



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙΙ: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**  
**ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**  
**ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**  
**(3D PRINTING)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΣΚΟΥΤΕΡΗ ΝΙΑΡΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**  
**Κ. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

**ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ, 2023**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙΙ: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**  
**ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**  
**ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**  
**(3D PRINTING)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΣΚΟΥΤΕΡΗ ΝΙΑΡΟΥ**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Κ. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Α. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ, 2023**

## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο R-Nano Lab της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κύριο Κωνσταντίνο Χαριτίδη, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική.

Η παρούσα Διπλωματική δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την αμέριστη βοήθεια και στήριξη του υποψήφιου διδάκτορα Κωνσταντίνου Ζαφείρη τον οποίο και αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα. Η υπομονή του κατά τη διάρκεια της εξοικείωσής μου με τις πειραματικές τεχνικές, το σύνολο των γνώσεων που μου μετέδωσε και το ειλικρινές ενδιαφέρον του για την πρόοδό μου συντέλεσαν καταλυτικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστίες οφείλω στους Υποψήφιους Διδάκτορες Διονύσιο Σεμιτέκολο , Ελένη Γκάρτζου , Άρτεμις Κοντιζά και Στεφανία Τέρμινε για τον χρόνο που μου αφιέρωσαν κατά τον χαρακτηρισμό των αισθητήρων παραμόρφωσης.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα του εργαστηρίου. Το κλίμα συνεργασίας που δημιούργησαν τόσο σε φιλικό όσο και σε επιστημονικό επίπεδο συντέλεσε στην ομαλή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη στήριξή τους τόσο κατά την εκπόνηση της εργασίας όσο και στα υπόλοιπα φοιτητικά χρόνια.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ABSTRACT .....	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	9
Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση διατάξεων αισθητήρων σε πλαστικά υποστρώματα και εφαρμογές.....	9
<b>1.1 Εύκαμπτοι αισθητήρες</b> .....	9
<b>1.2 Αισθητήρες παραμόρφωσης</b> .....	9
<b>1.3 Είδη αισθητήρων παραμόρφωσης</b> .....	10
1.3.1. Αισθητήρες αντίστασης (Resistive sensors).....	10
1.3.2. Αισθητήρες χωρητικότητας (Capacitive sensors) .....	10
<b>1.4 Εφαρμογές</b> .....	11
Κεφάλαιο 2. Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων παραμόρφωσης .....	12
<b>2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας</b> .....	12
Κεφάλαιο 3: Υλικά κατασκευής .....	14
<b>3.1. Ελαστομερές υπόστρωμα</b> .....	14
3.1.1. Υλικά με βάση τη θερμοπλαστική πολυουρεθάνη.....	16
<b>3.2. Αγωγίμο Στρώμα</b> .....	17
3.2.1. Νανοσύνθετα Υλικά Αυξημένης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας.....	18
3.2.2. Νανοσωλήνες άνθρακα.....	20
3.2.3. Αιθάλη (Carbon Black) .....	21
3.2.4. Νανοδομές γραφενίου.....	22

<b>3.3. Μέθοδοι παραγωγής, χαρακτηρισμού και αξιολόγησης νανοσύνθετων υλικών .....</b>	<b>23</b>
3.3.1 Μέθοδοι χαρακτηρισμού και αξιολόγησης νανοσύνθετων υλικών .....	23
3.3.1.1. Ανάμιξη τήγματος.....	26
3.3.2. Μέθοδοι βελτιστοποίησης διασποράς νανοσωματιδίων .....	27
Κεφάλαιο 4: Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής .....	28
<b>4.1. Αρχή λειτουργίας.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2. Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής .....</b>	<b>28</b>
4.2.1 Στερεολιθογραφία .....	29
4.2.2 Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ .....	29
4.2.3 Κατασκευή με Εναπόθεση Συνδεδετικού Υλικού .....	30
4.2.4 Κατασκευή με Εναπόθεση Τήγματος Υλικού .....	31
<b>4.3. Περιγραφή διαδικασίας 3D εκτύπωσης με την τεχνική FFF .....</b>	<b>31</b>
<b>4.4. Ποιοτικά χαρακτηριστικά υλικών FFF εκτύπωσης .....</b>	<b>34</b>
Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία ανάπτυξης αισθητήρων.....	36
<b>5.1 CAD παραμετρικός σχεδιασμός.....</b>	<b>36</b>
<b>5.2.Ανάπτυξη αγώγιμων διεπαφών και συνδεσμολογίας με σύστημα καταγραφής ηλεκτρικής αντίστασης.....</b>	<b>36</b>
<b>5.3 Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments).....</b>	<b>38</b>
5.3.1 Πλήρης Παραγοντικός Σχεδιασμός.....	38
5.3.2 Κλασματικός Παραγοντικός Σχεδιασμός .....	38
5.3.3 Μέθοδος Taguchi.....	38
5.3.4 Πειραματικός Σχεδιασμός σε εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής .....	42
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	45
Κεφάλαιο 6: Σχεδιασμός Διάταξης Πιεζοαντιστατικού Αισθητήρα.....	45
<b>6.1 Σχεδιασμός πιεζοαντιστατικού (piezoresistive) αισθητήρα.....</b>	<b>45</b>
6.1.1. Σχεδιασμός Εύκαμπτου Υποστρώματος (Substrate) .....	45

6.1.2. Σχεδιασμός Αγώγιμου Δρόμου (Conductive Path).....	51
6.1.3. Τελικός Σχεδιασμός και Παραμετροποίηση 3D εκτύπωσης πιεζοαντιστατικού αισθητήρα.....	64
Κεφάλαιο 7: Χαρακτηρισμός Λειτουργικότητας Πιεζοαντιστατικού Αισθητήρα.....	65
<b>7.1 Προετοιμασία δειγμάτων πιεζοαντιστατικών αισθητήρων.....</b>	<b>65</b>
<b>7.2 Πειραματική διάταξη χαρακτηρισμού λειτουργικότητας πιεζοαντιστατικού αισθητήρα .....</b>	<b>65</b>
<b>7.3 Αποτελέσματα Χαρακτηρισμού Λειτουργικότητας Πιεζοαντιστατικού Αισθητήρα.....</b>	<b>66</b>
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	69
<b>8.1 Συμπεράσματα.....</b>	<b>69</b>
<b>8.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....</b>	<b>71</b>
Βιβλιογραφία.....	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	80

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ανάπτυξη αισθητήρα παραμόρφωσης μέσω της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής. Ο αισθητήρας παραμόρφωσης αποτελείται από δύο μέρη, το υπόστρωμα και τον αγώγιμο δρόμο. Για το υπόστρωμα επιλέχθηκε ως υλικό κατασκευής η θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU). Μέσω της θεωρίας Taguchi έγινε ο σχεδιασμός των πειραμάτων με τρεις παραμέτρους (θερμοκρασία ακροφυσίου, ύψος στρώσης και ταχύτητα εκτύπωσης) ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων ως προς την διαστατική ακρίβεια κατασκευής. Κατόπιν σχετικών πειραμάτων 3D εκτύπωσης με διαφορετικά ακροφύσια (0.6mm, 0.8mm) και μετρήσεων διαστατικής ακρίβειας, πραγματοποιήθηκε ανάλυση Taguchi, η οποία πρόκρινε τις βέλτιστες συνθήκες κατασκευής 210 °C, 0.2mm, 20mm/s και 210 °C, 0.2mm, 40mm/s). Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν 3D εκτυπώσεις για την επαλήθευση των εκτιμήσεων. Για τον αγώγιμο δρόμο, επιλέχθηκε ως υλικό κατασκευής σύνθετο υλικό αποτελούμενο από μήτρα θερμοπλαστικής πολουρεθάνης και εγκλείσματα αιθάλης (Carbon Black). Πραγματοποιήθηκε πειραματικός σχεδιασμός τεσσάρων παραμέτρων (θερμοκρασία ακροφυσίου, ύψος στρώσης, ταχύτητα εκτύπωσης και πολλαπλασιαστής εξώθησης) στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης και στην διαστατική ακρίβεια. Κατόπιν σχετικών πειραμάτων 3D εκτύπωσης με δύο διαφορετικά ακροφύσια (0.6mm, 0.8mm) και μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης και διαστατικής ακρίβειας των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση Taguchi. Η ανάλυση πρόκρινε τις βέλτιστες συνθήκες κατασκευής για τις δύο περιπτώσεις ακροφυσίων ως προς την ηλεκτρική αντίσταση (230 °C, 0.3mm, 35 mm/s, 1.2, και 225 °C, 0.3mm, 25mm/s, 1.2) και τη διαστατική ακρίβεια (230 °C, 0.3mm, 15mm/s, 1.2 και 225 °C, 0.3mm, 25mm/s, 1.2). Πραγματοποιήθηκαν 3D εκτυπώσεις για την επαλήθευση των εκτιμήσεων. Ο συνδυασμός των βέλτιστων παραμέτρων κατασκευής του υποστρώματος και του αγώγιμου δρόμου χρησιμοποιήθηκε για την 3D εκτύπωση ολοκληρωμένης διάταξης αισθητήρα. Οι 3D εκτυπωμένοι αισθητήρες χαρακτηρίστηκαν σχετικά με την απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης κατά τη διάρκεια μηχανικής καταπόνησης (κάμψη). Οι μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης κατά την μηχανική καταπόνηση, επιβεβαίωσαν τη λειτουργικότητα των αισθητήρων, την ικανότητα δηλαδή μεταβολής (αύξησης) της ηλεκτρικής αντίστασης του αγώγιμου δρόμου κατά την φόρτιση και την επακόλουθη αύξηση της κατά την αποφόρτιση.

## **ABSTRACT**

The present work studied the development of a strain sensor through additive manufacturing technology. The strain sensor consists of two parts, the substrate, and the conductive path. For the substrate, thermoplastic polyurethane (TPU) was selected as construction material. Through the Taguchi theory, the design of experiments was done with three parameters (nozzle temperature, layer height, and printing speed) to find the optimal combination of parameters in terms of dimensional accuracy of 3D printing constructs. Following the relevant 3D printing experiments with different nozzles (0.6mm, 0.8mm) and dimensional accuracy measurements, Taguchi analysis was performed, which resulted in the best 3D printing conditions (210 °C, 0.2mm, 20mm/s and 210 °C, 0.2mm, 40mm/s). Subsequently, printings were carried out for the verification of the estimates. For the conductive path, a composite material consisting of a thermoplastic polyurethane matrix and Carbon Black (CB) filler was selected as construction material. An experimental design of four parameters (nozzle temperature, layer height, printing speed, and extrusion multiplier) was carried out, targeting the minimization of electrical resistance and optimum dimensional accuracy. After related 3D printing experiments with two different nozzle diameters (0.6mm, 0.8mm) and measurements of electrical resistance and dimensional accuracy of the samples, Taguchi analysis was performed. The analysis indicated the optimum 3D printing conditions for the two nozzle cases with respect to electrical resistance (230 °C, 0.3mm, 35 mm/s, 1.2, and 225 °C, 0.3mm, 25mm/s, 1.2) and dimensional accuracy (230 °C, 0.3mm, 15mm/s, 1.2 and 225 °C, 0.3mm, 25mm/s, 1.2). 3D prints were carried out to verify the estimates. The combination of the best 3D printing parameters for the substrate and conductive path was used for 3D printing of a complete sensor layout. The 3D printed sensors were characterized in terms of electrical resistance response during mechanical deformation (bending). The measurements of electrical resistance during mechanical stress confirmed the functionality of the sensors, the ability to change (decrease) the electrical resistance of the conductive path during loading and the subsequent increase during unloading.



# ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση διατάξεων αισθητήρων σε πλαστικά υποστρώματα και εφαρμογές.

### 1.1 Εύκαμπτοι αισθητήρες

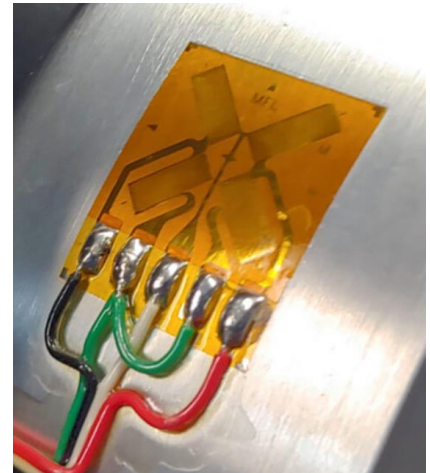
Οι εύκαμπτοι αισθητήρες βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς της καθημερινής μας ζωής λόγω των πολλών και σημαντικών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν όπως είναι:

- η δυνατότητα να ακολουθούν την καμπυλότητα της επιφάνειας όπου τοποθετούνται
- το χαμηλό κόστος
- η ευκολία κατασκευής

Τα κύρια μέρη ενός εύκαμπτου αισθητήρα είναι:

- το εύκαμπτο υπόστρωμα
- ο μετατροπέας ο οποίος μετασχηματίζει την υπό ανίχνευση ποσότητα σε μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα
- το ευαίσθητο στρώμα το οποίο αλληλοεπιδρά παραμορφώνεται

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των εύκαμπτων αισθητήρων διαδραματίζουν οι νέες τεχνολογίες κατασκευής καθώς και τα νέα υλικά. Υλικά όπως: το πολυϊμίδιο (polyimide (PI), το ναφθαλικό πολυαιθυλένιο (polyethylenenaphthalate, PEN), το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (polyethylene terephthalate, PET)), η πολυ(διμεθυλοσιλοξάνη) (Polydimethylsiloxane, PDMS), το χαρτί (paper) και το ύφασμα (textile) αντικαθιστούν τα παραδοσιακά άκαμπτα υποστρώματα όπως το γυαλί και το πυρίτιο. Επιπλέον, υλικά όπως το γραφένιο, οι νανοσωλήνες άνθρακα καθώς και μια πλειάδα από νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή εύκαμπτων αισθητήρων, λόγω των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους. (1)



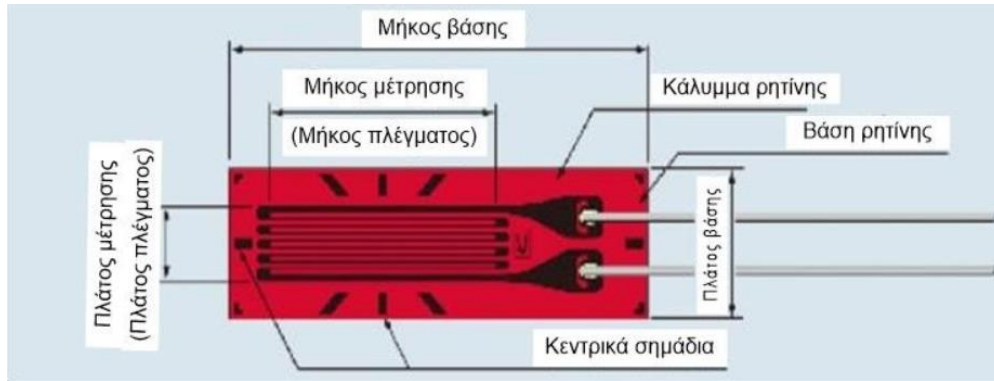
**Σχήμα 1:** Αισθητήρας ροής: Η συσκευή αποτελείται από θερμοστοιχεία επί ενός εύκαμπτου στρώματος πολυαμιδίου, πάχους 10μm.(87)

### 1.2 Αισθητήρες παραμόρφωσης

Ένας αισθητήρας παραμόρφωσης (strain sensor) μετατρέπει τις παραμορφώσεις που προκαλούνται σε αυτόν σε ηλεκτρικά σήματα. Η εφαρμογή για την οποία προορίζεται ο αισθητήρας καθορίζει το είδος του αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και τις παραμέτρους κατασκευής του.

Με την τεχνολογική πρόοδο τα τελευταία χρόνια στους τομείς της νανοτεχνολογίας έχουν παρατηρηθεί μεγάλες εξελίξεις σε εφαρμόσιμους στο ανθρώπινο σώμα αισθητήρες παραμόρφωσης από πολυμερή και νανოსύνθετα υλικά. Οι εν λόγω αισθητήρες αποκτούν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στην ιατρική περίθαλψη, διάγνωση, καθώς και στη ρομποτική, προσθετική, εικονική πραγματικότητα, ψυχαγωγία κλπ.

Οι αισθητήρες παραμόρφωσης αποτελούνται από το πλαστικό υπόστρωμα που συνήθως είναι πολυουρεθάνη και από το αγώγιμο κύκλωμα που μπορεί να είναι εμπλουτισμένο από υλικά όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα.



Σχήμα 2: Αισθητήρας παραμόρφωσης (strain sensor) (2).

### 1.3 Είδη αισθητήρων παραμόρφωσης

Τα πιο γνωστά είδη αισθητήρων παραμόρφωσης είναι οι αισθητήρες χωρητικότητας (capacitive), αντίστασης (resistive), υγρών μετάλλων (liquid metals), ο αισθητήρας πλέγματος ινών-Fiber Bragg Grating- (FBG), οι τριβοηλεκτρικοί και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες. Ανάλογα με το είδος, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στην αρχή λειτουργίας τους και στη μέθοδο κατασκευής.

#### 1.3.1. Αισθητήρες αντίστασης (Resistive sensors)

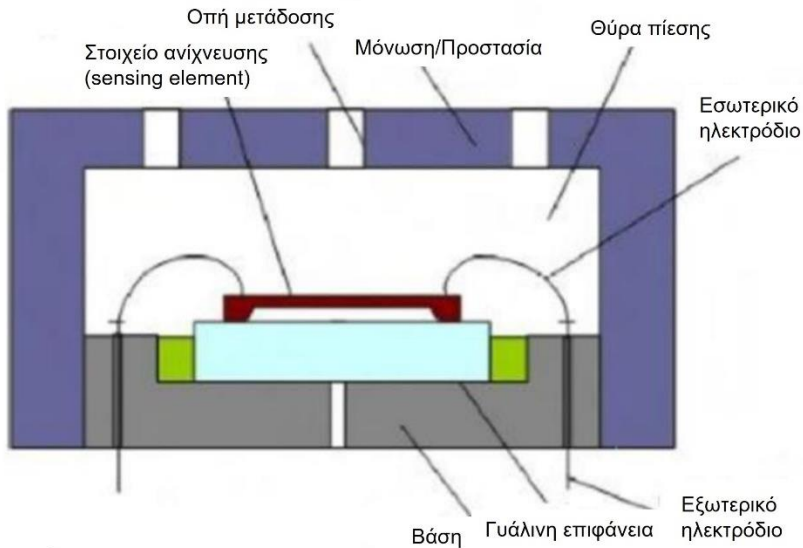
Οι αισθητήρες αντίστασης αξιοποιούν, όπως αναφέρει και η ονομασία τους, τη μεταβολή της αντίστασης κατά την παραμόρφωση του αισθητήρα σαν μέσο ανίχνευσης. Με τη διέλευση ρεύματος σταθερής έντασης από τον αισθητήρα οι προκαλούμενες παραμορφώσεις λόγω της καταπόνησης ή (καταπονήσεων) που ασκείται (ή ασκούνται) δυσχεραίνουν τα «μονοπάτια» διέλευσης του ρεύματος, προκαλώντας αύξηση της αντίστασης. Ο λόγος της μεταβολής της αντίστασης προς την αρχική τιμή του αισθητήρα δίνει μία εικόνα για την ευαισθησία του προς την αντίστοιχη παραμόρφωση (3)

$$G = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

όπου  $G$  ο παράγοντας μέτρησης ενός αισθητήρα αντίστασης,  $\Delta R/R$  η ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης για την αντίστοιχη καταπόνηση και  $\varepsilon$  η παραμόρφωση του υλικού. (3)

#### 1.3.2. Αισθητήρες χωρητικότητας (Capacitive sensors)

Οι αισθητήρες χωρητικότητας λειτουργούν ανιχνεύοντας την μεταβολή της χωρητικότητας εξαιτίας της επιρροής ενός εξωτερικού αντικειμένου. Περιλαμβάνουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο μετράει τη χωρητικότητα απέναντι από τα δύο ηλεκτρόδια. Όταν η χωρητικότητα αλλάζει, οι μεταβολές αυτές γίνονται αντιληπτές με τη μορφή σήματος από το σύστημα που είναι συνδεδεμένο με τον αισθητήρα, καθιστώντας έτσι ένα σύστημα ανίχνευσης. Το πλεονέκτημα των αισθητήρων αυτών είναι ότι μπορούν να ανιχνεύσουν ένα μεγάλο εύρος υλικών αλλά και επίσης η ικανότητα της ανίχνευσης σε μεγάλες αποστάσεις με μικρού μεγέθους αισθητήρες. Είναι ευρέως διαδεδομένοι σε εφαρμογές όπως η ανίχνευση στάθμης υγρού σε μια δεξαμενή.



Σχήμα 3: Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα χωρητικότητας (4)

## 1.4 Εφαρμογές

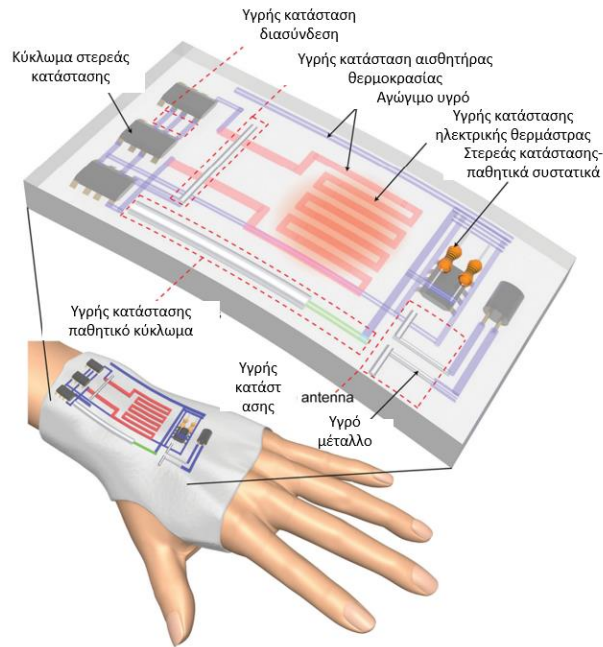
Ίσως η πιο διαδεδομένη χρήση των αισθητήρων παραμόρφωσης είναι οι αισθητήρες τύπου χωρητικότητας. Συγκεκριμένα στα κινητά τηλέφωνα ο αισθητήρας χωρητικότητας αποτελείται από το γυαλί (οθόνη), οριζόντιες και κατακόρυφες αισθητήριες γραμμές (πλέγμα) και από τη μπαταρία. Καθώς φέρνουμε το δάχτυλο μας (εξωτερικό αντικείμενο) κοντά στην οθόνη μεταβάλλεται το ηλεκτροστατικό πεδίο γύρω από το πλέγμα και ο ανιχνευτής παρατηρεί αυτή τη μεταβολή και τη μεταφράζει. (4)



Σχήμα 4: Εφαρμογή αισθητήρων σε κινητά τηλέφωνα (5).

Ένας τομέας που χρησιμοποιούνται οι εύκαμπτοι αισθητήρες καταπόνησης και το συναντάμε στην καθημερινή μας ζωή είναι ο αθλητισμός. Εύκαμπτοι αισθητήρες τοποθετούνται στα σώματα των αθλητών με σκοπό την καταγραφή των αθλητικών επιδόσεων σε πραγματικό χρόνο. Ανάλογα με την παραμόρφωση τους, και έχοντας σωστή βαθμονόμηση, είναι εφικτό να υπολογισθεί η δύναμη που τους ασκήθηκε.

Οι Hiroki Ota et al εκτύπωσαν πάνω σε ένα γάντι χεριού ένα αγώγιμο εύκαμπτο κύκλωμα το οποίο ανιχνεύει την κίνηση και την πίεση που ασκείται σε αυτό όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η 3D εκτύπωση επιτρέπει την συναρμολόγηση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με πολύπλοκες τρισδιάστατες αρχιτεκτονικές για την δημιουργία ‘έξυπνων’ και εξατομικευμένων αντικειμένων. (6)



Σχήμα 5: Απεικόνιση αισθητήρα χεριός (6)

## Κεφάλαιο 2. Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων παραμόρφωσης

### 2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

Οι συσκευές εκείνες που μετρούν μια φυσική ποσότητα και τη μετατρέπουν σε ένα μέγεθος (σήμα) που μπορεί να το διαβάσει ένας παρατηρητής, ονομάζονται αισθητήρες. Το πρωτογενές φυσικό μέγεθος εκείνο που δέχεται ο αισθητήρας κατά τη μέτρηση ορίζεται ως ερέθισμα (stimulus) ή μετρούμενο μέγεθος (measurand). Τυπικά οι σύγχρονοι αισθητήρες νοούνται ως οι συσκευές που δέχονται ένα ερέθισμα και αποκρίνονται σε αυτό με ένα ηλεκτρικό σήμα. Κατά τη λειτουργία του δηλαδή ο αισθητήρας μετατρέπει ένα φυσικό μέγεθος εισόδου σε ένα σήμα συμβατό με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Μπορεί γενικά να θεωρηθεί ως «μεταφραστής» μιας μη ηλεκτρικής τιμής σε ηλεκτρική, (π.χ. η ηλεκτρική τάση, η ένταση ή το φορτίο) η οποία και αποτελεί το σήμα εξόδου του. Κατά τη λειτουργία οποιουδήποτε είδους αισθητήρα, πραγματοποιείται τόσο η μεταφορά ενέργειας από το αντικείμενο μέτρησης προς τη συσκευή όσο και η μετατροπή της συγκεκριμένης ενέργειας σε διαφορετική μορφή. Η μεταφορά της ενέργειας είναι συνυφασμένη με την μεταφορά πληροφορίας που πραγματοποιείται κατά τη διαδικασία της μέτρησης μέσω ενός αισθητήρα (sensing process). Αντίστοιχα, η μετατροπή ενέργειας αφορά την μετατροπή του ερεθίσματος (π.χ. πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία, χημική σύσταση) σε ηλεκτρικό σήμα. Η γενικότερη κατηγορία συσκευών που ασχολείται με την μετατροπή ενός είδους ενέργειας σε οποιοδήποτε άλλο ονομάζονται μετατροπείς (transducers). Ως παράδειγμα μιας τέτοιας συσκευής μπορεί να αναφερθεί το ηχείο. Το ηχείο μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα αρχικά σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και ακολούθως σε ακουστικά κύματα. Προφανώς αυτή η περίπτωση δε σχετίζεται με τη μέτρηση κάποιου μεγέθους. Ειδικότερα, όταν η μετατροπή ενέργειας που πραγματοποιείται είναι η αντίστροφη

αυτής του αισθητήρα, (δηλαδή όταν η είσοδος είναι ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο και μετατρέπεται σε άλλου είδους ενέργεια), τότε οι συσκευές αυτές καλούνται ενεργοποιητές (actuators).

Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τη φύση με τα αισθητήρια όργανά του

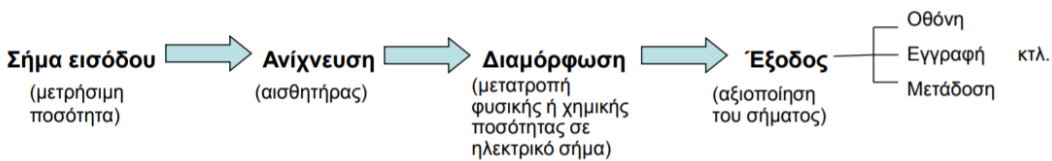


**ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΑΝΤΙΛΗΨΗ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΤΟΜΟ ΞΕΧΩΡΙΣΤΑ!**

ποσοτικός τρόπος μέτρησης → αισθητήρες

### Σύστημα πληροφορίας

#### Λειτουργικό Διάγραμμα συστήματος μέτρησης



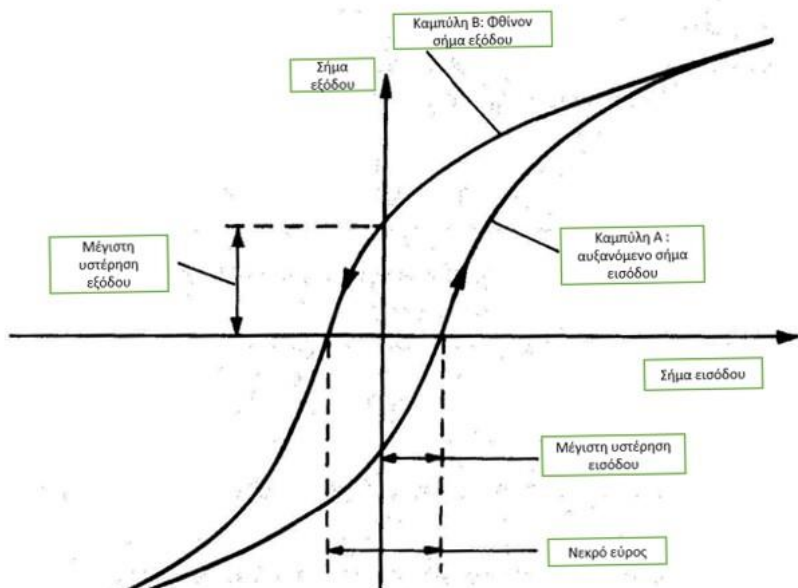
Σχήμα 6: Περιγραφική απεικόνιση βασικών λειτουργιών του αισθητήρα (7).

Κάθε αισθητήρας συνοδεύεται από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά, τα οποία και αποτελούν τις προδιαγραφές του. Παρότι οι ποικίλοι αισθητήρες που υπάρχουν σήμερα στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας, έχουν κοινά τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

**Ευαισθησία (Sensitivity):** εκφράζει πόσο υψηλό σήμα εξόδου αποδίδει ο αισθητήρας για κάθε μονάδα του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Συνεπώς, εάν ένας αισθητήρας θερμοκρασίας έχει ευαισθησία  $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , συνεπάγεται ότι παράγει έξοδο ίση με  $1 \text{ mV}$  για κάθε βαθμό της μετρούμενης θερμοκρασίας και προφανώς είναι πιο ευαίσθητος από έναν άλλο αισθητήρα με ευαισθησία  $0.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , ο οποίος για κάθε θερμοκρασία παράγει ως έξοδο τη μισή τάση.

**Γραμμικότητα (Linearity):** κάθε αισθητήρας διαθέτει ένα χαρακτηριστικό ή μια ιδιότητα, του οποίου η τιμή μεταβάλλεται όταν αλλάζει η φυσική ποσότητα που μετρά ο αισθητήρας. Είναι επιθυμητό οι μεταβολές της φυσικής ποσότητας να προκαλούν αυστηρά ανάλογες μεταβολές της ιδιότητας του αισθητήρα. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται γραμμικότητα και είναι ιδιαίτερης σημασίας. Εάν ο αισθητήρας δεν είναι γραμμικός, τότε η αντιστοίχιση των τιμών του μετρούμενου μεγέθους με τις τιμές εξόδου του αισθητήρα γίνεται με βάση την καμπύλη «βαθμονόμησης». Η μη-γραμμικότητα είναι συχνά εγγενής ιδιότητα του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αισθητήρας και συνεπώς είναι αδύνατο να μηδενιστεί.

**Σφάλμα υστέρησης (Hysteresis):** σε έναν αισθητήρα αντίστασης, η ικανότητα ανίχνευσης εξαρτάται άμεσα από τις μεταβολές στο αγώγιμο δίκτυο εντός αυτού και τη δυνατότητα να επανέρθει στην αρχική του κατάσταση όταν η καταπόνηση μηδενίζεται. Σε



Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση σφάλματος υστέρησης (88)

αισθητήρες που έχουν να διαχειριστούν δυναμικά φορτία κατά τη λειτουργία τους, όπως οι εφαρμόσιμοι στο ανθρώπινο σώμα (π.χ. κίνηση χεριού, παλμός καρδιάς, εισπνοή και εκπνοή), η υστέρηση αποτελεί σημαντική παράμετρο. Υψηλά φαινόμενα υστέρησης μπορούν να οδηγήσουν σε μη αντιστρέψιμη μεταβολή της τιμής της αντίστασης των αισθητήρων αυτών υπό δυναμική καταπόνηση.

**Χρόνος απόκρισης (Frequency response):** ο χρόνος που χρειάζεται η έξοδος του αισθητήρα για να φθάσει στο 90% της τελικής τιμής της, όταν στην είσοδο του αισθητήρα εφαρμόζεται βηματικό σήμα.

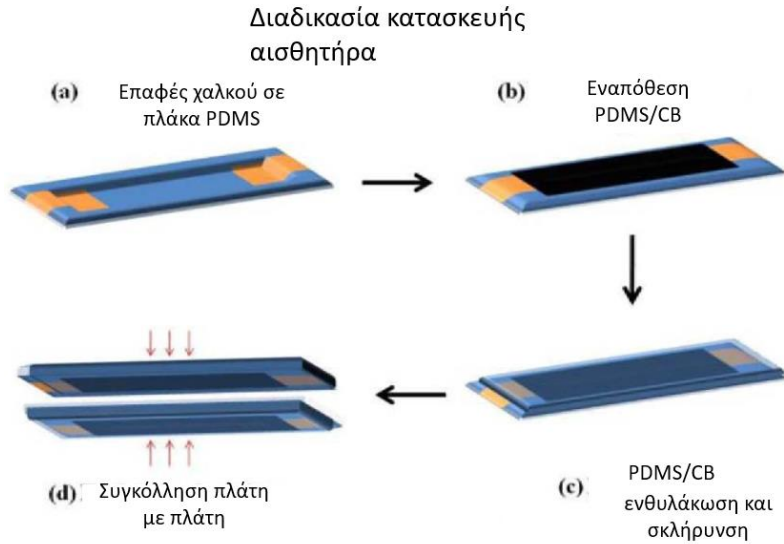
**Χρόνος επαναφοράς (response time):** αποτελεί μια ακόμη παράμετρο απόδοσης για ελαστικούς αισθητήρες που διαχειρίζονται δυναμικά φορτία. Σχετίζεται, άμεσα με τον χρόνο απόκρισης και την υστέρηση. Η άμεση επαναφορά του αισθητήρα στην αρχική του μορφή είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων και σφαλμάτων κατά τη λήψη μετρήσεων σε υψηλή συχνότητα, και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τους υπολογισμούς σε περίπτωση που ο χρόνος είναι πολύ μεγάλος. Για παράδειγμα, ο αισθητήρας από ευθυγραμμισμένα λεπτά φιλμς CNTs με PDMS έχει χρόνο επαναφοράς σημαντικά μικρότερο από έναν αισθητήρα CBs-TPE (τάξης δευτερολέπτων). Ο μεγαλύτερος αυτός χρόνος επαναφοράς είναι αποτέλεσμα της τριβής που δημιουργείται μεταξύ των αγώγιμων και ελαστικών στρωμάτων, η οποία δυσχεραίνει την επαναφορά του δικτύου διήθησης. (8)

## Κεφάλαιο 3: Υλικά κατασκευής

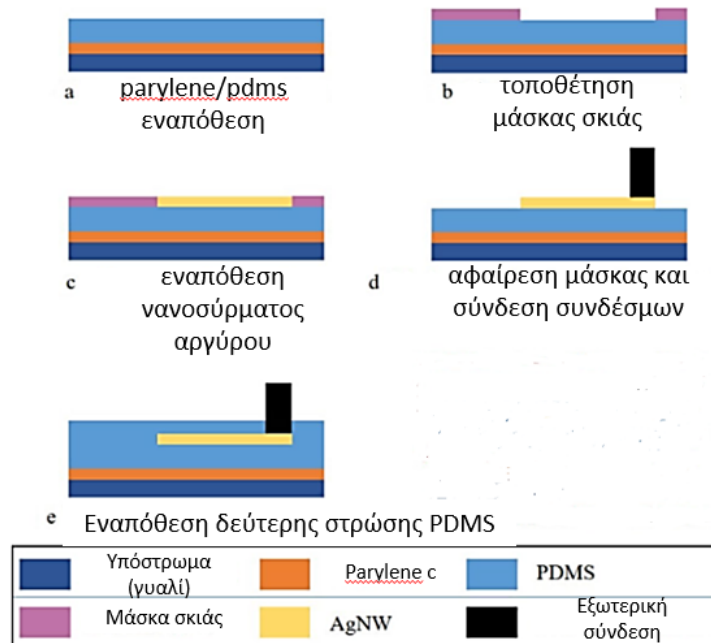
### 3.1. Ελαστομερές υπόστρωμα

Όταν ένας αισθητήρας πίεσης συνδέεται με μια επιφάνεια υπό πίεση, θα παραμορφωθεί ή θα καμφθεί ταυτόχρονα με αυτήν, προκαλώντας μετατόπιση της ηλεκτρικής αντίστασης ανάλογη με την πίεση που εφαρμόζεται στην επιφάνεια, το σήμα που μας δίνει ο αισθητήρας είναι η ηλεκτρική αντίσταση που χρειαζόμαστε έναν μετατροπέα ώστε να το μετατρέψει σε σήμα που είναι αντιληπτό από τις ανθρώπινες αισθήσεις.

Ο αισθητήρας πίεσης αποτελείται από στρώματα. Το στρώμα βάσης (κάτω μέρος αισθητήρα) είναι κατασκευασμένο από πολυμερές το οποίο είναι συνήθως θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (thermoplastic polyurethane-TPU). Στο επόμενο στρώμα βρίσκεται η αγώγιμη περιοχή του αισθητήρα. Πρόκειται ουσιαστικά για κατάλληλα τοποθετημένα ηλεκτρόδια με σκοπό την δημιουργία ενός κυκλώματος. Η αντίσταση του τελευταίου επηρεάζεται από τα ερεθίσματα πίεσης, αποδίδοντας την ηλεκτρική αντίσταση που στην συνέχεια ο μετατροπέας αποκωδικοποιεί σε μορφή σήματος.



**Σχήμα 8:** Σχηματική απεικόνιση των περιοχών ενός αισθητήρα παραμόρφωσης.(9)



**Σχήμα 9:** Σχηματική απεικόνιση των περιοχών ενός αισθητήρα παραμόρφωσης (10).

Τα ελαστομερή υποστρώματα λειτουργούν σαν υλικά υποστήριξης των αισθητήρων παραμόρφωσης, παρέχοντάς τους σταθερότητα και ευελιξία. Τα υλικά κατασκευής του ελαστικού υποστρώματος, οφείλουν να διακρίνονται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Κατάλληλες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες

- Αντοχή σε ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις
- Κατεργασιμότητα
- Ευκολία προσκόλλησης με τα υπόλοιπα υλικά κατασκευής του αισθητήρα( π.χ. αγωγίμη περιοχή)
- Χαμηλό κόστος

Τα θερμοπλαστικά ελαστομερή (thermoplastic elastomers - TPEs), που μερικές φορές αναφέρονται ως θερμοπλαστικά ελαστικά, είναι μια κατηγορία συμπολυμερών ή ένα φυσικό μείγμα πολυμερών (συνήθως ένα πλαστικό και ένα ελαστικό) που αποτελούνται από υλικά με θερμοπλαστικές και ελαστομερείς ιδιότητες (11).

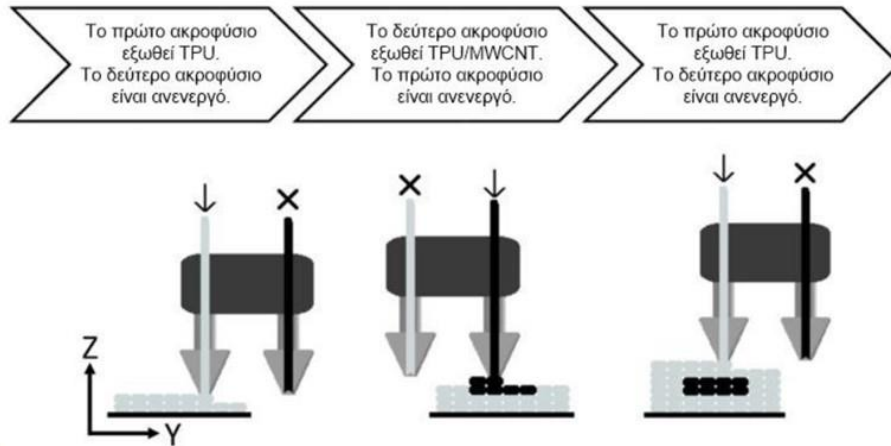
### 3.1.1. Υλικά με βάση τη θερμοπλαστική πολουρεθάνη

Η θερμοπλαστική πολουρεθάνη (Thermoplastic Poly-Urethane - TPU) είναι ένα θερμοπλαστικό ελαστομερές που συνδυάζει ιδανικά τις ιδιότητες των θερμοπλαστικών και των ελαστομερών. Πρόκειται για ένα συμπολυμερές που αποτελείται από εναλλασσόμενες αλληλουχίες σκληρών και μαλακών περιοχών. Αναφορικά με τις ιδιότητες του, το εν λόγω πολυμερές διαθέτει ελαστικότητα παρόμοια με του καουτσούκ, υψηλή αντοχή σε σχισμό και τριβή, υψηλή αντοχή στην παραμόρφωση και θερμική σταθερότητα. Επιπλέον, το TPU είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό σε λιπαρά περιβάλλοντα (π.χ. λιπαντικά, γράσα) και ποικίλους διαλύτες. Στο σύνολό τους, οι παραπάνω ιδιότητες, καθιστούν το TPU ένα ελκυστικό υλικό για την κατασκευή ελαστικών και ηλεκτρικά αγωγίμων σύνθετων υλικών για χρήση σε τεχνολογίες 3D εκτύπωσης. Σχετικά με την αποτελεσματική εφαρμογή του στην 3D εκτύπωση, το TPU αποτελεί μερική έως καθόλου παραμετροποίηση σε σχέση με άλλα εύκαμπτα υλικά.

Αντικείμενα κατασκευασμένα από TPU, διαθέτουν αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και παραμένουν εύκαμπτα, πάντα σε συνάρτηση με τις εφαρμοζόμενες σχεδιαστικές παραμέτρους εκτύπωσης. Τα 3D εκτυπωμένα αντικείμενα αποτελούμενα αποκλειστικά ή μερικώς από TPU, βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλο εύρος τομέων, όπως στην ιατρική ως ορθοπεδικά μοντέλα, εμφυτεύματα και φορητές ιατρικές συσκευές, στην αυτοκινητοβιομηχανία ως μέσα προστασίας και απορρόφησης παραμορφώσεων, σε προσωπικά είδη όπως θήκες ηλεκτρονικών συσκευών αλλά και σε τεχνολογίες αισθητήρων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το TPU επιλέγεται ως υπόστρωμα σε διατάξεις αισθητήρων παραμόρφωσης ώστε να υποστηρίξουν την επιβολή μεγάλων μηχανικών καταπονήσεων οι οποίες εν συνεχεία μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα, συχνά απαιτώντας υψηλά επίπεδα ελαστικότητας (έως και πάνω από 100%). Ερευνητές έχουν ανακαλύψει ότι την υψηλή ελαστικότητα στους αισθητήρες την προσφέρουν τα ελαστομερή και ποικίλα αγωγίμα υλικά όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο (12). Επιδιώκεται δηλαδή η παραγωγή συνθέτων υλικών με πολυμερική μήτρα την TPU σε συνδυασμό με νανοσωλήνες άνθρακα ή αιθάλη ή γραφένιο. Με την 3D εκτύπωση επιτυγχάνεται πολύ πιο εύκολα η κατασκευή αντικειμένων που αποτελούνται από ποικίλα υλικά.

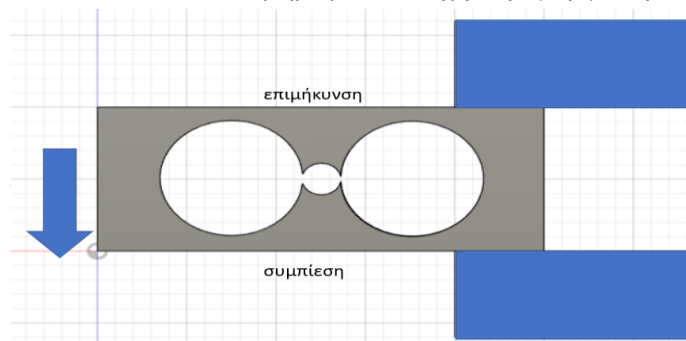




**Σχήμα 10:** Απεικόνιση των βημάτων της διαδικασίας 3D εκτύπωσης σύνθετου υλικού (TPU/MWCNTs) με χρήση δύο κεφαλών εκτύπωσης.(13)

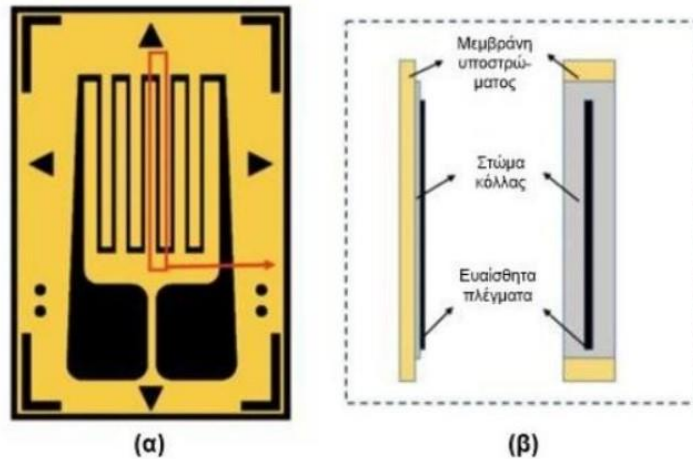
### 3.2. Αγωγήμο Στρώμα

Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται μια πλάκα συγκεκριμένης γεωμετρίας η οποία αρθρώνεται από την μια πλευρά της και από την άλλη της ασκείται μια κατακόρυφη δύναμη. Η πλάκα στη μέση είναι πιο λεπτή οπότε σε εκείνο το σημείο λόγω κατασκευής θα υποστεί παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα το πάνω μέρος θα επιμηκυνθεί και το κάτω θα συμπιεστεί. Αν μπορούμε με κάποιο τρόπο να υπολογίσουμε την παραμόρφωση που θα υποστεί η πλάκα γνωρίζοντας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μπορούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια τη δύναμη που ασκείται. Επομένως, τοποθετούμε έναν αισθητήρα παραμόρφωσης στο πάνω μέρος της πλάκας στο σημείο παραμόρφωσης με σκοπό να υποστεί και ο αισθητήρας αντίστοιχη παραμόρφωση.



**Σχήμα 11:** Στηριζόμενη πλάκα που δέχεται δύναμη σε κάθετη διεύθυνση.

Το αγωγήμο στρώμα του αισθητήρα αποτελείται από δύο συνδεδεμένους αγωγούς που συνδέονται με αγωγήμα σύρματα συγκεκριμένης αντοχής. Όταν παραμορφωθούν λόγω της πίεσης που υφίστανται αλλάζει η αντοχή τους, οπότε με έναν κατάλληλο μετατροπέα μπορούμε να βρούμε την αντοχή του υλικού γνωρίζοντας την παραμόρφωση του αγωγήμου στρώματος.



Σχήμα 12: Απεικόνιση μετρητή α)κάτοψη και β) πλάγια όψη (14).

### 3.2.1. Νανოსύνθετα Υλικά Αυξημένης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας

Τα αγώγιμα υλικά πλήρωσης (conductive filler composites-CFC) προσφέρουν πολλές λειτουργικές χρήσεις στο πεδίο της ανίχνευσης. Σε γενικές γραμμές, τα νανοσύνθετα πολυμερή/νανοσωματίδια άνθρακα έχουν προσελκύσει σημαντική προσοχή την τελευταία δεκαετία, ως ελαφρά και εύκαμπτα ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά. Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι τα CFC έχουν ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, δυναμικό θωράκισης καθώς και εφαρμογές ανίχνευσης πίεσης για χρήση σε ηλεκτρονικές διατάξεις (15). Τέτοια υλικά είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα, η αιθάλη (carbon black) και οι νανοδομές γραφενίου. Αντίστοιχα, τα αγώγιμα σύνθετα πολυμερών (Conductive Polymer Composites – CPCs) συγκεντρώνουν ολοένα και περισσότερο ερευνητικό ενδιαφέρον, ειδικά σε εφαρμογές 3D εκτύπωσης. Οι αλλοτροπικές μορφές άνθρακα σε μορφή νανοϋλικών μπορούν να μετατρέψουν ένα εγγενώς μονωτικό πολυμερές σε αγώγιμο, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα κατασκευής ελαφρών (lightweight) και εύκαμπτων αγωγών. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των τελευταίων μπορούν να ρυθμιστούν με βάση: α) την περιεκτικότητα της πολυμερικής μήτρας σε εγκλείσματα, β) τον λόγο διαστάσεων (aspect ratio) των σωματιδίων, γ) την επιφανειακή περιοχή και τις αντίστοιχες χημικές ιδιότητες καθώς και δ) τη διεργασία που πραγματοποιείται για την παραγωγή του αγώγιμο σύνθετου πολυμερούς. Τα αγώγιμα σύνθετα πολυμερή βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε τεχνολογίες ανίχνευσης (sensing) όπως α) αισθητήρες υγρών ή αερίων, β) ηλεκτροχημικούς αισθητήρες, γ) αισθητήρες παραμόρφωσης (φορητούς ή αφής) που βασίζονται σε πιεζοαντιστατικούς ή πιεζοηλεκτρικούς μηχανισμούς, και δ) αισθητήρες θερμοκρασίας. (16)

#### Αυτό-διάγνωση (Self-sensing)

Η αυτό-διάγνωση (self-sensing) πρόκειται για την ιδιότητα ενός υλικού να αντιλαμβάνεται μια εγγενή αντίδραση παραμόρφωσης που μπορεί να οφείλεται σε καταπόνηση, αστοχία, μεταβολή θερμοκρασίας κ.ά. Τα νανοσύνθετα υλικά που φέρουν το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό λειτουργούν με βάση την αρχή της πιεζοαντίστασης (piezoresistivity), δηλαδή την ανίχνευση αλλαγών στην ηλεκτρική τους αντίσταση που οφείλεται σε καταπόνηση ή βλάβη. Για να εκτυλιχθεί το συγκεκριμένο φαινόμενο σε ένα σύνθετο υλικό, είναι απαραίτητη παρουσία ενός αγώγιμου συστατικού (π.χ. αλλοτροπικές μορφές άνθρακα) για τον σχηματισμό ενός ηλεκτρικά αγώγιμου δικτύου εντός του σύνθετου υλικού. Όταν τα εν λόγω σύνθετα υλικά υποβάλλονται σε παραμόρφωση ή υφίστανται κάποια βλάβη, το αγώγιμο δίκτυο διαταράσσεται με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης (17) Η ηλεκτρική αντίσταση και η μεταβολή αυτή εξαρτάται από τον τύπο του αγώγιμου εγκλείσματος, την ποσότητα και την κατανομή του εντός της πολυμερικής μήτρας. Βασικά

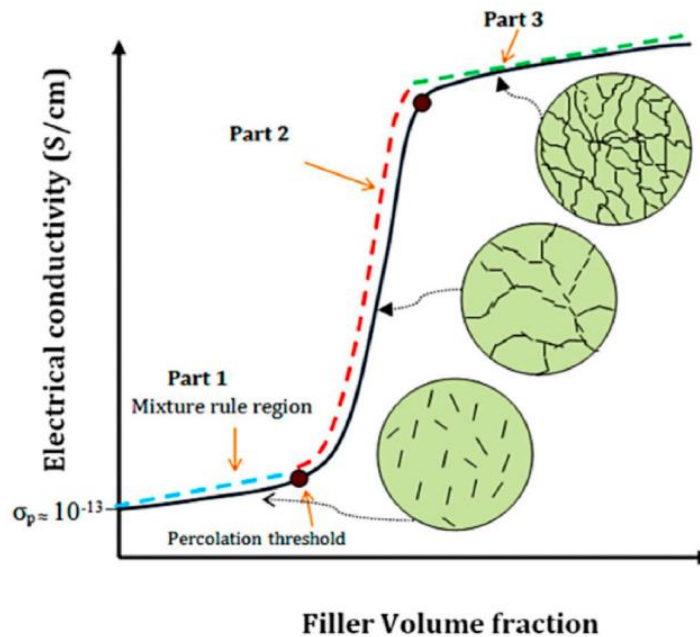
πλεονεκτήματα των υλικών αυτό-διάγνωσης συγκριτικά με συμβατικούς αισθητήρες είναι το χαμηλό κόστος, η υψηλή αντοχή, και η ικανότητα διατήρησης των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

### Μηχανισμός αυτό-διάγνωσης (Self-sensing mechanism)

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών μπορούν να περιγραφούν σύμφωνα με τη θεωρία διαφυγής (percolation theory), ως εξής:

$$\sigma \propto (p - p_c) t$$

όπου  $\sigma$  η ηλεκτρική αγωγιμότητα του σύνθετου,  $p$  το κλάσμα όγκου του εγκλείσματος,  $p_c$  το κατώφλι διαφυγής του σύνθετου και  $t$  μια εκθετική σταθερά που σχετίζεται με τα σύνθετα υλικά (18). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα συναρτήσκει της αναλογίας του εγκλείσματος που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 13 και χαρακτηρίζεται από μια μορφή σχήματος S. Υπάρχουν τρεις τυπικές περιοχές σε αυτήν την καμπύλη σχήματος S, που χαρακτηρίζονται ως περιοχή I, II και III. Σε χαμηλές αναλογίες ενισχυτικού μέσου, πριν σχηματιστεί το αγωγίμο δίκτυο, η αγωγιμότητα παραμένει κοντά σε αυτή του καθαρού μονωτικού πολυμερικού πλέγματος. Τα ενισχυτικά υπάρχουν μόνο μεμονωμένα ή σε μικρές ομάδες σε όλη τη μήτρα πολυμερούς, χωρίς φυσική επαφή ή σήραγγα ηλεκτρονίων μεταξύ αγωγίμων σωματιδίων για να επιτρέπεται η μεταφορά φορτίου (περιοχή I). Με την αύξηση της συγκέντρωσης του προσθέτου, η απόσταση μεταξύ των προσθέτων μειώνεται. Καθώς επιτυγχάνεται η κρίσιμη τιμή του αγωγίμου ενισχυτικού υλικού, η αγωγιμότητα του σύνθετου υλικού αυξάνεται δραματικά κατά πολλές τάξεις μεγεθών εντός ενός στενού εύρους συγκέντρωσης ενισχυτικών (Περιοχή II). Με περαιτέρω αύξηση της αναλογίας του ενισχυτικού υλικού, η αγωγιμότητα φτάνει σε μια σταθερή τιμή, με αποτέλεσμα έπειτα να μην παρατηρείται σημαντική αλλαγή στην αγωγιμότητα (Περιοχή III) (19).



