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Applications and Technology*, Elsevier, 2009, pp. 253–296. doi: 10.1016/B978-0-8155-2031-3.00005-3.
- [32] J. Green, “An Overview of Magnetron Sputtering,” Jan. 30, 2022.
- [33] M. Hughes, “What is RF Sputtering?,” Oct. 27, 2016.
- [34] “Scanning Electron Microscope.” Purdue University. Accessed: Jan. 13, 2023. [Online]. Available:  
<https://www.purdue.edu/epps/rem/laboratory/equipment%20safety/Research%20Equipment/sem.html>
- [35] “A Brief Introduction to SEM (Scanning Electron Microscopy),” *SciMed*, Accessed: Jan. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.scimed.co.uk/education/sem-scanning-electron-microscopy/>