



Τμήμα Φυσικής  
Πανεπιστήμιο Κρήτης



ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ομάδα Μικροηλεκτρονικής  
Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ

**Μελέτη και εφαρμογές αγωγίων δομών κατασκευασμένες με τη μέθοδο της 3D εκτύπωσης**

Πτυχιακή εργασία

Χρήστος Ανδρέου

Υπεύθυνος Ερευνητής:  
Δρ. Πανταζής Αλέξανδρος

Υπεύθυνος καθηγητής:  
Καθ. Γιωργακίλας Αλέξανδρος

Ηράκλειο Κρήτης

2022

## Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής, τον δρ.Πανταζή Αλέξανδρο επιβλέπων ερευνητή, τον πρόεδρο του τμήματος φυσικής και επιβλέπων καθηγητή Αλέξανδρο Γιωργακίλα και τον καθηγητή Ηλία Απεραθίτη.

Επιπρόσθετα, θέλω να ευχαριστήσω την Ομάδα Μικροηλεκτρονικής, και ειδικά τον τεχνικό έρευνας της ομάδας κ.Μακρή Γεώργιο, για όλη τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Τέλος θα ήθελα να πω ενα ευχαριστώ στους καθηγητές Γιάννη και Μαίρη Αλιφραγκή από το τμήμα χημείας αλλά και τον καθηγητή Νίκο Χανιωτάκη από το τμήμα φυσικής που μου επέτρεψαν τη χρήση των εργαστηρίων τους.

Η πτυχιακή αυτή έγινε στα πλαίσια του Smart-Insole (ΕΔΚ).

## Σύνοψη:

Τα ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά είναι στοιχεία απαραίτητα για κάθε λειτουργία στον τεχνολογικό τομέα. Η απουσία τους αυτόματα καθιστά σε αχρηστία τις βασικές ανάγκες λειτουργικότητας, ξεκινώντας από τον ηλεκτρισμό, επικοινωνίες και κάθε μορφής τεχνολογικού επιτεύγματος. Αντιλαμβάνοντας της πολλαπλές εφαρμογές που υπάρχουν, έγινε εφικτό να μπορούμε να εκτυπώνουμε με ένα εκτυπωτή αυτά τα ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά. Η είσοδος της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing, 3D printing) στην έρευνα, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη υλικών με αγώγιμες, πιεζοαντίστασης κι ελαστικές ιδιότητες, έδωσε νέες επαναστατικές δυνατότητες σχεδιαστικής και κατασκευαστικής ελευθερίας στην καινοτομία, καθώς πλέον μπορούν να παραχθούν βασικά ηλεκτρικά στοιχεία και κυκλώματα . Τέσσερα από τα πιο γνωστά ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά σε 3D εκτύπωση θα μελετηθούν στην παρούσα πτυχιακή, τα οποία είναι το Proto-Pasta, NijaTek EEL, Palmiga-Pi, και το Conductive TPU της Filaflex. Όπως θα δούμε τα υλικά αυτά εκτυπώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες, έχοντας ως συνέπεια την διαφοροποίηση των ιδιοτήτων τους πριν την εκτύπωση, τις οποίες παρέχει ο κατασκευαστής. Κύρια κατεύθυνση της μελέτης αυτής είναι η παρατήρηση των φυσικών ποσοτήτων της α) αντίστασης, β) ειδική αντίστασης, γ) πιεζοαντίσταση , καθώς επίσης και της γήρανσης μετά την εκτύπωση των ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών και την εφαρμογή τους σαν ηλεκτρόδια και αισθητήρες. Για να μελετηθούν αυτές οι ιδιότητες εκτυπώσαμε τα υλικά αυτά σε συγκεκριμένη αρχιτεκτονική και μεταβάλαμε το ύψος, το πλάτος και το μήκος ,ανάλογα, των εκτυπώσεων σε συνδυασμό με τις ρυθμίσεις εκτύπωσης. Μια ακόμα εφαρμογή που θα δούμε είναι η μεταβολή της αντίστασης όταν ασκείτε πίεση στα εκτυπωμένα αυτά υλικά. Μπορεί εύκολα κάποιος να αντιληφτεί ότι τα υλικά αυτά εκτός από αγωγοί μπορούν να έχουν την ιδιότητα της αντίστασης και συνάμα ενός αισθητήρα. Καταλήγουμε λοιπόν ότι με την ταυτοποίηση της ειδικής αντίστασης σε αυτά τα 4 υλικά μετά την εκτύπωση τους, η εφαρμογή τους σαν αισθητήρες είναι αναπόφευκτη. Τέλος ακόμη μία παρατήρηση που θα γίνει είναι κατά πόσο επηρεάζετε η αντίσταση του υλικού εκτύπωσης από το ποσοστό γεμίσματος και το μοτίβο γεμίσματος.

## Περιεχόμενα:

Λίστα εικόνων.....	6
Λίστα πινάκων.....	6
Λίστα Γραφημάτων.....	8
<b>A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	
A.1. Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....	10
A.2. Υλικά για 3D εκτύπωση.....	10
A.2.1. Ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά.....	11
<b>B. ΥΛΙΚΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ</b>	
B.1. Εκτύπωση.....	13
B.1.1. Μέθοδος εκτύπωσης.....	13
B.1.2. Σχεδιαστικό λογισμικό.....	13
B.1.3. Εκτυπωτές και λογισμικό εκτύπωσης.....	13
B.1.4. Μέσα- εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν.....	14
B.1.4.1. Νήματα εκτύπωσης.....	14
B.1.4.2. Electric paint .....	14
B.1.4.3. Συσκευές για μέτρηση.....	15
B.1.5. Γεωμετρία αγωγών.....	15
B.2. Πειραματική διάταξη.....	16
B.2.1. Κύκλωμα.....	16
B.2.2. Διάταξη δυναμικών μετρήσεων.....	16
<b>C. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b>	
C.1. Proto-Pasta.....	17
C.1.1. Αντίσταση - Μήκος.....	17
C.1.2. Αντίσταση - Ύψος.....	18
C.1.3. Αντίσταση - Πλάτος.....	19
C.1.4. Αντίσταση - Infill pattern.....	20
C.1.4.1. Concentric.....	20
C.1.4.2. Octagram spiral .....	21
C.1.4.3. Hilbert Curve .....	22
C.1.4.4. Archimedean chords.....	23
C.1.5. Ειδική αντίσταση- Ύψος.....	24
C.1.6. Ειδική αντίσταση- Μήκος.....	25
C.1.7. Ειδική αντίσταση- Πλάτος.....	26
C.2. NinjaTek EEL 3D Printing filament.....	27
C.2.1. Αντίσταση - Μήκος.....	27
C.2.2. Αντίσταση - Ύψος.....	28
C.2.3. Αντίσταση - Πλάτος.....	29
C.2.4. Ειδική αντίσταση- Ύψος.....	30
C.2.5. Ειδική αντίσταση- Μήκος.....	31
C.2.6. Ειδική αντίσταση- Πλάτος.....	32

C.3. Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black.....	33
C.3.1. Αντίσταση - Μήκος.....	33
C.3.2. Αντίσταση - Ύψος.....	34
C.3.3. Αντίσταση - Πλάτος.....	35
C.3.4. Ειδική αντίσταση- Ύψος.....	36
C.3.5. Ειδική αντίσταση- Μήκος.....	37
C.3.6. Ειδική αντίσταση- Πλάτος.....	38
C.4. Conductive TPU filaflex.....	39
C.4.1. Αντίσταση - Μήκος.....	39
C.4.2. Αντίσταση - Ύψος.....	40
C.4.3. Αντίσταση - Πλάτος.....	41
C.4.4. Ειδική αντίσταση- Ύψος.....	42
C.4.5. Ειδική αντίσταση- Μήκος.....	43
C.4.6. Ειδική αντίσταση- Πλάτος.....	44
C.5. Γήρανση.....	45
<b>D. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b>	
D.1. Υπολογισμός αντίστασης αγωγών.....	46
D.2. Σύγκριση τιμών με αυτές των κατασκευαστών.....	46
D.2.1. Proto-Pasta.....	46
D.2.1.1. Αντίσταση.....	46
D.2.1.2. Ειδική αντίσταση.....	47
D.2.1.3. Infill.....	47
D.2.2. NijaTek EEL 3D Printing filament.....	48
D.2.2.1. Αντίσταση.....	48
D.2.2.2. Ειδική αντίσταση.....	48
D.2.3. Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black.....	48
D.2.3.1. Αντίσταση.....	48
D.2.3.2. Ειδική αντίσταση.....	48
D.2.4. Conductive TPU filaflex.....	48
D.2.4.1. Αντίσταση.....	49
D.2.4.2. Ειδική αντίσταση.....	49
<b>E. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ</b>	
E.2. Αισθητήρας πιεζοαντίστασης.....	51
E.3. Ηλεκτρόδιο.....	52
<b>F. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ</b> .....	52
Βιβλιογραφία και προτάσεις .....	54
Παράρτημα Α .....	56

## Λίστα εικόνων:

**Εικόνα 1:** Βιοεκτύπωσης [4]

**Εικόνα 2:** Σκίτσο της αρχής της συσκευής. Η ανισότροπη συστολή μηχανικού καρδιακού ιστού (1) εκτρέπει ένα υποστηρικτικό υπόστρωμα (2), τεντώνοντας έτσι ένα μετρητή μαλακής καταπόνησης ενσωματωμένο στο υποστηρικτικό υπόστρωμα. Αυτό δημιουργεί μια αλλαγή στην αντίσταση ανάλογη με τη συσταλτική τάση του ιστού (3). [6]

**Εικόνα 3:** Μοντέλα ηλεκτροδίων για 3D εκτύπωση. [8]

**Εικόνα 4:** Αισθητήρας πιεζοαντίστασης από νανοσωλήνες άνθρακα με μικροπόρους. [9]

**Εικόνα 5:** Μερικοί από τους αγωγούς που μελετήθηκαν αριθμοί 1 έως 5 είναι 7mm πλάτος επί 1cm μέχρι 5cm μήκος επί 3mm ύψος αντίστοιχα, και από αριθμούς 6 έως 10 είναι 3mm πλάτος επί 1cm μέχρι 5cm επί 1mm ύψος αντίστοιχα.

**Εικόνα 6:** Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για της μετρήσεις.

**Εικόνα 7:** Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη των αισθητήρων πιεζοαντίστασης.

**Εικόνα 8:** Μοτίβο εκτύπωσης Concentric 50% γέμισμα

**Εικόνα 9:** Μοτίβο εκτύπωσης Octagram spiral 50% γέμισμα

**Εικόνα 10:** Μοτίβο εκτύπωσης Hilbert Curve 50% γέμισμα

**Εικόνα 11:** Μοτίβο εκτύπωσης Archimedean chords 75% γέμισμα

**Εικόνα 12:** Πειραματική διάταξη για την εφαρμογή ηλεκτροδίου στην θέση το BNC καλωδίου

**Εικόνα 13:**

**Εικόνα 14:**

**Εικόνα 15:** Εκτυπώσεις ηλεκτροδίων από 0,5mm μέχρι 5mm ύψος.

**Εικόνα 16:** Α) Πειραματική διάταξη για μέτρηση αντίστασης διαλύματος, Β) Μοντέλο μέτρησης με microspheres την αντίσταση ζελέ, Γ,Δ) Μοντέλα microspheres για εφαρμογή.

## Λίστα πινάκων:

**Πίνακας 1:** Χαρακτηριστικά των τεσσάρων υλικών που μελετήθηκαν με βάση τον κατασκευαστή

**Πίνακας 2:** Τιμές της αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο μήκος, από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 3:** Τιμές της αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο ύψος, από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 4:** Τιμές της αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο πλάτος, από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

**Πίνακας 5:** Τιμές της αντίστασης για το μοτίβο Concentric με ποσοστά γεμίματος 5-25-50-75-100% για σταθερό ύψος και πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα με μεταβαλλόμενη διάσταση το μήκος 1cm-5cm.

**Πίνακας 6:** Τιμές της αντίστασης για το μοτίβο Octagram spiral με ποσοστά γεμίματος 5-25-50-75-100% για σταθερό ύψος και πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα με μεταβαλλόμενη διάσταση το μήκος 1cm-5cm.

**Πίνακας 7:** Τιμές της αντίστασης για το μοτίβο Hilbert Curve με ποσοστά γεμίματος 5-25-50-75-100% για σταθερό ύψος και πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα με μεταβαλλόμενη διάσταση το μήκος 1cm-5cm.

**Πίνακας 8:** Τιμές της αντίστασης για το μοτίβο Archimedean chords με ποσοστά γεμίματος 5-25-50-75-100% για σταθερό ύψος και πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα με μεταβαλλόμενη διάσταση το μήκος 1cm-5cm.

**Πίνακας 9:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 10:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 11:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

**Πίνακας 12:** Τιμές της αντίστασης του υλικού NijaTek EEL 3D Printing filament για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 13:** Τιμές της αντίστασης του υλικού NijaTek EEL 3D Printing filament για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 14:** Τιμές της αντίστασης του υλικού NijaTek EEL 3D Printing filament για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm

**Πίνακας 15:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού NijaTek EEL 3D Printing filament για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 16:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού NijaTek EEL 3D Printing filament για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 17:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού NijaTek EEL 3D Printing filament για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

**Πίνακας 18:** Τιμές της αντίστασης του υλικού Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 19:** Τιμές της αντίστασης του υλικού Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 20:** Τιμές της αντίστασης του υλικού Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm

**Πίνακας 21:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 22:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 23:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

**Πίνακας 24:** Τιμές της αντίστασης του υλικού Conductive TPU filaflex για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 25:** Τιμές της αντίστασης του υλικού Conductive TPU filaflex για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 26:** Τιμές της αντίστασης του υλικού Conductive TPU filaflex για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm

**Πίνακας 27:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού Conductive TPU filaflex για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 28:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού Conductive TPU filaflex για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

**Πίνακας 29:** Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού Conductive TPU filaflex για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

**Πίνακας 30:** Τιμές της αντίστασης σε διάστημα 28 ημερών για κάθε ένα από τα τέσσερα υλικά.  
**Πίνακας 31:** Τιμές των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με αυτές των κατασκευαστών.

#### Λίστα γραφημάτων:

**Γράφημα 1:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το P.Pasta με μεταβαλλόμενο ύψος και σταθερό πλάτος.

**Γράφημα 2:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το ύψος για το P.Pasta με μεταβαλλόμενο μήκος και σταθερό πλάτος.

**Γράφημα 3:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το πλάτος για το P.Pasta με μεταβαλλόμενο μήκος και σταθερό ύψος.

**Γράφημα 4:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το P.Pasta με μοτίβο εκτύπωσης Concentric για 5-25-50-75-100% γέμισμα.

**Γράφημα 5:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το P.Pasta με μοτίβο εκτύπωσης Octagram spiral για 5-25-50-75-100% γέμισμα.

**Γράφημα 6:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το P.Pasta με μοτίβο εκτύπωσης Hilbert Curve για 5-25-50-75-100% γέμισμα.

**Γράφημα 7:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το P.Pasta με μοτίβο εκτύπωσης Archimedean chords για 5-25-50-75-100% γέμισμα.

**Γράφημα 8:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το ύψος για το P.Pasta. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε μήκος ξεχωριστά.

**Γράφημα 9:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το P.Pasta. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε ύψος ξεχωριστά.

**Γράφημα 10:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το πλάτος για το P.Pasta. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε μήκος ξεχωριστά.

**Γράφημα 11:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το NijaTek EEL 3D Printing filament με μεταβαλλόμενο ύψος και σταθερό πλάτος.

**Γράφημα 12:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το ύψος για το NijaTek EEL 3D Printing filament με μεταβαλλόμενο μήκος και σταθερό πλάτος.

**Γράφημα 13:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το πλάτος για το NijaTek EEL 3D Printing filament με μεταβαλλόμενο μήκος και σταθερό ύψος.

**Γράφημα 14:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το ύψος για το NijaTek EEL 3D Printing filament. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε μήκος ξεχωριστά.

**Γράφημα 15:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το NijaTek EEL 3D Printing filament. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε ύψος ξεχωριστά.

**Γράφημα 16:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το πλάτος για το NijaTek EEL 3D Printing filament. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε μήκος ξεχωριστά.

**Γράφημα 17:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black με μεταβαλλόμενο ύψος και σταθερό πλάτος.

**Γράφημα 18:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το ύψος για το Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black με μεταβαλλόμενο μήκος και σταθερό πλάτος.

**Γράφημα 19:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το πλάτος για το Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black με μεταβαλλόμενο μήκος και σταθερό ύψος.



**Γράφημα 20:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το ύψος για το Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε μήκος ξεχωριστά.

**Γράφημα 21:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε ύψος ξεχωριστά.

**Γράφημα 22:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το πλάτος για το Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε μήκος ξεχωριστά.

**Γράφημα 23:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το NijaTek EEL 3D Printing filament με μεταβαλλόμενο ύψος και σταθερό πλάτος.

**Γράφημα 24:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το ύψος για το NijaTek EEL 3D Printing filament με μεταβαλλόμενο μήκος και σταθερό πλάτος.

**Γράφημα 25:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το πλάτος για το NijaTek EEL 3D Printing filament με μεταβαλλόμενο μήκος και σταθερό ύψος.

**Γράφημα 26:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το ύψος για το NijaTek EEL 3D Printing filament. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε μήκος ξεχωριστά

**Γράφημα 27:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για το NijaTek EEL 3D Printing filament. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε ύψος ξεχωριστά.

**Γράφημα 28:** Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το πλάτος για το NijaTek EEL 3D Printing filament. Μέση ειδική αντίσταση για κάθε μήκος ξεχωριστά.

**Γράφημα 29:** Αντίσταση σε συνάρτηση με τον χρόνο για την γήρανση σε όλα τα υλικά.

**Γράφημα 30:** Αντίσταση σε συνάρτηση με το μήκος για δύο ποσοστά γεμίσματος 5% και 100% για τα 4 διαφορετικά μοτίβα.

**Γράφημα 31:** Μέση τιμή βημάτων ανά λεπτό σε συνάρτηση με το βάρος για κάθε ένα από τους 3 αισθητήρες και σύγκριση των δύο μεθόδων μέτρησης.

**Γράφημα 32:** Mili Volt σε συνάρτηση με το pH για κάθε ένα από τα ηλεκτρόδια με διαφορετικό ύψος. Για το **A** γράφημα (πάνω) είναι ο P.Pasta αισθητήρα για ύψη 0,5mm και 5mm με δυο προσπάθειες μέτρησης. Για το **B** (κάτω) γράφημα είναι ο EEL αισθητήρας για τα ύψη 1mm και 5mm με δύο προσπάθειες μέτρησης.

## **Ορισμοί :**

**3DP:** 3 Dimension Printing

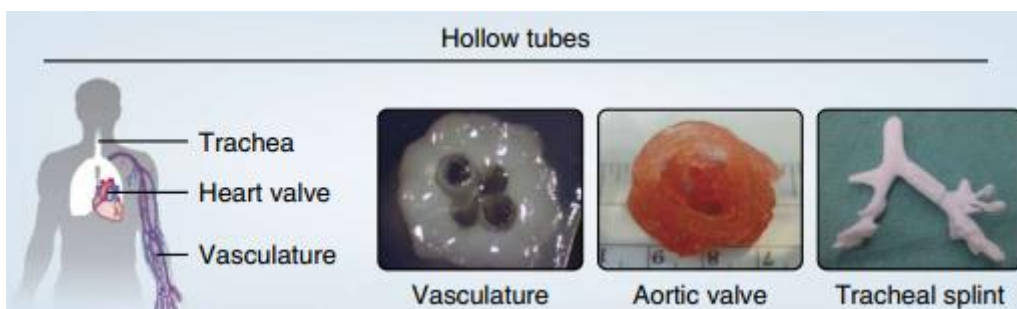
**FFF:** Fused Fabrication Filament

### A.1. Ανασκόπηση βιβλιογραφίας:

### A.2. Υλικά για 3D εκτύπωση:

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αναδύεται ως μια τεχνολογία που οδηγεί σε ένα ευρύ φάσμα νέων εφαρμογών. Έχοντας ως βάση την ταχύτητα κατασκευής, την ολοένα και μεγαλύτερη γκάμα υλικών με "εξωτικές" ιδιότητες αλλά και την δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων μοντέλων, δίνετε η δυνατότητα εφαρμογής σε διάφορους τομείς [1]. Την βασική κατανόηση των πιο πάνω θεμελιωδών αρχών δίνετε από τον *Jian-Yuan Lee [1]*, βλέπουμε την πρόσφατη εφαρμογή και ανάπτυξη σε υλικά όπως έξυπνα υλικά, κεραμικά υλικά [2], βιοϋλικά, σύνθετα υλικά και τέλος ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά.