Σχήμα 13: Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σύνθετων υλικών συναρτήσκει του κλάσματος όγκου του εγκλείσματος (20)

Το κατώφλι διαφυγής αντιπροσωπεύει την κρίσιμη τιμή του κλάσματος όγκου των εγκλεισμάτων, πέραν της οποίας μια μικρή αύξηση της περιεκτικότητας μπορεί να προκαλέσει απότομη μεταβολή της ηλεκτρικής

αγωγιμότητας του συνθέτου. Σε ένα αγώγιμο δίκτυο που σχηματίζεται από νανοσωματίδια, η ηλεκτρική αντίσταση αποτελείται από τρία βασικά συστατικά: την εσωτερική αντίσταση των νανοσωματιδίων ( $R_{nanoparticle}$ ), την αντίσταση στη στένωση λόγω της άμεσης επαφής των νανοσωματιδίων ( $R_{contact}$ ) και την αντίσταση σήραγγας μεταξύ δύο γειτονικών νανοσωματιδίων ( $R_{tunnel}$ ), και συγκεκριμένα:

$$R = R_{nanoparticle} + R_{contact} + R_{tunnel}$$

Η αντίσταση σήραγγας,  $R_{tunnel}$ , εξαρτάται από το πάχος και τις ιδιότητες του μονωτικού στρώματος, το οποίο είναι πολύ υψηλότερο από τους άλλους δύο τύπους αντίστασης ( $R_{nanoparticle}$  και  $R_{contact}$ ) κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Το φαινόμενο της σήραγγας είναι ιδιαίτερα εμφανές όταν δύο νανοσωματίδια βρίσκονται σε κοντινή απόσταση (της τάξης των πολλών νανομέτρων) αλλά όχι σε άμεση επαφή. Αυτό τονίζει ότι στο κατώφλι διαφυγής, το φαινόμενο κβαντικής σήραγγας κυριαρχεί στην ηλεκτρική αντίσταση που εκδηλώνεται από τα νανοςύνθετα. Πέρα από το κατώφλι, τα νανοσωματίδια έρχονται σε επαφή ή αλληλεπικαλύπτονται, κάτω από τα οποία το φαινόμενο σήραγγας τείνει να είναι ασθενές και η αγωγιμότητα των νανοςύνθετων να κορεστεί (21).

### 3.2.2. Νανοςωλήνες άνθρακα

Η ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογικών αναγκών οδήγησε στην ανάπτυξη νέων λειτουργικών υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες όπως οι δυνατότητες ανίχνευσης. Είναι γνωστό ότι η προσθήκη νανοςωλήνων άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (Multi-Walled Carbon Nanotubes- MWCNTs) βελτιώνει τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών[10]. Για το λόγο αυτό, τα CNTs έχουν μελετηθεί εκτενώς για την κατασκευή νανοςύνθετων υλικών με πληθώρα εφαρμογών. Επιπλέον, η προσθήκη MWCNTs έχει αποδειχθεί ότι παρέχει στα πολυμερή δυνατότητες ανίχνευσης(22).

Τα νανοςύνθετα υλικά πολυμερούς/ MWCNTs έχουν μελετηθεί εκτενώς ως αισθητήρες καταπόνησης, προσφέροντας μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για μελλοντικές εμπορικές εφαρμογές (23). Ωστόσο, το είδος του πολυμερούς, το σχήμα, η μορφολογία και ο σχεδιασμός του σύνθετου CNT όπως και η διασπορά των MWCNTs στην μήτρα του πολυμερούς παίζουν επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση καταπόνησης. Βιβλιογραφικά έχει βρεθεί ότι τα νανοςύνθετα υλικά πολυμερούς/ MWCNTs παρουσιάζουν νέες βελτιωμένες μηχανικές ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αγωγιμότητας που λήφθηκαν για το TPU ψεκασμό νανοςωλήνων άνθρακα. Για τα νανοςύνθετα από επίστρωση ψεκασμού με 1% μάζας νανοςωλήνων στη μήτρα οδηγεί σε αγωγιμότητα από  $10^{-12}$  σε  $10^{-5}$  S cm<sup>-1</sup> σε θερμοκρασία δωματίου. Οι θερμοβαρυσμετρικές αναλύσεις φανερώουν ότι τα buckypapers παράχθηκαν με ποσοστό παραπάνω από 50% της μάζας να είναι νανοςωλήνες με συνέπεια αυτό το ποσό να είναι υπεύθυνο για την υψηλή αύξηση της αγωγιμότητας (24)

**Πίνακας 1:** Αποτελέσματα αγωγιμότητας για σύνθετο υλικό TPU/MWCNTs, αποτελέσματα των Aline M. F. Lima et al. (24).

Είδος δείγματος	Αγωγιμότητα (S cm <sup>-1</sup> )
Neat TPU	$1.5 \times 10^{-12}$
TPU/MWCNT-COOH 1 mass%	$1.22 \times 10^{-5}$
TPU/MWCNT-NH2 1 mass%	$2.44 \times 10^{-5}$
TPU/MWCNT-COOH buckypaper	1.1
TPU/MWCNT-NH2 buckypaper	7.3

Σε άλλη έρευνα οι Xiang fu et all κατασκευάσανε τρεις αισθητήρες καταπόνησης με 5,7,9 % συγκέντρωση σε MWCNTs αντίστοιχα. Σκοπός ήταν η σύγκριση της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας που εκφράζεται μέσω της ηλεκτρικής τους αντίστασης.(25)

**Πίνακας 2:** Σύγκριση ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την περιεκτικότητα σε MWCNTs,αποτελέσματα των Xiang Fu et all (25)

Περιεκτικότητα	Ηλεκτρική αντίσταση (kΩ)
5% MWCNTs	263,18- 1028,64
7% MWCNTs	4,54-20,36
9% MWCNTs	0,175-0,341

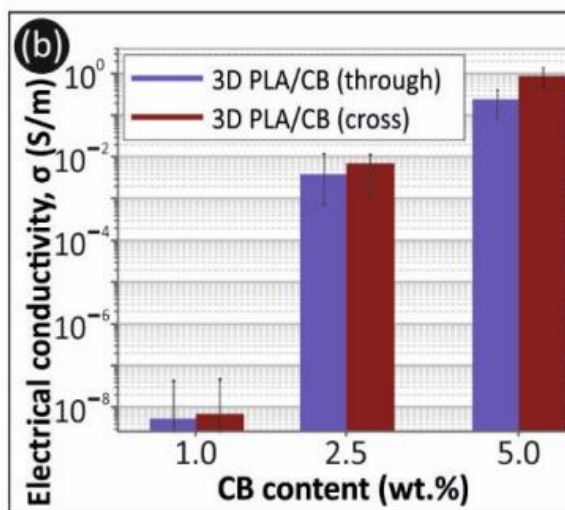
Ο αισθητήρας με περιεκτικότητα 9% σε MWCNTs έχει την πιο σταθερή και εξαιρετική ηλεκτρική αντίσταση. Παρατηρείται, ότι όσο πιο υψηλή πυκνότητα σε MWCNTs έχει ο αισθητήρας τόσο καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα έχει. Αξίζει να σημειωθεί ότι προσθέτοντας παραπάνω νανοσωλήνες άνθρακα στο αισθητήρα με περιεκτικότητα 9% σε νανοσωλήνες άνθρακα , η ηλεκτρική αγωγιμότητα θα αυξηθεί αλλά όχι με τον ίδιο ρυθμό.

### 3.2.3. Αιθάλη (Carbon Black)

Η αιθάλη (Carbon black - CB) είναι ένα τρισδιάστατο πληρωτικό με μεγάλο εύρος εφαρμογών. Μπορεί να ορισθεί ως μια μαύρη ουσία σε σκόνη που λαμβάνεται από την καύση υδρογονανθράκων σε περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου, μια διαδικασία που ονομάζεται πυρόλυση. Ακολουθείται δηλαδή μια διαδικασία η οποία δεν είναι τεχνητή. Ως εκ τούτου, η αιθάλη δεν εμφανίζεται ως φυσικό προϊόν. Είναι περισσότερο οργανική ουσία παρά ανόργανη καθώς περιέχει 90-99% στοιχειακό άνθρακα, 0,2-0,5% υδρογόνο και ελάχιστο ποσοστό ανόργανων ακαθαρσιών(26). Περισσότερο από το 90% της αιθάλης που παράγεται παγκοσμίως χρησιμοποιείται ως πληρωτικό (22). Συγκεκριμένα, το CB συνήθως διασπείρεται σε σχετικά υψηλές ποσότητες έως 20-40% κατά βάρος. Σε ελαστομερή (συμπεριλαμβανομένων των ελαστικών) για την ενίσχυση αρκετών ιδιοτήτων, όπως ακαμψία, αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε σχίσσιμο και αντοχή στην τριβή.

Οι Leigh et al. (27) διερεύνησαν νανოსύνθετα βασισμένα σε PLA γεμάτα με 15% κ.β. CB ως αγωγίμο σύνθετο υλικό χαμηλού κόστους για τριδιάστατη εκτύπωση ηλεκτρονικών αισθητήρων. Οι τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας των σύνθετων υλικών κατά μήκος (εντός του επιπέδου) και κάθετα προς τα στρώματα ήταν περίπου 1111 S/m και 833 S/m, αντίστοιχα. Τα 3D εκτυπωμένα μέρη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενσωματωμένος ευέλικτος αισθητήρας, χωρητικό κουμπί και έξυπνο δοχείο.

Οι Flowers et al. (28) χρησιμοποιούν εμπορικά αγωγίμα νήματα PLA που περιέχουν σωματίδια CB, GNP και χαλκού. Η αντίσταση των ιχνών που εκτυπώθηκαν από αγωγίμα θερμοπλαστικά νήματα κατασκευασμένα με αιθάλη, γραφένιο



**Σχήμα 14:** Ηλεκτρική αγωγιμότητα συναρτήσει της περιεκτικότητας σε αιθάλη, αποτελέσματα των Vidakis et all (30)

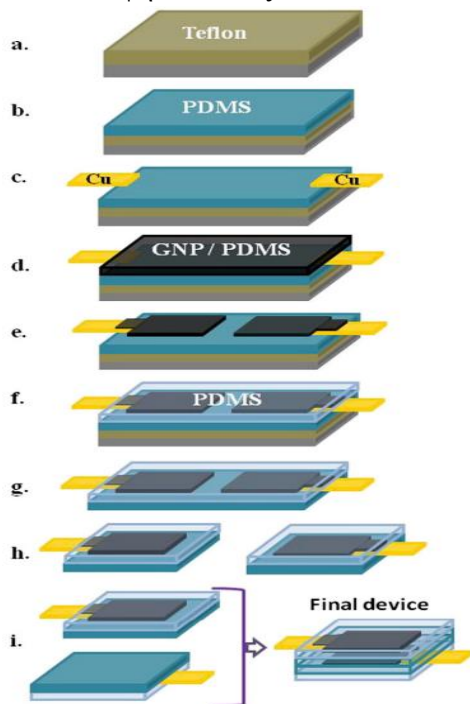
και χαλκό ως αγώγιμα πληρωτικά βρέθηκε να είναι 12, 0.78 και 0.014 cm, αντίστοιχα. Γίνεται έτσι αντιληπτή η μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα της αιθάλης που προσφέρει στο σύνθετο (29).

Οι Vidakis et al στην έρευνα τους για το νανοσύνθετο PLA/CB με περιεκτικότητες 0.5, 1, 2.5, 5.0% παρατήρησαν ότι η αγωγιμότητα του νανοσύνθετου αυξανόταν όσο αυξανόταν και η περιεκτικότητα του CB. Στο Σχήμα 14 παρουσιάζονται οι μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας που δημοσιεύσαν στην έρευνα τους.(30)

### 3.2.4. Νανοδομές γραφενίου

Οι διαφανείς αγώγιμες μεμβράνες (textolite laminated sheets - TCFs) διαδραματίζουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο σε πολλές οπτοηλεκτρονικές συσκευές, όπως οργανικές δίοδοι εκπομπής φωτός, φωτοβολταϊκά στοιχεία και οθόνες υγρών κρυστάλλων (31). Σε σύγκριση με άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα TCFs, όπως το οξειδίο του κασσίτερου ινδίου (ITO), τους νανοσωλήνες άνθρακα, τα αγώγιμα πολυμερή και τα μεταλλικά νανοσύρματα (32–36), το γραφένιο είναι ένα ανερχόμενο υλικό για τις εξαιρετικές του ιδιότητες, όπως χαμηλή αντίσταση, καλή οπτική μετάδοση, μεγάλη μηχανική ευελιξία, χημική σταθερότητα (37,38), χαμηλό κόστος και πλούσιο σε πρώτες ύλες. Οι εφαρμογές TCF με βάση το γραφένιο έχουν αναφερθεί ευρέως (39) το οποίο δείχνει την ευήμερούσα χρησιμότητα του γραφενίου σε μελλοντικές ηλεκτρονικές συσκευές.

Η κατασκευή μεμβρανών γραφενίου με καλές φωτοηλεκτρικές ιδιότητες είναι κρίσιμη. Οι συνήθεις μέθοδοι παρασκευής γραφενίου περιλαμβάνουν την μικρο-μηχανική απολέπιση (40), την επιταξιακή ανάπτυξη (41), τη χημική μείωση (42) και τη χημική απόθεση ατμών (Chemical Vapor Deposition - CVD) .Μεταξύ αυτών των μεθόδων, η CVD εφαρμόζεται ευρέως για τη σύνθεση φιλμ γραφενίου μεγάλης έκτασης και υψηλής ποιότητας, Πολλές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην άμεση εναπόθεση του γραφενίου σε μονωτικά υποστρώματα (43–48), όπου απαιτείται είτε υψηλή θερμοκρασία σύνθεσης (> 1200 °C) που συνήθως υποβαθμίζει τις ηλεκτρικές και τις οπτικές ιδιότητες του γραφενίου είτε υψηλό κόστος.

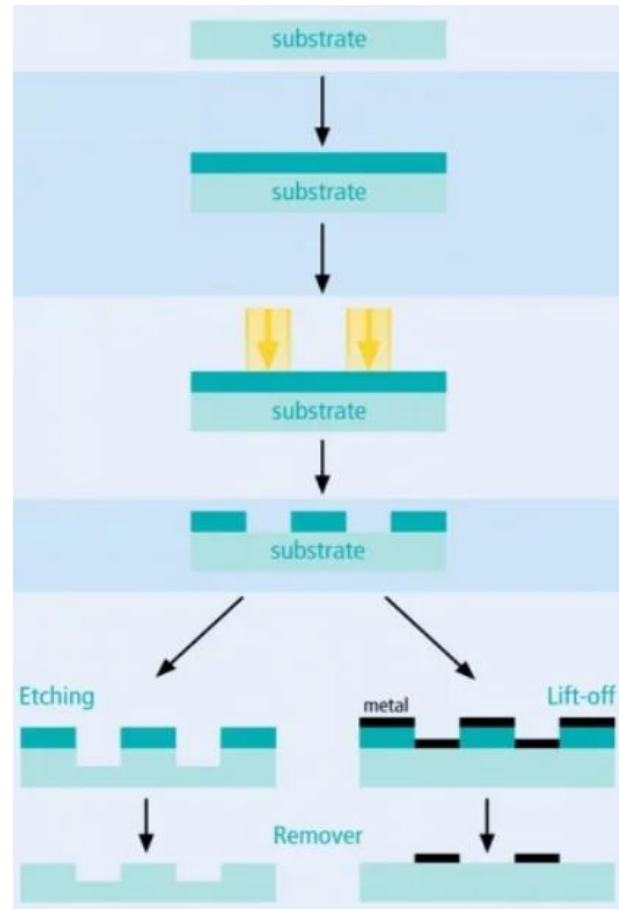


Σχήμα 15: Απεικόνιση περιοχών (στρώσεων) ενός αισθητήρα (49)

### 3.3. Μέθοδοι παραγωγής, χαρακτηρισμού και αξιολόγησης νανοσύνθετων υλικών

Για την κατασκευή προϊόντων υψηλής τεχνολογίας (π.χ., Η/Υ, κινητά τηλέφωνα, τηλεοράσεις) είναι απαραίτητη μια πλακέτα κυκλώματος. Ωστόσο, τα τμήματα αυτών των πλακών είναι πολλές φορές υπερβολικά μικρά, συνήθως ανήκουν στη νανο-κλίμακα. Είναι επομένως υλικά που δεν είναι ορατά στο ανθρώπινο μάτι, για αυτό δεν μπορούν να ακολουθηθούν οι συμβατικές μέθοδοι εκτύπωσής τους.

Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η μέθοδος της φωτολιθογραφίας. Φωτολιθογραφία είναι η διαδικασία που μεταφέρονται σχήματα από μια φωτογραφία στην επιφάνεια ενός υποστρώματος χρησιμοποιώντας φως. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε δυο τεχνικές, την microcontact printing technique, όπου χρησιμοποιώντας μια προκαθορισμένη σφραγίδα με το επιθυμητό σχήμα και βυθίζοντας την σε μια δεξαμενή πολυμερούς νανοσύνθετου μελανιού μεταφέρονται απευθείας μοτίβα στο υπόστρωμα. Από τη στιγμή που το καλούπι εκτύπωσης μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει έναν μεγάλο αριθμό νέων δειγμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα η διαδικασία αυτή μειώνει το χρόνο αλλά και το κόστος εκτύπωσης (50–53). Το αρνητικό της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι για κάθε καινούριο σχήμα απαιτείται η κατασκευή μιας καινούργιας σφραγίδας. Η δεύτερη τεχνική που έχει σχεδιαστεί για να παρακάμψει αυτό το ζήτημα είναι η micropatterning via laser ablation assisted screen printing - όπου η διαδικασία εκτύπωσης υποστηρίζεται από μια ακτίνα λέιζερ που ορίζει μικρο-μοτίβα



Σχήμα 16: Απεικόνιση διαδικασίας φωτολιθογραφίας (58)

(micropatterns). Πιο συγκεκριμένα είναι μια διαδικασία στην οποία τα μόρια πολυμερούς που εκτίθενται στη περιοχή υψηλής εστίασης δέσμης λέιζερ απορροφούν οπτική ενέργεια και εξατμίζονται σε αέρια μορφή. Δεδομένου ότι τα μόρια αφαιρούνται από το στρώμα από πάνω προς τα κάτω, το βάθος της κατάλυσης σχετίζεται με την οπτική ενέργεια που λαμβάνεται στο εκτεθειμένο σημείο (54–56). Συνήθως, στα ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα λέιζερ, η οπτική ενέργεια είναι ανάλογη με τον αριθμό των εκπεμπόμενων παλμών λέιζερ. Να σημειωθεί ακόμα ότι η ακτίνα λέιζερ ακολουθεί ακριβώς την διαδρομή που έχει προγραμματιστεί από το λογισμικό (CAD).

#### 3.3.1 Μέθοδοι χαρακτηρισμού και αξιολόγησης νανοσύνθετων υλικών

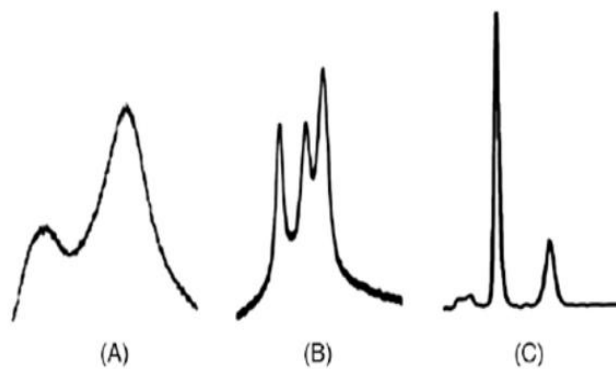
Ο χαρακτηρισμός πολυμερικών υλικών που περιέχουν νανοσωματίδια προσφέρει τη δυνατότητα εντοπισμού των αντιπροσωπευτικών χαρακτηριστικών των εκάστοτε νανοσωματιδίων καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών και των πολυμερών. Οι ιδιότητες των νανοϋλικών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά αλλάζοντας τα μεγέθη τους και διαφέρει αισθητά από τα λεπτά σωματίδια ή τα υλικά (35). Για παράδειγμα, η θερμοκρασία μετάπτωσης των σιδηρομαγνητικών σωματιδίων ( $MgFe_2O_4$ ,  $MnFe_2O_4$ ) μπορεί να μεταβληθεί αλλάζοντας το

μέγεθος των σωματιδίων τους. Ομοίως, τα σωματίδια ZnO έχουν διαφορετικό εύρος προσρόφησης, διαφορετικό ρυθμό αντίδρασης και οξειδοαναγωγή από τα νανοσωματίδια ZnO (34). Οι τεχνικές χαρακτηρισμού έχουν σημαντικό ρόλο για την ερευνητική κοινότητα και τη βιομηχανία για τον σχεδιασμό και παραγωγή πολυμερών υλικών με βάση τα νανοσωματίδια. Στη συνέχεια, θα ασχοληθούμε με τη χρήση διαφόρων τεχνικών χαρακτηρισμού για τον προσδιορισμό των θερμικών, μορφολογικών και κρυσταλλογραφικών ιδιοτήτων των ενσωματωμένων με νανοσωματίδια πολυμερών.

**Πίνακας 3:** Παρουσίαση τεχνικών χαρακτηρισμού (57)

Τεχνικές χαρακτηρισμού	Λεπτομέρειες Ανίχνευσης
Wide-Angle X-ray Diffraction (WAXD)	Δομή και Μορφολογία
Small-Angle X-ray Scattering (SAXS)	Δομή και Μορφολογία
Scanning Electron Microscope (SEM)	Δομή και Μορφολογία
Transmission Electron Microscopy (TEM)	Δομή και Μορφολογία
Atomic Force Microscopy (AFM)	Δομή και Μορφολογία
Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	Μηχανικές, Θερμικές, Ρεολογικές Ιδιότητες
Differential Scanning Calorimeter (DSC)	Μηχανικές, Θερμικές, Ρεολογικές Ιδιότητες
Rheometry	Μηχανικές, Θερμικές, Ρεολογικές Ιδιότητες
Dynamic Modulus Analysis (DMA)	Μηχανικές, Θερμικές, Ρεολογικές Ιδιότητες
Thermomechanical Analysis (TMA)	Μηχανικές, Θερμικές, Ρεολογικές Ιδιότητες
Thermogravimetric Analysis (TGA)	Μηχανικές, Θερμικές, Ρεολογικές Ιδιότητες

Τα χαρακτηριστικά των νανοσωματιδίων και η συμπεριφορά των πολυμερικών υλικών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ο τύπος πλήρωσης, το μέγεθος, η συμπύκνωση και η διασπορά του πληρωτικού μέσου κ.λπ. Με τη χρήση των παραπάνω τεχνικών μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις κρυσταλλογραφικές, τις μορφολογικές αλλά και τις θερμικές ιδιότητες ενός συνθέτου υλικού. Με τη χρήση τεχνικών όπως είναι οι ακτίνες X και η περίθλαση ακτίνων X (X-Ray Diffraction – XRD) μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την κρυσταλλικότητα του

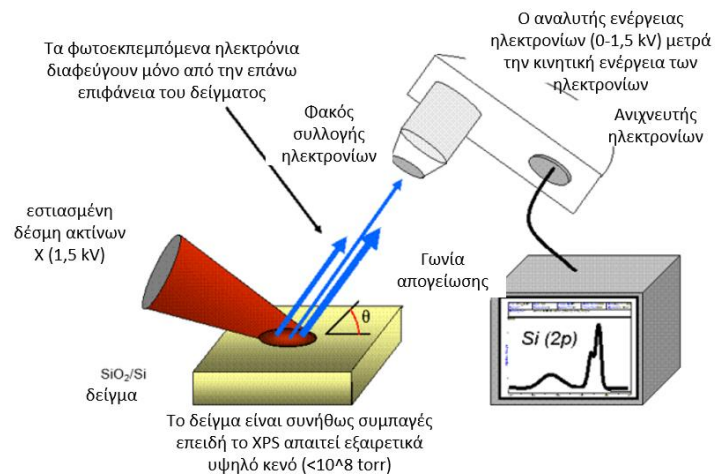


**Σχήμα 17:** Διαφορετικές φάσεις ενός νανοςύνθετου πολυμερούς a) άμορφη, b) ημικρυσταλλική και c) κρυσταλλική(89)



υλικού (στο Σχήμα 17) (58).

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της κρυσταλλικότητας ενός υλικού έχουν την εξής αρχή λειτουργίας. Υψηλής ενέργειας ακτινοβολία κατευθύνεται στην προς εξέταση επιφάνεια, όσο πιο μικρό μήκος κύματος έχει η ακτινοβολία τόσο υψηλότερης έντασης είναι, με συνέπεια να μεταφέρεται περισσότερη ενέργεια στο δείγμα. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας δεν ξεπερνά  $10^{-10}$  nm επομένως είναι της τάξεως των ακτίνων X. Οι ακτίνες X, ανήκουν σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο από ότι μπορεί να μεταφερθεί στα ηλεκτρόνια του δείγματος, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να ωθούνται εκτός του δείγματος. Κατευθύνονται προς τον ανιχνευτή, συγκρούονται με αυτόν, και ανάλογα με την ταχύτητα σύγκρουσης ο υπολογιστής αντιλαμβάνεται το ενεργειακό επίπεδο του καθενός. Έτσι, με δεδομένα πλέον τα ενεργειακά επίπεδα κάθε ηλεκτρονίου μπορεί ο υπολογιστής να αποτυπώνει τα κρυσταλλογραφικά γραφήματα (59).



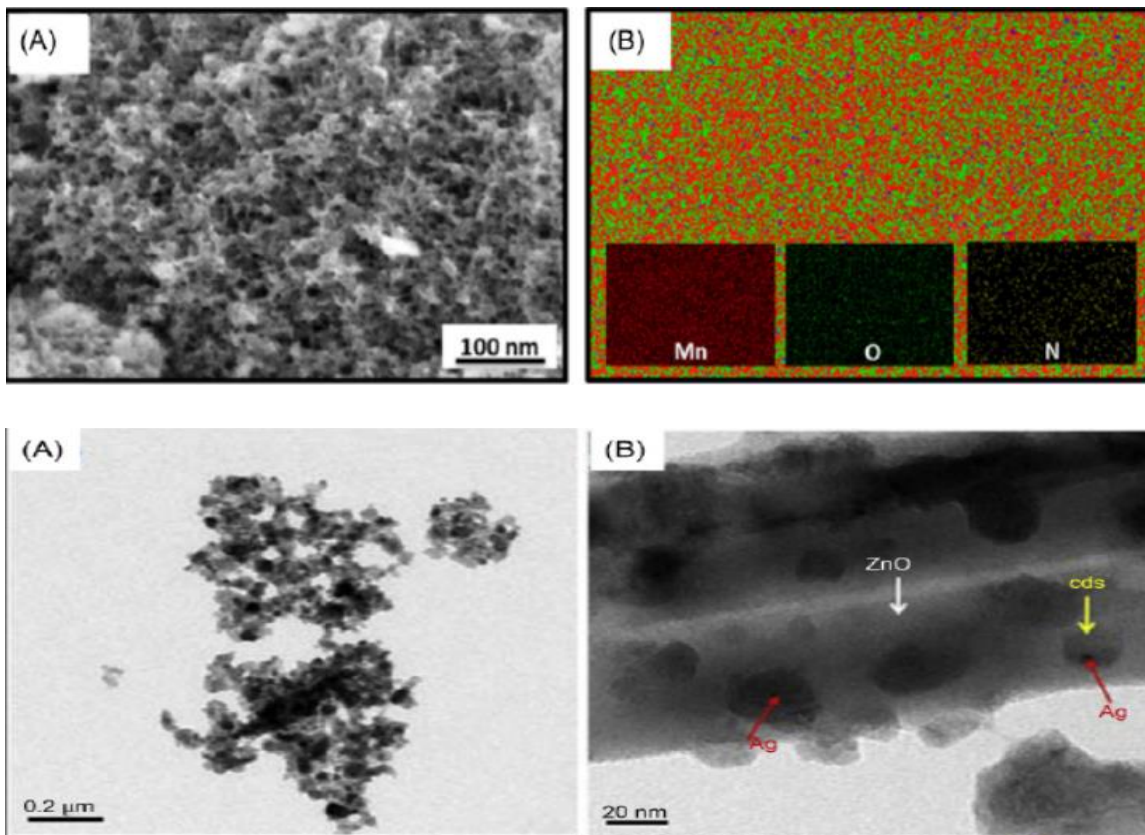
Σχήμα 18: Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της τεχνικής XPS (59).

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της μορφολογίας νανοσωματιδίων που ενσωματώνονται σε πολυμερικά υλικά, είναι :

- ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (scanning electron microscopy - SEM)
- ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης πηγής τύπου FEG (εκπομπής πεδίου) – (Field emission SEM-FESEM).
- μικροσκοπία ατομικής δύναμης (atomic force microscopy - AFM)
- μικροσκοπία σάρωσης σήραγγας (scanning tunneling microscopy - STM)
- ηλεκτρονική μικροσκοπία διέλευσης (transmission electron microscopy - TEM).

Τα χαρακτηριστικά που συνήθως αξιολογούνται είναι α) η διασπορά των νανοσωματιδίων στην πολυμερική μήτρα, β) η μεταβολή στη μορφολογία της επιφάνειας, γ) η στοιχειακή κατανομή και η χαρτογράφηση των νανοσωματιδίων.

Η τεχνική SEM χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση των μορφολογικών αλλαγών στην επιφάνεια του πολυμερούς και των χαρακτηριστικών αστοχίας. Η λειτουργία του SEM είναι πανομοιότυπη με αυτή του x-ray και XRD με τη διαφορά όμως ότι γίνεται χρήση δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί του φωτός (60). Η δέσμη αυτή δίνει τη δυνατότητα να εξετάζονται δείγματα σε λεπτομερή κλίμακα εξαιτίας της κυματοειδούς φύσης των ηλεκτρονίων. Ακόμη τα ηλεκτρόνια της δέσμης μπορούν να εστιάσουν σε πολύ μικρότερη επιφάνεια σε σχέση με την επιφάνεια που μπορούν να εστιάσουν τα φωτεινά κύματα(61). Συγκεκριμένα η δέσμη των ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος και αλληλοεπιδρά με αυτήν, με αποτέλεσμα να συλλέγονται πληροφορίες σε ότι αφορά τα άτομα των στοιχείων που αποτελούν το δείγμα.



Σχήμα 19: Χαρακτηριστικές εικόνες από την τεχνική SEM (57).

Τα νανοπληρωτικά μέσα (nanofillers) τείνουν να τροποποιήσουν την θερμική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών όταν αυτά χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά μέσα. Οι βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες των νανοσύνθετων οφείλονται στη υψηλή επιφάνεια διασύνδεσης με το πληρωτικό μέσο με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη και ομοιογενή διασπορά των νανοπληρωτικών μέσων.

Για τον χαρακτηρισμό των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού οι πιο διαδεδομένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι :

- Η δυναμική μηχανική ανάλυση (Dynamic Mechanical Analysis - DMA)
- Η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (Thermogravimetric Analysis - TGA)
- Η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry - DSC)

Παράγοντες όπως η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, ο υπολειπόμενος άνθρακας και η θερμοκρασία υποβάθμισης έναρξης και λήξης υπολογίζονται από τις παραπάνω τεχνικές δίνοντας πληροφορίες για τη θερμική σταθερότητα(58).

### 3.3.1. Ανάμιξη τήγματος

Η τεχνική της ανάμιξης τήγματος περιλαμβάνει την ανάμιξη του πολυμερούς με το πληρωτικό μέσο υπό καθεστώς υψηλών θερμοκρασιών. Πραγματοποιείται τήξη του πολυμερικού υλικού και ακολούθως εισαγωγή του πληρωτικού μέσου στο τήγμα. Ακολουθεί ταχύτατη ψύξη με στόχο την άμεσα στερεοποίηση του συνθέτου-πλέον-υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ανάμιξης της τεχνικής αυτής είναι ο συνδυασμός θερμοπλαστικού πολυμερούς (μήτρα) με νανοσωλήνες άνθρακα (πληρωτικό μέσο) (27,28). Αρχικά, το πολυμερές εισάγεται σε

θάλαμο μηχανικής ανάδευσης, όπου, με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας, μετατρέπεται σε τήγμα. Στη συνέχεια, οι νανοσωλήνες άνθρακα προστίθενται στο τήγμα του πολυμερούς. Εξαιτίας της ταχύτατης στερεοποίησης, το πληρωτικό μέσο εγκλωβίζεται στο εσωτερικό της μήτρας.

Ο βαθμός της διασποράς του πληρωτικού μέσου στη μήτρα εξαρτάται από την αναλογία αυτών, από την ταχύτητα ψύξης και κυρίως από τις διατμητικές δυνάμεις που ασκεί στο τήγμα το σύστημα ανάδευσης. Μια σημαντική και απαραίτητη προϋπόθεση για την μέθοδο ανάμιξης τήγματος, είναι η δυνατότητα ανάμιξης της μήτρας με το πληρωτικό μέσο. Ακόμη ένας σημαντικός περιορισμός αυτής της τεχνικής είναι η θερμική σταθερότητα του πληρωτικού μέσου και της μήτρας. Δεδομένου ότι απαιτείται υψηλή θερμοκρασία μπορεί να παρατηρηθεί μέχρι και η αποσύνθεση των υλικών ((27,28).

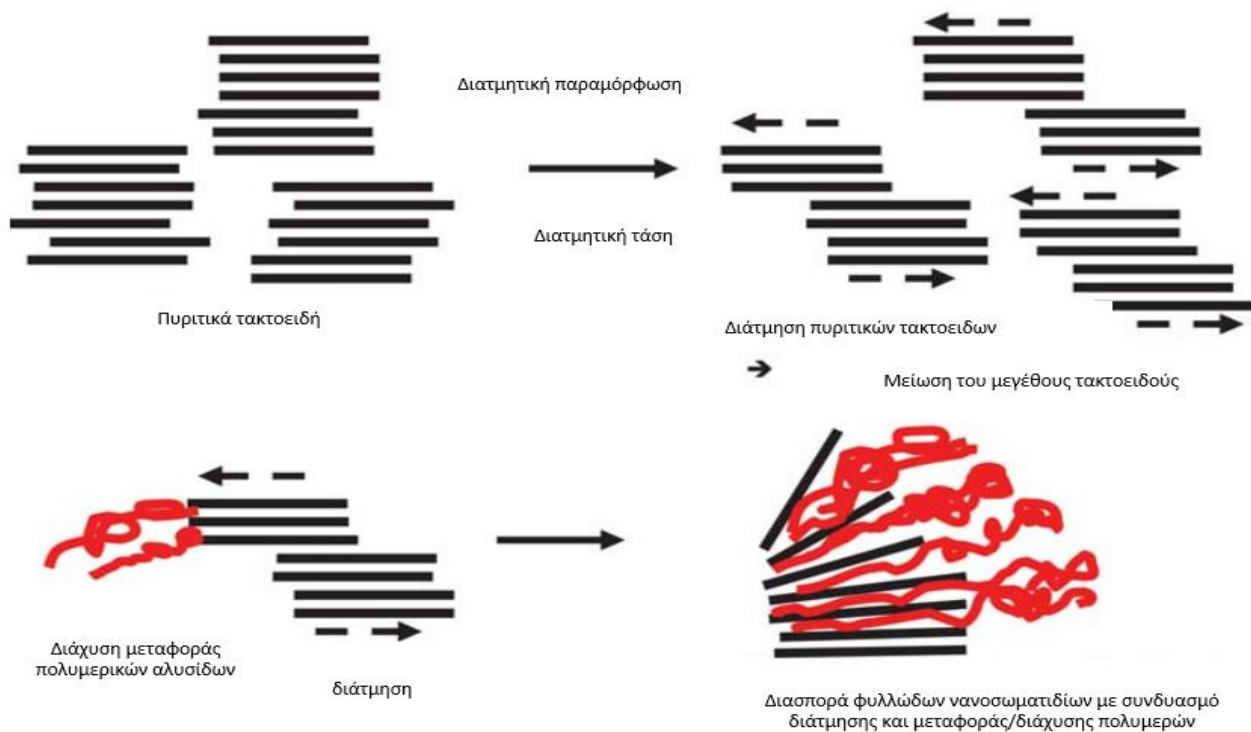
### 3.3.2. Μέθοδοι βελτιστοποίησης διασποράς νανοσωματιδίων

Η διασπορά των νανοσωματιδίων σε πολυμερικές μήτρες είναι μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις των επιστημόνων γύρω από την επιστήμη των νανოსύνθετων. Μερικές από τις πιο βασικές μεθόδους επίτευξης της διασποράς των νανοσωματιδίων σε πολυμερή συμπεριλαμβάνουν νανοσωματίδια με:

- Ασθενείς δυνάμεις έξω από τα μόρια τους (Van der Waals)
- Ιοντικές δυνάμεις
- Ομοιοπολικές δυνάμεις

Η χρήση επιφανειοδραστικών (surfactants) και πολυμερών που αλληλεπιδρούν με αδύναμες δυνάμεις με τα νανοσωματίδια, εφαρμόζεται στη διασπορά νανοσωματιδίων. Αυτή η μέθοδος διατηρεί πολλές από τις ελκυστικές ιδιότητες των νανοσωματιδίων και σε μερικές περιπτώσεις το σταθεροποιητικό πολυμερές μπορεί και να αφαιρεθεί μετά τη διασπορά(62).

Εκτός από τα φυσικά μείγματα των νανοσωματιδίων με πολυμερικές μήτρες, δυο ακόμα ενδιαφέρουσες τεχνικές ενίσχυσης της διασποράς και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της μήτρας και των νανοσωματιδίων είναι η «grafting to» στην οποία πολυμερικές αλυσίδες μπορούν να συνδεθούν στην επιφάνεια είτε με φυσική προσρόφηση είτε με χημική σύνδεση μέσω μιας δραστηκής ομάδας που φέρουν στο ένα άκρο σχηματίζοντας ομοιοπολικό δεσμό. Η δεύτερη μέθοδος είναι η «grafting from», όπου ο πολυμερισμός ξεκινάει από κατάλληλους απαρχηγές πολυμερισμού οι οποίοι έχουν συνδεθεί στην επιφάνεια(62) (63). Επιπλέον, παρά τα μειονεκτήματα που έχουν οι νανοσωλήνες άνθρακα στην έκθεση υπερήχων (πχ σύμπτυξη) εξαιρετικά δημοφιλής μέθοδος για την διασπορά αυτών έχει αποδειχθεί η χρήση υπερήχων (62). Η αρχή λειτουργίας των υπερήχων βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού υπερήχων (>20000 Hz) μέσα στο σύνθετο υλικό. Ο παλμός υπερήχων δημιουργείται με την εφαρμογή ενός παλμού υψηλής τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό δίσκο. Οι ανακλάσεις δονούν τον δίσκο ο οποίος τις μετατρέπει πάλι σε τάσεις. Κάθε επιφάνεια ανακλά μια ηχώ παλμού με πρώτη από όλες την επιφάνεια στην οποία εφάπτεται ο δίσκος και τελευταία την απέναντι επιφάνεια του σύνθετου.



Σχήμα 20: Χαρακτηριστική απεικόνιση διασποράς λόγω διάτμησης υλικού (62).

## Κεφάλαιο 4: Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής

### 4.1. Αρχή λειτουργίας

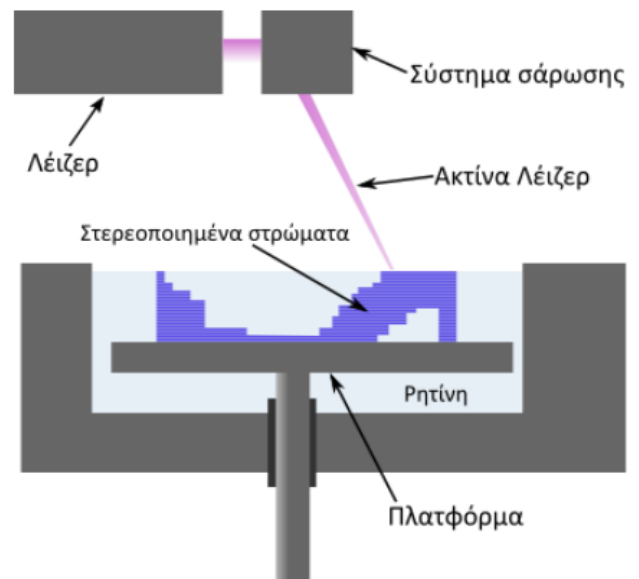
Με τον όρο προσθετική κατασκευή (additive manufacturing) ή τριδιάστατη (3D) εκτύπωση (3D Printing) περιγράφεται ένα σύνολο αυτοματοποιημένων διαδικασιών κατασκευής, οι οποίες μετατρέπουν ψηφιακά μοντέλα (Computer Aided Design – CAD) σε φυσικά αντικείμενα. Η προσθετική κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει ποικίλα υλικά, ανάλογα με τη μέθοδο εκτύπωσης που θα χρησιμοποιηθεί, κατασκευάζοντας στρώμα προς στρώμα (layer-by-layer) το φυσικό αντικείμενο. Η 3D εκτύπωση έχει μια ξεχωριστή φιλοσοφία κατασκευής (layer-by-layer) που επιτρέπει την ευελιξία κατασκευής περίπλοκων δομών, που είναι δύσκολο να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας συμβατικές κατασκευαστικές μεθόδους, όπως η χύτευση και η μηχανική κατεργασία. Η 3D εκτύπωση έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, διότι πετυχαίνει σε πολύ μικρό χρόνο, την λεπτομερή δημιουργία και απόκτηση ενός αντικειμένου που έχει σχεδιαστεί (CAD) μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (64).

### 4.2. Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

Ανάλογα την αρχή λειτουργίας, παρουσιάζεται μια πληθώρα τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πολυμερικών 3D δομών και συνοψίζονται στις εξής κατηγορίες: (α) στερεολιθογραφία, (β) επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ, (γ) κατασκευή με εναπόθεση συνδετικού υλικού και (δ) κατασκευή με εναπόθεση τήγματος υλικού. (65)

#### 4.2.1 Στερεολιθογραφία

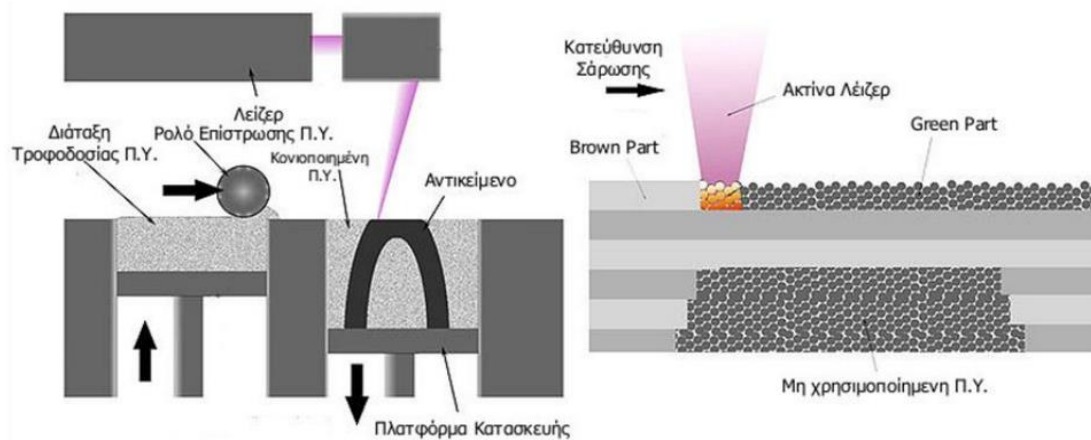
Η στερεολιθογραφία (Stereolithography – SLA) βασίζει τη λειτουργία της στη χρήση υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας για τον ελεγχόμενο πολυμερισμό ρευστών ρητινών. Οι πρώτες μελέτες παραγωγής 3D αντικειμένων με τη συγκεκριμένη τεχνική πραγματοποιήθηκαν από τον Kodama (1981) που ανέπτυξε δύο διαφορετικές τεχνικές. Η πρώτη περιλάμβανε τη χρήση μασκών για τον καθορισμό της δομής κάθε στρώσης, ενώ η δεύτερη τη χρήση οπτική ίνας για τον πολυμερισμό της ρευστής ρητίνης. Στην τελευταία περίπτωση κατέστη δυνατή η κατασκευή προκαθορισμένου μοτίβου με μετακίνηση της ίνας κατά τη διεύθυνση των αξόνων X και Y. Το 1986 ο Hull κατοχύρωσε την ευρεσιτεχνία με την ονομασία που είναι γνωστή σήμερα και τον ορισμό της «διαδικασίας κατασκευής 3D στερεών αντικειμένων με επάλληλες στρώσεις με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας» (65). Κατόπιν του πολυμερισμού μίας στρώσης, η πλατφόρμα εκτύπωσης χαμηλώνει σε ένα δεδομένο ύψος και εναποτίθεται η επόμενη στρώση ρητίνης επί της ήδη τοποθετημένης. Για την αποφυγή της αποκόλλησης των στρώσεων, ο πολυμερισμός που πραγματοποιείται στην καινούργια στρώση επικαλύπτει και ένα ποσοστό της προηγούμενης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί πλήρως το 3D αντικείμενο. (66)



Σχήμα 21: Λειτουργία της τεχνικής της Στερεολιθογραφίας. (65)

#### 4.2.2 Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ

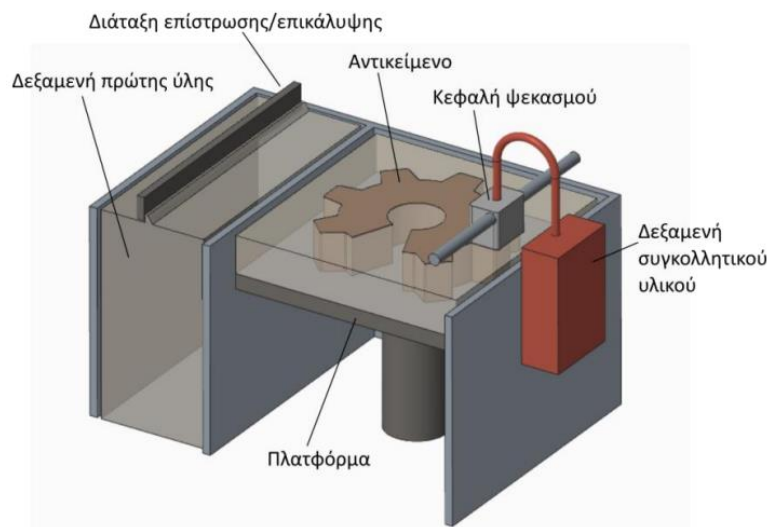
Η τεχνική της επιλεκτικής συσσωμάτωσης με λέιζερ (Selective Laser Sintering – SLS) αναπτύχθηκε από τον Deckard (1989). Η μέθοδος χρησιμοποιεί κυρίως πολυμερικά ή κεραμικά υλικά σε μορφή σκόνης που τήκονται από μία δέσμη λέιζερ υψηλής έντασης. Η σκόνη εναποτίθεται ομοιόμορφα επί της πλατφόρμας εκτύπωσης και η δέσμη λέιζερ σαρώνει επιλεκτικά την επιφάνεια, τήκοντας και συνδέοντας τους κόκκους του υλικού. Με τον τρόπο αυτό συντίθεται κάθε στρώση του 3D αντικείμενου (65). Μεταξύ των συνθέσεων κάθε στρώσης, η πλατφόρμα εκτύπωσης μετακινείται προς το κάτω, ένας κυλιόμενος κύλινδρος απλώνει την καινούργια στρώση σκόνης και η διαδικασία συσσωμάτωσης επαναλαμβάνεται. Η τελευταία, πραγματοποιείται με την κατάλληλη ένταση δέσμης ανάλογα τη σύσταση της σκόνης, ενώ πέραν της συνένωσης των κόκκων, περιλαμβάνει και τη σύνδεση των διαδοχικών στρώσεων. Οι περιοχές που δεν έχουν τηχθεί από τη δέσμη, δρουν υποστηρικτικά στην κατασκευή του τελικού 3D αντικείμενου. (67).



**Σχήμα 22:** Λειτουργία της τεχνικής με Επιλεκτική Συσσωμάτωση με χρήση λέιζερ. (65)

#### 4.2.3 Κατασκευή με Εναπόθεση Συνδεδετικού Υλικού

Η συγκεκριμένη τεχνική αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (Massachusetts Institute of Technology – MIT) στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και βασίζεται στην ελεγχόμενη εναπόθεση συνδεδετικού υλικού σε στρώση σκόνης με χρήση κεφαλής ψεκασμού (inkjet head). Κατόπιν εναπόθεσης του προαναφερθέντος υλικού, μία καινούργια στρώση σκόνης τοποθετείται επί της ήδη υπάρχουσας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Για να συμβεί αυτό, η πλατφόρμα εκτύπωσης χαμηλώνει κατά απόσταση ίση με το πάχος της στρώσης που εναποτίθεται. Τα τμήματα σκόνης που δεν έχουν συνδεθεί σε κάθε στρώση, λειτουργούν ως υποστήριξη για το υπό κατασκευή 3D αντικείμενο.