Με μια γρήγορη ανασκόπηση στην βιβλιογραφία μπορεί εύκολα και γρήγορα κάνεις να δει την εργονομία που μπορεί να προσφέρει η πρόσθετη κατασκευή σε συνδυασμό με τα πιο σύνθετα υλικά. Ένα καλό παράδειγμα να δει κανείς είναι τα έξυπνα υλικά. Τα έξυπνα υλικά ορίζονται τα υλικά αυτά έχουν την ικανότητα να μεταμορφώνουν τη γεωμετρία τους υπό την επίδραση εξωτερικών ερεθισμάτων[3]. Αυτόματα η 3D εκτύπωση μετατρέπεται σε 4D. Η τετραδιάστατη εκτύπωση είναι ένα αναδυόμενο θέμα στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπου η τέταρτη διάσταση είναι ο χρόνος και η βασική ιδέα της 4D εκτύπωσης έχει βάση την τρισδιάστατη εκτύπωση προγραμματιζόμενων έξυπνων υλικών που μπορούν σταδιακά να αλλάξουν το σχήμα με την πάροδο του χρόνου υπό εξωτερικά ερεθίσματα, όπως νερό και θερμότητα. Επιπρόσθετα οι πρόσφατες εξελίξεις σε βιοσυμβατά υλικά [4] έδωσαν την ευκαιρία για ανάπτυξη τρισδιάστατης βιο-εκτύπωσης λειτουργικών ζωντανών ιστών, οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν στην αναγεννητική ιατρική για την αντιμετώπιση αναγκών για μεταμόσχευση οργάνων .



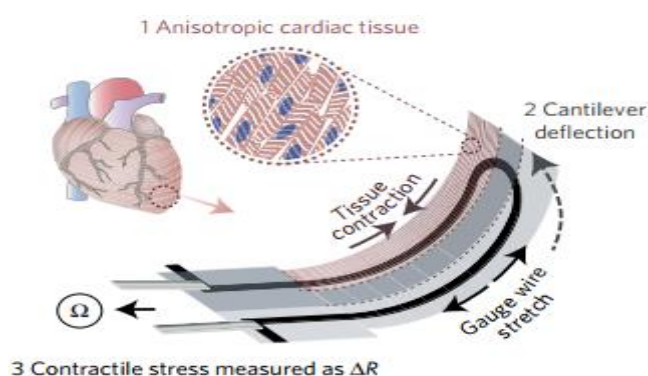
Εικόνα 1: Ανθρώπινα όργανα από Βιοεκτύπωση

Μια ακόμα εντυπωσιακή εφαρμογή των υλικών σε 3DP είναι η πρόσθεση ατόμων με μαγνητικές ιδιότητες μέσα σε ένα μη μαγνητικό υλικό, του δίνετε η δυνατότητα να μετατραπεί σε μαγνητικό υλικό. Με βάση την πιο πάνω μετατροπή που έγινε από τον *S. J. Leigh [5]*, αναφέρετε στην δημιουργία νήματος με μαγνητίτη με σκοπό την παραγωγή αισθητήρα ροής με την χρήση του φαινομένου Hall. Πιο συγκεκριμένα στόχος είναι η

κατασκευή ενός θερμοπλαστικού σύνθετου υλικού με νανοσωματίδια με μαγνητιότητα και την ενσωμάτωσή του σε έναν τρισδιάστατο εκτυπωμένο αισθητήρα, με σκοπό να μιμηθεί την λειτουργία μιας εμπορικά διαθέσιμης συσκευής ανίχνευσης ροής. Η ανάλυση του τυπωμένου αισθητήρα αποκάλυψε επίσης μια πολύ πιο γραμμική ανταπόκριση στην αυξανόμενη παροχή νερού που δείχνει ότι οι συσκευές με τρισδιάστατη εκτύπωση έχουν τη δυνατότητα να αποδίδουν τουλάχιστον όσο και ένας συμβατικά παραγόμενος αισθητήρας. Αβίαστα λοιπόν θα μπορούσαμε να σκεφτούμε ακόμα και των συνδυασμό μερικών από των πιο πάνω σύνθετων υλικών με τα ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά.

### A.2.1. Ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά

Τις τελευταίες δεκαετίες, σημειώθηκαν σημαντικές εξελίξεις σε ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά στον τομέα της πρόσθετης κατασκευής. Ένα ενδιαφέρον ερευνητικό ερώτημα που προκύπτει είναι αν η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να υποστηρίξει πλήρως τις ηλεκτρονικές συσκευές και αν είναι η καλύτερη προσέγγιση για την κατασκευή ηλεκτρονικών ειδών μαζικής παραγωγής. Οι τρέχουσες τεχνολογίες 3DP επιτρέπουν την κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών, όπως κεραίες, πυκνωτές, αντιστάσεις, αγωγούς και ηλεκτρόδια ακόμα και μικροφυσιολογικά συστήματα[6], σε ένα μόνο βήμα χωρίς καμία επιπλέον επεξεργασία.



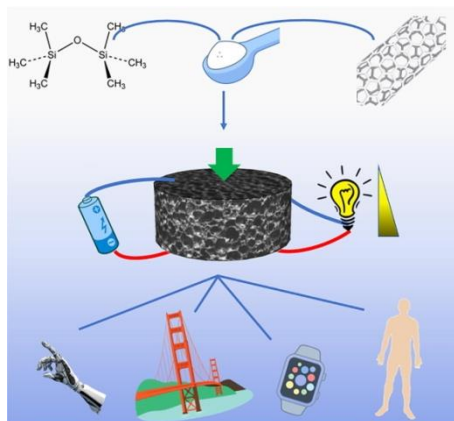
Εικόνα 2: Σκίτσο της αρχής της συσκευής. Η ανισότροπη συστολή μηχανικού καρδιακού ιστού (1) εκτρέπει ένα υποστηρικτικό υπόστρωμα (2), τεντώνοντας έτσι ένα μετρητή μαλακής καταπόνησης ενσωματωμένο στο υποστηρικτικό υπόστρωμα. Αυτό δημιουργεί μια αλλαγή στην αντίσταση ανάλογη με τη συσταλτική τάση του ιστού (3).

Μια αρκετά ενδιαφέρων εφαρμογή έγινε σε ελαστικά ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά, σε μια προσπάθεια εφαρμογής των 3DP αγωγιμων υλικών σε ανίχνευση σημάτων για εγκεφαλογράφημα [7],[8]. Τα εμπορικά ηλεκτρόδια προσαρμόζονται στο τριχωτό της κεφαλής χρησιμοποιώντας ένα αγωγιμο τζελ, Ωστόσο αυτό μπορεί, να είναι άβολο για το άτομο, προκαλεί ερεθισμό του δέρματος και μερικά τζελ έχουν βραχυπρόθεσμη χρήση. Τα εκτυπωμένα ηλεκτρόδια (εικόνα 3) έδωσαν τη λύση στην αποκατάσταση του αγωγιμου τζελ αλλά και στην άνεση του ασθενή.



Εικόνα 3: Μοντέλα ηλεκτροδίων για 3D εκτύπωση

Επιπρόσθετα μια άλλη αρκετά ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι η κατασκευή ενός πορώδους πιεζοαντίστασης αισθητήρα από νανοσωλήνες άνθρακα με υποσχόμενη εφαρμογή στην ρομποτική και σε φορητές έξυπνες συσκευές [9]. Την ιδιότητα αυτή της πιεζοαντίστασης, θα την δούμε σαν εφαρμογή με συνδυασμό των αγώγιμων υλικών που μελετάμε.



Εικόνα 4: Αισθητήρας πιεζοαντίστασης από νανοσωλήνες άνθρακα με μικροπόρους

Αυτές οι κατασκευαστικές ικανότητες κάνουν ιδιαίτερα εύχρηστους τους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Αξίζει να αναφέρουμε ότι κάθε αλλαγή στη ρύθμιση εκτύπωσης επηρεάζει άμεσα το αποτέλεσμα αλλά και τις ιδιότητες του υλικού. Είναι πολύ σημαντικό να εξετάζετε ξεχωριστά κάθε παράμετρος αλλαγής. Μερικές παράμετροι που χρειάζονται άμεση προσοχή είναι το ποσοστό γεμίσματος του υλικού και το μοτίβο γεμίσματος αφού έχει παρατηρηθεί ως και 15% αραιώση[10]. Επιπρόσθετα η ταχύτητα εκτύπωσης η οποία επηρεάζει την σταθερή εξώθηση του υλικού από την κεφαλή, μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα να παγιδευτούν φυσαλίδες αέρα ανάμεσα στις στρώσεις. Κατά αυτό τον τρόπο επηρεάζεται η συνοχή της σύστασης του υλικού και ταυτόχρονα η αντίστασή του. Επιπλέον, το ύψος εκτύπωσης κάθε στρώσης μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα της εκτύπωσης αλλά και να έχει παρόμοιες επιπτώσεις με την ταχύτητα εκτύπωσης. Δεν είναι μια εύκολη και απλή διαδικασία αφού απαιτεί χρόνο και προσεκτική σχεδίαση όλων των παραμέτρων της

εκτύπωσης για να έρθει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αν όλα εξελιχθούν με προσοχή σίγουρα το αποτέλεσμα δεν θα είναι καθόλου απογοητευτικό.

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία θα μελετήσουμε διάφορους αγωγούς που έχουν κατασκευαστεί από αγώγιμα υλικά με την μέθοδο της 3D εκτύπωσης. Θα γίνει χαρακτηρισμός αυτών των υλικών σε διάταξη λαμπτήρα, ώστε να δούμε πώς επηρεάζονται το κάθε ένα από αυτά. Τέλος, θα συζητήσουμε κάποιες από τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν. Η επεξεργασία τρισδιάστατης εκτύπωσης με σχεδιαστικά προγράμματα οδηγεί σε καινούργια μονοπάτια δημιουργίας καινοτόμων συσκευών από διάφορα υλικά και πολύπλοκα σχήματα τριών διαστάσεων. Αυτή η δυνατότητα δίνει την ευκαιρία στους σχεδιαστές να βελτιώσουν την εργονομία και την αποδοτικότητα ακόμη και σε ηλεκτρονικά συστήματα, όπου πριν ο σχεδιασμός γινόταν σε δισδιάστατη μορφή .

## **B. ΥΛΙΚΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ**

### **B.1. Εκτύπωση**

#### **B.1.1. Μέθοδος εκτύπωσης**

Η διαδικασία της προσθετικής κατασκευής – 3D printing, χωρίζεται σε τρία βήματα: Σχεδιασμός τρισδιάστατου μοντέλου με κάποιο CAD (Computer Aided Design) λογισμικό, μετατροπή του μοντέλου από STL σε g-code αρχείο, που περιέχει εντολές εκτύπωσης (slicing), και η εκτέλεση αυτών των εντολών από τον εκτυπωτή για τη δημιουργία του αντικειμένου. Στο δεύτερο στάδιο, το slicing λογισμικό μεταφράζει το τρισδιάστατο μοντέλο σε άθροισμα δισδιάστατων στοιβαγμένων επιπέδων, το καθ' ένα από τα οποία περιγράφεται από ένα σύνολο συντεταγμένων που αντιστοιχούν σε σχετική θέση κεφαλής εκτυπωτή – τράπεζας (bed) εκτυπωτή. Σε αυτό το στάδιο καθορίζονται και οι ρυθμίσεις εκτύπωσης, όπως θερμοκρασία κεφαλής, ταχύτητα και πάχος εκτύπωσης. Στο τρίτο στάδιο, υλικό εκτύπωσης οδηγείται μηχανικά μέσα στην κεφαλή του εκτυπωτή, όπου ρευστοποιείται και τοποθετείται στην τράπεζα σύμφωνα με τις εντολές θέσης του αρχείου, μία στρώση τη φορά. Κάθε στρώση στερεοποιείται πριν την εναπόθεση της επόμενης κι έτσι δημιουργείται το τρισδιάστατο αντικείμενο. Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί νήμα, το οποίο λιώνει στην κεφαλή του εκτυπωτή, λέγεται μέθοδος *FFF*.

#### **B.1.2. Σχεδιαστικό λογισμικό**

Τα δείγματα σχεδιάστηκαν στο *Fusion 360* της *Autodesk* (άδεια φοιτητικής χρήσης).

#### **B.1.3. Εκτυπωτές και λογισμικό εκτύπωσης**

Για την εκτύπωση των δειγμάτων αγωγών , χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Lulzbot Taz Workhorse (Alerh, USA) και ο εκτυπωτής Prusa i3 MK3S (Prusa Research, Czech) με κεφαλές εκτύπωσης 0,4mm.

Αντίστοιχα κάθε εκτυπωτής έχει το δικό του λογισμικό εκτύπωσης.

#### B.1.4. Μέσα- εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν:

##### B.1.4.1. Νήματα εκτύπωσης:

Όλα τα υλικά που μελετήθηκαν έχουν σαν βάση τον άνθρακα (Carbon black). Το Carbon black ενσωματώνεται σε πολυμερικά υλικά έτσι ώστε να έχουν ηλεκτρική ειδική αντίσταση από  $1 \Omega cm$  μέχρι και  $10^6 \Omega cm$ .

Για τα εκτυπώσιμα μοντέλα δοκιμάστηκαν τα πιο κάτω νήματα:

**Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των τεσσάρων υλικών που μελετήθηκαν με βάση τον κατασκευαστή**

Εμπορική επωνυμία	Σύνθεση	Σκληρότητα	Θερμοκρασία εκτύπωσης	Ταχύτητα εκτύπωσης	Ειδική αντίσταση	Πυκνότητα
<b>Proto Pasta</b>	PLA κατά βάρος όγκο > 99% carbon black 15%	----	215°C	25 – 45 $\frac{mm}{s}$	Μετά την εκτύπωση: 30 $\Omega cm$	1.24 $\frac{g}{cm^3}$
<b>Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black</b>	TPU	95 shore A	210°C – 230°C	15 – 20 $\frac{mm}{s}$	< 800 $\Omega cm$	1.3 $\frac{g}{cm^3}$
<b>NijaTek EEL 3D Printing filament</b>	≤ 18% carbon black ≥ 82% TPU	90 shore A	220°C – 230°C	15 – 20 $\frac{mm}{s}$	1,5x10 <sup>3</sup> $\Omega cm$	1,18 $\frac{g}{cm^3}$
<b>Conductive TPU filaflex</b>	Thermoplastic Polyurethane Elastomer and lampback	92 shore A	245°C – 250°C	20 $\frac{mm}{s}$	3.9 $\Omega cm$	1.35 $\frac{g}{cm^3}$

##### B.1.4.2. Electric paint:

Είναι μπογιά φτιαγμένη με βάση το νερό, η οποία είναι ηλεκτρικά αγώγιμη και μη τοξική. Χρησιμοποιείτε κυρίως για την δημιουργία μικρών αγώγιμων κυκλωμάτων και για δημιουργία αισθητήρων χωρητικότητας. Κατασκευαστής είναι η *Bare conductive*[11].

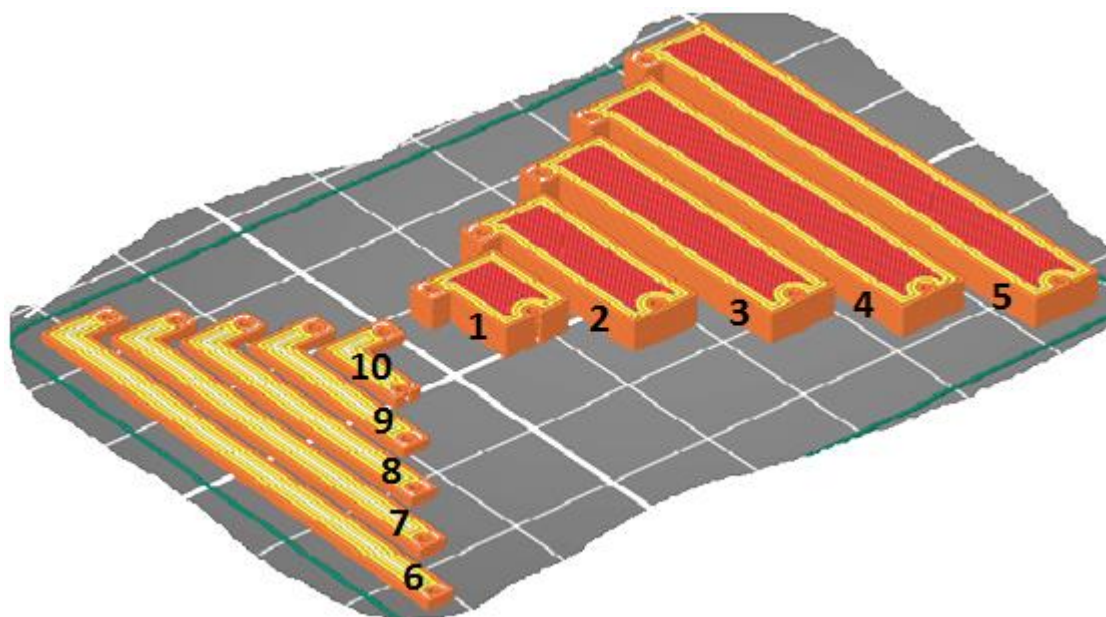
Επιπρόσθετα περιέχει ένα συνδυασμό γραφίτη και carbon black. Ο συνδυασμός αυτός την καθιστά ακόμα πιο αγώγιμη. Η αγωγιμότητα της εξαρτάτε κυρίως από το πάχος της επιστρώσης, για παράδειγμα, σε πάχος 50  $\mu m$  έχει επιφανειακή αντίσταση είναι  $55 \frac{\Omega}{\text{μονάδα επιφάνειας}}$ .

#### B.1.4.3. Συσκευές για μέτρηση:

Για τις μετρήσεις τάσης ρευματος, έντασης ρευματος και ένταση φωτός και χρησιμοποιήθηκε ένα πολύμετρο της KEYSIGHT 34450A, ένα αμπερόμετρο V&A®, MY-68, μια πηγή τάσης AXIO MET, AX-6003P, ένα Arduino UNO και ένα φωτόμετρο SI1145 uv sensor .

#### B.1.5. Γεωμετρία αγωγών:

Οι αγωγοί που χρησιμοποιήθηκαν σχεδιάστηκαν σε μορφή F, έτσι ώστε στις άκρες τους να να μπορεί να τοποθετηθεί ένα LED.



Εικόνα 5: Μερικοί από τους αγωγούς που μελετήθηκαν αριθμοί 1 έως 5 είναι 7mm πλάτος επί 1cm μέχρι 5cm μήκος επί 3mm ύψος αντίστοιχα, και από αριθμούς 6 έως 10 είναι 3mm πλάτος επί 1cm μέχρι 5cm επί 1mm ύψος αντίστοιχα.

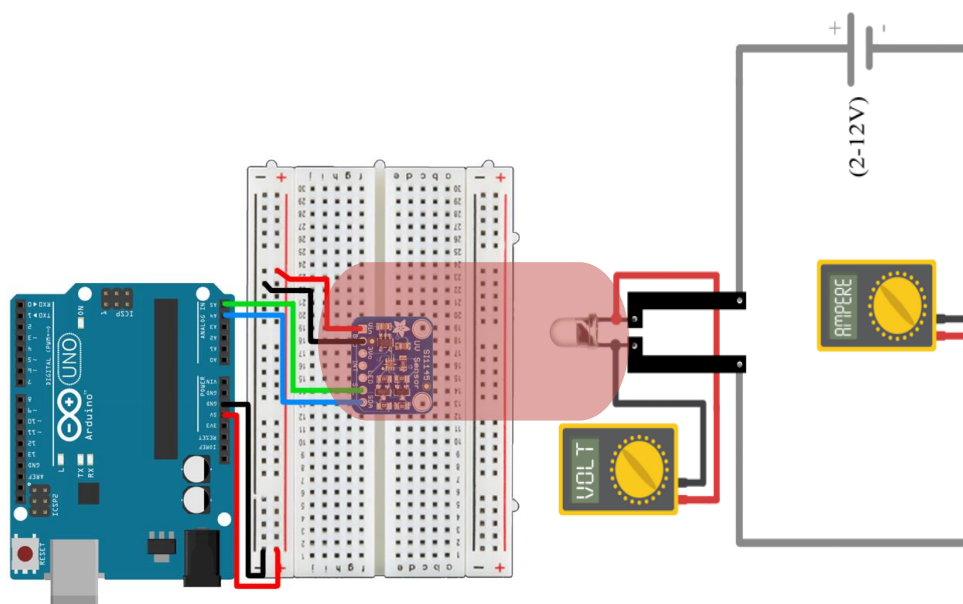
Οι μεταβαλλόμενες γεωμετρίες που θα εξεταστούν είναι ύψος, πλάτος, μήκος και γέμισμα σε ένα αγωγό. Κάθε περίπτωση θα έχει σταθερή μια από τις τρεις διαστάσεις.

Για την καλύτερη διηλεκτρική επαφή χρησιμοποιήθηκε Electric paint στις υποδοχές που ενώνονται βρίσκονται τα καλώδια με τους 3D αγωγούς της παραπάνω εικόνας.

## B.2. Πειραματική διάταξη

### B.2.1. Κύκλωμα:

Στην εικόνα 6 παρουσιάζεται το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθούν οι ιδιότητες των υλικών. Αλλάζοντας την εφαρμοζόμενη τάση, παίρνουμε τιμές της έντασης του LED από το φωτόμετρο, της τάσης που φθάνει στα άκρα του LED και της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Ο κώδικας του arduino βρίσκεται στο παράρτημα Α. Το LED μαζί με τον αισθητήρα φωτός τοποθετήθηκαν σε ένα κουβούκλιο έτσι ώστε να βρίσκονται σε πλήρες σκοτάδι.

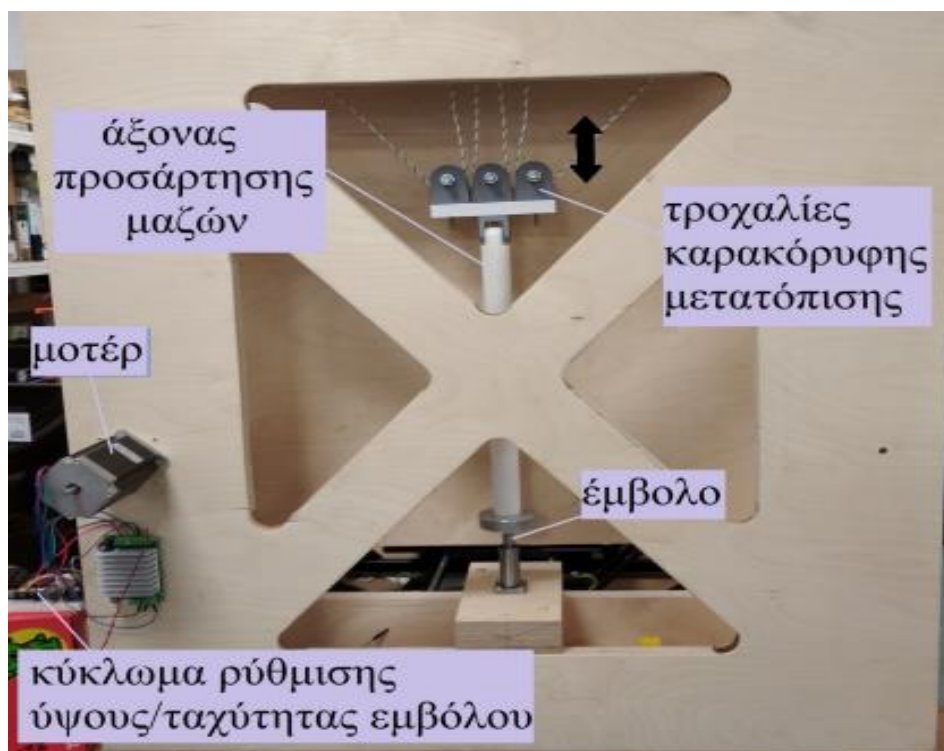


Εικόνα 6: Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για της μετρήσεις.

### B.2.2. Διάταξη δυναμικών μετρήσεων

Για τις δυναμικές μετρήσεις, το έμβολο προσαρτάται μέσω συστήματος τροχαλιών, σε μοτέρ, ελεγχόμενο από Arduino. Μπορούμε να ρυθμίζουμε σε πραγματικό χρόνο την κίνηση του εμβόλου, ταχύτητα και γωνία περιστροφής του μοτέρ, από δύο ηλεκτρικούς ροοστάτες. Η συχνότητα βηματισμού εμφανίζεται σε LCD, ως βήματα ανά λεπτό ανά πόδι.





Εικόνα 7: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη των αισθητήρων πιεζοαντίστασης.

## C. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μια άλλη φυσική ποσότητα που εκφράζει την αντίσταση ενός αγωγού στην διέλευση ηλεκτρικού φορτίου είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Σε ένα αγωγό συγκεκριμένου μήκους η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται :  $\rho = RA/l$  όπου  $R$  η αντίσταση του αγωγού,  $A$  το εμβαδόν διατομής και  $l$  το μήκος του αγωγού και έχει μονάδες μέτρησης  $\rho = [\Omega \cdot cm]$  είναι το αντίστροφο της ειδικής αγωγιμότητας  $\sigma$ ,  $\Rightarrow \rho = 1/\sigma$ . Σε αυτό το μέρος απώτερος σκοπός είναι να υπολογίσουμε την ειδική αντίσταση του αγωγού, και να την συγκρίνουμε με αυτή του κατασκευαστή στο μέρος D.

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε νήμα ξεχωριστά

### C.1. Proto-Pasta:

#### C.1.1. Αντίσταση - Μήκος

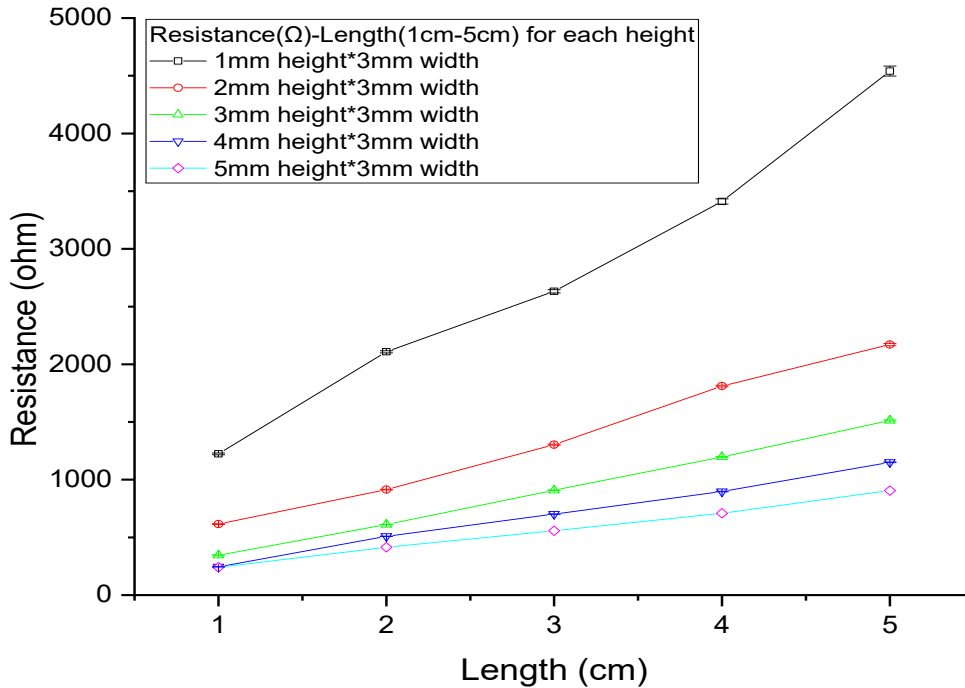
Κρατώντας σταθερό το πλάτος στα  $3mm$  και μεταβάλλοντας το μήκος από  $1cm$  μέχρι  $5cm$  πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε ύψος ξεχωριστά από  $1mm - 5mm$ .

Πίνακας 2: Τιμές της αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο μήκος , από  $1 cm$  μέχρι  $5cm$  για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα  $3mm$ .

Μήκος (cm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	2mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	3mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	4mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	5mm, 3mm (ύψος,πλάτος)
1	1223,60 $\pm$ 7,85	614,92 $\pm$ 3,06	344,88 $\pm$ 4,33	244,87 $\pm$ 2,06	240,66 $\pm$ 3,36

2	2108,35 ± 9,39	914,49 ± 2,80	611,09 ± 1,50	509,44 ± 1,22	415,27 ± 1,38
3	2632,18 ± 14,59	1303,64 ± 3,91	908,65 ± 2,13	702,00 ± 1,55	556,98 ± 0,94
4	3411,18 ± 22,64	1811,90 ± 6,98	1197,58 ± 3,10	897,45 ± 2,85	709,21 ± 5,29
5	4540,62 ± 42,87	2170,91 ± 10,01	1513,37 ± 4,83	1150,21 ± 2,94	906,04 ± 1,81

Βάζοντας τα πιο πάνω αποτελέσματα σε μια γραφική Αντίσταση - Μήκος έχουμε:



Γράφημα 1

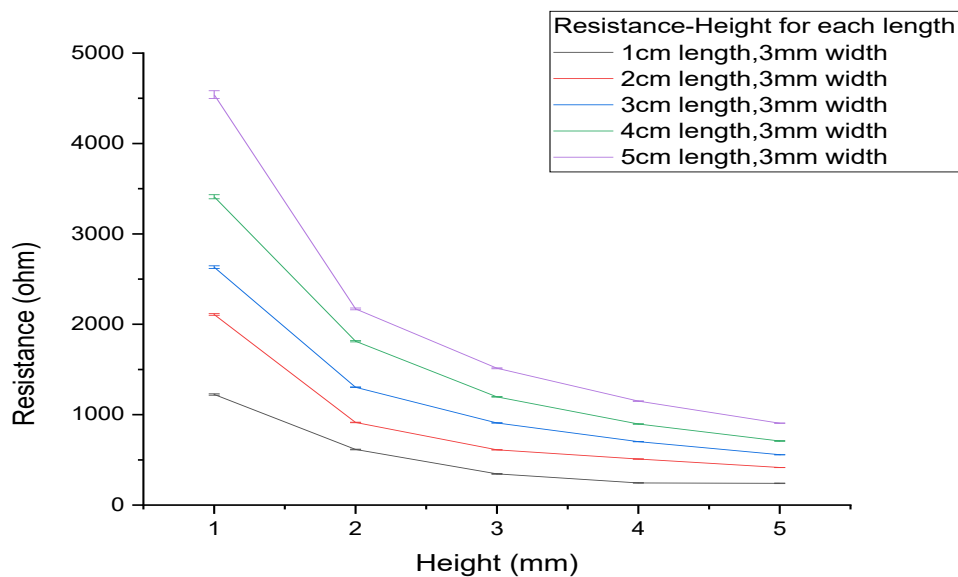
### C.1.2. Αντίσταση - Ύψος

Κρατώντας σταθερό το πλάτος στα 3mm και μεταβάλλοντας το ύψος από 1mm μέχρι 5mm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε μήκος ξεχωριστά από 1cm μέχρι 5cm.

Πίνακας 3: Τιμές της αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο ύψος, από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Ύψος (mm)	Αντίσταση (Ω)				
	1cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	2cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	3cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	4cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	5cm, 3mm (μήκος, πλάτος)
1	1223,60 ± 7,85	2108,35 ± 9,39	2632,18 ± 14,59	3411,18 ± 22,64	4540,62 ± 42,87
2	614,92 ± 3,06	914,49 ± 2,80	1303,64 ± 3,91	1811,90 ± 6,98	2170,91 ± 10,01
3	344,88 ± 4,33	611,09 ± 1,50	908,65 ± 2,13	1197,58 ± 3,10	1513,37 ± 4,83
4	244,87 ± 2,06	509,44 ± 1,22	702,00 ± 1,55	897,45 ± 2,85	1150,21 ± 2,94
5	240,66 ± 3,36	415,2 ± 1,38	556,98 ± 0,94	709,21 ± 5,29	906,04 ± 1,81

Βάζοντας τα πιο πάνω αποτελέσματα σε μια γραφική Αντίσταση - Ύψος έχουμε:



Γράφημα 2

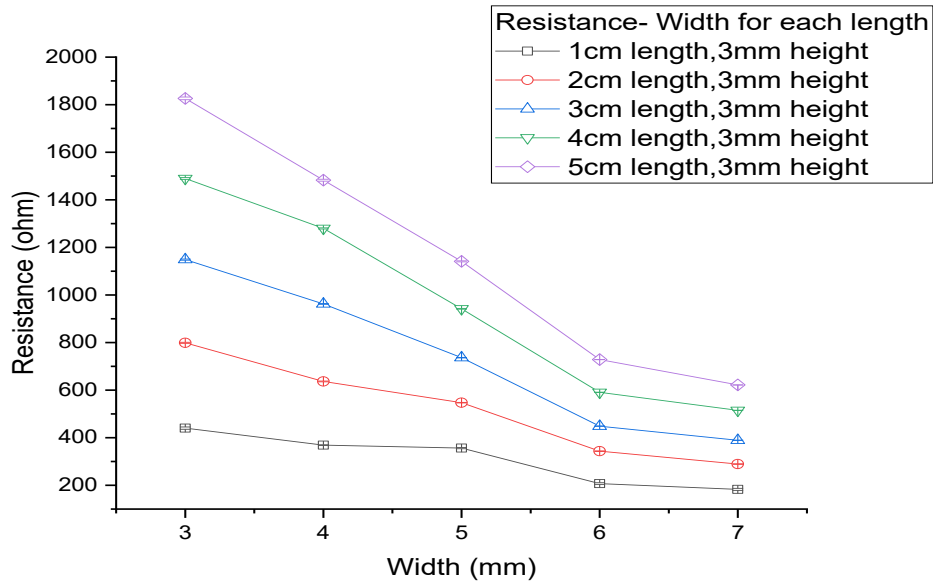
### C.1.3. Αντίσταση - Πλάτος

Κρατώντας σταθερό το ύψος στα 3mm και μεταβάλλοντας το πλάτος από 3mm μέχρι 7mm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε μήκος ξεχωριστά από 1cm μέχρι 5cm

Πίνακας 4: Τιμές της αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο πλάτος, από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

Πλάτος (mm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1cm, 3mm (μήκος, ύψος)	2cm, 3mm (μήκος, ύψος)	3cm, 3mm (μήκος, ύψος)	4cm, 3mm (μήκος, ύψος)	5cm, 3mm (μήκος, ύψος)
3	440,39 $\pm$ 4,86	798,90 $\pm$ 2,28	1148,67 $\pm$ 2,30	1489,62 $\pm$ 3,65	1826,42 $\pm$ 5,65
4	368,75 $\pm$ 1,75	636,63 $\pm$ 1,52	962,16 $\pm$ 1,59	1279,85 $\pm$ 2,66	1482,58 $\pm$ 4,09
5	356,22 $\pm$ 2,43	547,29 $\pm$ 0,92	736,35 $\pm$ 0,80	941,87 $\pm$ 1,47	1141,48 $\pm$ 2,14
6	207,19 $\pm$ 3,43	343,49 $\pm$ 1,37	448,55 $\pm$ 0,70	590,68 $\pm$ 0,56	728,56 $\pm$ 0,70
7	182,71 $\pm$ 4,31	289,09 $\pm$ 1,13	389,16 $\pm$ 0,66	515,29 $\pm$ 0,55	621,84 $\pm$ 0,38

Βάζοντας τα πιο πάνω αποτελέσματα σε μια γραφική :



Γράφημα 3

#### C.1.4. Αντίσταση - Infill pattern

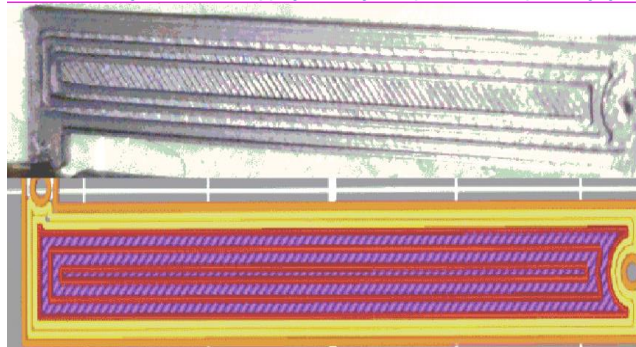
Κάθε μοτίβο γεμίματος παρουσίασε διαφορετική αντίσταση. Είδαμε 4 διαφορετικά μοτίβα γεμίματος :

α) Ομοκεντρικό (*Concentric*) β) Οκτάγραμμη σπείρα (*Octagram spiral*) γ) Καμπύλη Χίλμπερτ (*Hilbert Curve*)  
 δ) Αρχιμηδιανή χορδή (*Archimedean chords*) σε 5 διαφορετικά ποσοστά γεμίματος. Από 5% μέχρι 100% με βήμα 25% κάθε φορά. Θεωρούμε 5% σαν μηδέν αφού το 5% είναι το ελάχιστο δομικό κριτήριο έτσι ώστε να μπορέσει να εκτυπώσει ο εκτυπωτής

##### C.1.4.1. Ομοκεντρικό (*Concentric*):

Κρατώντας σταθερό το ύψος και το πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα, μεταβάλλοντας μόνο το μήκος από 1cm μέχρι 5cm.

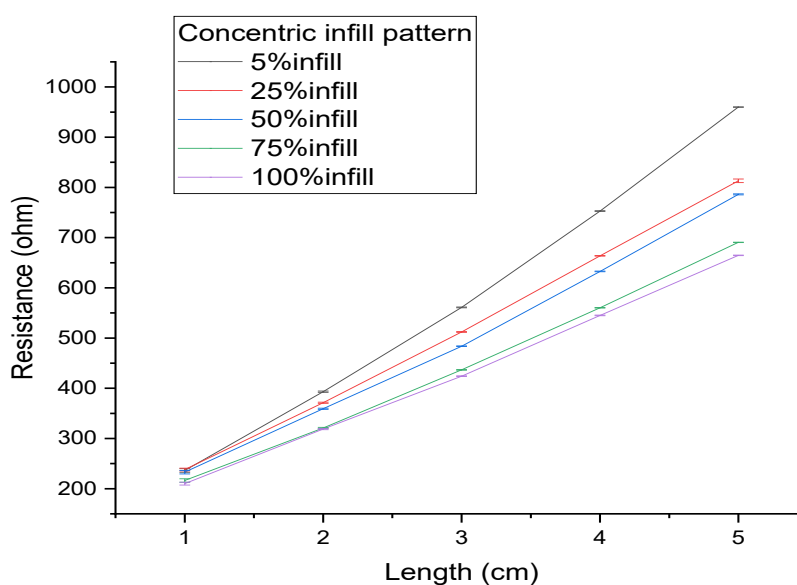
Εικόνα 8: Μοτίβο εκτύπωσης ομοκεντρικό (*Concentric*) 50% γέμισμα



Πίνακας 5: Τιμές της αντίστασης για το μοτίβο ομοκεντρικό με ποσοστά γέμισματος 5-25-50-75-100% για σταθερό ύψος και πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα με μεταβαλλόμενη διάσταση το μήκος 1cm-5cm.

Μήκος cm	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	5% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	25% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	50% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	75% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	100% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)
1	236,38 $\pm$ 3,54	238,24 $\pm$ 2,77	232,96 $\pm$ 3,41	216,37 $\pm$ 3,34	210,16 $\pm$ 2,88
2	393,21 $\pm$ 1,20	371,22 $\pm$ 1,09	359,25 $\pm$ 1,21	320,85 $\pm$ 1,19	318,86 $\pm$ 1,19
3	561,03 $\pm$ 0,80	512,13 $\pm$ 0,64	483,67 $\pm$ 0,58	436,67 $\pm$ 0,67	424,12 $\pm$ 0,58
4	752,91 $\pm$ 0,61	663,75 $\pm$ 0,63	632,71 $\pm$ 0,64	560,33 $\pm$ 0,52	545,11 $\pm$ 0,56
5	960,03 $\pm$ 0,44	813,19 $\pm$ 3,59	786,19 $\pm$ 0,94	690,59 $\pm$ 0,36	664,61 $\pm$ 0,49

Οι παραπάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική

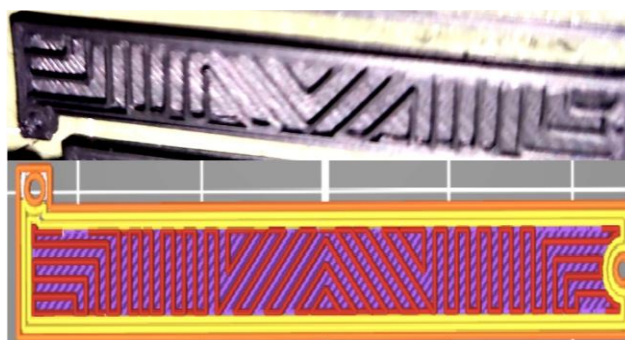


Γράφημα 4

#### C.1.4.2. Οκτάγραμμη σπείρα (Octagram spiral):

Κρατώντας σταθερό το ύψος και το πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα, μεταβάλλοντας μόνο το μήκος από 1cm μέχρι 5cm.