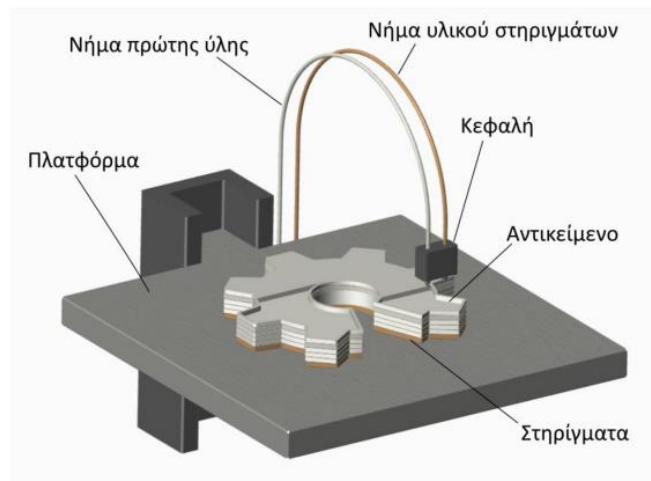


**Σχήμα 23:** Λειτουργία τεχνικής Κατασκευής με Εναπόθεση Συνδεδετικού Υλικού. (65)

Η διαδικασία προσθετικής κατασκευής επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκληρωτική κατασκευή του αντικείμενου (65) Ο υψηλός ρυθμός κατασκευής και η δυνατότητα παραγωγής προϊόντων μεγάλου μεγέθους, καθιστούν τη εν λόγω τεχνική ιδιαίτερα ελκυστική για βιομηχανικές εφαρμογές.

#### 4.2.4 Κατασκευή με Εναπόθεση Τήγματος Υλικού

Η κατασκευή με εναπόθεση υλικού (Fused Filament Fabrication – FFF), πρόκειται για τεχνική που αναπτύχθηκε εμπορικά από την εταιρία Stratasys® (1990) με στόχο την κατασκευή προτύπων. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην εξώθηση πολυμερικής φύσης υλικού υπό μορφή νήματος μέσω θερμαινόμενης κεφαλής. Συγκεκριμένα, εξωθείται θερμοπλαστικό πολυμερές σε ρευστή κατάσταση αφού πρώτα έχει θερμανθεί σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από την αντίστοιχη τήξης του. Το νήμα τροφοδοτείται στην κεφαλή με τη βοήθεια ενός ή περισσότερων τροχών και το τήγμα του εναποτίθεται συνεχώς επί της πλατφόρμας εκτύπωσης. Η κίνηση της κεφαλής και της πλατφόρμας εκτύπωσης, ρυθμίζονται από κατάλληλο λογισμικό ηλεκτρονικού υπολογιστή, το οποίο επιτρέπει την εναπόθεση του τήγματος με συγκεκριμένο μοτίβο. Μετά την κατασκευή κάθε στρώσης, η πλατφόρμα κινείται προς τα κάτω, ούτως ώστε να συνεχιστεί η διαδικασία με την κατασκευή την εναπόθεση της επόμενης στρώσης υλικού, έως την ολοκληρωτική κατασκευή του 3D αντικειμένου (65). **Βασικό πλεονέκτημα της εν λόγω τεχνικής** που την κάνει να ξεχωρίζει από τις προαναφερθείσες, είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης εναπόθεσης παραπάνω του ενός υλικών με χρήση διαφορετικών κεφαλών. Εξαιτίας αυτού, δύναται είτε η παρασκευή αντικειμένων με πολύ-λειτουργικά μέλη, είτε η εναπόθεση υποστηρικτικού υλικού που θα εξασφαλίζει τη σταθερότητα του υπό κατασκευή μοντέλου. (68)



Σχήμα 24: Λειτουργία τεχνικής Κατασκευής με Εναπόθεση Τήγματος Υλικού. (65)

### 4.3. Περιγραφή διαδικασίας 3D εκτύπωσης με την τεχνική FFF

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η κατασκευή μέσω εναπόθεσης τήγματος υλικού (FFF) βασίζεται στην τήξη της πρώτης ύλης (θερμοπλαστικό νήμα) για την μορφοποίηση και σύντηξη (fusion) των διαδοχικών εναποτιθέμενων στρώσεων που διαμορφώνουν την τελική 3D μορφή του αντικειμένου, καθώς και στην άμεση στερεοποίηση τους μόλις εναποτεθούν.

Η μέθοδος αυτή είναι συμβατή με αμιγώς θερμοπλαστικά υλικά και σύνθετα νήματα αποτελούμενα από θερμοπλαστική μήτρα και εγκλείσματα (π.χ. νανοϋλικά), που έχουν την επιθυμητή ρεολογική συμπεριφορά στην κατάσταση τήγματος και στερεοποιούνται καθώς ψύχονται, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητικά το σχήμα που τους έχει δοθεί. Ένας 3D εκτυπωτής τύπου FFF αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη:

1. Το κύριο σώμα
2. Την πλατφόρμα εκτύπωσης

3. Την κεφαλή εκτύπωσης
4. Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου

### **Κύριο σώμα της διάταξης του 3D εκτυπωτή**

Το κύριο σώμα του 3D εκτυπωτή λειτουργεί ως μέσο στήριξης και προστασίας των υπολοίπων μερών του. Αποτελείται από κάθετους άξονες στους οποίους έχει τοποθετηθεί ο μηχανισμός της κεφαλής και το καρούλι στο οποίο έχει τυλιχτεί η πρώτη ύλη της διαδικασίας σε μορφή νήματος (αποτελούμενο είτε αποκλειστικά από θερμοπλαστικό πολυμερές είτε από συνδυασμό πολυμερούς/πληρωτικών μέσων). Μέρος του κύριου σώματος της διάταξης είναι ο χώρος ψύξης, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την προστασία από την υπερθέρμανση του ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου και της θερμοκρασίας της κεφαλής.

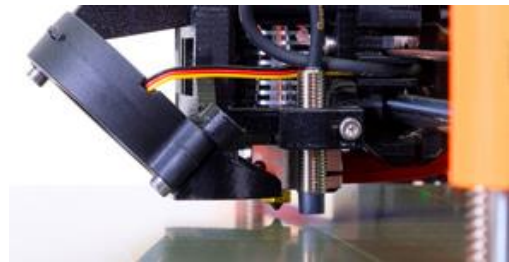
### **Πλατφόρμα 3D εκτύπωσης**

Η πλατφόρμα 3D εκτύπωσης είναι ο χώρος εργασίας του εκτυπωτή επί της οποίας εναποτίθεται κατά στρώσεις το υλικό μέχρι την ολοκληρωτική κατασκευή του φυσικού αντικειμένου. Η πλατφόρμα εκτύπωσης έχει τρία βασικά χαρακτηριστικά:

**Θερμαίνεται:** Η θέρμανση της πλατφόρμας πραγματοποιείται με τη χρήση θερμοστοιχείου και κρίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις (ανάλογα το υλικό) 3D εκτύπωσης απαραίτητη ώστε να ενισχυθεί η πρόσφυση του υλικού στην πλατφόρμα. Σε αντίθετη περίπτωση, το υπό κατασκευή 3D αντικείμενο μπορεί να αποκολληθεί μερικώς ή ολικώς, αλλοιώνοντας την ποιότητα εκτύπωσης.

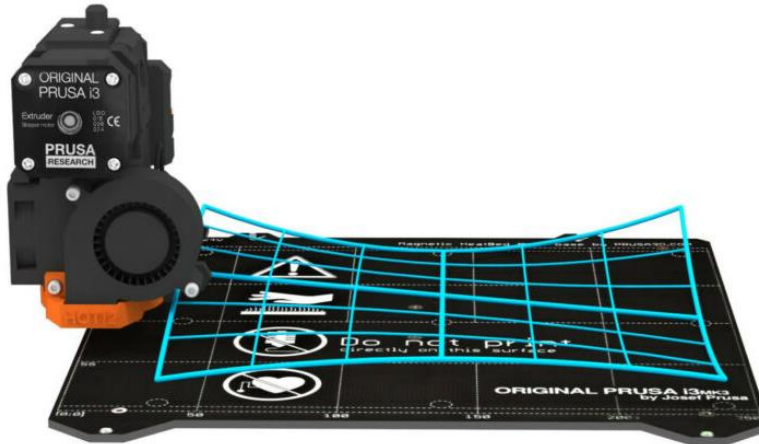
**Βαθμονομείται:** Η βαθμονόμηση (calibration) είναι μια διαδικασία κατά την οποία ρυθμίζεται η απόσταση του ακροφυσίου (nozzle) από την επιφάνεια εκτύπωσης. Η διαδικασία είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ομοιόμορφης πρόσφυσης της πρώτης στρώσης υλικού και την επιτυχή εναπόθεση των επομένων. Η βαθμονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε χειροκίνητα από τον χρήστη της διάταξης, είτε αυτοματοποιημένα από την ίδιο το σύστημα, είτε συνδυαστικά. Στην πρώτη περίπτωση η βαθμονόμηση γίνεται με τη χρήση ενός φύλλου χαρτιού, στις τέσσερις γωνίες της πλατφόρμας.

Το χαρτί τοποθετείται μεταξύ ακροφυσίου και επιφάνειας και η απόσταση ρυθμίζεται ώστε να μην υπάρχει κενό μεταξύ των τριών. Κατά την αυτοματοποιημένη βαθμονόμηση, το σύστημα 3D εκτύπωσης χρησιμοποιώντας κατάλληλο αισθητήρα, ρυθμίζει αυτόματα την απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και επιφάνειας εκτύπωσης. Ειδικότερα, η επιφάνεια εκτύπωσης «μετατρέπεται» σε ένα ψηφιακό πλέγμα στους κόμβους του οποίου πραγματοποιείται η βαθμονόμηση (mesh bed levelling). Συνδυαστικά, η βαθμονόμηση πραγματοποιείται σε δύο βήματα: (α) με προκαταρκτική ρύθμιση απόστασης μέσω του ψηφιακού πλέγματος (βλ. αυτοματοποιημένη βαθμονόμηση) και ακολούθως (β) με εκτύπωση δοκιμαστικού μοτίβου μίας στρώσης, κατά την οποία ο χρήστης ρυθμίζει επί τόπου την απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και επιφάνειας (first layer calibration). (69)



**Σχήμα 25:** Κεφαλή εκτύπωσης 3D εκτυπωτή Prusa MK3S και αισθητήρας βαθμονόμησης (69)





Σχήμα 26: Αυτοματοποιημένη βαθμονόμηση εκτύπωσης μέσω ψηφιακού πλέγματος (mesh bed leveling) (69).

Κινείται: αποκλειστικά κατά τη διεύθυνση ενός άξονα (είτε του Y, δηλαδή παράλληλα με το επίπεδο εναπόθεσης, είτε του Z, δηλαδή κάθετα στο επίπεδο εναπόθεσης). Στην περίπτωση που η πλατφόρμα εκτύπωσης κινείται κάθετα (Z-άξονα), κάθε φορά που η κεφαλή ολοκληρώνει την πλήρωση μιας στρώσης υλικού η πλατφόρμα κατεβαίνει στον άξονα Z ύψος μιας στρώσης. Αυτό γίνεται στους εκτυπωτές τους οποίους η κεφαλή δεν έχει τη δυνατότητα να κινηθεί στον άξονα Z. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν η κεφαλή εκτύπωσης κινείται κατά τον άξονα Z, τότε η ίδια μετατοπίζεται κατά ύψος μίας στρώσης μετά την ολοκλήρωση της προηγούμενης.

### Κεφαλή 3D εκτύπωσης

Η κεφαλή εκτύπωσης στηρίζεται σε έναν από τους κάθετους άξονες του κυρίου σώματος και έχει την δυνατότητα κίνησης στους άξονες X και Y και ανάλογα τον εκτυπωτή και στον Z. Αποτελείται από το σύστημα τροφοδοσίας του υλικού, την ψύκτρα (heatsink), την περιοχή τήξης (hotend) καθώς και ακροφύσιο (nozzle). Το σύστημα τροφοδοσίας υλικού δέχεται συμπαγή νήματα κυκλικής διατομής και καθορισμένης διαμέτρου (1.75 ή 2.85 mm) τα οποία προωθούνται μέσω του θαλάμου στον θάλαμο τήξης. Εκεί αναπτύσσονται θερμοκρασίες λίγο μεγαλύτερες από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού με σκοπό την πλήρη τήξη του. Από εκεί ασκώντας την απαραίτητη πίεση προωθείται το τήγμα στο ακροφύσιο και ακολούθως γίνεται η εξώθηση στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Η διάταξη της κεφαλής εκτύπωσης περιλαμβάνει και δύο εξωτερικά συστήματα ψύξης (ανεμιστήρες). Ο πρώτος βρίσκεται δίπλα Συμβατικοί (επιτραπέζιοι) 3D εκτυπωτές μπορούν να υποστηρίξουν θερμοκρασίες εξώθησης έως και 280 – 290 °C, καλύπτοντας έτσι ένα μεγάλο εύρος θερμοπλαστικών υλικών.



Σχήμα 27: Κεφαλή 3D εκτύπωσης (69)

### Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου

Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου είναι υπεύθυνο για όλες τις εντολές του εκτυπωτή. Συνδέεται με αισθητήρες θερμοκρασίας, τα κυκλώματα οδήγησης των βηματικών κινητήρων και το λογισμικό του εκτυπωτή. Στο λογισμικό αυτό γίνεται από τον χειριστή έλεγχος των παραμέτρων εκτύπωσης, οι οποίες κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης επιβλέπονται από το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου καθώς ο χειριστής δε μπορεί να επέμβει.

Ορισμένες παράμετροι οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω ρυθμίζονται από το λογισμικό και αφορούν την κίνηση της κεφαλής και της πλατφόρμας καθώς και την ρύθμιση της τροφοδοσίας του υλικού. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι εντολές που έχουν ορισθεί στο λογισμικό, πριν δοθούν ως εντολές προς εκτύπωση μεταφράζονται στη γλώσσα που «διαβάζει» ο εκτυπωτής, τον g-κώδικα.

**Αριθμός βημάτων κινητήρα ανά mm:** πρόκειται για τον αριθμό των βημάτων που εκτελούν οι βηματικοί κινητήρες των X,Y,Z αξόνων για την μετακίνηση της κεφαλής και της πλατφόρμας κατά 1mm, καθώς επίσης και ο βηματικός κινητήρας του συστήματος τροφοδοσίας για να μετακινήσει προς τον θάλαμο τήξης 1mm νήματος υλικού.

**Ταχύτητα εναπόθεσης πρώτης στρώσης (first layer speed):** πρόκειται για την ταχύτητα κίνησης της κεφαλής κατά την εναπόθεση της πρώτης στρώσης υλικού. Είναι ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την προσκόλληση του αντικειμένου με την πλατφόρμα εκτύπωσης. Συνήθως όσο πιο αργή είναι η ταχύτητα τόσο καλύτερη γίνεται και η προσκόλληση της πρώτης στρώσης στο bed.

**Ταχύτητα κίνησης κεφαλής (Travel speed):** αφορά την ταχύτητα η οποία αναπτύσσει η κεφαλή μεταξύ δυο σημείων στην οποία δεν γίνεται εξώθηση υλικού.

**Ταχύτητα κίνησης κεφαλής κατά την εναπόθεση του μοτίβου πλήρωσης (Infill speed):** πρόκειται για την ταχύτητα η οποία αναπτύσσει η κεφαλή για την επίστρωση του εσωτερικού μέρους του σώματος προς εκτύπωση.

**Ταχύτητα κίνησης κεφαλής κατά την εναπόθεση της περιμέτρου (Perimeter speed):** αφορά την ταχύτητα η οποία αναπτύσσει η κεφαλή κατά τη διάρκεια της επίστρωσης της περιμέτρου του σώματος προς εκτύπωση.

**Μοτίβο πλήρωσης (Infill pattern):** είναι το σχέδιο το οποίο επιλέγεται για να καλυφθεί μια στρώση υλικού.

**Υποστήριξη (support):** ανάλογα με το αντικείμενο εκτύπωσης, μπορεί να χρειαστεί υποστηρικτικό υλικό για την καλύτερη σταθεροποίηση του αντικειμένου κατά την διάρκεια της εκτύπωσης.

**Θερμοκρασία (temperature):** η θερμοκρασία τόσο στο θάλαμο τήξης όσο και στην πλατφόρμα εκτύπωσης όπως ήδη έχει αναφερθεί πρέπει να οριστεί συνυπολογίζοντας το υλικό πλήρωσης. Ο έλεγχος της γίνεται μέσω PID ρυθμιστών.

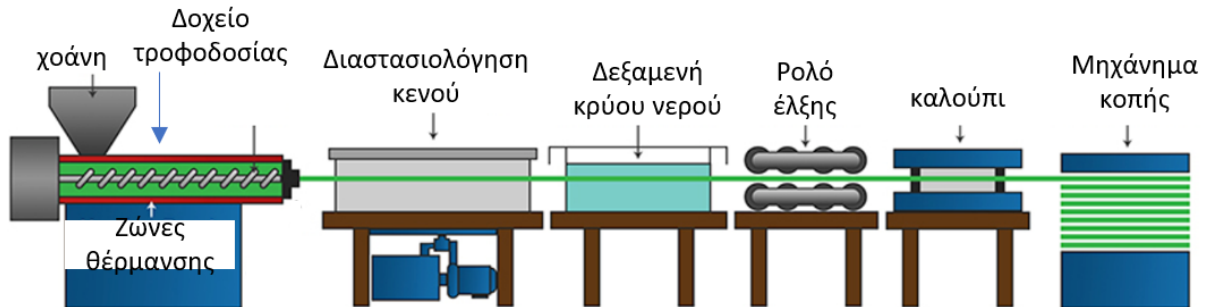
#### **4.4. Ποιοτικά χαρακτηριστικά υλικών FFF εκτύπωσης**

Στο γεγονός ότι η FFF εκτύπωση χρησιμοποιεί αποκλειστικά θερμοπλαστικά υλικά με ή χωρίς πρόσθετα οφείλονται το χαμηλό κόστος της εκτύπωσης, η εύκολη κατεργασία και μορφοποίηση της πρώτης ύλης, το χαμηλό σημείο τήξης της πρώτης ύλης, η δυνατότητα της ανακύκλωσης καθώς και το γεγονός ότι τα θερμοπλαστικά με πρόσθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες στα νανοσύνθετα υλικά.(70)

Τα θερμοπλαστικά υλικά για να είναι συμβατά με τον εκτυπωτή πρέπει πρώτα να περάσουν ένα αρχικό στάδιο μορφοποίησης. Τα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται είναι σε μορφή κόκκων (pellets) ή σκόνης (powder) και έχουν κατάλληλο δείκτη ροής τήγματος ώστε να μπορούν να μορφοποιηθούν μέσω εκβολής (extrusion). Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά της μορφοποίησης είναι:

- Η παραγωγή νήματος κυκλικής διατομής σταθερής διαμέτρου (είτε 1.75 mm είτε 2.85 mm ανάλογα το σύστημα 3D εκτύπωσης) με μικρή ανοχή  $\pm 0.05\text{mm}$ .
- Η ξήρανση και η αεροστεγής συσκευασία του παραγόμενου νήματος για την αποφυγή υγρασίας
- Η εύρεση σημείου τήξης του υλικού

Σε βιομηχανικό επίπεδο η παραγωγή και μορφοποίηση του θερμοπλαστικού νήματος γίνεται μέσω συστημάτων συνεχόμενης ροής και ο εξοπλισμός παραγωγής οργανώνεται χωροταξικά όπως στην παρακάτω εικόνα.



**Σχήμα 28:** Χωροταξική απεικόνιση βιομηχανικής παραγωγής της μορφοποίησης του θερμοπλαστικού υλικού (71).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 28, οι πρώτες ύλες τοποθετούνται σε ένα σύστημα ξηρής ανάμιξης και στη συνέχεια διοχετεύονται στον εκβολέα. Εκεί, μέσω της θέρμανσης και της ανάδευσης επιτυγχάνεται η ανάμιξη τους. Στη συνέχεια το τήγμα εξωθείται στη μήτρα εκβολής για να πραγματοποιηθεί η μορφοποίησή του. Μετά την έξοδο του από τη μήτρα το νήμα διέρχεται από δύο λουτρά ψύξης διαφορετικών θερμοκρασιών με σκοπό την σταθεροποίηση της διαμέτρου του και από ένα σύστημα ξήρανσης για την απομάκρυνση του νερού. Στο τελευταίο στάδιο το νήμα οδηγείται στο σύστημα τανισμού και περιέλιξης, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος.

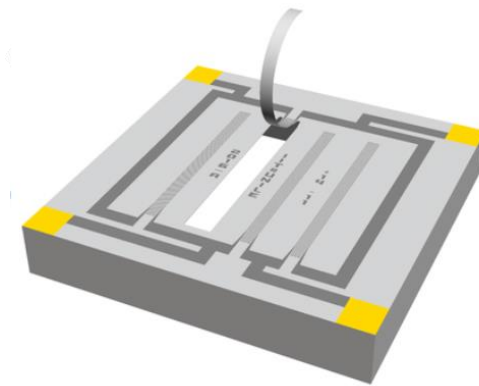
### Νανοςύνθετα Πολυμερικά Υλικά

Τα νανοςύνθετα πολυμερικά υλικά πρόκειται για υλικά με πολυμερική μήτρα και εγκλείσματα σε μορφή σωματιδίων με τουλάχιστον μία διάσταση στην κλίμακα των νανομέτρων (δηλ. 1-100 nm). Τα εγκλείσματα αποτελούν είτε μέσο ενίσχυσης των ήδη υπαρχουσών ιδιοτήτων της μήτρας, είτε μέσο δημιουργίας επιθυμητών χαρακτηριστικών. Η πολυμερική μήτρα μπορεί να είναι είτε θερμοπλαστική είτε θερμοσκληρυνόμενη, ενώ ως πρόσθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορων ειδών νανოსωματίδια με τις αλλοτροπικές μορφές άνθρακα (π.χ., νανοσωλήνες, γραφένιο) να συγκεντρώνουν το ερευνητικό ενδιαφέρον. Στις τεχνολογίες 3D εκτύπωσης, δύναται να χρησιμοποιηθούν τόσο τα θερμοπλαστικά όσο και τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, αναλόγως την αρχή λειτουργίας της εκάστοτε διάταξης.

## Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία ανάπτυξης αισθητήρων

### 5.1 CAD παραμετρικός σχεδιασμός

Με την ανάπτυξη των τεχνολογιών 3D εκτύπωσης, έχει επιτευχθεί ο στόχος της γρήγορης παραγωγής προϊόντων με μικρό κόστος σε ελάχιστο χρόνο συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους. Ωστόσο, σε πολλές εφαρμογές το κόστος και ο χρόνος δεν αποτελούν τα μόνα κριτήρια ενώ πολλές φορές η γεωμετρική και διαστατική ακρίβεια του αντικειμένου είναι μείζονος σημασίας. Η σχεδίαση της γεωμετρίας ενός αντικειμένου απαιτεί τη χρήση ενός σχεδιαστικού λογισμικού τύπου CAD (Computer-Aided Design). Σήμερα η σχεδίαση ενός προϊόντος γίνεται τρισδιάστατη και μπορούμε να μοντελοποιήσουμε το σκελετό, τις επιφάνειες, ή και ολόκληρο το στερεό. Βασικό πλεονέκτημα, είναι η δυνατότητα παραμετρικού σχεδιασμού. Αυτό σημαίνει, ότι είναι δυνατός ο ορισμός των διαστάσεων παραμετρικά, ώστε η μεταβλητή να ορίζεται από τον χρήστη, είτε αυτοδύναμα, είτε σε συνδυασμό με άλλες μεταβλητές.



Σχήμα 29: Μοντέλο CAD αισθητήρα (72).

### 5.2. Ανάπτυξη αγωγίμων διεπαφών και συνδεσμολογίας με σύστημα καταγραφής ηλεκτρικής αντίστασης

Ένας αισθητήρας παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μετατρέπει την μεταβολή της παραμόρφωσης που έχει υποστεί σε αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα. Για να γίνει αυτό, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ενός αγωγίμου δρόμου στον αισθητήρα ώστε μέσω αυτού να μεταφέρεται το σήμα. Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, οι παράμετροι σχεδιασμού κρίνονται σημαντικοί, αφενός για να εκτυπωθεί ο δρόμος με τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες αλλά και αφετέρου για να γίνει η απαραίτητη προσκόλληση του στο υπόστρωμα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο δρόμος από την στιγμή που πρέπει να είναι αγωγίμος αποτελείται από διαφορετικά υλικά σε σχέση με το υπόστρωμα επομένως απαιτείται αλλαγή των παραμέτρων σχεδιασμού, οι οποίες θα επηρεαστούν από τα υλικά που αποτελούν τον δρόμο, από τα υλικά που αποτελούν το υπόστρωμα και από τις ιδιότητες που απαιτούνται να έχει ο αισθητήρας.

Η αρχή λειτουργίας της μέτρησης του ηλεκτρικού σήματος ενός αισθητήρα παραμόρφωσης βασίζεται στην μεταβολή της απόστασης δύο σημείων του αγωγίμου δρόμου. Η μεταβολή αυτή δημιουργεί αλλαγή στο σήμα που λαμβάνεται, έτσι προκαλείται μια διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων η οποία έχει βαθμονομηθεί κατάλληλα.

Η μέτρηση του Gauge Factor (GF) μπορεί να οριστεί ως ο λόγος του σχετικού ρυθμού μεταβολής ηλεκτρικών σημάτων ως προς το αρχικό σήμα. Οι αισθητήρες συνήθως παρουσιάζουν μονοαξονική συμπεριφορά εφελκυσμού κατά τη μέτρηση τους, συνεπώς η παραγόμενη τάση μπορεί να οριστεί ως ο γραμμικός αξονικός ρυθμός των αισθητήρων μήκος, που φαίνονται στην εξίσωση (73)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5.1)$$

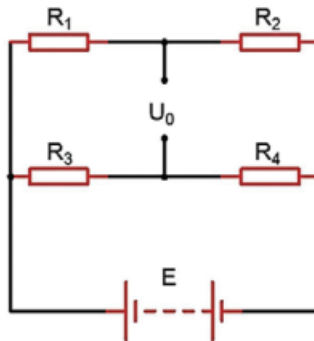
Όπου  $L_0$  και  $\Delta L$  είναι το αρχικό μήκος και η επιμήκυνση του αισθητήρα αντίστοιχα. Για αισθητήρες χωρητικής καταπόνησης παράλληλων πλακών η μέτρηση αντιστοιχεί (73)

$$GF = \frac{\Delta C}{\varepsilon C_0} = \frac{1 - \nu_e + \nu_d - \nu_e}{1 - \nu_d} \quad (5.2)$$

$$C = \frac{\varepsilon r S c}{4 \pi k d} \quad (5.3)$$

Όπου  $\Delta C$  είναι η μεταβολή της χωρητικότητας του αισθητήρα,  $\varepsilon$  είναι η τάση του αισθητήρα,  $C_0$  είναι η αρχική τιμή της χωρητικότητας του αισθητήρα,  $\nu_e$  και  $\nu_d$  είναι ο λόγος Poisson των ηλεκτροδίων και των διηλεκτρικών στρωμάτων αντίστοιχα. Το  $S c$  είναι η αντικριστή περιοχή μεταξύ των δύο πλακών,  $d$  είναι το πάχος του διηλεκτρικού στρώματος,  $\varepsilon r$  είναι η σχετική διαπερατότητα των διηλεκτρικών και το  $k$  ορίζεται ως η σταθερά Coulomb.