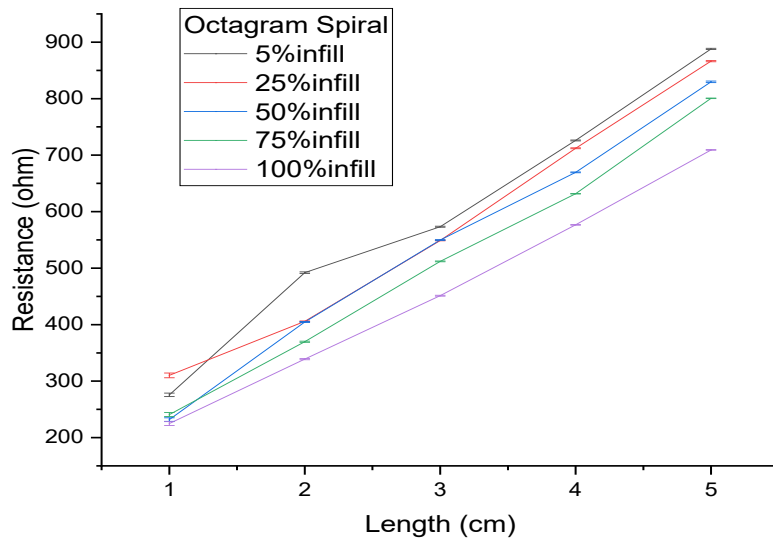
Εικόνα 9: Μοτίβο εκτύπωσης Οκτάγραμμη σπείρα (Octagram spiral) 50% γέμισμα



Πίνακας 6: Τιμές της αντίστασης για το μοτίβο Οκτάγραμμα σπείρα με ποσοστά γεμίματος 5-25-50-75-100% για σταθερό ύψος και πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα με μεταβαλλόμενη διάσταση το μήκος 1cm-5cm.

Μήκος cm	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	5% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	25% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	50% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	75% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	100% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)
1	275,69 $\pm$ 3,03	310,18 $\pm$ 4,16	231,96 $\pm$ 3,09	240,85 $\pm$ 3,56	224,90 $\pm$ 3,43
2	492,03 $\pm$ 1,39	405,82 $\pm$ 0,59	404,69 $\pm$ 0,98	369,71 $\pm$ 0,93	338,99 $\pm$ 1,03
3	573,30 $\pm$ 0,81	548,94 $\pm$ 0,60	549,71 $\pm$ 0,65	511,90 $\pm$ 0,70	451,22 $\pm$ 0,75
4	726,01 $\pm$ 0,71	712,16 $\pm$ 0,78	669,47 $\pm$ 0,68	631,75 $\pm$ 0,43	576,62 $\pm$ 0,51
5	887,99 $\pm$ 1,01	866,37 $\pm$ 1,05	829,69 $\pm$ 1,36	800,60 $\pm$ 0,36	709,21 $\pm$ 0,57

Οι παραπάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική

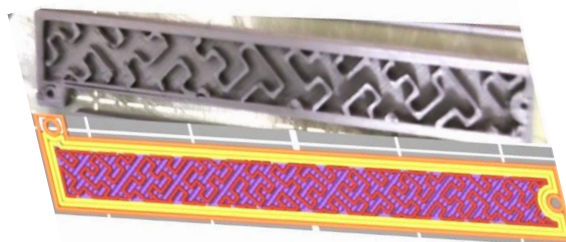


Γράφημα 5

#### C.1.4.3. Καμπύλη Χιλμπερτ (Hilbert Curve):

Κρατώντας σταθερό το ύψος και το πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα, μεταβάλλοντας μόνο το μήκος από 1cm μέχρι 5cm.

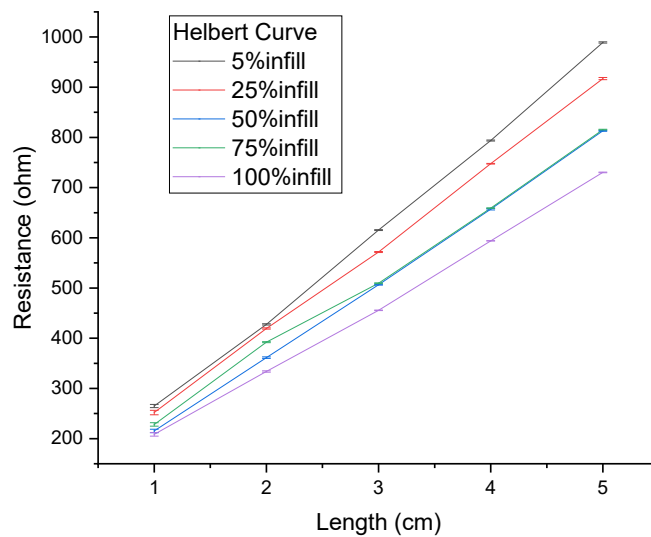
Εικόνα 10: Μοτίβο εκτύπωσης καμπύλη Χέλμπερτ (Hilbert Curve) 50% γέμισμα



Πίνακας 7: Τιμές της αντίστασης για το μοτίβο καμπύλη Χίλπερτ με ποσοστά γεμίσματος 5-25-50-75-100% για σταθερό ύψος και πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα με μεταβαλλόμενη διάσταση το μήκος 1cm-5cm.

Μήκος cm	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	5% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	25% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	50% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	75% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	100% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)
1	265,07±3,20	252,00 ±4,41	215,33 ±3,43	228,28±3,35	208,57 ±3,59
2	427,52±1,32	419,35 ±1,29	361,40 ±1,52	392,24±1,00	333,77 ±1,32
3	615,41±0,81	571,71 ±1,00	506,49 ±0,71	509,58±0,69	455,54 ±0,57
4	793,71±1,04	747,66 ±0,67	657,00 ±1,55	659,19±0,48	593,99 ±0,47
5	989,05±1,28	917,13 ±2,15	813,05 ±0,89	815,55±0,61	730,31 ±0,57

Οι παρά πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική

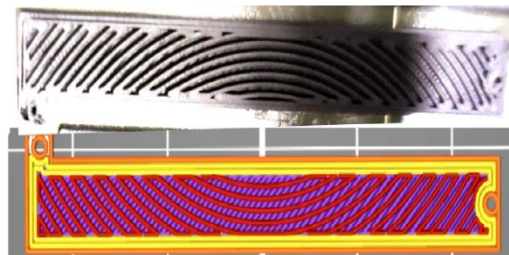


Γράφημα 6

#### C.1.4.4. Αρχιμηδιανή χορδή (Archimedean chords):

Κρατώντας σταθερό το ύψος και το πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα, μεταβάλλοντας μόνο το μήκος από 1cm μέχρι 5cm

Εικόνα 11: Μοτίβο εκτύπωσης Αρχιμηδιανή χορδή (Archimedean chords) 75% γέμισμα

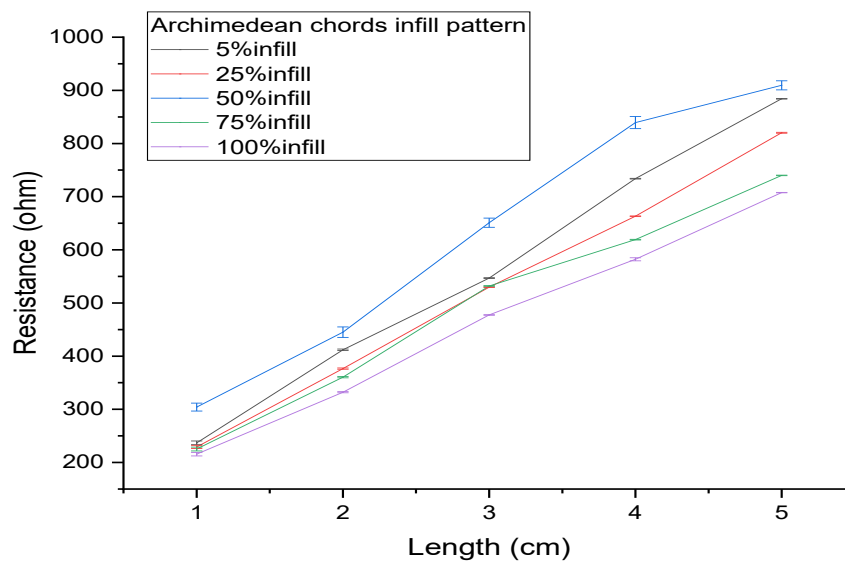


Πίνακας 8 Τιμές της αντίστασης για το μοτίβο Αρχιμηδιανή χορδή με ποσοστά γεμίσματος 5-25-50-75-100% για σταθερό ύψος και πλάτος στα 3mm και 7mm αντίστοιχα με μεταβαλλόμενη διάσταση το μήκος 1cm-5cm.

Αντίσταση ( $\Omega$ )
------------------------

Μήκος cm	5% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	25% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	50% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	75% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)	100% γέμισμα 3mm, 7mm (ύψος, πλάτος)
1	236,89 ±3,45	229,24 ±3,03	304,24 ±7,43	225,25 ±3,55	215,58±3,19
2	411,94 ±1,36	376,50 ±1,15	445,12 ±9,82	360,47 ±1,13	332,13±1,13
3	546,77 ±0,75	529,70 ±0,67	650,95 ±8,64	532,00 ±0,63	477,52±0,61
4	733,95 ±0,58	663,17 ±0,65	839,38 ±11,39	619,13 ±0,62	582,22±2,78
5	884,23 ±0,53	820,22 ±0,91	909,47 ±8,47	740,01 ±0,39	707,68±0,39

Οι παρά πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 7

### Ειδική αντίσταση $\rho$

Μελετώντας την αντίσταση του Proto Pasta και με βάση τον τύπο  $\rho = RA/l$  έχουμε την ειδική αντίσταση  $\rho$  για ύψος, πλάτος και μήκος ξεχωριστά.

#### C.1.5. Ειδική αντίσταση- Ύψος

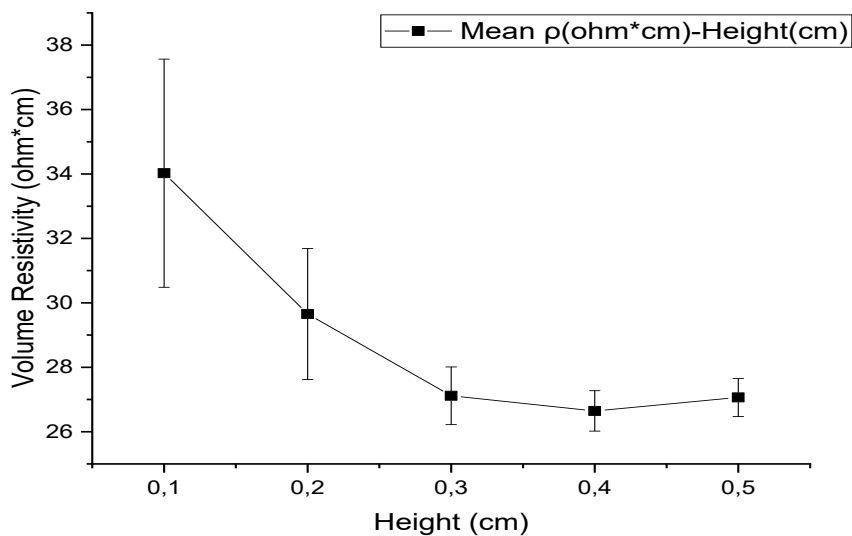
Πίνακας 9: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο ύψος, από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Ύψος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )				
	1cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	2cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	3cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	4cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	5cm, 3mm (μήκος, πλάτος)
0.1	36,70	31,62	26,32	25,58	27,24
0.2	36,89	27,43	26,07	27,17	26,05
0.3	31,03	27,49	27,25	26,94	27,24
0.4	29,38	30,56	28,08	26,92	27,60



0.5	36,10	31,14	27,84	26,59	27,18
Μέσο $\rho$	34,02	29,65	27,11	26,64	27,06
<i>S.D</i>	3,54	2,03	0,89	0,62	0,59

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



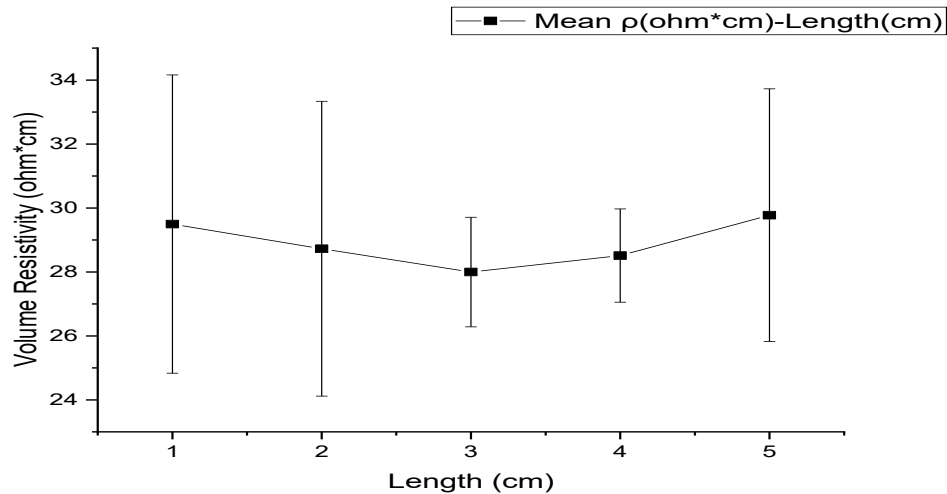
Γράφημα 8

#### C.1.6. Ειδική αντίσταση- Μήκος

Πίνακας 10: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Μήκος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )				
	1mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	2mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	3mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	4mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	5mm, 3mm (ύψος, πλάτος)
1	36,70	36,89	31,03	29,38	36,10
2	31,62	27,43	27,49	30,56	31,14
3	26,32	26,07	27,25	28,08	27,84
4	25,58	27,17	26,94	26,92	26,59
5	27,24	26,05	27,24	27,60	27,18
Μέσο $\rho$	29,49	28,72	27,99	28,51	29,77
<i>S.D</i>	4,66	4,60	1,71	1,45	3,95

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



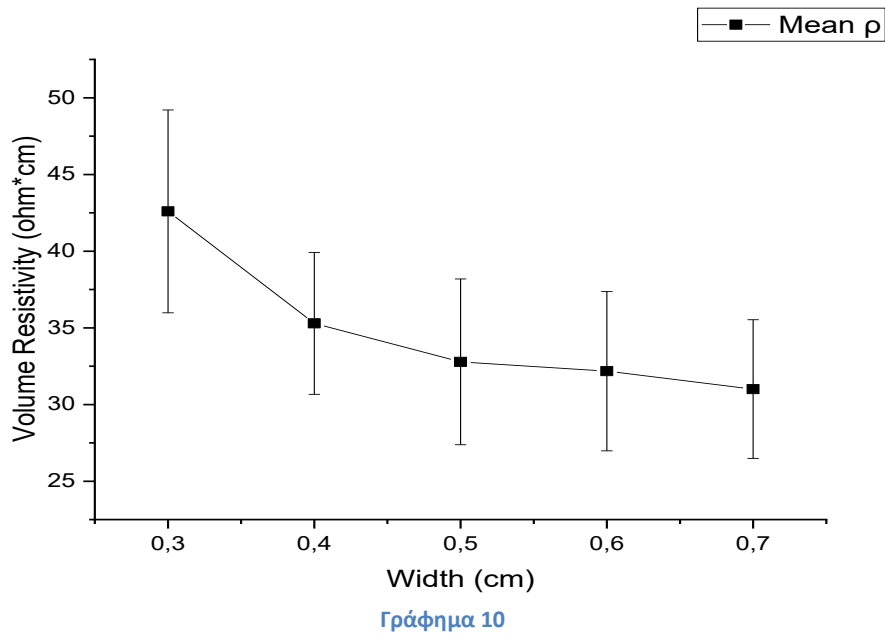
Γράφημα 9

### C.1.7. Ειδική αντίσταση- Πλάτος

Πίνακας 11: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού P.Pasta για μεταβαλλόμενο πλάτος, από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

Πλάτος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )				
	1cm, 3mm (μήκος, ύψος)	2cm, 3mm (μήκος, ύψος)	3cm, 3mm (μήκος, ύψος)	4cm, 3mm (μήκος, ύψος)	5cm, 3mm (μήκος, ύψος)
0.1	39,63	35,95	34,46	33,51	32,87
0.2	44,25	38,19	38,48	38,39	35,58
0.3	53,43	41,04	36,81	35,32	34,24
0.4	37,29	30,91	26,91	26,58	26,22
0.5	38,37	30,35	27,24	27,05	26,11
Μέσο $\rho$	42,59	35,29	32,78	32,17	31,00
S. D	15,81	16,04	6,11	5,11	13,26

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



## C.2. NijaTek EEL 3D Printing filament

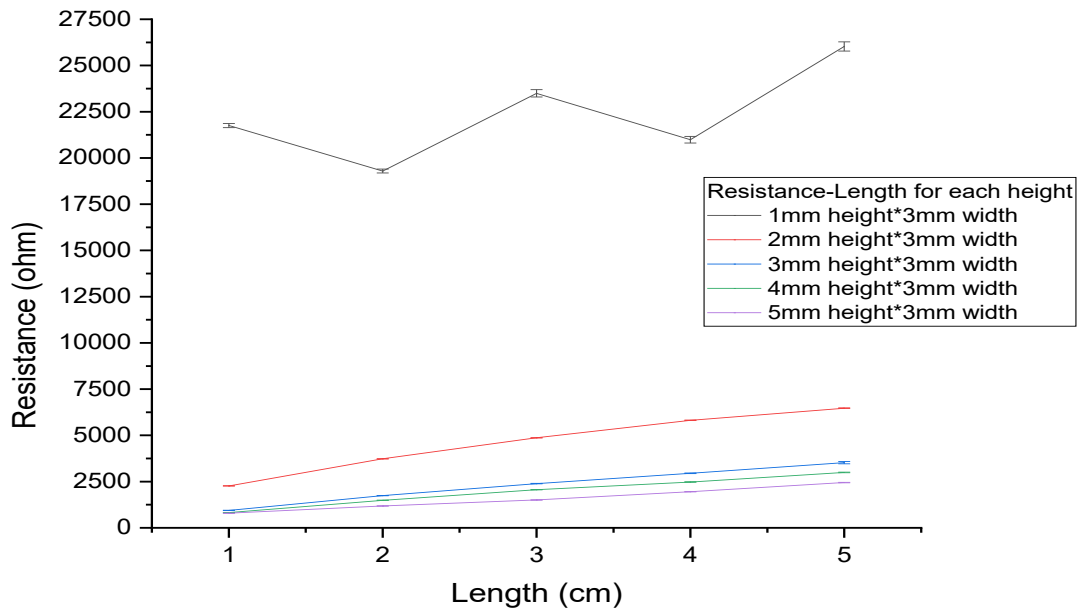
### C.2.1. Αντίσταση - Μήκος:

Κρατώντας σταθερό το πλάτος στα 3mm και μεταβάλλοντας το μήκος από 1cm μέχρι 5cm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε ύψος ξεχωριστά από 1mm μέχρι 5mm.

Πίνακας 12: Τιμές της αντίστασης του υλικού EEL για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Μήκος (cm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	2mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	3mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	4mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	5mm, 3mm (ύψος,πλάτος)
1	21755,02±110,84	2267,20±12,35	943,87±2,26	828,37±1,27	790,93±4,59
2	19293,17±107,38	3731,87±3,81	1741,88±5,81	1489,92±3,48	1182,08±2,21
3	23494,41±198,52	4867,37±6,98	2392,37±10,54	2062,62±7,94	1507,32±4,10
4	20987,25±178,51	5814,64±10,23	2950,30±17,23	2477,52±10,83	1954,91±7,05
5	26029,73±247,32	6468,65±17,36	3524,95±63,23	2994,51±14,46	2447,53±10,94

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 11

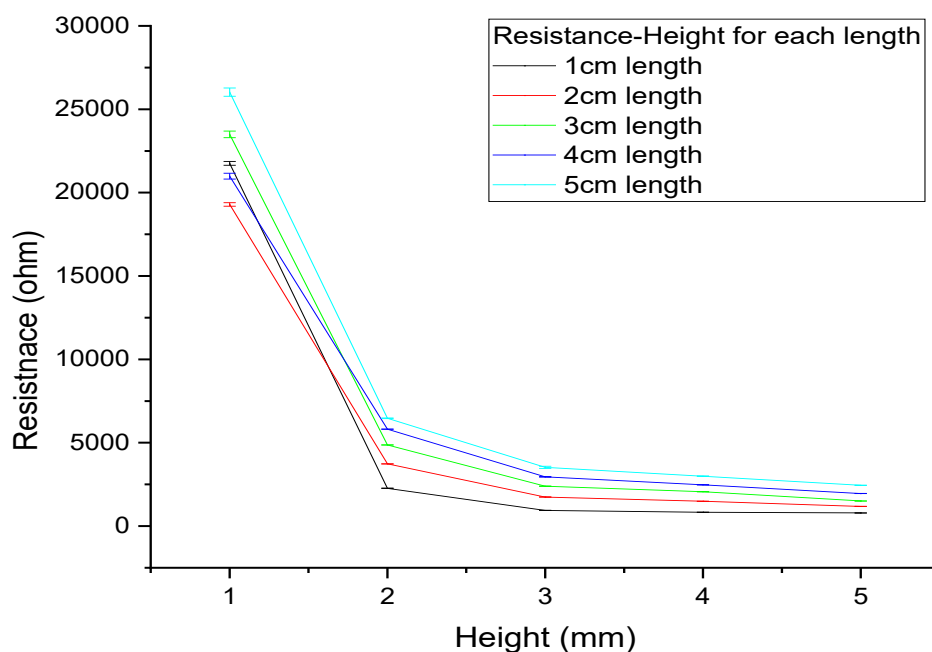
### C.2.2. Αντίσταση - Ύψος

Κρατώντας σταθερό το πλάτος στα 3mm και μεταβάλλοντας το ύψος από 1mm μέχρι 5mm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε μήκος ξεχωριστά από 1cm μέχρι 5cm.

Πίνακας 13: Τιμές της αντίστασης του υλικού EEL για μεταβαλλόμενο ύψος, από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Ύψος (mm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	2cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	3cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	4cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	5cm, 3mm (μήκος, πλάτος)
1	21755,02±110,84	19293,17±107,38	23494,41±198,52	20987,25±178,51	26029,73±247,32
2	2267,20±12,35	3731,87±3,81	4867,37±6,98	5814,64±10,23	6468,65±17,31
3	943,87±2,26	1741,88±5,81	2392,37±10,54	2950,30±17,23	3524,95±63,23
4	828,37±1,27	1489,92±3,48	2062,62±7,94	2477,52±10,83	2994,51±14,46
5	790,93±4,59	1182,08±2,21	1507,32±4,10	1954,91±7,05	2447,53±10,94

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 12

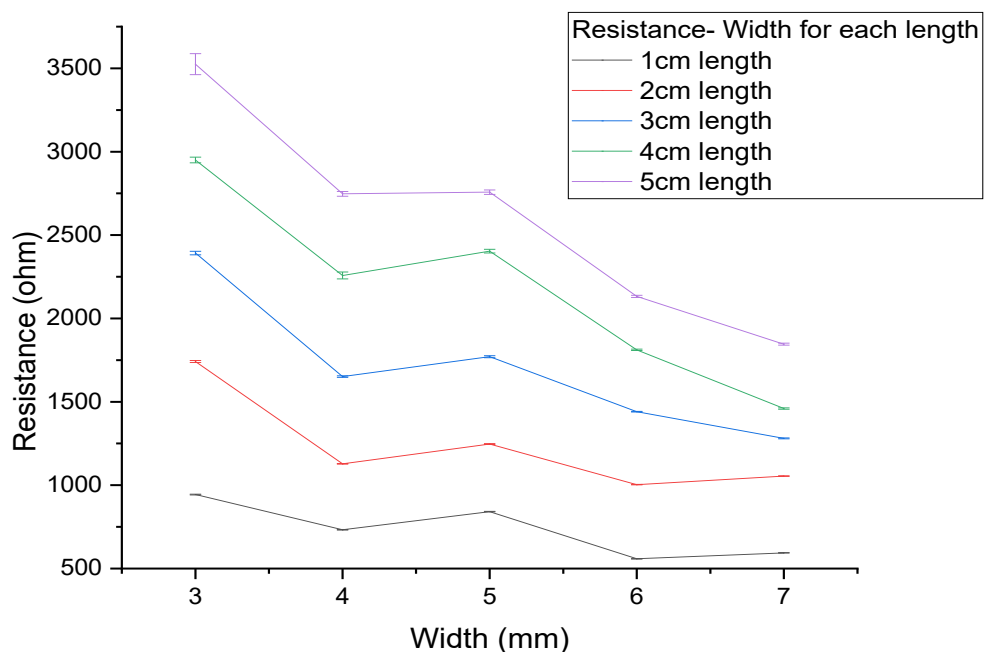
### C.2.3. Αντίσταση - Πλάτος

Κρατώντας σταθερό το ύψος στα 3mm και μεταβάλλοντας το πλάτος από 3mm μέχρι 7mm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε μήκος ξεχωριστά από 1cm μέχρι 5cm

Πίνακας 14: Τιμές της αντίστασης του υλικού EEL για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

Πλάτος (mm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1cm, 3mm (μήκος, ύψος)	2cm, 3mm (μήκος, ύψος)	3cm, 3mm (μήκος, ύψος)	4cm, 3mm (μήκος, ύψος)	5cm, 3mm (μήκος, ύψος)
3	943,87 $\pm$ 2,26	1741,88 $\pm$ 5,81	2392,37 $\pm$ 10,54	2950,30 $\pm$ 17,23	3524,95 $\pm$ 63,23
4	732,52 $\pm$ 1,64	1128,30 $\pm$ 1,70	1651,08 $\pm$ 4,65	2257,86 $\pm$ 21,05	2747,21 $\pm$ 14,46
5	841,62 $\pm$ 1,72	1246,92 $\pm$ 3,03	1770,68 $\pm$ 5,77	2403,88 $\pm$ 10,90	2757,42 $\pm$ 13,06
6	558,43 $\pm$ 1,35	1003,25 $\pm$ 1,54	1440,84 $\pm$ 2,13	1811,79 $\pm$ 4,36	2132,11 $\pm$ 6,46
7	594,23 $\pm$ 1,54	1054,25 $\pm$ 1,87	1280,53 $\pm$ 2,80	1459,73 $\pm$ 3,76	1845,61 $\pm$ 6,09

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 13

### Ειδική αντίσταση $\rho$

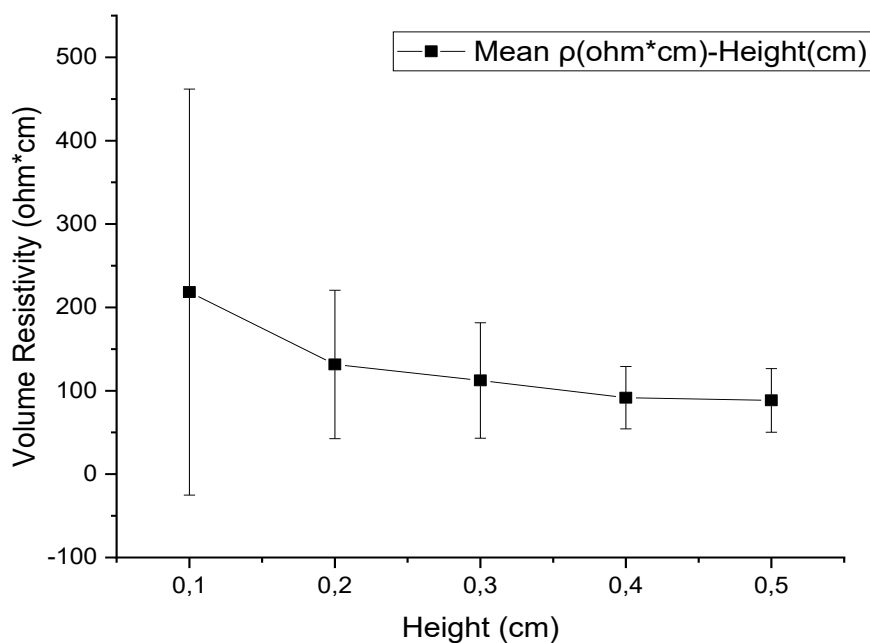
Μελετώντας την αντίσταση του NijaTek EEL και με βάση τον τύπο  $\rho = RA/l$  παίρνουμε την ειδική αντίσταση  $\rho$  για ύψος, πλάτος και μήκος ξεχωριστά.

#### C.2.4. Ειδική αντίσταση- Ύψος

Πίνακας 15: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού EEL για μεταβαλλόμενο ύψος, από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Ύψος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S.D
	1cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	2cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	3cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	4cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	5cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	
0.1	652,65	289,39	234,94	157,40	156,17	243,55
0.2	136,03	111,95	97,34	87,21	77,62	89,08
0.3	84,94	78,38	71,77	66,38	63,44	69,20
0.4	99,40	89,39	82,50	74,32	71,86	37,47
0.5	118,63	88,65	75,36	73,30	73,42	38,17
Μέσο $\rho$	218,33	131,55	112,38	91,72	88,50	

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



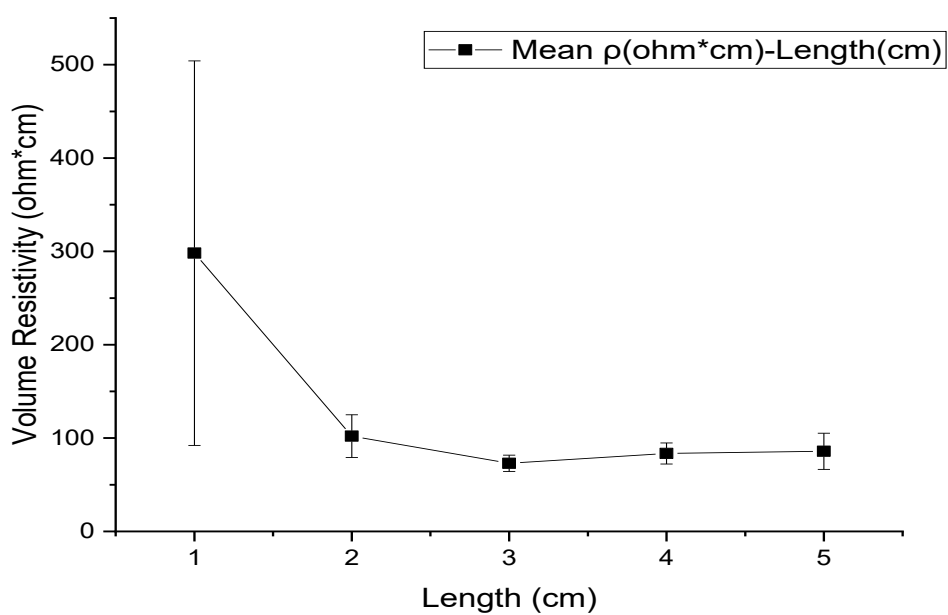
Γράφημα 14

### C.2.5. Ειδική αντίσταση- Μήκος

Πίνακας 16: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού EEL για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Μήκος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S. D
	1mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	2mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	3mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	4mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	5mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	
1	652,65	136,03	84,94	99,40	118,63	205,97
2	289,39	111,95	78,38	89,39	88,65	22,86
3	234,94	97,34	71,77	82,50	75,36	8,77
4	157,40	87,21	66,38	74,32	73,30	11,27
5	156,17	77,62	63,44	71,86	73,42	19,39
Μέσο $\rho$	298,11	102,03	72,98	83,49	85,87	

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 15

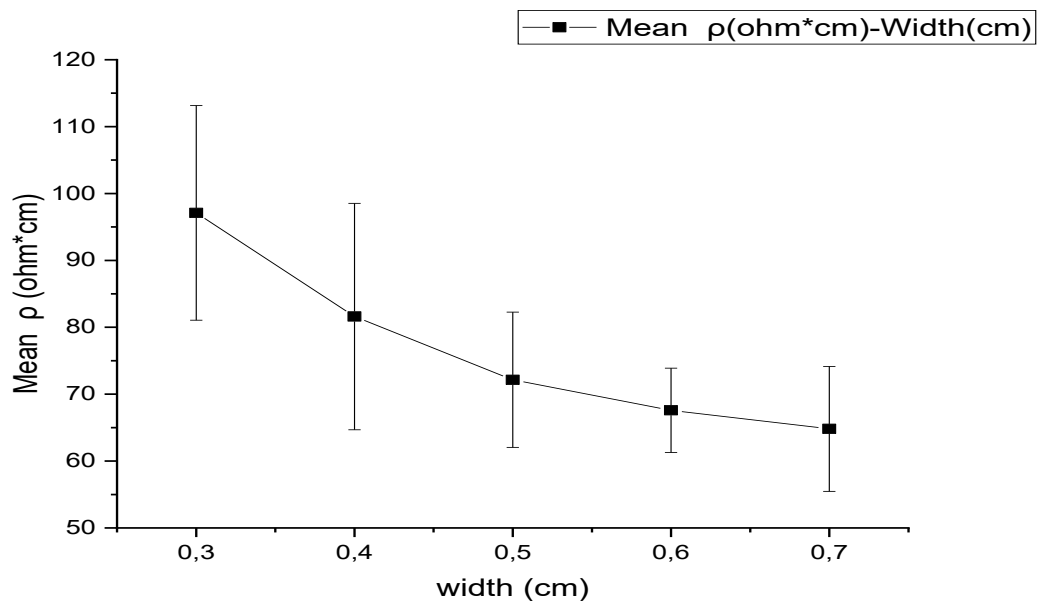
### C.2.6. Ειδική αντίσταση- Πλάτος

Πίνακας 17: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού EEL για μεταβαλλόμενο πλάτος , από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

Πλάτος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S.D
	1cm, 3mm (μήκος, ύψος)	2cm, 3mm (μήκος, ύψος)	3cm, 3mm (μήκος, ύψος)	4cm, 3mm (μήκος, ύψος)	5cm, 3mm (μήκος, ύψος)	
0.1	84,94	78,38	71,77	66,38	63,44	16,04
0.2	87,90	67,69	66,04	67,73	65,93	16,93
0.3	91,53	72,06	64,89	58,92	51,29	10,12
0.4	96,34	79,17	68,42	68,24	65,84	6,30
0.5	124,78	110,69	89,63	76,63	77,51	9,33
Μέσο $\rho$	97,10	81,60	72,15	67,58	64,80	

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική





Γράφημα 16

### C.3. Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black

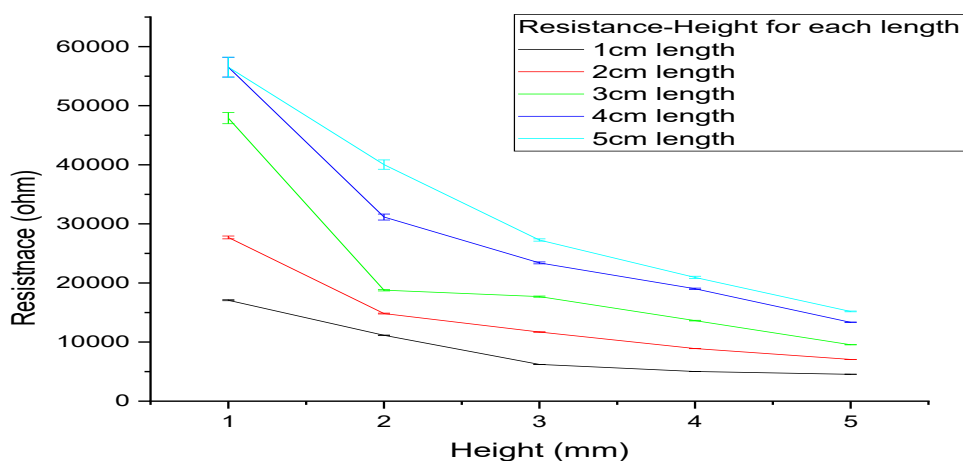
#### C.3.1. Αντίσταση - Μήκος:

Κρατώντας σταθερό το πλάτος στα 3mm και μεταβάλλοντας το μήκος από 1cm μέχρι 5cm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε ύψος ξεχωριστά από 1mm – 5mm.

Πίνακας 18: Τιμές της αντίστασης του υλικού Pi για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Μήκος (cm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1mm,3mm (ύψος,πλάτος)	2mm,3mm (ύψος,πλάτος)	3mm,3mm (ύψος,πλάτος)	4mm,3mm (ύψος,πλάτος)	5mm,3mm (ύψος,πλάτος)
1	17075,16 $\pm$ 81,62	11142,86 $\pm$ 43,20	6212,25 $\pm$ 11,03	5029,69 $\pm$ 10,01	4544,91 $\pm$ 36,72
2	27714,01 $\pm$ 240,19	14829,64 $\pm$ 72,59	11699,61 $\pm$ 29,36	8901,87 $\pm$ 20,52	7062,14 $\pm$ 7,01
3	47892,12 $\pm$ 941,88	18779,55 $\pm$ 118,42	17690,36 $\pm$ 100,89	13636,06 $\pm$ 50,85	9544,10 $\pm$ 722,89
4	56521,46 $\pm$ 1678,53	31162,95 $\pm$ 504,77	23405,04 $\pm$ 166,69	19021,01 $\pm$ 105,82	13345,01 $\pm$ 49,53
5	56520,47 $\pm$ 1689,04	40035,21 $\pm$ 785,08	27273,64 $\pm$ 194,73	20937,83 $\pm$ 193,95	15184,05 $\pm$ 67,67

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 17

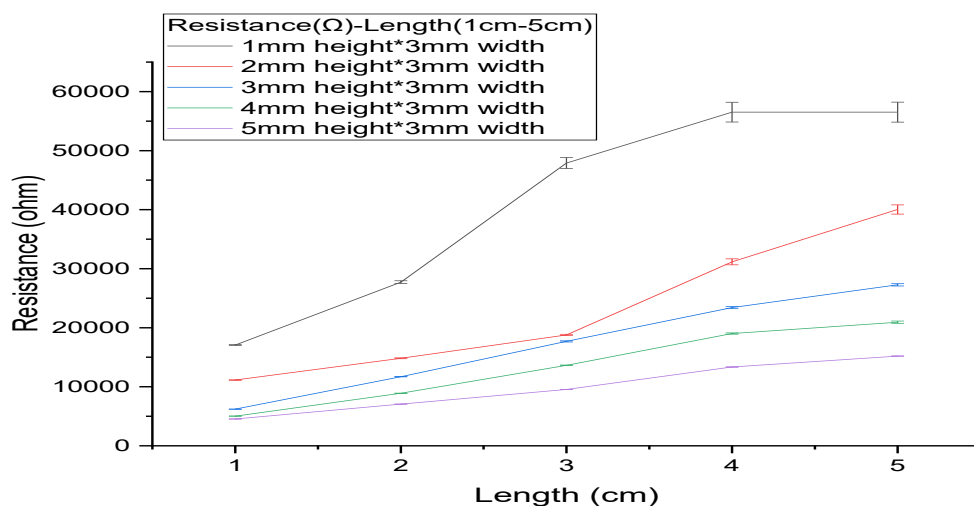
### C.3.2. Αντίσταση - Ύψος

Κρατώντας σταθερό το πλάτος στα 3mm και μεταβάλλοντας το ύψος από 1mm μέχρι 5mm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε μήκος ξεχωριστά από 1cm μέχρι 5cm.