Γενικά ο στόχος είναι οι αποκρίσεις στο ηλεκτρικό σήμα που οφείλονται στην παραμόρφωση του κυκλώματος να ενισχυθούν και να μετατραπούν σε τάση (voltage). Κυκλώματα γέφυρας με υψηλή ευαισθησία, ακρίβεια και σταθερότητα μπορούν να μετατρέψουν ηλεκτρικές αποκρίσεις σε τάσεις, τα οποία βέβαια έχουν αναπτυχθεί ως ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κυκλώματα σε αισθητήρες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2<sup>α</sup> η ένταση  $E$  και οι αντιστάσεις  $R_1$ - $R_4$  είναι συνεχούς ρεύματος (DC). Η τάση εξόδου  $U_0$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (73).



Σχήμα 30: Κύκλωμα γέφυρας (73).

Η τάση εξόδου  $U_0$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση. (73)

$$U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \quad (5.4)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι μια ισορροπημένη γέφυρα μπορεί να ληφθεί αν  $E \neq 0$  και  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ . Όταν  $R_3$  και  $R_4$  έχουν ορισθεί με μια συγκεκριμένη τιμή  $R$ , ενώ το  $R_1$  είναι  $R + \Delta R$  ως απόκριση σε θετική τάση ενώ το  $R_2$

είναι R-ΔR ως απόκριση σε αρνητική τάση. Η διαφορική γέφυρα μπορεί να ορισθεί από την παρακάτω εξίσωση(73)

$$U_d = \frac{E\Delta R}{2R} \quad (5.5)$$

### 5.3 Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments)

Ο σχεδιασμός πειραμάτων (Design of Experiments – DOE) πρόκειται για μια διαδικασία συλλογής, οργάνωσης και επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων, με στόχο τη βελτίωση των διεργασιών με τον πιο αποδοτικό τρόπο.

#### 5.3.1 Πλήρης Παραγοντικός Σχεδιασμός

Η μέθοδος της πλήρους παραγοντοποίησης απαιτεί την εκτέλεση όλων των πιθανών συνδυασμών σε ένα πείραμα. Δηλαδή, στην περίπτωση που εξετάζονται m αριθμός παραγόντων, ο καθένας από τους οποίους παίρνει L διαφορετικές τιμές (έχει L επίπεδα), θα πρέπει να γίνουν συνολικά  $N=L^m$  επαναλήψεις. Ο αριθμός των επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό αυξάνεται γεωμετρικά με την αύξηση των παραγόντων ή των επιπέδων τους. Ενώ η μέθοδος εκτιμάται ως η αποτελεσματικότερη από την άποψη του όγκου των δεδομένων και των πληροφοριών που συλλέγονται, από την άποψη της δαπάνης και της απαίτησης του χρόνου συνήθως προτιμάται μόνο στις περιπτώσεις που ερευνάται η επίδραση λίγων παραγόντων (74).

#### 5.3.2 Κλασματικός Παραγοντικός Σχεδιασμός

Όταν ο αριθμός των επαναλήψεων του πειράματος σε έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό είναι μεγάλος, μπορεί να εξετασθεί μόνο ένα τμήμα/κλάσμα του παραγοντικού σχεδιασμού χωρίς όμως να χάνονται σημαντικές πληροφορίες. Το τμήμα/κλάσμα των συνδυασμών δεν επιλέγεται τυχαία, αλλά με τη βοήθεια κανόνων και στατιστικών πινάκων που έχουν αναπτυχθεί ακριβώς για αυτόν το σκοπό. Μια από τις δημοφιλέστερες μεθόδους κλασματικής παραγοντοποίησης είναι η λεγόμενη μέθοδος Taguchi(74).

#### 5.3.3 Μέθοδος Taguchi

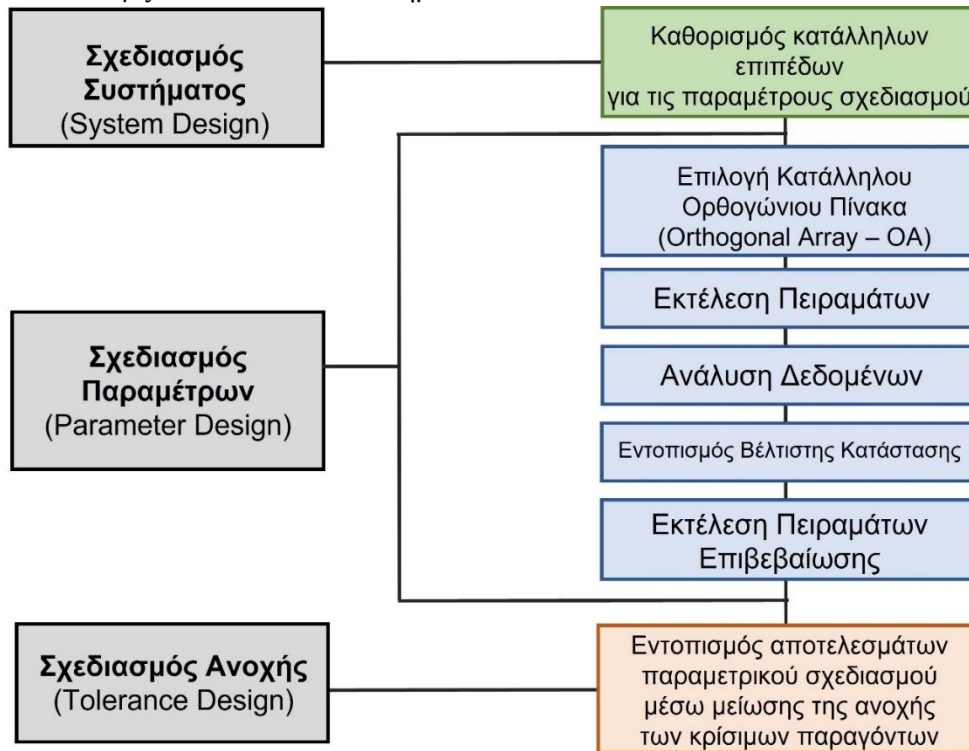
Η μέθοδος σχεδιασμού Taguchi αναπτύχθηκε από τον Δρ. Genich Taguchi, είναι ένα σύνολο μεθοδολογιών με τις οποίες έχει ληφθεί υπόψη στο σχεδιαστικό κομμάτι η εγγενής μεταβλητότητα των υλικών και η κατασκευαστική διαδικασία(74).

Ο Taguchi ορίζει την ποιότητα ενός προϊόντος ως την απώλεια που μεταβιβάζεται στην κοινωνία από την στιγμή που της αποστέλλεται το προϊόν. Ορισμένες από τις απώλειες αυτές οφείλονται στην απόκλιση μιας σχεδιαστικής παραμέτρου από την τιμή στόχο της παραμέτρου αυτής. Η απόκλιση αυτή οφείλεται σε δυο είδη παραγόντων, τους ελεγχόμενους και τους μη ελεγχόμενους. Οι ελεγχόμενοι παράγοντες είναι αυτοί που ρυθμίζονται από τον πειραματιστή ενώ οι μη ελεγχόμενοι παράγοντες ή παράγοντες θορύβου (noise factors) είναι πηγές διασποράς που συνδέονται συνήθως με το περιβάλλον της παραγωγής ή της λειτουργίας. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί να είναι η υγρασία, η θερμοκρασία, τα ανθρώπινα λάθη κ.α.(74)

Η μέθοδος Taguchi είναι μια τεχνική σχεδιασμού πειραμάτων, η οποία είναι πολύ χρήσιμη στον περιορισμό των πειραμάτων χρησιμοποιώντας ορθογώνιους πίνακες και προσπαθώντας να περιορίσει τις επιδράσεις των παραγόντων εκτός ελέγχου. Η βασική φιλοσοφία αυτής της μεθόδου είναι να διασφαλίσει την ποιότητα στη φάση σχεδιασμού. Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου Taguchi είναι η μείωση του χρόνου των πειραμάτων, η μείωση του κόστους και η διαπίστωση των σημαντικών παραγόντων σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Η φιλοσοφία του Taguchi βασίζεται σε τρεις απλές αρχές:

1. Η ποιότητα πρέπει να σχεδιάζεται από πριν στο προϊόν και όχι να ελέγχεται με την κατασκευή του.
2. Η ποιότητα επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας την απόκλιση από μια τιμή στόχο και το προϊόν πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από μη ελεγχόμενους παράγοντες.
3. Το κόστος της ποιότητας πρέπει να μετράτε σαν συνάρτηση της απόκλισης από το στόχο και οι ζημιές πρέπει να υπολογίζονται σε όλο το σύστημα.



Σχήμα 31: Περιγραφική απεικόνιση φιλοσοφίας Taguchi.

### Ορθογώνιοι Πίνακες

Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί ορθογώνιους πίνακες (orthogonal arrays) για το σχεδιασμό των πειραμάτων. Η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στον παρακάτω πίνακα περιγράφει τον έλεγχο επτά παραγόντων δύο επιπέδων σε οκτώ πειραματικές δοκιμές. Η εκτέλεση του αντίστοιχου πλήρους παραγοντικού πειράματος θα απαιτούσε  $2^7$  ή 128 δοκιμές χωρίς απαραίτητα να δώσει σημαντικά μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών. Κάθε γραμμή του παραπάνω πίνακα αντιστοιχεί σε μια πειραματική δοκιμή, ενώ τα νούμερα στο εσωτερικό του αντιστοιχούν στα διαφορετικά επίπεδα του εκάστοτε παράγοντα. Αυτός ο πίνακας που χαρακτηρίζεται από το σύμβολο L8 χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό πειραμάτων που περιλαμβάνουν έως και επτά παράγοντες δύο επιπέδων. Οι διαφορετικοί παράγοντες σημειώνονται με γράμματα (A-G) στο πάνω μέρος του πίνακα. Κάθε στήλη περιέχει τέσσερις συνθήκες επιπέδου (level) 1 και τέσσερις επιπέδου 2. Οι στήλες όλων των ορθογώνιων πινάκων είναι ισορροπημένες με δυο τρόπους. Πρώτων οι στήλες είναι ισορροπημένες εσωτερικά τους έτσι ώστε όλες να έχουν ίσο αριθμό επιπέδων του κάθε παράγοντα. Δεύτερον οι στήλες είναι ισορροπημένες μεταξύ οποιονδήποτε δυο στηλών έτσι ώστε συνολικά να αποτελούν ίσο αριθμό πιθανών συνδυασμών. Ο Taguchi έχει δημιουργήσει 18 βασικούς ορθογώνιους πίνακες που ονομάζονται πρότυποι ορθογώνιοι πίνακες (standard

orthogonal arrays) οι περισσότεροι από τους οποίους μπορούν να βρεθούν και σε ελαφρώς διαφοροποιημένες μορφές.(75)

TRIAL \ FACTOR	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

**Σχήμα 32:** Παράδειγμα ορθογώνιων πινάκων Taguchi όπου περιλαμβάνονται 8 δοκιμές (trials) και 7 παράγοντες (factor). Κάθε παράγοντας ελέγχεται για δύο τιμές (1 και 2). (74)

### Βαθμοί Ελευθερίας

Η επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα είναι βασικό στοιχείο του επιτυχημένου σχεδιασμού πειραμάτων και συνδέεται άμεσα με τους συνολικούς βαθμούς ελευθερίας (Degrees of Freedom – DoF). Οι βαθμοί ελευθερίας ορίζονται ως ο αριθμός των συγκρίσεων μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού οι οποίοι είναι αναγκαίοι να γίνουν, ούτως ώστε να προσδιοριστεί ποιο επίπεδο είναι καλύτερο και πόσο καλύτερο είναι.

Γενικά ο βαθμός ελευθερίας μιας παραμέτρου είναι ένας μικρότερος από τον αριθμό των επιπέδων του, για παράδειγμα ένας παράγοντας με 3 επίπεδα έχει βαθμό ελευθερίας  $3-1=2$ . Προκειμένου να επιλεγθεί ο κατάλληλος ορθογώνιος πίνακας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο αριθμός των γραμμών του πίνακα δηλαδή ο αριθμός των πειραμάτων προς εκτέλεση θα πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος των συνολικών βαθμών ελευθερίας. Επιπλέον, για να επιλέξουμε τον κατάλληλο ορθογώνιο πίνακα, πρέπει να είμαστε σε θέση να ταιριάξουμε τον αριθμό των επιπέδων των παραγόντων με τον αριθμό των επιπέδων των στηλών του πίνακα. Καθώς η διεξαγωγή των πειραμάτων συνήθως είναι χρονοβόρα και ακριβή, προτιμώνται οι μικρότεροι δυνατοί πίνακες που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις.(74)

### Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (Signal to noise ratio)

Ο λόγος S/N σήματος (signal) προς θόρυβο (noise) είναι ένα μέτρο το οποίο μετράει το πόσο επηρεάζουν το πείραμα οι εσωτερικοί παράγοντες σε σχέση με τους εξωτερικούς. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος αυτός τόσο μικρότερη είναι η διακύμανση του προϊόντος γύρω από την ονομαστική τιμή (τιμή στόχο). Μια υψηλή τιμή του λόγου S/N υποδηλώνει ότι το σήμα είναι πολύ μεγαλύτερο από τις τυχαίες επιδράσεις των παραγόντων θορύβου. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες χαρακτηριστικών ποιότητας για την ανάλυση του λόγου S/N.

- όσο μικρότερο τόσο καλύτερο (smaller the better)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} (\sum y^2) \quad (5.6)$$

- όσο μεγαλύτερο τόσο καλύτερο (larger the better)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left( \sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (5.7)$$

- το ονομαστικό είναι το καλύτερο (nominal is best)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left( \frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (5.8)$$



όπου  $\bar{y}$  ο μέσος όρος των παρατηρήσεων,  $s_y^2$  η διακύμανση του  $y$ ,  $n$  ο αριθμός των παρατηρήσεων και  $y$  τα παρατηρούμενα δεδομένα ή ο κάθε τύπος χαρακτηριστικού. Η απόκλιση μεταξύ πειραματικών και επιθυμητών τιμών ορίζεται ως συνάρτηση απώλειας (loss function). Η συνάρτηση απώλειας μετατρέπεται περαιτέρω σε λόγο S/N.(74)

### Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Στη μέθοδο Taguchi τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναλύονται για να επιτευχθούν ένας ή περισσότεροι από τους παρακάτω σκοπούς:

1. Εύρεση της βέλτιστης κατάστασης ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας, δηλαδή οι τιμές (επίπεδα) των παραγόντων που οδηγούν στην βέλτιστη απόκριση.
2. Εκτίμηση της συνεισφοράς του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα.
3. Πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος υπό τις βέλτιστες συνθήκες.

Ως απόκριση (response) ορίζεται η τιμή του μετρούμενου μεγέθους με τη λήξη του πειράματος. Το μετρούμενο μέγεθος ή τα μετρούμενα μεγέθη (συχνά αναφερόμενα και ως ποιοτικά χαρακτηριστικά, quality characteristics) έχουν καθοριστεί κατά το σχεδιασμό του πειράματος και εκφράζουν πόσο καλά ένα προϊόν ή μια διεργασία ανταποκρίνεται στους στόχους που έχουν οριστεί κατά τον πειραματικό σχεδιασμό. Ανάλογα με τη φύση του κάθε ποιοτικού χαρακτηριστικού, ο πειραματιστής μπορεί να επιθυμεί την μεγιστοποίηση του, την ελαχιστοποίηση του ή όσο γίνεται την μικρότερη απόκλιση του από μια συγκεκριμένη τιμή. Η βέλτιστη κατάσταση ανιχνεύεται μελετώντας την κύρια επίδραση του κάθε παράγοντα, η οποία ισούται με τη διαφορά της μέσης απόδοσης των επιπέδων του. Ως μέση απόδοση του επιπέδου ενός παράγοντα ορίζεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων για το μετρήσιμο μέγεθος στις δοκιμές που ο εν λόγω παράγοντας εμφανίστηκε στο συγκεκριμένο επίπεδο.

Για να καθοριστεί η επί τοις εκατό συνεισφορά του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα, συνήθως χρησιμοποιείται η στατιστική μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης (Analysis of Variance, ANOVA). Η ανάλυση ANOVA ανιχνεύει διαφορές στη μέση απόδοση των ομάδων των αντικειμένων που εξετάζονται, αναλύοντας τη συνολική μεταβολή στις πηγές της. Ο κύριος στόχος της ANOVA είναι να εξαγάγει από τα αποτελέσματα τη μεταβολή που προκαλεί ο κάθε παράγοντας σε σχέση με τη συνολική μεταβολή που παρατηρείται στο αποτέλεσμα. Επίσης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της σημαντικότητας (significance) όλων των κύριων παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων τους, συγκρίνοντας το μέσο τετράγωνο με μία εκτίμηση των πειραματικών σφαλμάτων σε συγκεκριμένα επίπεδα εμπιστοσύνης (confidence levels). Μέσω της ανάλυσης διακύμανσης και του ποσοστού επιρροής του κάθε παράγοντα μπορεί να αποφασιστεί ποιοι από αυτούς μπορούν να απομακρυνθούν. Ως εκ τούτου θα μειωθούν οι παράγοντες, ο συνολικός χρόνος και το κόστος των πειραμάτων.(75,76)

### Πείραμα επιβεβαίωσης

Σε πολλές περιπτώσεις τυχαίνει ο συνδυασμός παραμέτρων που προτείνει η ανάλυση Taguchi να είναι ένας από τα ήδη εκτελεσμένα πειράματα. Ωστόσο στην περίπτωση που ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων δεν βρίσκεται στον πίνακα Taguchi, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα επιβεβαίωσης (confirmation run). Η τιμή του τελευταίου πειράματος μπορεί να εκτιμηθεί θεωρητικά χρησιμοποιώντας τις παρακάτω μεταβλητές ((77)

1.  $T$ = το άθροισμα όλων των S/N
2.  $N$ = ο αριθμός των αποκρίσεων
3.  $A$ = μικρότερος λόγος S/N της μεταβλητής A
4.  $B$ = μικρότερος λόγος S/N της μεταβλητής B

5. C= μικρότερος λόγος S/N της μεταβλητής C

$$Y_{opt} = \frac{T}{N} + \left(A - \frac{T}{N}\right) + \left(B - \frac{T}{N}\right) + \left(C - \frac{T}{N}\right) \quad (5.9)$$

Η διαδικασία του πειράματος επιβεβαίωσης θεωρείται αναγκαίο και σημαντικό βήμα της μεθόδου Taguchi το οποίο επιβεβαιώνει τις υποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Η απόκριση του πειράματος επιβεβαίωσης δεν είναι αναγκαίο να ταυτίζεται με την εκτιμώμενη βέλτιστη απόκριση αλλά πρέπει να ανήκει σε ένα εύρος τιμών που ορίζεται από την εκτιμώμενη βέλτιστη απόκριση και τον συντελεστή διόρθωσης (correction factor). Οι δυο τιμές αυτές ορίζουν το διάστημα εμπιστοσύνης.

Για να υπολογιστεί ο συντελεστής διόρθωσης πρέπει να υπολογιστούν πρώτα οι παρακάτω μεταβλητές

Το άθροισμα των τετραγώνων, S, που αποτελεί το μέτρο της απόκλισης των πειραματικών δεδομένων από τη μέση τιμή των δεδομένων και υπολογίζεται από τον τύπο

$$S = \sum_1^n (Y_i - Y)^2 \quad (5.10)$$

όπου  $Y_i$  είναι η μέση τιμή του  $Y$

Ο βαθμός ελευθερίας της κάθε παραμέτρου, DOF, ο οποίος ισούται με ένα λιγότερο από τον συνολικό αριθμό των επιπέδων.

Η διακύμανση (variance), V, η οποία μετρά την κατανομή των δεδομένων σχετικά με τον μέσο όρο τους.

$$V = \frac{S}{DOF} \quad (5.11)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης (Confidence Factor, C.F.) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C.F. = \sqrt{\frac{F(f_1, f_2) * V_e}{N_e}} \quad (5.12)$$

Όπου

$F(f_1, f_2)$  είναι μια σταθερά η τιμή της οποίας υπολογίζεται με βάση τους βαθμούς ελευθερίας του σφάλματος και τον συντελεστή εμπιστοσύνης.

$V_e$  είναι η διακύμανση του σφάλματος

$N_e$  είναι ο λόγος των αριθμών των πειραμάτων προς το άθροισμα των βαθμών ελευθερίας των παραγόντων συν 1.

Το διάστημα εμπιστοσύνης (Confidence Interval) ορίζεται ως το εύρος τιμών:

$$(Y_{opt} - C.F., Y_{opt} + C.F.) \quad (5.13)$$

#### 5.3.4 Πειραματικός Σχεδιασμός σε εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής

Οι Zhenxue Zhang et al σε έρευνα τους σχετικά με τη δυνατότητα επεξεργασίας 3D εκτύπωσης μιας θερμικά αγωγίμης ένωσης που βασίζεται σε θερμοπλαστικό πολυαμίδιο τροποποιημένο με νανοπληρωτικό άνθρακα, μελετήθηκε η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μορφολογία του δείγματος. Από τα αποτελέσματα αυτά επιλέχθηκε ο βέλτιστος παραμετρικός σχεδιασμός της 3D εκτύπωσης. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων που ακολουθήθηκε ήταν ο πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός. Πρώτα όμως πραγματοποιήθηκε μια πειραματική εκτύπωση με nozzle diameter 0,4 0,6 και με 0,8 mm αντίστοιχα, για να εκτιμηθεί με ποια διάμετρο πραγματοποιείται καλύτερη εκβολή. Αφού επιλέχθηκε η διάμετρος 0.8 προχώρησαν στον πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό. Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν είναι η θερμοκρασία της μήτρας με 7 επίπεδα από τους 240 έως τους 280 βαθμούς celsius, η ταχύτητα εκτύπωσης από τα 20 έως 60 mm/sec, το strand height (layer height) από 0.15

εώς 0.6 mm και στο strand width (layer width) από 0.80 με βήμα 0.05 έως 1.10. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μεταβλητές και τα εύρη που επιλέχθηκαν.(78)

**Πίνακας 4:** Παράμετροι και τα επίπεδα που επιλέχθηκαν από τους Zhang Z et al. (78)

Factors/levels	1	2	3	4	5	6	7
Temperature nozzle	240	247	253	260	267	273	280
Printing speed	20	33	47	60	-	-	-
Strand height	0.15	0.22	0.30	0.37	0.45	0.52	0.60
Strand width	0.80	0.85	0.90	0.95	1	1.05	1.10
Extrusion multiplier	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
Retraction speed	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9

Ενώ οι Sood et al στην έρευνα τους για την βελτίωση της διαστατικής ακρίβειας 3D εκτύπωσης για τον σχεδιασμό των πειραμάτων χρησιμοποίησαν κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό και πιο συγκεκριμένα την μέθοδο Taguchi. Βασιζόμενοι σε άλλες έρευνες (7,9-11) που ανέδειξαν ότι η ποιότητα του προϊόντος εξαρτάται από μερικές πρωταρχικές παραμέτρους δημιούργησαν τον παρακάτω πίνακα Taguchi.(79)

**Πίνακας 5:** Παράμετροι και τα επίπεδα που επιλέχθηκαν από τους Sood AK et al (79)

Factors/levels	1	2	3
Layer thickness (mm)	0.127	0.178	0.254
Orientation (degrees)	0	15	30
Raster angle (degrees)	0	30	60
Raster width (mm)	0.4064	0.4564	0.5064
Air gap (mm)	0	0.004	0.008

Για την καλύτερη κατανόηση του παραπάνω πίνακα ορίζονται οι παρακάτω έννοιες: Orientation: είναι ο προσανατολισμός του δείγματος στην πλατφόρμα εκτύπωσης, Raster angle: γωνία πλέγματος, Raster width: πλάτος γραμμών πλέγματος, Air gap : είναι το διάκενο μεταξύ των γραμμών πλέγματος. Οι Lokesh et al μελέτησαν την επίδραση εκτυπωτικών παραμέτρων όπως το ύψος στρώσης, ο προσανατολισμός του δείγματος και η γωνία ράστερ ως προς τις μηχανικές ιδιότητες που δίνουν στο δείγμα υλικού PLA. Για τον σχεδιασμό των πειραμάτων χρησιμοποίησαν τον ορθογώνιο πίνακα Taguchi L9 με τρία level στην κάθε παράμετρο όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.(80)

**Πίνακας 6:** Σχεδιασμός πειραμάτων των Lokesh N et al. (80)

Δείγμα	Ύψος Στρώσης (mm)	Raster angle (°)	Κατεύθυνση Κατασκευής (°)
1	0.1	30	0
2	0.2	30	45
3	0.3	30	90
4	0.1	45	0
5	0.2	45	45
6	0.3	45	90
7	0.1	60	0

<b>8</b>	0.2	60	45
<b>9</b>	0.3	60	90

Οι Sharma et all στην έρευνα τους προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν την διαδικασία παραμετροποίησης μια 3D εκτύπωσης ως προς την διαστατική της ακρίβεια. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων βασίστηκε στον ορθογώνιο πίνακα L9 του Taguchi με μεταβλητές τα layer height, raster angle, nozzle temperature και την πίεση στο πάχος. Κάθε παράμετρος είχε τρία επίπεδα όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. (81)

**Πίνακας 7:** Σχεδιασμός πειραμάτων των Sharma K et all. (81)

<b>Ύψος στρώσης (mm)</b>	0.1	0.15	0.2
<b>Γωνία raster (°)</b>	0	45	95
<b>Θερμοκρασία ακροφυσίου (°C)</b>	200	210	220
<b>Περιβάλλουσα πίεση (psi)</b>	0	50	100

Πραγματοποιήθηκαν οι 9 εκτυπώσεις σύμφωνα με τον L9 ορθογώνιο πίνακα και μετρώντας τις αποκρίσεις του κάθε δοκιμίου από την ονομαστική τους τιμή υπολόγισαν τον λόγο S/N. Πραγματοποιώντας την ανάλυση Taguchi, παρατηρήθηκε ότι η μικρότερη θερμοκρασία και το μικρότερο ύψος στρώσης ευνοούν την διαστατική ακρίβεια των εκτυπώσεων τους. Με την ανάλυση ANOVA συνέλλεξαν δεδομένα όπως την ποσοστιαία συνεισφορά της κάθε παραμέτρου, το διάστημα εμπιστοσύνης (δηλαδή το θεωρητικό σφάλμα) και την προβλεπόμενη βέλτιστη τιμή απόκρισης του πλάτους αν ακολουθηθεί η παραμετροποίηση που προτείνει η μέθοδος Taguchi. Οι ερευνητές προχώρησαν κάνοντας την προτεινόμενη παραμετροποίηση επιβεβαιώνοντας τις προβλέψεις και το διάστημα εμπιστοσύνης.