Πίνακας 19 Τιμές της αντίστασης του υλικού  $R_i$  για μεταβαλλόμενο ύψος, από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Ύψος (mm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1cm,3mm (μήκος,πλάτος)	2cm,3mm (μήκος,πλάτος)	3cm,3mm (μήκος,πλάτος)	4cm,3mm (μήκος,πλάτος)	5cm,3mm (μήκος,πλάτος)
1	17075,16 ± 81,62	27714,01 ± 240,19	47892,12 ± 941,88	56521,46 ± 1678,53	56520,47 ± 1689,04
2	11142,86 ± 43,20	14829,64 ± 72,59	18779,55 ± 118,42	31162,95 ± 504,77	40035,21 ± 785,08
3	6212,25 ± 11,03	11699,61 ± 29,36	17690,36 ± 100,89	23405,04 ± 166,69	27273,64 ± 194,73
4	5029,69 ± 10,01	8901,87 ± 20,52	13636,06 ± 50,85	19021,01 ± 105,82	20937,83 ± 193,95
5	4544,91 ± 36,72	7062,14 ± 7,01	9544,10 ± 22,89	13345,01 ± 49,5	15184,05 ± 67,67

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 18

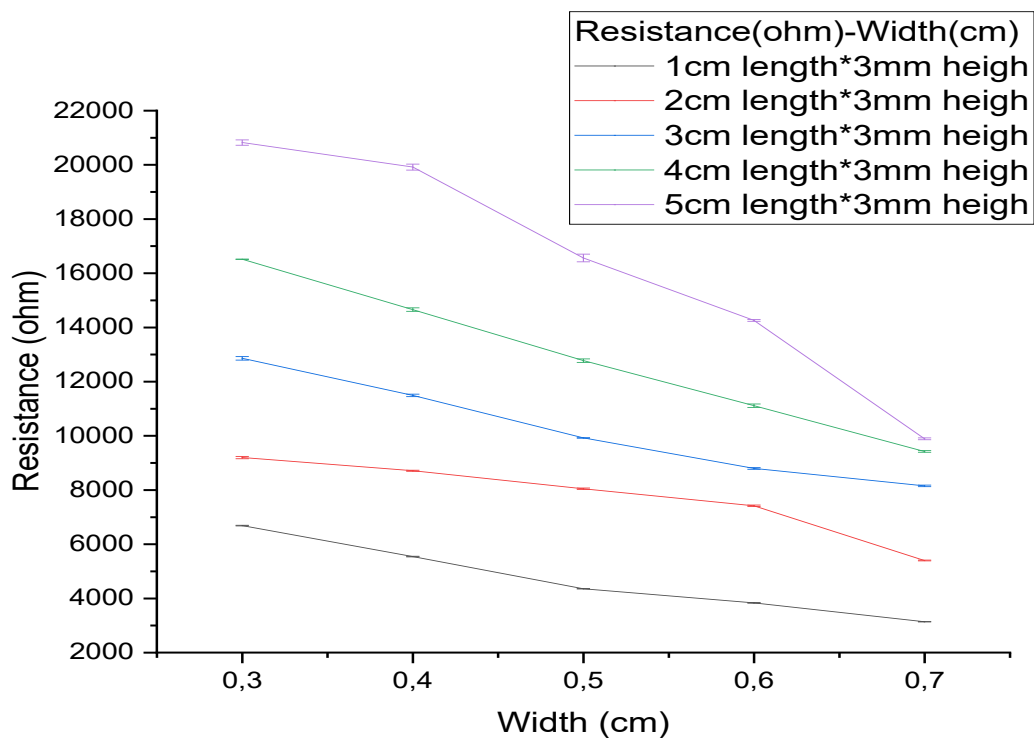
### C.3.3. Αντίσταση - Πλάτος

Κρατώντας σταθερό το ύψος στα 3mm και μεταβάλλοντας το πλάτος από 3mm μέχρι 7mm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε μήκος ξεχωριστά από 1cm μέχρι 5cm

Πίνακας 20: Τιμές της αντίστασης του υλικού P1 για μεταβαλλόμενο πλάτος, από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

Πλάτος (mm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1cm,3mm (μήκος,ύψος)	2cm,3mm (μήκος,ύψος)	3cm,3mm (μήκος,ύψος)	4cm,3mm (μήκος,ύψος)	5cm,3mm (μήκος,ύψος)
3	6685,51±12,25	9196,10 ±44,51	12857,42 ±63,85	16515,05 ±9,26	20820,69±99,78
4	5542,96 ±8,82	8710,10 ±18,53	11491,21 ±46,99	14656,91 ±63,86	19914,62 ±109,42
5	4352,11 ±6,20	8045,83 ±23,93	9921,60 ±9,26	12773,56 ±65,34	16562,15 ±141,61
6	3832,68±9,73	7417,16±24,63	8795,41±32,35	11110,14±65,94	14258,92 ±34,35
7	3136,17 ±6,71	5398,00 ±15,94	8151,52 ±26,12	9419,69 ±31,36	9891,12 ±33,94

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 19

### Ειδική αντίσταση $\rho$

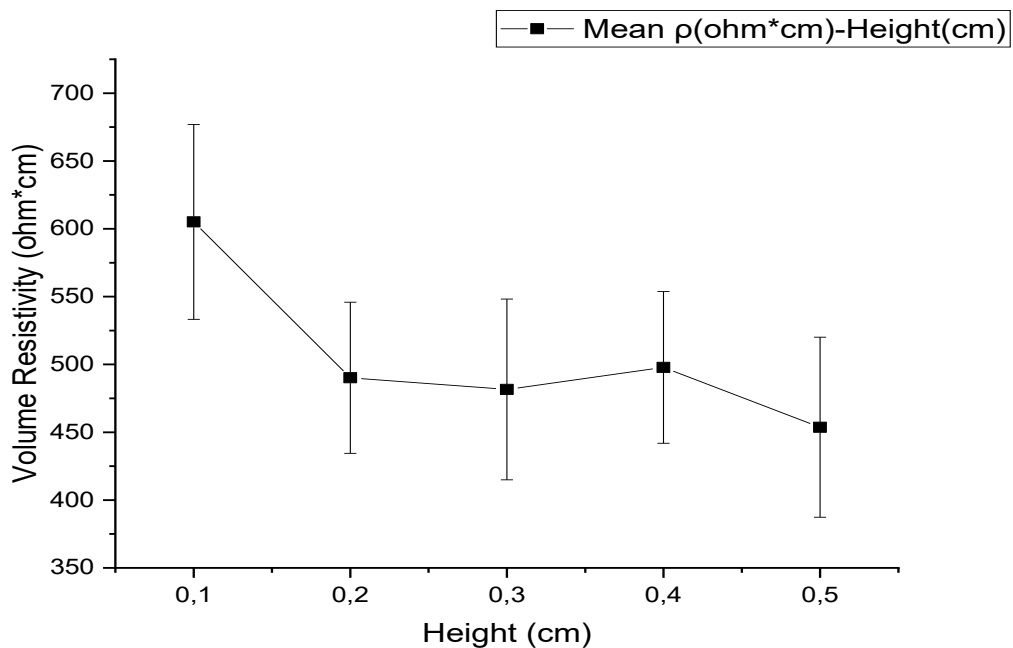
Μελετώντας την αντίσταση του Palmiga-Pi-etru και με βάση τον τύπο  $\rho = R \cdot A/l$  έχουμε την ειδική αντίσταση  $\rho$  για ύψος, πλάτος και μήκος ξεχωριστά.

#### C.3.4. Ειδική αντίσταση- Ύψος

Πίνακας 21: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού  $P_i$  για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Ύψος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S.D
	1cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	2cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	3cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	4cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	5cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	
0.1	512,25	415,71	478,92	423,91	339,12	71,83
0.2	668,57	444,88	375,59	467,44	480,42	55,68
0.3	559,10	526,48	530,71	526,61	490,92	66,61
0.4	603,56	534,11	545,44	570,63	502,50	55,95
0.5	681,73	529,66	477,20	500,43	455,52	66,35
Μέσο $\rho$	605,04	490,17	481,57	497,80	453,70	

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



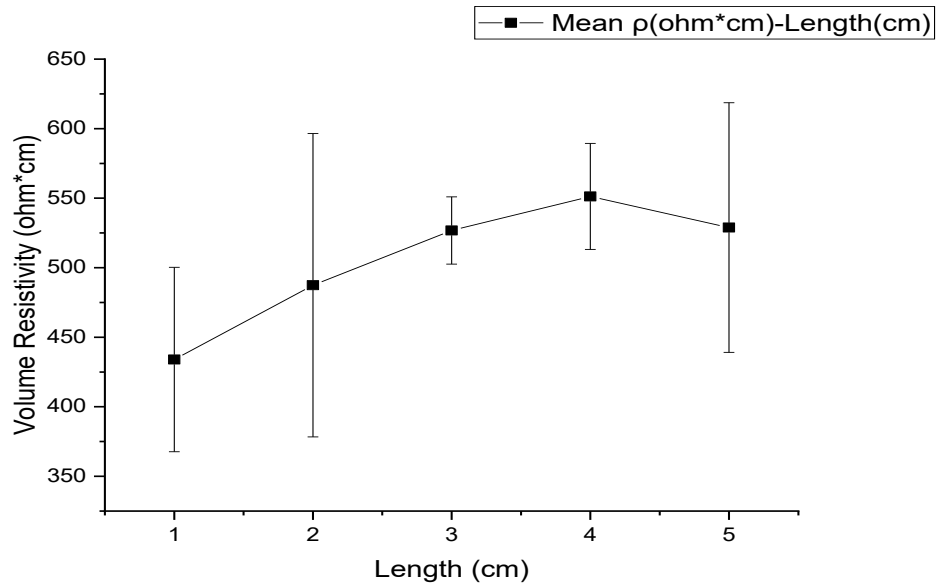
Γράφημα 20

### C.3.5. Ειδική αντίσταση- Μήκος

Πίνακας 22: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού  $\rho_i$  για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Μήκος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S. D
	1mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	2mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	3mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	4mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	5mm, 3mm (ύψος,πλάτος)	
1	512,25	668,57	559,10	603,56	681,73	66,29
2	415,71	444,88	526,48	534,11	529,66	109,06
3	478,92	375,59	530,71	545,44	477,20	24,21
4	423,91	467,44	526,61	570,63	500,43	38,12
5	339,12	480,42	490,92	502,50	455,52	89,75
Μέσο $\rho$	433,98	487,38	526,76	551,25	528,91	

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



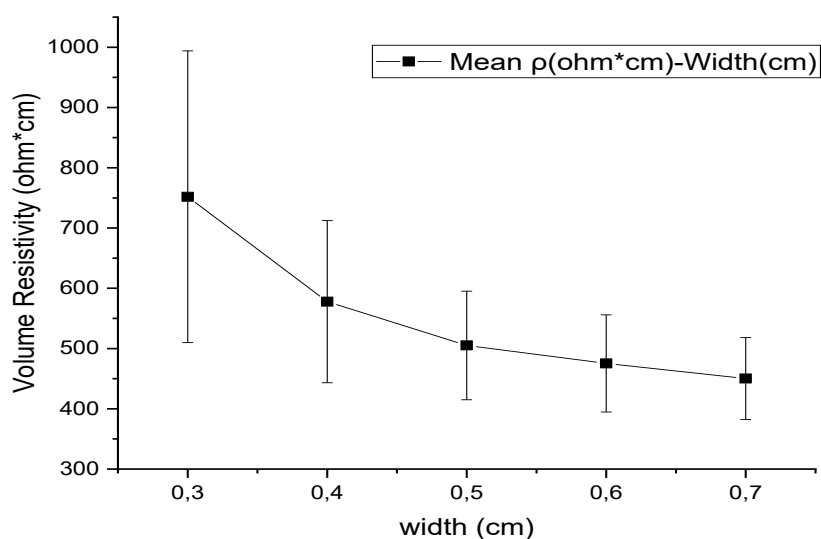
Γράφημα 21

C.3.6. Ειδική αντίσταση- Πλάτος

Πίνακας 23:

Πλάτος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S. D
	1cm, 3mm (μήκος, ύψος)	2cm, 3mm (μήκος, ύψος)	3cm, 3mm (μήκος, ύψος)	4cm, 3mm (μήκος, ύψος)	5cm, 3mm (μήκος, ύψος)	
0.3	601,69	413,82	385,72	371,58	374,77	242,02
0.4	665,15	522,60	459,64	439,70	477,95	134,59
0.5	652,81	603,43	496,08	479,00	496,86	90,13
0.6	689,88	667,54	527,72	499,95	513,32	80,58
0.7	658,59	566,79	570,60	494,53	415,42	68,16
Μέσο $\rho$	751,84	577,75	505,16	475,32	450,31	

Οι παρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 22

#### C.4. Conductive TPU filaflex

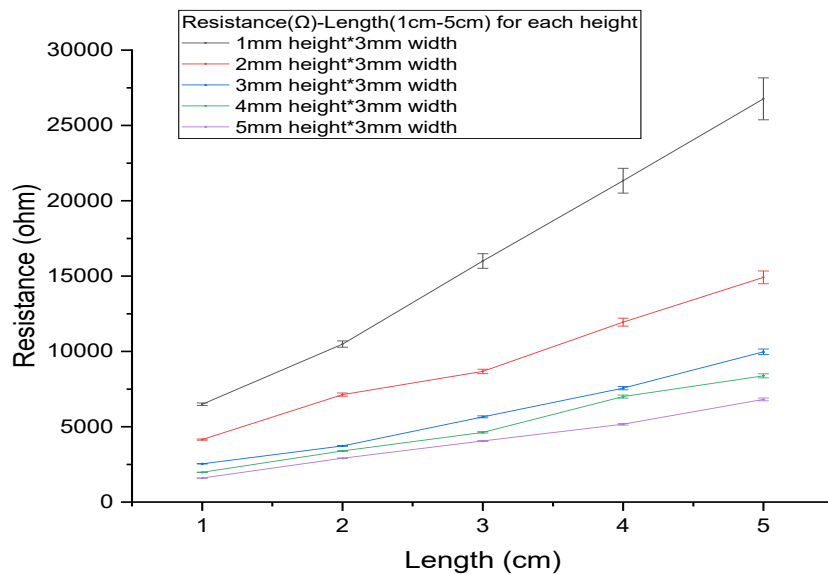
##### C.4.1. Αντίσταση VS Μήκος

Κρατώντας σταθερό το πλάτος στα 3mm και μεταβάλλοντας το μήκος από 1cm μέχρι 5cm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε ύψος ξεχωριστά από 1mm-5mm.

Πίνακας 24: Τιμές της αντίστασης του υλικού Conductive TPU για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Μήκος (cm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	2mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	3mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	4mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	5mm, 3mm (ύψος, πλάτος)
1	6497,33±82,16	4147,13±35,18	2540,49±11,78	1975,86 ±7,59	1593,33 ±4,43
2	10487,24±208,19	7133,71±103,97	3723,19±26,01	3393,04 ±23,44	2912,99 ±17,81
3	15998,30±484,08	8671,72±144,81	5654,30 ±63,31	4630,60 ±43,32	4061,26 ±34,56
4	21331,66±824,54	11947,77±262,75	7567,37 ±110,04	7001,82 ±99,87	5167,09 ±52,88
5	26766,68±1394,15	14917,26±425,44	9974,83 ±183,44	8378,57 ±133,36	6819,66 ±94,55

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 23

#### C.4.2. Αντίσταση VS Ύψος

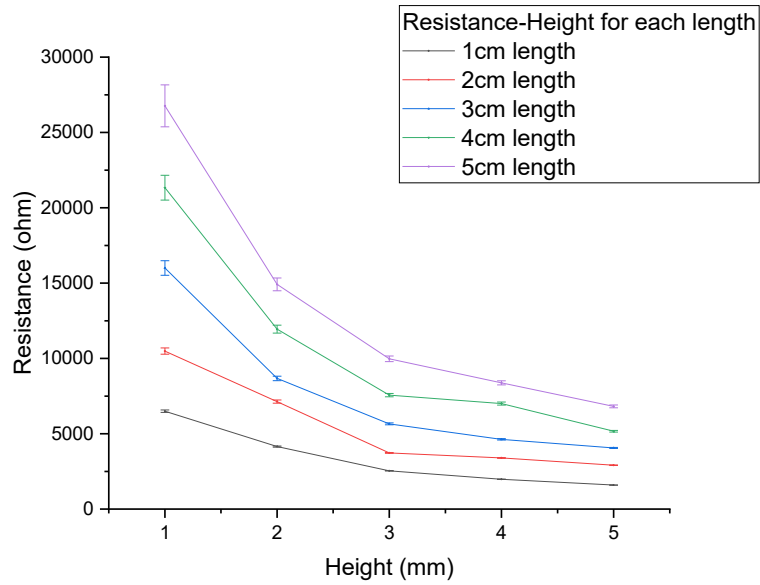
Κρατώντας σταθερό το πλάτος στα 3mm και μεταβάλλοντας το ύψος από 1mm μέχρι 5mm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε μήκος ξεχωριστά από 1cm μέχρι 5cm.

Πίνακας 25: Τιμές της αντίστασης του υλικού Conductive TPU για μεταβαλλόμενο ύψος , από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Ύψος (mm)	Αντίσταση (Ω)				
	1cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	2cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	3cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	4cm, 3mm (μήκος,πλάτος)	5cm, 3mm (μήκος,πλάτος)
1	6497,33±82,16	10487,24±208,1	15998,30±484,08	21331,66±824,54	26766,68±1394,15
2	4147,13±35,18	7133,71±103,97	8671,72±44,81	11947,77±262,7	14917,26±425,44
3	2540,49±11,78	3723,19±26,01	5654,30±63,31	7567,37±10,04	9974,83±183,44
4	1975,86±7,59	3393,04±23,44	4630,60±43,32	7001,82±99,87	8378,57±133,36
5	1593,33±4,43	2912,99±17,81	4061,26±34,56	5167,09±52,88	6819,66±94,55

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική





Γράφημα 24

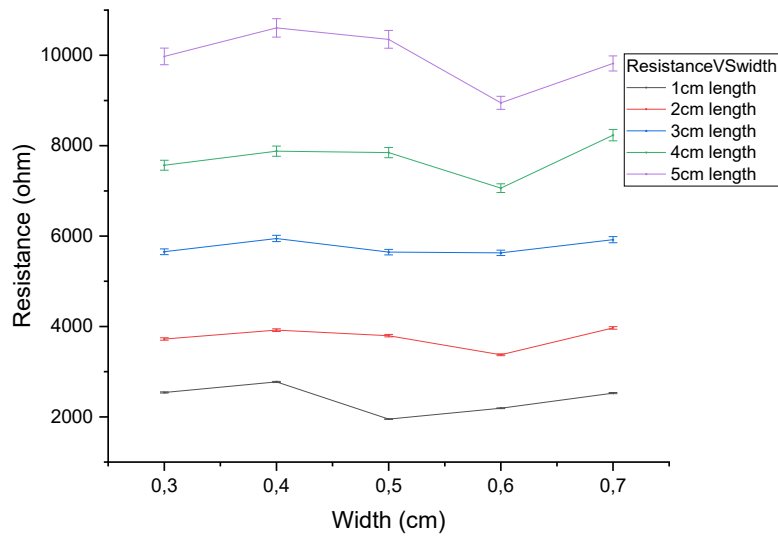
### C.4.3. Αντίσταση VS Πλάτος

Κρατώντας σταθερό το ύψος στα 3mm και μεταβάλλοντας το πλάτος από 3mm μέχρι 7mm πήραμε τις πιο κάτω μετρήσεις για κάθε μήκος ξεχωριστά από 1cm μέχρι 5cm

Πίνακας 26: Τιμές της αντίστασης του υλικού Conductive TPU για μεταβαλλόμενο πλάτος, από 3 mm μέχρι 7mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό ύψος στα 3mm.

Πλάτος (mm)	Αντίσταση ( $\Omega$ )				
	1cm, 3mm (μήκος, ύψος)	2cm, 3mm (μήκος, ύψος)	3cm, 3mm (μήκος, ύψος)	4cm, 3mm (μήκος, ύψος)	5cm, 3mm (μήκος, ύψος)
3	2540,49±11,78	3723,19±26,01	5654,30±63,31	7567,37±110,04	9974,83±183,44
4	2772,93±13,62	3919,02±28,95	5947,15±70,00	7878,84±114,46	10606,67±203,87
5	1950,24±6,44	3796,67±26,51	5645,34±59,96	7848,24±114,04	10352,77±197,09
6	2190,74±8,20	3373,89±20,98	5628,58±59,86	7060,01±96,06	8948,09±143,98
7	2526,312±13,58	3968,32±28,41	5920,70±68,15	8233,51±126,79	9818,92±167,15

Οι πάρα πάνω μετρήσεις μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 25

### Ειδική αντίσταση $\rho$

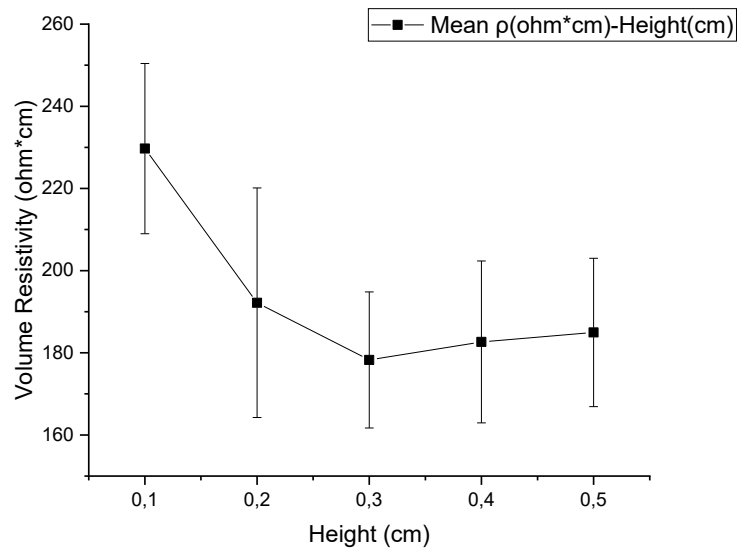
Μελετώντας την αντίσταση του Conductive TPU filaflex και με βάση τον τύπο  $\rho = R \cdot A/l$  έχουμε την ειδική αντίσταση  $\rho$  για ύψος, πλάτος και μήκος ξεχωριστά.

#### C.4.4. Ειδική αντίσταση- Ύψος

Πίνακας 27: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού Conductive TPU για μεταβαλλόμενο ύψος, από 1 mm μέχρι 5mm για κάθε μήκος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Ύψος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S. D
	1cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	2cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	3cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	4cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	5cm, 3mm (μήκος, πλάτος)	
0.1	194,92	157,30	159,98	159,98	160,60	20,72
0.2	248,82	214,01	173,43	179,21	179,00	27,91
0.3	228,64	167,54	169,62	170,26	179,54	16,54
0.4	237,10	203,58	185,22	210,05	201,08	19,70
0.5	239,00	218,47	203,06	193,76	204,58	18,05
Μέσο $\rho$	229,69	192,18	178,26	182,65	184,96	

Οι παραπάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



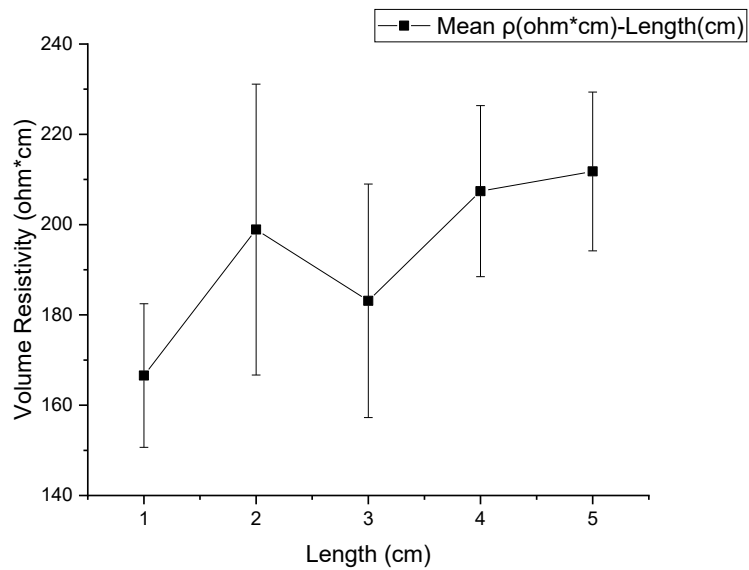
Γράφημα 26

#### C.4.5. Ειδική αντίσταση- Μήκος

Πίνακας 28: Τιμές της ειδικής αντίστασης του υλικού Conductive TPU για μεταβαλλόμενο μήκος , από 1 cm μέχρι 5cm για κάθε ύψος ξεχωριστά. Σταθερό πλάτος στα 3mm.

Μήκος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S. D
	1mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	2mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	3mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	4mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	5mm, 3mm (ύψος, πλάτος)	
1	194,92	248,82	228,64	237,10	239,00	15,90
2	157,30	214,01	167,54	203,58	218,47	32,22
3	159,98	173,43	169,62	185,22	203,06	25,86
4	159,98	179,21	170,26	210,05	193,76	18,94
5	160,60	179,00	179,54	201,08	204,58	17,59
Μέσο $\rho$	166,55	198,89	183,12	207,41	211,77	

Οι παρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



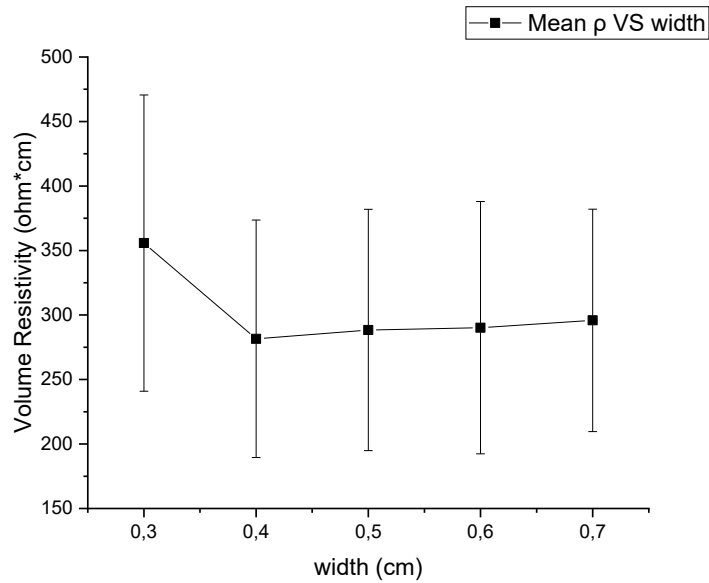
Γράφημα 27

C.4.6. Ειδική αντίσταση- Πλάτος

Πίνακας 29:

Πλάτος (cm)	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot cm$ )					S. D
	1cm, 3mm (μήκος, ύψος)	2cm, 3mm (μήκος, ύψος)	3cm, 3mm (μήκος, ύψος)	4cm, 3mm (μήκος, ύψος)	5cm, 3mm (μήκος, ύψος)	
0.3	228,64	167,54	169,62	170,26	179,54	114,79
0.4	332,75	235,14	237,88	236,36	254,56	92,07
0.5	292,53	284,75	282,26	294,30	310,58	93,56
0.6	394,33	303,65	337,71	317,70	322,13	97,77
0.7	530,52	416,67	414,44	432,25	412,39	86,19
Μέσο $\rho$	355,75	281,55	288,38	290,18	295,84	

Οι πάρα πάνω υπολογισμοί μας δίνουν την παρακάτω γραφική



Γράφημα 28

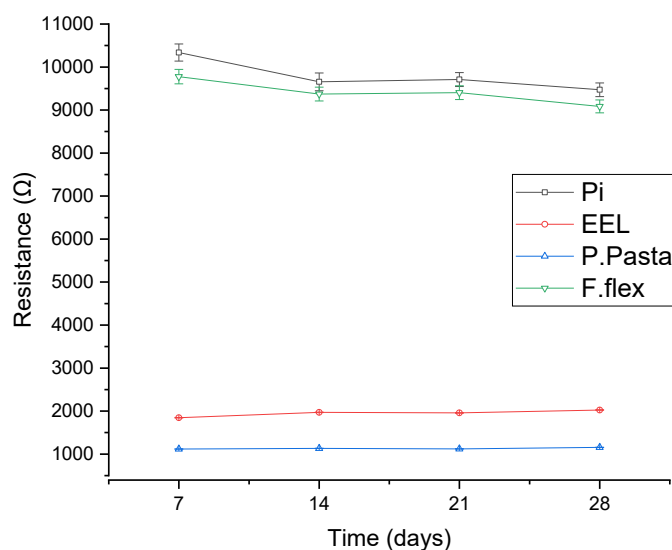
### C.5. Γήρανση

Ένα πολύ σημαντικός παράγοντας που μελετήθηκε ήταν αυτος της γήρανσης. Σε ένα κύκλο 28 ημερών υπολογίζαμε, με βάση την παράγραφο D.1, κάθε 7 μέρες την αντίσταση κάθε υλικού. Η γεωμετρία του αγωγού ήταν 7mm πλάτος 5cm μήκος και 3mm ύψος.

Πίνακας 30

Χρόνος (μέρες)	Αντίσταση (Ω) Pi	Αντίσταση (Ω) EEL	Αντίσταση (Ω) P.Pasta	Αντίσταση (Ω) F.Flex
7	10336,74±199,58	1845,18±6,07	1117,58±2,10	9776,55±167,83
14	9656,34±206,46	1971,03±6,79	1132,79±3,38	9371,82±160,54
21	9709,93±162,45	1958,26±7,05	1121,65±2,17	9405,54±160,26
28	9471,94±159,17	2025,45±6,97	1156,61±2,38	9084,99±149,94

Με βάση της πιο πάνω μετρήσεις έχουμε:



Γράφημα 29

## D. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### D.1. Υπολογισμός αντίστασης αγωγών

Με βάση το κύκλωμα της εικόνας 6. Καταγράψαμε δυο τιμές της τάσης, η πρώτη τιμή ήταν η τάση της πηγής  $V_{source}$  και η δεύτερη ήταν η τάση του LED  $V_{led}$ . Θέλοντας να υπολογίσουμε την αντίσταση των αγωγών παίρναμε την διαφορά των δύο τάσεων και από την γραφική  $V_{source} - V_{led}$  σε συνάρτηση του ρεύματος του κυκλώματος περνάμε την κλίση για να βρούμε την αντίσταση σε κάθε γεωμετρία του αγωγού.

### D.2. Σύγκριση τιμών με αυτές των κατασκευαστών

Αφού υπολογίσαμε την αντίσταση και ειδική αντίσταση των τεσσάρων υλικών θα κάνουμε την σύγκριση με τις τιμές των κατασκευαστών. Υπενθυμίζουμε ότι οι τιμές των κατασκευαστών μεταβάλλονται μετά την εκτύπωση.

#### D.2.1. Proto-Pasta

##### D.2.1.1. Αντίσταση

Ήταν αναμενόμενο να παρατηρηθεί μεταβολή στην αντίσταση καθώς αλλάζει η γεωμετρία των αγωγών. Γνωρίζουμε ότι αντίστασης ενός αγωγού είναι ανάλογο του μήκους και αντιστρόφως ανάλογο της ενεργός διατομής του αγωγού. Άρα όσο αυξάνουμε το μήκος η αντίσταση αυξάνετε, γράφημα 1 και όσο αυξάνουμε το ύψος ή το πλάτος παρατηρούμε ότι η αντίσταση μειώνετε γράφημα 2 και 3 αντίστοιχα.

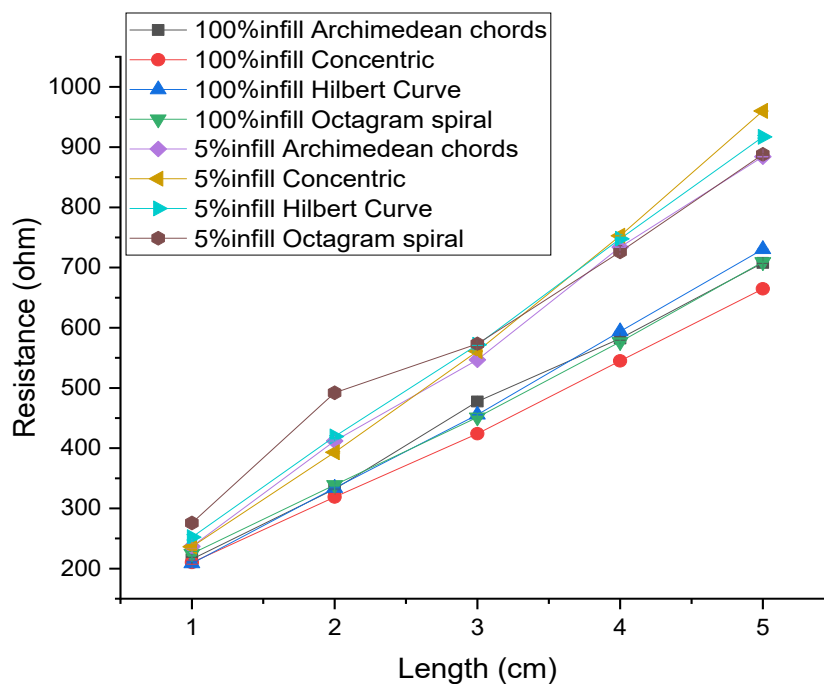
Η Αντίσταση  $R$  του υλικού πριν την εκτύπωση σε νήμα  $10\text{cm}$  και διατομή  $1,75\text{mm}$  είναι  $2 - 3\text{ k}\Omega$ . Μετά την εκτύπωση σε υλικό με διατομή  $1,8\text{mm}$  και  $5\text{cm}$  μήκος έχει αντίσταση  $728,3\ \Omega$

### D.2.1.2. Ειδική Αντίσταση

Παρατηρούμε ότι η ειδική αντίσταση του υλικού δεν μένει σταθερή καθώς μεταβάλλουμε την γεωμετρία του αγωγού (γραφήματα 8,9 και 10). Αυτό οφείλετε κυρίως στο γεγονός ότι κατά την εκτύπωση η εξώθηση του υλικού από τον εξωθητήρα δεν είναι ομοιογενής. Κατά τον κατασκευαστή η ειδική αντίσταση του Proto-Pasta είναι στα  $30\ \Omega \cdot \text{cm}$  μετά την εκτύπωση. Πριν την εκτύπωση ήταν  $52,3\ \Omega \cdot \text{cm}$ . Σύμφωνα με τα δικά μας αποτελέσματα βρήκαμε ότι η τιμή της ειδικής αντίστασης να είναι  $\rho = 30,85 \pm 3,38\ \Omega \cdot \text{cm}$  με ποσοστιαίο σφάλμα  $0,3\%$ . Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι εκτυπώσεις μας είχαν τις κατάλληλες ρυθμίσεις.

### D.2.1.3. Infill

Το αξιοσημείωτο με το γέμισμα είναι ότι ενώ περιμέναμε σταθερή αντίσταση ανεξάρτητα του ποσοστού γεμίματος παρατηρήθηκε μείωση της αντίστασης όσο αυξανόταν το ποσοστό του infill. Στην πιο κάτω γραφική παράσταση μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε την διάφορα στην αντίσταση σε σχέση με το infill στα  $5\%$  και  $100\%$  σε συνάρτηση τις απόστασης. Το υλικό με το οποίο έγινε ο έλεγχος ήταν το Proto-Pasta.



Γράφημα 30

## D.2.2. NinjaTek EEL 3D Printing filament

### D.2.2.1. Αντίσταση

Η αντίσταση  $R$  του υλικού δεν δίνεται από τον κατασκευαστή, όμως η αντίσταση που βρίσκουμε είναι μεγαλύτερη από το P.Pasta, μικρότερη του  $Pi$  και αρκετά κοντά με αυτή του filaflex. Βλέπουμε από τα γραφήματα 11, 12 και 13 ότι η αντίσταση υπακούει στη θεωρία. Επιπρόσθετα στο γράφημα 13 παρατηρούμε μια μεταβολή στα 5mm πλάτος, αυτό οφείλετε στο μοτίβο εκτύπωσης, το βλέπουμε να επαναλαμβάνετε για όλα τα μήκη. Το γεγονός αυτό μπορεί επίσης να οφείλετε και στην μαζική εκτύπωση των αγωγών, αφού όταν έγινε η εκτύπωση των αγωγών σαν μονάδα δεν το βλέπουμε επαναλαμβάνετε στα επόμενα υλικά.

### D.2.2.2. Ειδική αντίσταση

Και σε αυτό το υλικό παρατηρούμε να μην υπάρχει σταθερή ειδική αντίσταση, όπως αναφέραμε στην παράγραφο D.1.1.2 οφείλετε στην κακή ομοιογένεια της εκτύπωση. Στα  $1.5 * 10^3 \Omega \cdot cm$  δίνετε να είναι η ειδική αντίσταση του  $EEL$  πριν την εκτύπωση. Η τιμή μετά την εκτύπωση δεν δίνετε. Με βάση των τιμών των πινάκων 15,16 και 17 η ειδική αντίσταση του υλικού είναι  $\rho = 111,21 \pm 29,93 \Omega \cdot cm$ . Το αποτέλεσμα μας επιβεβαιώνει την μεταβολή της ειδικής αντίστασης μετά την εκτύπωση.

## D.2.3. Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black

### D.2.3.1. Αντίσταση

Το  $Pi$  παρουσιάζει την μεγαλύτερη αντίσταση από τα 4 υλικά και ακολουθεί την θεωρία για την μεταβολή της γεωμετρίας. Σε 10cm νήματος και 1,75mm διατομή η αντίσταση του υλικού πριν την εκτύπωση κυμαίνεται από 2 k $\Omega$  μέχρι 43 k $\Omega$ , θεωρητική τιμή. Η αντίσταση δεν ξεπερνάει τα 46 k $\Omega$ . Μετά την εκτύπωση σε υλικό με διατομή 1,8mm και 5cm μήκος έχει αντίσταση 11 k $\Omega$ .

### D.2.3.2. Ειδική αντίσταση

Η ειδική αντίσταση είναι μικρότερη από 800  $\Omega \cdot cm$ , σε συγκριση με την δική μας τιμή που είναι 521,13  $\Omega \cdot cm$ . Δεν θα μπορούσαμε να πούμε με βεβαιότητα ότι η τιμή που βρίσκουμε είναι η τιμή του υλικού μετά την εκτύπωση αφού ο ίδιος ο κατασκευαστής το δεν αναφέρετε συγκεκριμένα. Για ακόμα μια φορά παρατηρούμε ότι η ειδική αντίσταση δεν παραμένει σταθερή.

## D.2.4. Conductive TPU filaflex

### D.2.4.1. Αντίσταση

Η αντίσταση που δίνετε είναι μικρότερη του 10  $\Omega$  χωρίς να προσδιορίζετε το μήκος του υλικού και η διάμετρος που έγινε η μέτρηση, πριν την εκτύπωση. Με δεδομένη την ειδική αντίσταση 3.9  $\Omega \cdot cm$  και την



διατομή του νήματος 1,75mm βρίσκουμε ότι η μέτρηση ίσως να έγινε σε νήμα μήκους 0,6 cm. Η αντίσταση που βρίσκουμε μετά την εκτύπωση σε υλικό με διατομή 1,8mm και 5cm μήκος έχει αντίσταση 2,1 kΩ.

#### D.2.4.2. Ειδική αντίσταση

Κατά προσέγγιση η ειδική αντίσταση του υλικού είναι 3.9 Ω · cm. Μετά την εκτύπωση η τιμή που βρίσκουμε είναι 229,81 Ω · cm. Υπάρχει μεγάλη διαφορά από την θεωρητική τιμή αφού όπως είπαμε η ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού αλλάζουν μετά την εκτύπωση.

Πίνακας 31:Τιμές των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με αυτές των κατασκευαστών.

Εμπορική επωνυμία	Ειδική αντίσταση κατασκευαστή πριν την εκτύπωση Ω · cm	Ειδική αντίσταση μετά Ω · cm	Αντίσταση κατασκευαστή kΩ	Αντίσταση	SD ρ %	SD R %
Proto Pasta	52,3	Κατασκευαστή: 30 Πειραματική:30,85	2 – 3	728,3 Ω	0,3%	70%
Palmiga-Pi-etpu 95-250 Carbon black	< 800	521,13	< 46	11 kΩ	34%	76%
NijaTek EEL 3D Printing filament	1.5 * 10 <sup>3</sup>	111,21	--	1,8 kΩ		
Conductive TPU filaflex	Κατά προσέγγιση 3.9 σε 0,6cm μήκος	229,81	< 10Ω σε 0,6cm μήκος	2,1 kΩ		

## E. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### E.1. Αισθητήρας πιεζοαντίστασης

Εξαιτίας της ελαστικότητας που έχουν τα υλικά με δομή που βασίζεται στο υλικό carbon black, παρουσιάζουν την ιδιότητα της πιεζοαντίστασης. Συγκεκριμένα όταν δέχονται κάποια εξωτερική πίεση αυτά μεταβάλλεται η αντίστασή τους. Όσον αφορά την ανίχνευση της πιεζοαντίστασης ενός υλικού, ένα στρώμα κατασκευασμένο από υλικά πιεζοαντίστασης μετατρέπει τα δυναμικά σήματα σε αλλαγή αντίστασης/αγωγιμότητας και μετράτε από ένα εξωτερικό κύκλωμα [12]. Συμβατικά, σχέδια για υλικά πιεζοαντίστασης από μέταλλο χρησιμοποιούνται ως στοιχείο ανίχνευσης για εμπορικούς μετρητές καταπόνησης. Παρά την υψηλή ευαισθησία και το χαμηλό κόστος, αυτοί οι εμπορικοί μετρητές παραμόρφωσης είναι σταθεροί αισθητήρες κατεύθυνσης και μπορούν να μετρήσουν μόνο πολύ μικρά

στελέχη (συνήθως λιγότερο από 5%) [13]. Έτσι, δεν είναι κατάλληλα για φορητούς αισθητήρες αφής που είναι πολυλειτουργικοί, πολυκατευθυντικοί και απαιτούν υψηλή ευαισθησία σε ένα ευρύ φάσμα πίεσης. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των ευέλικτων αισθητήρων αφής για φορητά ηλεκτρονικά, απαιτούνται νέα υλικά βασισμένα σε νέα στοιχεία ανίχνευσης.

Άρα μια εφαρμογή που θα ήταν προφανής κανείς να δει είναι αυτή του αισθητήρα. Με την χρήση της πειραματικής διάταξης και της μεθόδου που παρουσιάστηκε στην παράγραφο Β.2.2 δοκιμάσαμε τρεις διαφορετικούς αισθητήρες, α) P.Pasta-EEL-P.Pasta, β) P.Pasta-Pi-P.Pasta, γ) EEL-EEL-EEL.

Η βασική γεωμετρία που μελετήθηκε είναι αυτή του κυλίνδρου με ύψος 3mm και ακτίνα 14.5mm, με τα τρία πρώτα επίπεδα εκτύπωσης και τα 3 τελευταία να είναι διαφορετικό υλικό εκτός από τον EEL-EEL-EEL αισθητήρα. Ο χρόνος μέτρησης ήταν 1 λεπτό. Ξεκινώντας από μηδέν κιλά μέχρι δεκατέσσερα στην διάταξη Β.2.2 με βήμα δύο κιλά ανά μέτρηση είχαμε την πιο κάτω ανταπόκριση.