Σε άλλη έρευνα οι Hikwat et all., βασιζόμενοι στη μέθοδο Taguchi για τον σχεδιασμό των πειραμάτων ερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες σωματιδίων PLA κατασκευασμένα από 3D εκτυπωτή. Μελέτησαν 7 μεταβλητές εκ των οποίων οι έξι είχαν 3 επίπεδα και η μία είχε 2 επίπεδα, δημιουργώντας έτσι, ένα L18 ορθογώνιο πίνακα Taguchi. Καταγράφοντας τις μέσες τιμές της αντοχής σε εφελκυσμό κάθε πειράματος, υπολόγισαν τον αντίστοιχο λόγο σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio, S/N). Στη συνέχεια με την ανάλυση Taguchi βρέθηκε ο βέλτιστος προτεινόμενος συνδυασμός των επιπέδων των παραμέτρων για την βέλτιστη απόκριση της τιμής της αντοχής σε εφελκυσμό. Με την ανάλυση ANOVA υπολόγισαν το διάστημα εμπιστοσύνης και την βέλτιστη τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό. (82)

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

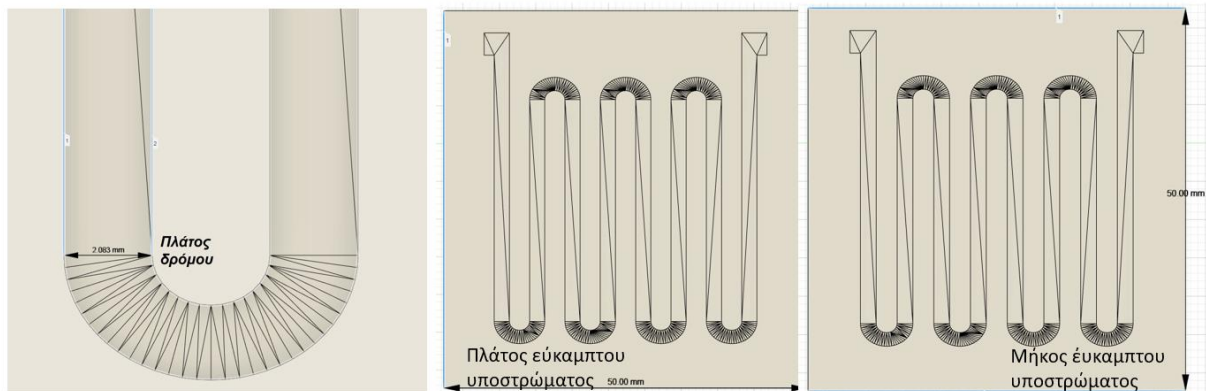
### Κεφάλαιο 6: Σχεδιασμός Διάταξης Πιεζοαντιστατικού Αισθητήρα

#### 6.1 Σχεδιασμός πιεζοαντιστατικού (piezoresistive) αισθητήρα

Η διάταξη του αισθητήρα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία, αποτελείται από δύο διακριτές περιοχές: α) την περιοχή του εύκαμπτου υποστρώματος (flexible substrate) και β) την περιοχή του αγώγιμου δρόμου (conductive path). Βάσει αυτού, επιλέχθηκαν τα κατάλληλα θερμοπλαστικά νήματα για την εκάστοτε περιοχή. Συγκεκριμένα το CR-TPU (Crealty®) επιλέχθηκε για την κατασκευή του υποστρώματος και το Eel (NinjaTek®) για τη μελέτη του αγώγιμου δρόμου.

##### 6.1.1. Σχεδιασμός Εύκαμπτου Υποστρώματος (Substrate)

Για την περιοχή του εύκαμπτου υποστρώματος σχεδιάστηκε στο λογισμικό Fusion 360 το παρακάτω σχέδιο.



Σχήμα 33: Σχεδιασμός του υποστρώματος του αισθητήρα μέσω του λογισμικού Autodesk Fusion 360.

##### Παραμετρικός Σχεδιασμός Taguchi για την 3D εκτύπωση του υποστρώματος

Κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης βρέθηκε ότι οι Nirmal Garg et al. (83) στο σχεδιασμό των πειραμάτων τους για την μελέτη της διαστατικής ακρίβειας της 3D εκτύπωσης TPU έλαβαν υπόψιν τους τρεις παραμέτρους το ύψος στρώσης με 5 επίπεδα από 0.10-0.30mm, την ταχύτητα εκτύπωσης με 5 επίπεδα από 10-50 mm/sec και την πυκνότητα του TPU με 5 επίπεδα από 40-100%. Ακόμη οι Tarun Bhardwaj et al. (84) στην έρευνα τους για την διαστατική ακρίβεια της 3d εκτύπωσης του TPU ο σχεδιασμός των πειραμάτων τους βασίστηκε σε 3 παράγοντες, την θερμοκρασία του ακροφυσίου με 3 επίπεδα 200,220,240 την θερμοκρασία της πλατφόρμας 45,55,65 και το ύψος στρώσης 0,2 0,3 0,4. Ενώ οι Vidakis et al. βάσισαν την έρευνα τους για την εκτυπωσιμότητα του TPU και τις μηχανικές του ιδιότητες στις παραμέτρους θερμοκρασία του ακροφυσίου με τρία επίπεδα 205-215 και ύψος στρώσεις με 3 επίπεδα 0.15-0.25 (85). Με βάση την βιβλιογραφία εντοπίστηκαν οι κατασκευαστικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διαστατική ακρίβεια της 3D εκτύπωσης του εύκαμπτου υποστρώματος. Ειδικότερα, αυτές είναι: α) η θερμοκρασία ακροφυσίου (nozzle temperature), β) το ύψος στρώσης (layer height) και γ) η ταχύτητα εκτύπωσης (printing speed). Για τη μελέτη των εν λόγω παραμέτρων μέσω του πειραματικού σχεδιασμού Taguchi, ορίστηκαν 3 επίπεδα (levels) για κάθε παράμετρο, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

**Πίνακας 8:** Οι παράμετροι και τα επίπεδα που επιλέχθηκαν για τη μελέτη του εύκαμπτου υποστρώματος.

Επίπεδα Μελέτης	Θερμοκρασία ακροφυσίου (°C)	Ύψος στρώσης (mm)	Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/s)
Επίπεδο 1	210	0.2	20
Επίπεδο 2	215	0.25	30
Επίπεδο 3	220	0.3	40

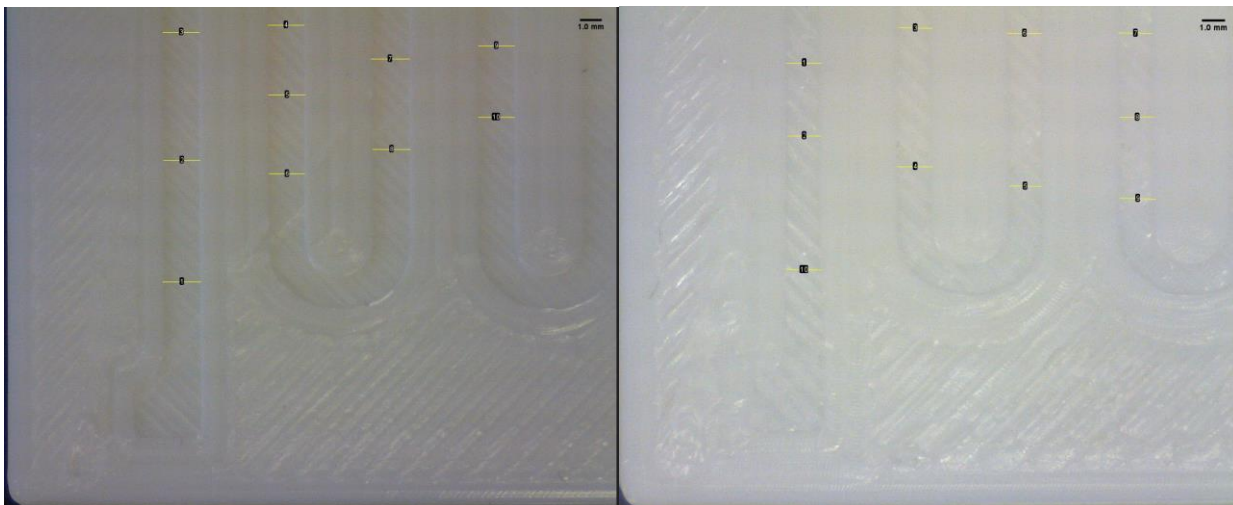
Μέσω του προγράμματος λογισμικού Minitab®, καταρτίστηκε ο πειραματικός σχεδιασμός Taguchi, μέσω της δημιουργίας ορθογώνιων πινάκων L9. Ειδικότερα, ορίστηκαν 9 πειράματα 3D εκτύπωσης για ακροφύσιο διαμέτρου 0.6 mm και 9 πειράματα για ακροφύσιο διαμέτρου 0.8 mm. Δεδομένου ότι οι σταθερές παράμετροι δεν επηρεάζουν τον τρόπο δημιουργίας των ορθογώνιων πινάκων, τα 9 πειράματα 3D εκτύπωσης είναι όμοια για τα δύο είδη ακροφυσίων.

**Πίνακας 9:** Σχεδιασμός των πειραμάτων 3D εκτύπωσης για την περίπτωση του υποστρώματος

Πείραμα	Θερμοκρασία ακροφυσίου (°C)	Ύψος στρώσης (mm)	Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/s)
1	210	0.20	20
2	215	0.20	30
3	220	0.20	40
4	210	0.25	30
5	215	0.25	40
6	220	0.25	20
7	210	0.30	40
8	215	0.30	20
9	220	0.30	30

#### Μελέτη Αποκρίσεων των 3D εκτυπωμένων δειγμάτων υποστρώματος

Τα 3D εκτυπωμένα δείγματα μελετήθηκαν ως προς τη διαστατική τους ακρίβεια συγκριτικά με τα αντίστοιχα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, όπως αυτά ορίστηκαν κατά τον CAD σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν το μήκος (length) και το πλάτος (width) του υποστρώματος και το πλάτος της τάφρου (trench width). Για τις μετρήσεις του μήκος και του πλάτος του υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε παχύμετρο, ενώ το πλάτος της τάφρου μελετήθηκε μέσω του λογισμικού imageJ, κατόπιν λήψης των κατάλληλων φωτογραφιών. Όσο αφορά στο τελευταίο, σε κάθε μέτρηση μετρήθηκε το πλάτος σε οχτώ σημεία, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων και καταγράφηκε η απόκλιση του από την ονομαστική τιμή που ορίστηκε κατά τον CAD σχεδιασμό.



**Σχήμα 34:** α φωτογραφία μέτρησης υποστρώματος εκτύπωσης 2 από τις 9 με διάμετρο ακροφυσίου 0.6mm, β φωτογραφία μέτρησης υποστρώματος εκτύπωσης 6 από τις 9 με διάμετρο ακροφυσίου 0.8mm

Για το μήκος και το πλάτος του υποστρώματος, ομοίως, καταγράφηκε η απόκλιση τους από τις αντίστοιχες ονομαστικές.



**Σχήμα 35:** Μέτρηση υποστρώματος με το παχύμετρο

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στους Πίνακες 10 και 11 για τα ακροφύσια 0.6 mm και 0.8 mm αντίστοιχα.

**Πίνακας 10:** Οι αποκρίσεις των πειραμάτων για διάμετρο ακροφυσίου 0.6mm

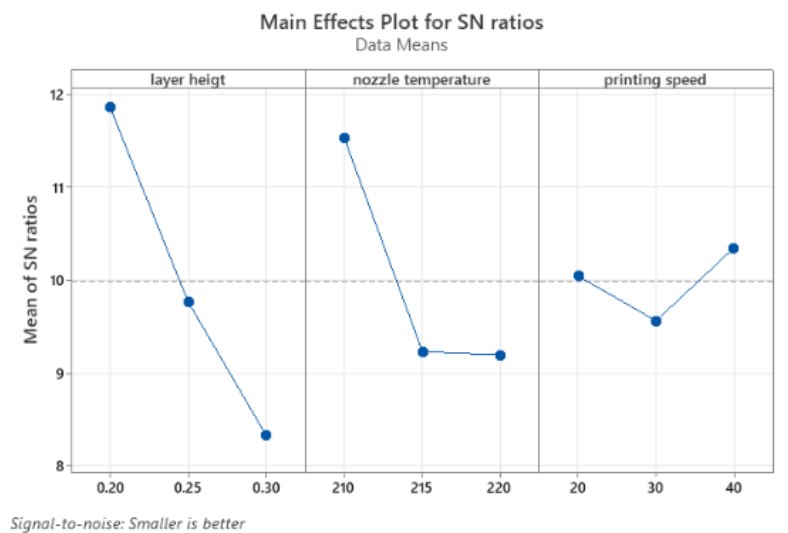
Απόκλιση πλάτους τάφρου (mm)	Απόκλιση μήκους (mm)	Απόκλιση πλάτους (mm)	S/N (dB)
0,2258	0,04	0,05	17,3608
0,3147	0,07	0,06	14,4557
0,5913	0,07	0,09	9,1765
0,4612	0,08	0,06	11,2939
0,4390	0,09	0,10	11,5321
0,4509	0,05	0,06	11,5612
0,5112	0,04	0,07	10,4927
0,4234	0,07	0,06	12,0350
0,5112	0,08	0,06	10,4363

**Πίνακας 11:** Οι αποκρίσεις των πειραμάτων για διάμετρο ακροφυσίου 0.8mm

Απόκλιση πλάτους τάφρου (mm)	Απόκλιση μήκους (mm)	Απόκλιση πλάτους (mm)	S/N (dB)
0,3895	0,06	0,03	12,8341
0,469	0,09	0,04	11,1603
0,4384	0,1	0,08	11,5782
0,4807	0,07	0,02	11,0352
0,584	0,16	0,18	8,7609
0,5199	0,17	0,19	9,5169
0,4785	0,01	0,16	10,7116
0,6964	0,09	0,08	7,7861
0,7827	0,19	0,15	6,5026

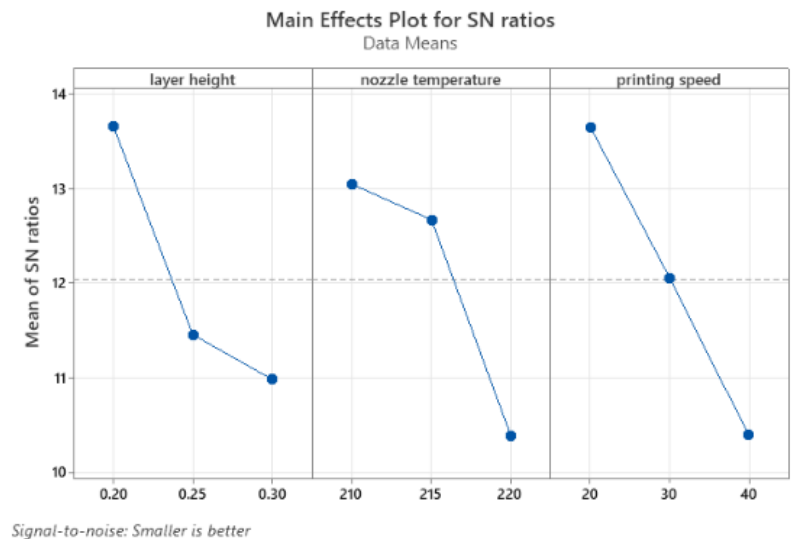
### 6.1.2. Ανάλυση Παραμετρικού Σχεδιασμού Taguchi για το υπόστρωμα

Με βάση την ανάλυση Taguchi η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Minitab®, εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για τις τιμές των παραμέτρων.



**Σχήμα 36:** Ανάλυση Taguchi για ακροφύσιο διαμέτρου 0.6 mm.





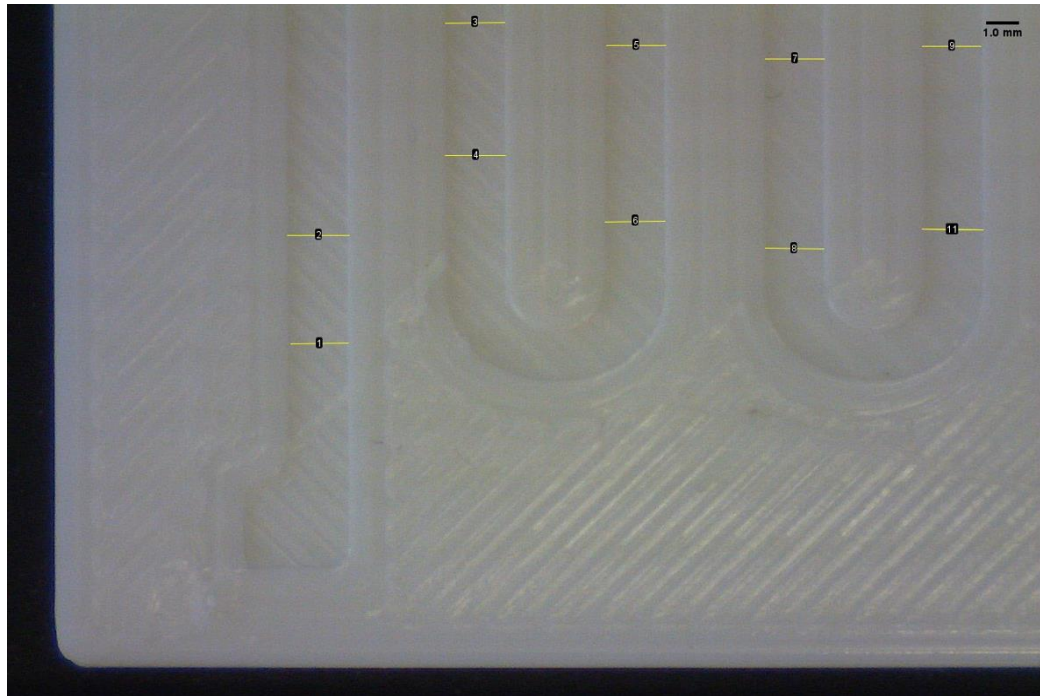
**Σχήμα 37:** Ανάλυση Taguchi για ακροφύσιο διαμέτρου 0.8 mm.

Με βάση τις τιμές των λόγων σήματος προς θόρυβο (S/N) για την κάθε περίπτωση, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι βέλτιστες συνθήκες 3D εκτύπωσης ως προς την διαστατική ακρίβεια είναι α) 0.20 mm | 210 °C | 20 mm/s και β) 0.20 mm | 210 °C | 40 mm/s για τα ακροφύσια 0.6 mm και 0.8 mm αντίστοιχα (Πίνακας 12).

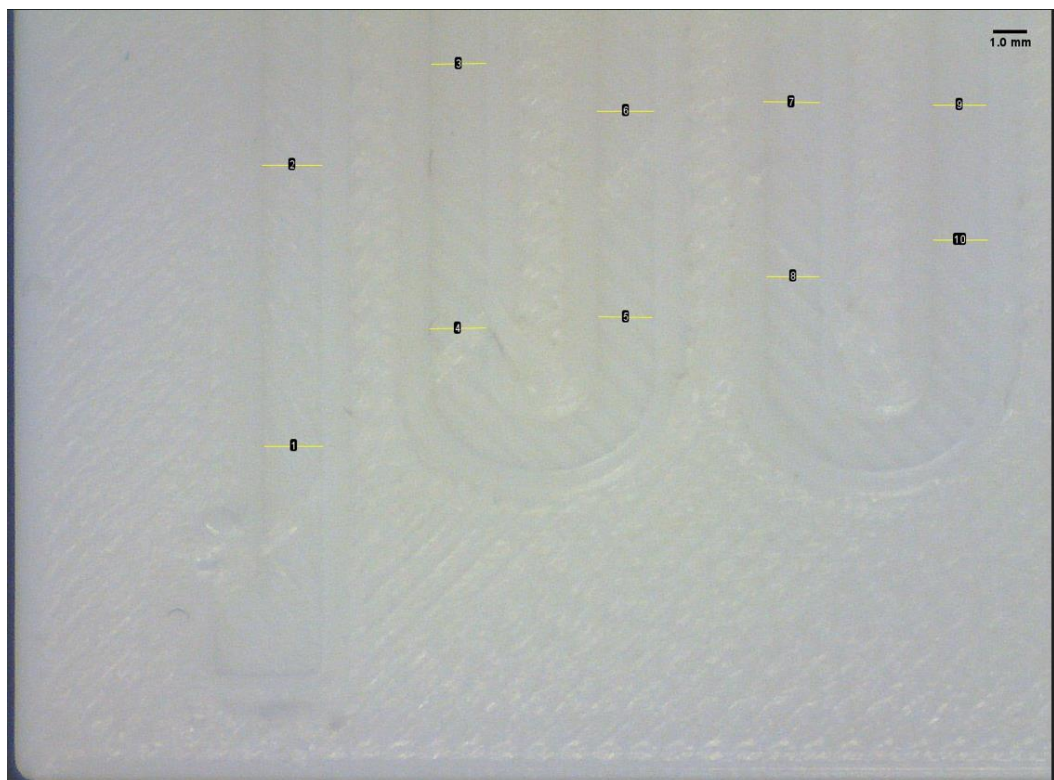
**Πίνακας 12:** Βέλτιστος παραμετρικός συνδυασμός που προτείνει η ανάλυση Taguchi για τις δύο περιπτώσεις ακροφυσίων.

Διάμετρος (mm)	Ύψος στρώσης (mm)	Θερμοκρασία ακροφυσίου (°C)	Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/s)
<b>0.6</b>	0.20	210	20
<b>0.8</b>	0.20	210	40

Όσον αφορά τις 3D εκτυπώσεις με ακροφύσιο 0.6mm, ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων που προτείνει η ανάλυση Taguchi, είναι ένα από τα πειράματα που ήδη έχουν γίνει και πράγματι χαρακτηρίζεται από τον υψηλότερο λόγο S/N. Σχετικά με τις 3D εκτυπώσεις με ακροφύσιο 0.8mm από τη στιγμή που ο προτεινόμενος συνδυασμός παραμέτρων δεν ταυτίζεται με κάποιο από τα ήδη εκτελεσμένα πειράματα, πρέπει να εκτελεστεί το πείραμα (3D εκτύπωση) επιβεβαίωσης με χρήση των προτεινόμενων παραμέτρων. Αφού μετρήθηκαν οι αποκρίσεις του πειράματος επιβεβαίωσης με την προτεινόμενη παραμετροποίηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 13 τα αποτελέσματα.



**Σχήμα 38:** Μετρήσεις πειράματος επιβεβαίωσης με διάμετρο ακροφυσίου 0.6 mm.



**Σχήμα 39:** Μετρήσεις πειράματος επιβεβαίωσης με διάμετρο ακροφυσίου 0.8 mm.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα απόκρισης της 3D εκτύπωσης επιβεβαίωσης.

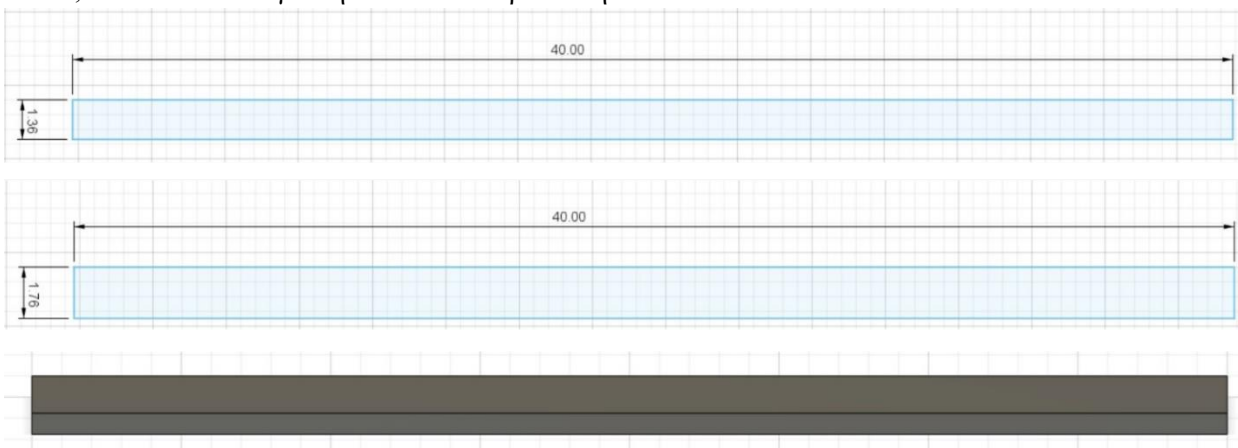
Απόκλιση πλάτους τάφρου (mm)	Απόκλιση μήκους (mm)	Απόκλιση πλάτους (mm)	S/N (dB)
0,3642	0,07	0,03	13,3585

### 6.1.2. Σχεδιασμός Αγωγίμου Δρόμου (Conductive Path)

Ο σχεδιασμός του αγωγίμου δρόμου χωρίστηκε σε δύο επιμέρους ενότητες. Αρχικά σχεδιάστηκαν δείγματα απλής γεωμετρίας και περιορισμένου μεγέθους ώστε να γίνει άμεσα και οικονομικά η μελέτη των παραμέτρων σχεδιασμού μέσω εκτέλεσης των κατάλληλων πειραμάτων όπως αυτά θα ορίζονταν από τη μέθοδο Taguchi. Ακολούθως, σχεδιάστηκε ο αγωγίμος δρόμος ο οποίος και θα εκτυπωνόταν μαζί με το υπόστρωμα του πιεζοαντιστατικού αισθητήρα.