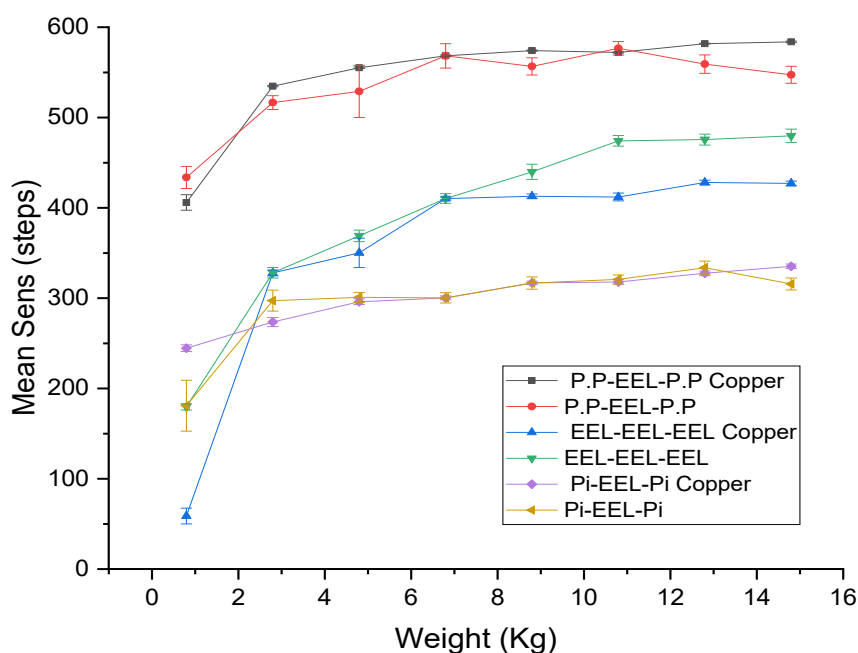
Οι αισθητήρες δοκιμάστηκαν με 2 μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος το κύκλωμα άνοιγε μόλις έχανε επαφή ο αισθητήρα με το έμβολο (εικόνα 12), προσθέτοντας μια ταινία χαλκού πάνω στο έμβολο, και η δεύτερη μέθοδος το κύκλωμα ήταν κλειστό καθ'όλη την διάρκεια της κίνησης του εμβόλου, προσαρμόζοντας τον αισθητήρα στο κύκλωμα(εικόνα 13).



Εικόνα 12: Το κύκλωμα ανοίγει όταν ανασηκώνεται το έμβολο.



Εικόνα 13: Το κύκλωμα είναι συνέχεια κλειστό.

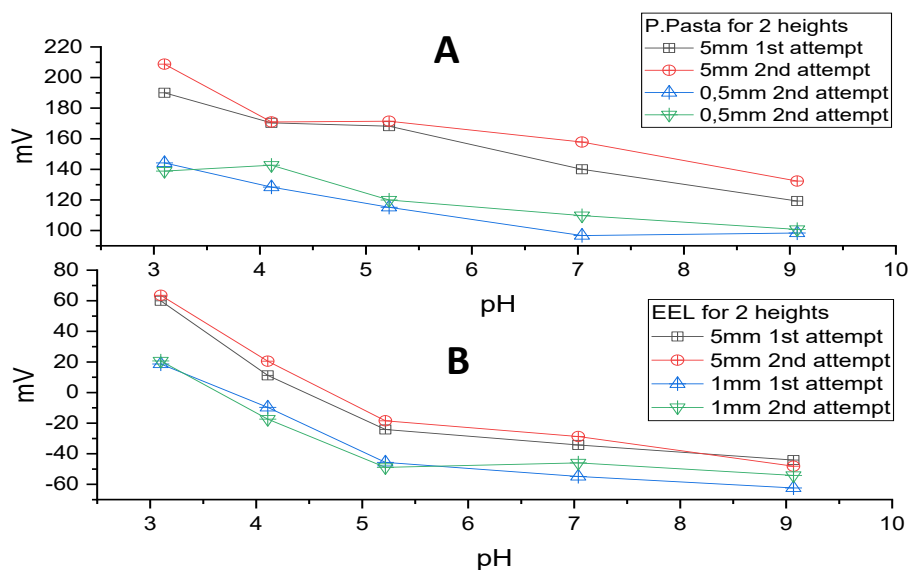


Γράφημα 31

## E.2. Ηλεκτρόδιο

Σε αυτή την εφαρμογή χρησιμοποιήσαμε 2 από τα αγώγιμα υλικά, Proto-Pasta και *EEL* με σκοπό την εφαρμογή τους σαν ηλεκτρόδιο στην θέση του BNC καλωδίου, σε μέτρηση της οξύτητας 5 διαλυμάτων με  $pH$  3.10, 4.11, 5.22, 7.04 και 9.07 αντίστοιχα. Στόχος ήταν για να δούμε την ευαισθησία των υλικών στα διάφορα  $pH$  αλλά και την απόκριση τους σε υδατινό περιβάλλον. Η γεωμετρία είναι αυτή της εικόνας 15. Δοκιμάστηκαν 4 ηλεκτρόδια, 2 P.Pasta με 0,5mm και 5mm ύψος και 2 *EEL* με 1mm και 5mm ύψος.

Έγιναν τρεις προσπάθειες μέτρησης με την τρίτη προσπάθεια να οδηγήσει σε αποτυχία καθώς τα διαλύματα ανακατευτήκαν μεταξύ τους όταν αλλάζαμε το ηλεκτρόδιο από δοχείο σε δοχείο.



Γράφημα 32

Βλέποντας τα γραφήματα **A** και **B** στο γράφημα 32 μπορούμε να καταλάβουμε ότι δεν υπάρχει η ευαισθησία και η απόκριση που περιμέναμε να δούμε, καθώς και στα δύο υλικά το εύρος των τιμών μας είναι αρκετά μικρό. Επιπρόσθετα, γνωρίζουμε ότι ένα ουδέτερο διάλυμα 7 pH θα έπρεπε να έχει 0mV τιμή. Μια τελευταία και σημαντική παρατήρηση που θα μπορούσαμε να κάνουμε είναι ότι για  $pH > 7$  οι τιμές της τάσης που θα έπρεπε να παίρνουμε είναι θετικές σε αντίθεση με τις δικές μας όπου είναι αρνητικές. Ίσως με μια πιο λεπτομερή μελέτη και με διαφορετικά ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά, κάποιος να καταφέρει να φτιάξει ηλεκτρόδιο BNC με ZDP, για μετρήσεις οξύτητας, αφού βλέπουμε ότι υπάρχει μια καλή απόκριση. Στα 4 πιο πάνω ηλεκτρόδια δεν τοποθετήθηκε electric paint.



Εικόνα 14: Πειραματική διάταξη για την εφαρμογή ηλεκτροδίου στην θέση το BNC καλωδίου.



Εικόνα 15: Εκτυπώσεις ηλεκτροδίων από 0,5mm μέχρι 5mm ύψος

## Φ. Συμπεράσματα- Επόμενα βήματα

Καταλήγοντας μπορεί κανείς να συμπεράνει τις ογκώδεις εφαρμογές που έχουν τα αγωγιμα υλικά στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Δεν θα μπορούσε να διαφωνήσει κανείς ότι είναι μια μη κοστοβόρα διαδικασία και συσχετίζοντας τα με τους σχετικά καινούργιου τομής της τεχνολογίας που ξεδιπλώνονται, όπως η εξατομικευμένη ιατρική αλλά και η βιοϊατρική μηχανική, τα αγωγιμα υλικά πρόκειται να δώσουν την λύση σε δαπανηρές θεραπείες αποκατάστασης αλλά και διάγνωσης.

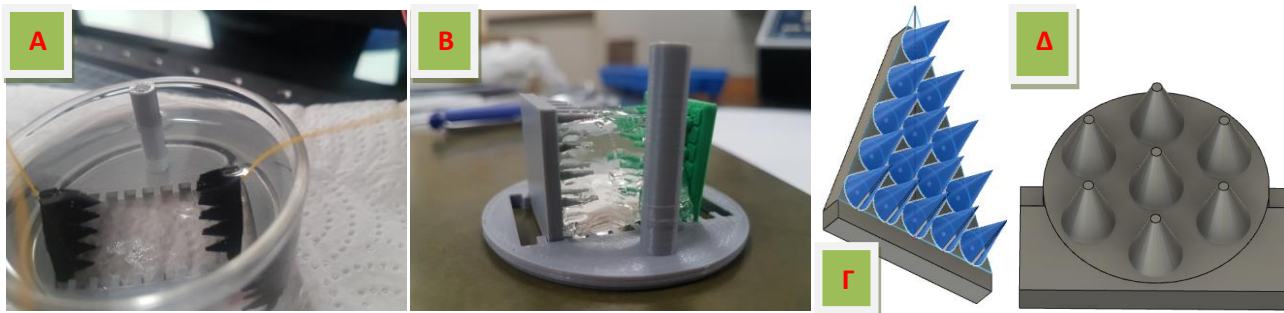
Στη παρούσα πτυχιακή παρουσιάστηκε η μελέτη αλλά και μερικές από τις πιο απλές εφαρμογές σαν βάση που θα μπορούσαν να έχουν εφαρμογή σε πιο πολύπλοκα και πολύπλευρα θέματα, τα ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά.

Επόμενα βήματα είναι αυτή των spikes με δύο εφαρμογές. Η μια εφαρμογή που είδαμε, αλλά δεν έγιναν μετρήσεις εξαιτίας του τύπου εκτυπωτή, δεν ήταν εφικτή λεπτομερή και ακριβής εκτύπωση αλλά και στην αποτυχία παρασκευής της ζελατίνης, ήταν αυτή των Spikes. Έγινε προσπάθεια διάκρισης περιεκτικότητας υγρών διαλυμάτων και ρευστών (ζελέ) με μέτρηση της αντίστασης, με την χρήση των αγωγιμων υλικών για εκτύπωση που αναφέρθηκαν στη παρούσα πτυχιακή. Στόχος ήταν η διάφορες

γεωμετρίας των spikes. Θα μπορούσε να υπάρξει μεγάλη καινοτομία αλλά και εφαρμογή στο κομμάτι αυτό. Για παράδειγμα μέτρηση τανινών σε ένα σταφύλι, σαν δείκτης ωριμότητας.

Επίσης η δεύτερη εφαρμογή που θα μπορούσε να γίνει είναι αυτή του εμβολιασμού, η ουσία να είναι αποθηκευμένη μέσα στα spikes και να γίνεται έκχυση κατά την διείσδυση [14].

Τέλος χρησιμοποιώντας κατάλληλα τα διάφορα υλικά για την 3D εκτύπωση και τον κατάλληλο εξοπλισμό η τρισδιάστατη εκτύπωση τοποθετείτε στο βάθρο με τις πιο πρωτοπόρες και επαναστατικές μεθόδους.



Εικόνα 16: Α) Πειραματική διάταξη για μέτρηση αντίστασης διαλύματος, Β) Μοντέλο μέτρησης με microspikes την αντίσταση ζελέ, Γ,Δ) Μοντέλα microspikes για εφαρμογή.

## Bibliography

### [1] Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials.

Jian-Yuan Lee, Jia An, Chee Kai Chua.

Singapore Centre for 3D Printing, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, 50 Nanyang Avenue, Singapore 639798, Singapore.

### [2] 3D printing of ceramics: A review.

Zhangwei Chen, Ziyong Li, Junjie Li, Chengbo Liu, Changshi Lao, Yuelong Fu, Changyong Liu, Yang Li, Pei Wang, Yi He.

Additive Manufacturing Institute, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, 518060, China.

### [3] 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing

Zhong Xun Khoo, Joanne Ee Mei Teoh, Yong Liu, Chee Kai Chua, Shoufeng

Yang, Jia An, Kah Fai Leong & Wai Yee Yeong.

To cite this article: Zhong Xun Khoo, Joanne Ee Mei Teoh, Yong Liu, Chee Kai Chua, Shoufeng Yang, Jia An, Kah Fai Leong & Wai Yee Yeong (2015) 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing, *Virtual and Physical Prototyping*, 10:3, 103-122,

DOI:10.1080/17452759.2015.1097054

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>

### [4] 3D Bioprinting of Tissues and Organs

Article in *Nature Biotechnology* · August 2014

DOI: 10.1038/nbt.2958 · Source: PubMed

### [5] Using a magnetite/thermoplastic composite in 3D printing of direct replacements for commercially available flow sensors.

S J Leigh, C P Pursell, D R Billson and D A Hutchins

School of Engineering, University of Warwick Coventry, CV4 7AL, UK

(<http://iopscience.iop.org/0964-1726/23/9/095039>)

### [6] Instrumented cardiac microphysiological devices via multimaterial three-dimensional printing

Johan U. Lind, Travis A. Busbee, Alexander D. Valentine, Francesco S. Pasqualini, Hongyan Yuan, Moran

Yadid, Sung-Jin Park, Arda Kotikian, Alexander P. Nesmith, Patrick H. Campbell, Joost J. Vlassak, Jennifer A.

Lewis and Kevin K. Parker

### [7] 3D Printed Dry EEG Electrodes

Sammy Krachunov and Alexander J. Casson

School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK;

[sammy.mahdi@student.manchester.ac.uk](mailto:sammy.mahdi@student.manchester.ac.uk) Correspondence: [alex.casson@manchester.ac.uk](mailto:alex.casson@manchester.ac.uk); Tel.: +44(0)-

161-306-4801 Academic Editor: Patricia A. Broderick. Received: 26 July 2016; Accepted: 28 September 2016;

Published: 2 October 2016

### [8] Flexible 3D-Printed EEG Electrodes

Andrei Velcescu, Alexander Lindley, Ciro Cursio, Sammy Krachunov, Christopher Beach ,

Christopher A. Brown, Anthony K. P. Jones and Alexander J. Casson

**[9] Nanoarchitectonics of highly sensitive and with large working range 3D piezoresistive microporous foam based on carbon nanotubes and elastomer**

Antonio Turco, Anna Grazia Monteduro, Francesco Montagna, Elisabetta Primiceri, Mariaenrica Frigione, Giuseppe Maruccio.

**[10] The impact of 3D printing process parameters on the dielectric properties of high permittivity composites.**

Goulas, A., Zhang, S., Cadman, D. A., Järveläinen, J., Mylläri, V., Whittow, W. G., & Engstrøm, D. S. (2019) DOI:10.3390/designs3040050

[11] <https://www.bareconductive.com/collections/electric-paint>

**[12] 3D Printing Technologies for Flexible Tactile Sensors toward Wearable Electronics and Electronic Skin**

Changyong Liu , Ninggui Huang Feng Xu, Junda Tong, Zhangwei Chen, Xuchun Gui, Yuelong Fu and Changshi Lao

**[13] Astretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection.**

Yamada, T.; Hayamizu, Y.; Yamamoto, Y.; Yomogida, Y.; Izadi-Najafabadi, A.; Futaba, D.N.; Hata, K *Nat. Nanotechnol.* **2011**, *6*, 296–301.

[CrossRef] [PubMed]

**[14] Biocompatible 3D Printed Microneedles for Transdermal, Intradermal, and Percutaneous Applications.**

Khalil Moussi, Abdullah Bukhamsin, Tania Hidalgo, and Jurgen Kosel, K. Moussi, A. Bukhamsin, Prof. J. Kosel

**[15] A fully 3D printed electronic skin with bionic high resolution and air permeable porous structure.**

Zhen Pei, Qiang Zhang, Qiang Li, Chao Ji, Yan Liu, Kun Yang, Kai Zhuo, Wendong Zhang, Shengbo Sang

**[16] 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing**

Zhong Xun Khoo, Joanne Ee Mei Teoh, Yong Liu, Chee Kai Chua, Shoufeng, Yang, Jia An, Kah Fai Leong & Wai Yee Yeong

**[17] 3D printing of bone tissue engineering scaffolds**

Chong Wang, Wei Huang, Yu Zhou, Libing He, Zhi He, Ziling Chen, Xiao He, Shuo Tian, Jiaming Liao, Bingheng Lu, Yen Wei, Min Wang

**[18] Measurement of skin-electrode impedance for a 12-lead electrocardiogram**

Zepeda-Carapia, A. Marquez-Espinoza, Carlos Alvarado-Serrano, DOI:[10.1109/ICEEE.2005.1529606](https://doi.org/10.1109/ICEEE.2005.1529606)

**[19] 3D-Printed Graphene/Polylactic Acid Electrodes Promise High Sensitivity in Electroanalysis**

C. Lorena Manzanares Palenzuela, Filip Novotny, Petr Krupicka, Zdenek Sofer and Martin Pumera

**[20] 3D-PRINTED STRETCHABLE STRAIN SENSOR WITH APPLICATION TO WIND SENSING.**

Mohammed Al-Rubaiai, Ryohei Tsuruta, Umesh Gandhi, Chuan Wang, Xiaobo Tan

## Παράρτημα Α:

Το σκίτσο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις προσομοίωσης βηματισμού:

---

```
long timer1 = 0;
long totalTime = 100; //Time in minutes
int theEnd = 0;
const int OUT_PIN = A2;
const int IN_PIN = A0;
const float IN_STRAY_CAP_TO_GND = 24.459;
const float IN_CAP_TO_GND = IN_STRAY_CAP_TO_GND;
const float R_PULLUP = 37.26;
const int MAX_ADC_VALUE = 1023;
int i=0;
float average;
float av[10];
float capacitance;
void setup()
{
  pinMode(OUT_PIN, OUTPUT);
  pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  timer1 = millis();
  totalTime = totalTime * 60000; //Convert minutes to mseconds
}
void loop()
{
  pinMode(IN_PIN, INPUT);
  digitalWrite(OUT_PIN, HIGH);
  int val = analogRead(IN_PIN);
  digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
  long dif = millis() - timer1;
  if (dif <= totalTime)
  {
    if (val < 1000)
    {
      pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
      float capacitance = (float)val * IN_CAP_TO_GND / (float)(MAX_ADC_VALUE - val);
      // Serial.print(dif);
      Serial.print('\t');
```



83

```
Serial.println(capacitance);
}
}
else if (dif > totalTime && theEnd == 0)
{
Serial.println("The End");
digitalWrite(9, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(9, LOW);
delay(100);
digitalWrite(9, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(9, LOW);
delay(100);
digitalWrite(9, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(9, LOW);
theEnd = 1;
}
if (val < 1000)
{
pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
float capacitance = (float)val * IN_CAP_TO_GND / (float)(MAX_ADC_VALUE - val);
Serial.print(val);
// Serial.println(F(" "));
av[i]=capacitance;
}
else
{
pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
delay(1);
pinMode(OUT_PIN, INPUT_PULLUP);
unsigned long u1 = micros();
unsigned long t;
int digVal;
do
{
digVal = digitalRead(OUT_PIN);
unsigned long u2 = micros();
t = u2 > u1 ? u2 - u1 : u1 - u2;
} while ((digVal < 1) && (t < 400000L));
pinMode(OUT_PIN, INPUT);
val = analogRead(OUT_PIN);
digitalWrite(IN_PIN, HIGH);
```

```

int dischargeTime = (int)(t / 1000L) * 5;
delay(dischargeTime);
pinMode(OUT_PIN, OUTPUT);
digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
digitalWrite(IN_PIN, LOW);
float capacitance = -(float)t / R_PULLUP
/ log(1.0 - (float)val / (float)MAX_ADC_VALUE);
av[i]=capacitance;
if (capacitance > 1000.0)
{
Serial.print(capacitance / 1000.0, 2);
av[i]=capacitance / 1000.0;
}
else
{
Serial.print(capacitance, 2);
Serial.print(F(" nF"));
av[i]=capacitance;
}
Serial.print(F(" "));
Serial.print(digVal == 1 ? F("Normal") : F("HighVal"));
Serial.print(t);
Serial.print(val);
// Serial.println(F(""));
}
// Serial.println(av[i]);
//Serial.println(i);
if (i>=9)
{
for (int j=0;j<9;j++)
{
//Serial.println(av[j]);
average=average+av[j];
//Serial.println(average);
}
// Serial.println(average);
average=average/10;
// Serial.println(average);
}
i++;
if(i>9) i=0;
}

```

Το σκίτσο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις έντασης LED :

---

```
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_SI1145.h"
Adafruit_SI1145 uv = Adafruit_SI1145();
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Adafruit SI1145 test");
  if (! uv.begin()) {
    Serial.println("Didn't find Si1145");
    while (1);
  }
  Serial.println("OK!");
}
void loop() {
  Serial.println("=====");
  Serial.print("Vis: "); Serial.println(uv.readVisible());
  Serial.print("IR: "); Serial.println(uv.readIR());
  // Uncomment if you have an IR LED attached to LED pin!
  //Serial.print("Prox: "); Serial.println(uv.readProx());
  float UVindex = uv.readUV();
  // the index is multiplied by 100 so to get the
  // integer index, divide by 100!
  UVindex /= 100.0;
  Serial.print("UV: "); Serial.println(UVindex);
  delay(1000);
}
```