#### Σχεδιασμός δειγμάτων απλής γεωμετρίας

Μέσω του προγράμματος Autodesk Fusion 360 σχεδιάστηκαν δείγματα ορθογώνιας διατομής και μήκους 40 mm. Το πλάτος και το ύψος καθορίστηκαν με βάση τις συνθήκες εκτύπωσης ώστε να μην υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ του ψηφιακού αρχείου και του αντίστοιχου που προκύπτει, κατόπιν παραμετροποίησης της διαδικασίας εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, το πλάτος ορίστηκε ως το διπλάσιο του πλάτους εξώθησης (extrusion width) το οποίο με τη σειρά του καθορίζεται από το ακροφύσιο του εκτυπωτή. Δεδομένου ότι για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν ακροφύσια διαμέτρου 0.6 mm και 0.8 mm, τα αντίστοιχα πλάτη εξώθησης ορίστηκαν 0.68 mm και 0.88 mm αντίστοιχα. Επομένως, το πλάτος των δειγμάτων ορίστηκε 1.36 mm και 1.76 mm για την εκάστοτε περίπτωση. Όσο αφορά στο ύψος, καθορίστηκε με βάση τα ύψη στρώσης που μελετήθηκαν, δηλαδή 0.20, 0.25 και 0.30 mm, θεωρώντας σταθερό τον συνολικό αριθμό στρώσεων και ίσο με τέσσερα (4). Συνεπώς, το ύψος των δειγμάτων ορίστηκε 0.80, 1.0 και 1.2 mm για την εκάστοτε περίπτωση.

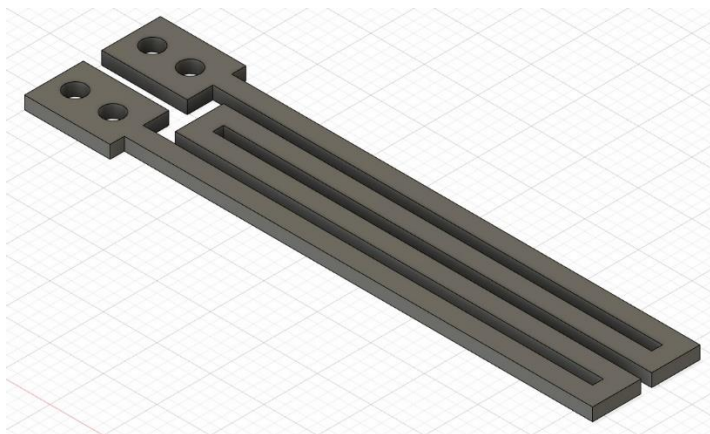


Σχήμα 40: CAD σχεδιασμός δειγμάτων απλής γεωμετρίας για τη μελέτη 3D εκτύπωσης του αγωγίμου δρόμου.

#### Σχεδιασμός διάταξης αγωγίμου δρόμου (conductive path)

Στο συγκεκριμένο βήμα, σχεδιάστηκε ο αγωγίμος δρόμος, όπως αυτός θα εκτυπωνόταν επί του εύκαμπτου υποστρώματος. Ο αγωγίμος δρόμος αποτελείται από δύο περιοχές κατάλληλα σχεδιασμένες για να

«φιλοξενήσουν» ηλεκτρόδια μέτρησης για την αντίστοιχη μελέτη πιεζοαντιστατικής συμπεριφοράς. Οι εν λόγω περιοχές (pads) περιλαμβάνουν δύο οπές (διάμετρος 2 mm) έκαστη, ώστε να τοποθετηθούν εντός αυτών τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Πέραν των περιοχών αυτών, ο αγωγίμος δρόμος αποτελείται από 4 ευθύγραμμα τμήματα μήκους 40 mm έκαστο και από 3 περιελίξεις γωνίας 90°.



Σχήμα 41: CAD σχεδιασμός διάταξης αγωγίμου δρόμου (conductive path).

Παραμετρικός Σχεδιασμός Taguchi για την 3D εκτύπωση αγωγίμου δρόμου με βάση τα δείγματα απλής γεωμετρίας

Κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης βρέθηκε ότι οι Syed Riyaz Ahammed και Ayyappan Susila Praveen στην έρευνα τους για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων με σκοπό την καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα του 3d εκτυπωμένου κυκλώματος συμπεραίνουν ότι η διάμετρος του ακροφυσίου και η ταχύτητα εκτύπωσης είναι κομβικοί παράμετροι για την αγωγιμότητα του κυκλώματος (86). Ακόμη οι Steven Lathers et all στην έρευνα τους εκτύπωσαν θερμοπλαστικά υλικά με αγωγίμο άνθρακα λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους ύψος στρώσης, θερμοκρασία ακροφυσίου, τον πολλαπλασιαστή εξώθησης και την ταχύτητα εκτύπωσης. Εντοπίστηκαν οι κατασκευαστικές παράμετροι που επηρεάζουν την ηλεκτρική αντίσταση αντικειμένων που έχουν κατασκευαστεί από αγωγίμα θερμοπλαστικά υλικά μέσω της 3D εκτύπωσης. Ειδικότερα, αυτές είναι: α) η θερμοκρασία ακροφυσίου (nozzle temperature), β) το ύψος στρώσης (layer height), γ) ο πολλαπλασιαστής εξώθησης (extrusion multiplier) και δ) η ταχύτητα εκτύπωσης (printing speed). Για τη μελέτη των εν λόγω παραμέτρων μέσω του πειραματικού σχεδιασμού Taguchi, ορίστηκαν 3 επίπεδα (levels) για κάθε παράμετρο, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 14. Παράλληλα, οι ίδιες κατασκευαστικές παράμετροι μελετήθηκαν και ως προς την συνεισφορά τους στη διαστατική ακρίβεια των 3D εκτυπωμένων δειγμάτων.

Πίνακας 14: Οι παράμετροι και τα επίπεδα που επιλέχθηκαν για τη μελέτη του αγωγίμου δρόμου.

Επίπεδα Μελέτης	Θερμοκρασία ακροφυσίου (°C)	Ύψος στρώσης (mm)	Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/s)	Πολλαπλασιαστής εξώθησης
Επίπεδο 1	220	0.20	15	1.0
Επίπεδο 2	225	0.25	25	1.1

Επίπεδο 3	230	0.30	35	1.2
-----------	-----	------	----	-----

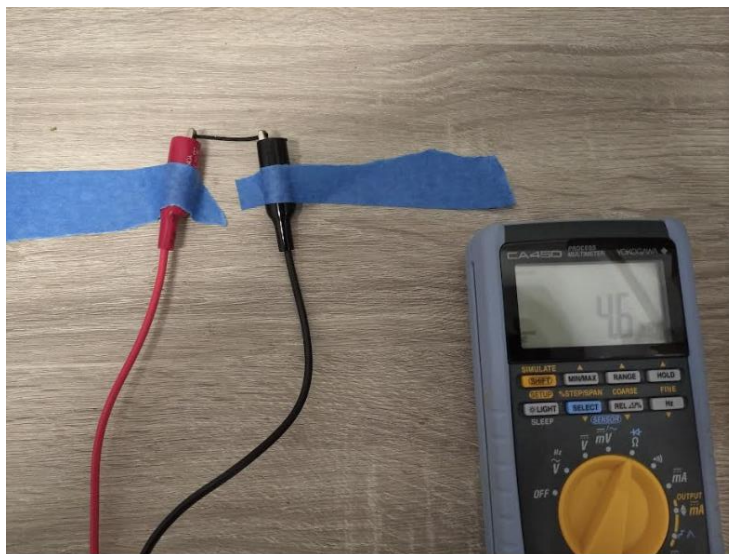
Μέσω του προγράμματος λογισμικού Minitab®, καταρτίστηκε ο πειραματικός σχεδιασμός Taguchi, μέσω της δημιουργίας ορθογώνιων πινάκων L9. Ειδικότερα, ορίστηκαν 9 πειράματα 3D εκτύπωσης για ακροφύσιο διαμέτρου 0.6 mm και 9 πειράματα για ακροφύσιο διαμέτρου 0.8 mm. Δεδομένου ότι οι σταθερές παράμετροι δεν επηρεάζουν τον τρόπο δημιουργίας των ορθογώνιων πινάκων, τα 9 πειράματα 3D εκτύπωσης είναι όμοια για τα δύο είδη ακροφυσίων.

**Πίνακας 15:** Σχεδιασμός των πειραμάτων 3D εκτύπωσης για την περίπτωση του αγώγιμου δρόμου.

Πείραμα	Θερμοκρασία ακροφυσίου (°C)	Ύψος στρώσης (mm)	Πολλαπλασιαστής Εξώθησης	Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/s)
1	220	0.20	1.0	15
2	220	0.25	1.1	25
3	220	0.30	1.2	35
4	225	0.20	1.1	35
5	225	0.25	1.2	15
6	225	0.30	1.0	25
7	230	0.20	1.2	25
8	230	0.25	1.0	35
9	220	0.20	1.0	15

Μελέτη Αποκρίσεων Ηλεκτρικής Αντίστασης των 3D εκτυπωμένων δειγμάτων αγώγιμου δρόμου

Για την προκαταρκτική αξιολόγηση της ηλεκτρικής αντίστασης των 3D εκτυπωμένων δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε πολύμετρο (Process Multimeter CA450, Yokogawa) το οποίο και συνδέθηκε μέσω ηλεκτροδίων με τα άκρα του εκάστοτε δείγματος. Επιλέχθηκε η κλίμακα kΩ και εύρος μέτρησης 600 kΩ.



Σχήμα 42 μετρώντας με πολύμετρο την ηλεκτρική αντίσταση

Τα αποτελέσματα από την προκαταρκτική αξιολόγηση των δειγμάτων αναφορικά με την ηλεκτρική τους αντίσταση, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 16: Ηλεκτρική αντίσταση 3D εκτυπωμένων δειγμάτων απλής γεωμετρίας για πειράματα με ακροφύσια διαμέτρου 0.6 mm και 0.8 mm

3D Εκτυπώσεις Taguchi με ακροφύσιο 0.6 mm	Ηλεκτρική Αντίσταση (kΩ)	3D Εκτυπώσεις Taguchi με ακροφύσιο 0.8 mm	Ηλεκτρική Αντίσταση (kΩ)
1	13.3	1	6.4
2	9.5	2	4.6
3	6.7	3	3.4
4	11.4	4	5.0
5	8.2	5	4.1
6	7.1	6	3.4
7	11.5	7	4.7
8	8.2	8	4.5
9	6.6	9	3.7

Μελέτη Αποκρίσεων Διαστατικής Ακρίβειας των 3D εκτυπωμένων δειγμάτων αγωγίμου δρόμου

Τα 3D εκτυπωμένα δείγματα μελετήθηκαν ως προς τη διαστατική τους ακρίβεια συγκριτικά με τα αντίστοιχα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, όπως αυτά ορίστηκαν κατά τον CAD σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν το πλάτος της ράβδου (single strand width) και το συνολικό πλάτος του κάθε δείγματος (total

width). Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό imageJ, κατόπιν λήψης των κατάλληλων φωτογραφιών.

**Πίνακας 17:** Αποκρίσεις διαστατικής ακρίβειας 3D εκτυπωμένων δειγμάτων απλής γεωμετρίας με ακροφύσιο 0.6 mm.

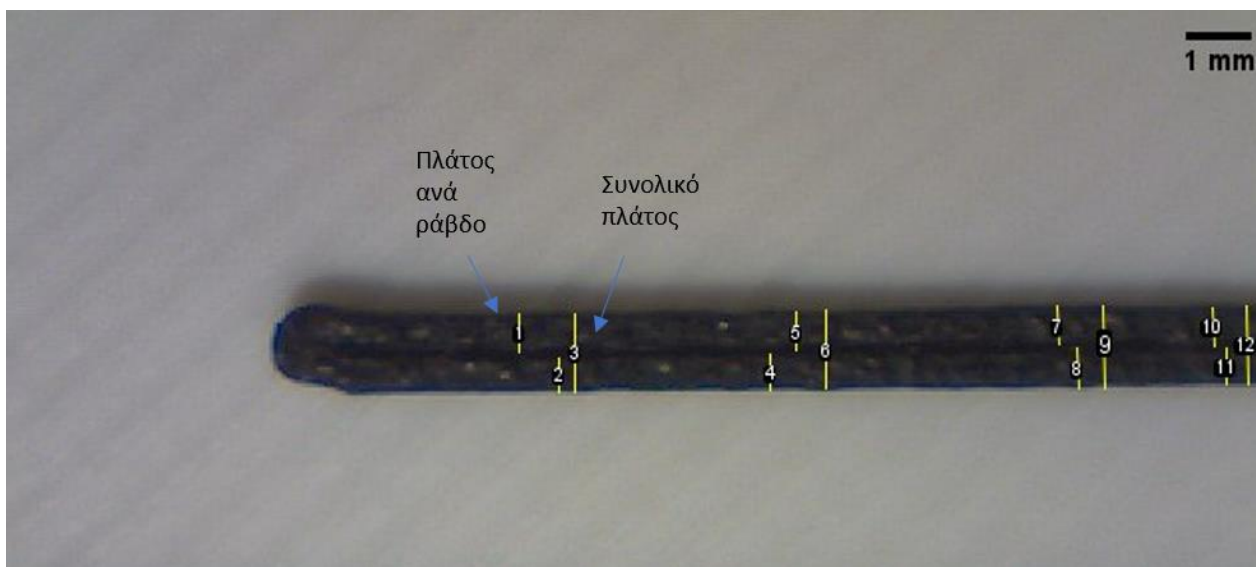
3D Εκτυπώσεις Taguchi με ακροφύσιο 0.6 mm	Απόκλιση πλάτους ράβδου (mm)	Απόκλιση συνολικού πλάτους δείγματος (mm)
1	0.10275	0.56500
2	0.065375	0.47200
3	0.0125	0.35550
4	0.0665	0.43200
5	0.045125	0.30925
6	0.01125	0.38950
7	0.0100	0.41000
8	0.018875	0.38725
9	0.052125	0.19175

**Πίνακας 18:** Αποκρίσεις διαστατικής ακρίβειας 3D εκτυπωμένων δειγμάτων απλής γεωμετρίας με ακροφύσιο 0.8 mm.

3D Εκτυπώσεις Taguchi με ακροφύσιο 0.8 mm	Απόκλιση πλάτους ράβδου (mm)	Απόκλιση συνολικού πλάτους δείγματος (mm)
1	0.128375	0.19275
2	0.08125	0.08125
3	0.043125	0.07625
4	0.087875	0.06675
5	0.010750	0.05775
6	0.051375	0.00250
7	0.037625	0.00625
8	0.017875	0.04700
9	0.047250	0.12850

*Ανάλυση Παραμετρικού Σχεδιασμού Taguchi για τον αγωγίμο δρόμο ως προς την Διαστατική Ακρίβεια και την Ηλεκτρική Αντίσταση*

Για την μέτρηση της διαστατικής ακρίβειας, χρειάστηκε να παρθούν φωτογραφίες του δείγματος από την κάμερα (μοντέλο) και με την χρήση του λογισμικού image j έγιναν οι μετρήσεις στον αγωγίμο δρόμο. Οι μετρήσεις αφορούσαν το single strand width του αγωγίμου δρόμου και το double strand width όπως φαίνεται στο σχήμα. Για το single strand width έγιναν 8 μετρήσεις σε κάθε δείγμα και υπολογίστηκε το μέσο όρο, ενώ για το double strand width έγιναν 4 μετρήσεις σε κάθε δείγμα και υπολογίστηκε το μέσο όρο των μετρήσεων. Η τιμή που καταγράφηκε είναι η απόκλιση του μέσου όρου των μετρήσεων από την ονομαστική τιμή που δόθηκε στο fusion 360.



Σχήμα 43: φωτογραφία πρώτης εκτύπωσης με διάμετρο ακροφυσίου 0.6mm

Στη συνέχεια έγινε καταγραφή των αποτελεσμάτων μετρήσεων της ηλεκτρικής αντίστασης και της διαστατικής ακρίβειας για τις δύο περιπτώσεις διαμέτρων ακροφυσίων, 0.6 και 0.8 mm.

Πίνακας 19: Αποκρίσεις των εκτυπώσεων με διάμετρο ακροφυσίου 0.6

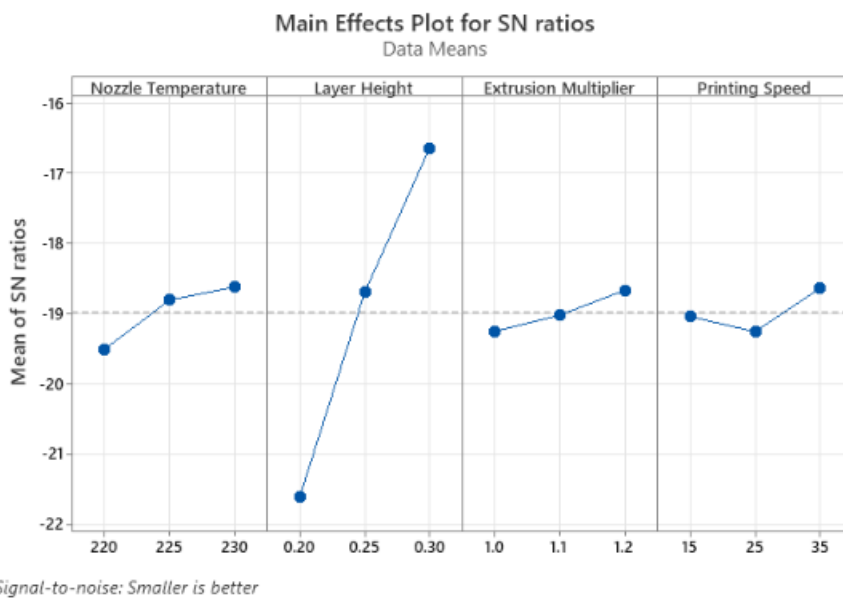
A/A	Ηλεκτρική Αντίσταση (kΩ)	Απόκλιση Πλάτους/Ράβδο	Απόκλιση Συνολικού Πλάτους
1	13.3	0.10275	0.56500
2	9.5	0.065375	0.47200
3	6.7	0.0125	0.35550
4	11.4	0.0665	0.43200
5	8.2	0.045125	0.30925
6	7.1	0.01125	0.38950
7	11.5	0.0100	0.41000
8	8.2	0.018875	0.38725
9	6.6	0.052125	0.19175

Πίνακας 20: Αποκρίσεις των εκτυπώσεων με διάμετρο ακροφυσίου 0.8.

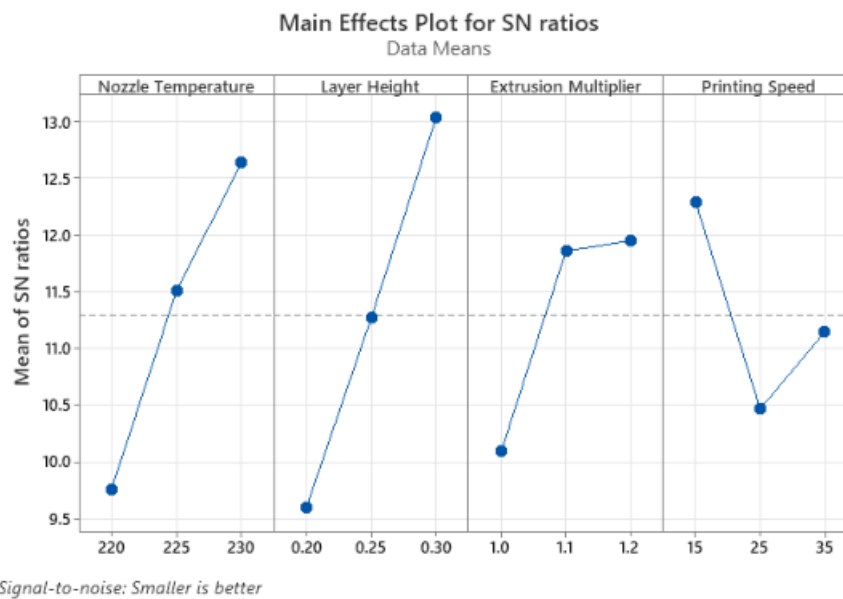
A/A	Ηλεκτρική Αντίσταση (kΩ)	Απόκλιση Πλάτους/Ράβδο	Απόκλιση Συνολικού Πλάτους
1	6,4	0,128375	0,19275
2	4,6	0,08125	0,08125
3	3,4	0,043125	0,07625
4	5,0	0,087875	0,06675
5	4,1	0,010750	0,05775
6	3,4	0,051375	0,00250
7	4,7	0,037625	0,00625
8	4,5	0,017875	0,04700
9	3,7	0,047250	0,12850



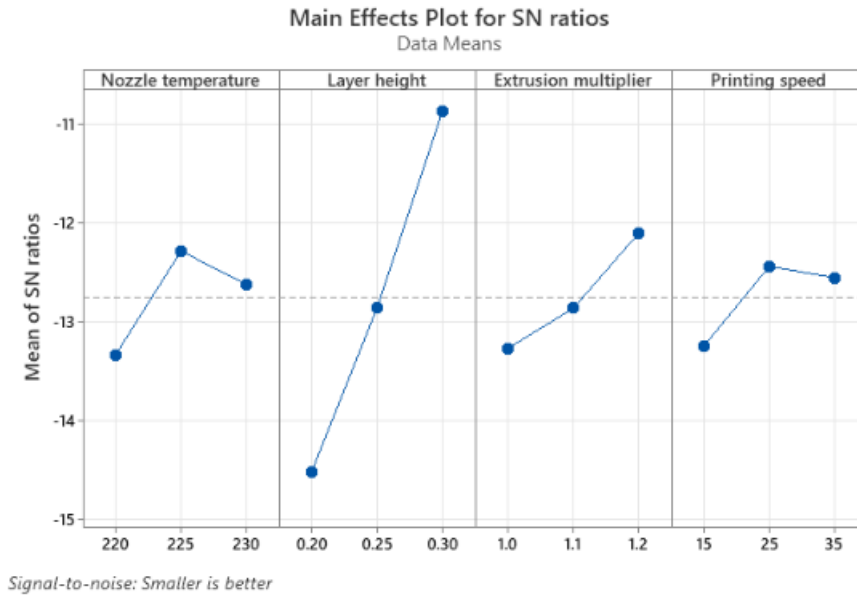
Από τον τύπο (5.6) υπολογίστηκαν οι λόγοι σήματος προς θόρυβο. Μέσω του λογισμικού Minitab πραγματοποιήθηκε η ανάλυση Taguchi και βρέθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων.



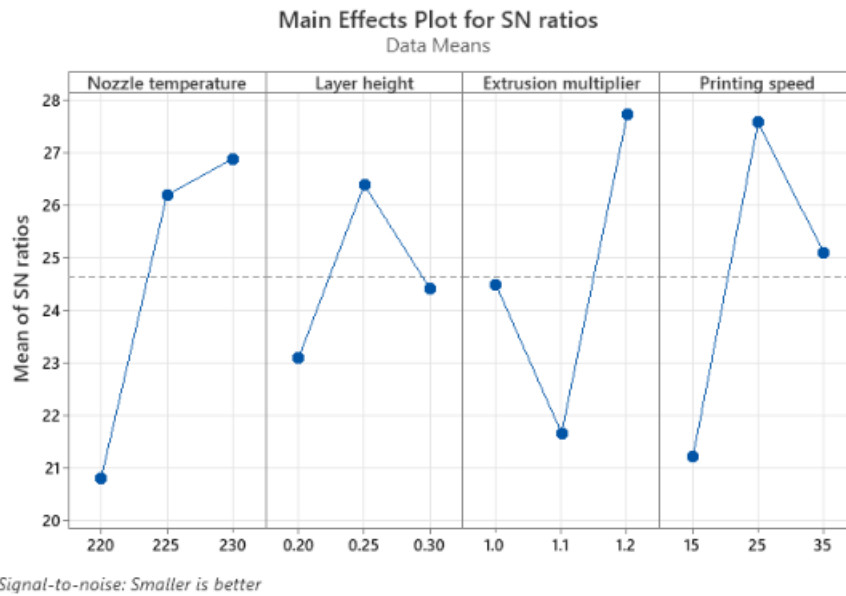
**Σχήμα 44:** Ανάλυση Taguchi για τις εκτοπώσεις με διάμετρο ακροφυσίου 0.6mm ως προς τις αποκρίσεις της ηλεκτρικής αντίστασης.



**Σχήμα 45:** Ανάλυση Taguchi για τις εκτοπώσεις με διάμετρο ακροφυσίου 0.6mm ως προς τις αποκρίσεις των διαστάσεων.



Σχήμα 46: Ανάλυση Taguchi για τις εκτυπώσεις με διάμετρο ακροφυσίου 0.8mm ως προς τις αποκρίσεις της ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 47: Ανάλυση Taguchi για τις εκτυπώσεις με διάμετρο ακροφυσίου 0.8mm ως προς τις αποκρίσεις των διαστάσεων.

Πίνακας 21: Λόγοι S/N για διάμετρο ακροφυσίου 0.6 mm.

A/A	S/N (Αντίσταση)	S/N (Διαστατική Ακρίβεια)
1	-22.4770	7.8280
2	-19.5545	9.4489
3	-16.5215	11.9881
4	-21.1381	10.1989
5	-18.2763	13.1126
6	-17.0252	11.1965

7	-21.2140	10.7520
8	-18.2763	11.2402
<b>9</b>	<b>-16.3909</b>	<b>15.9217</b>

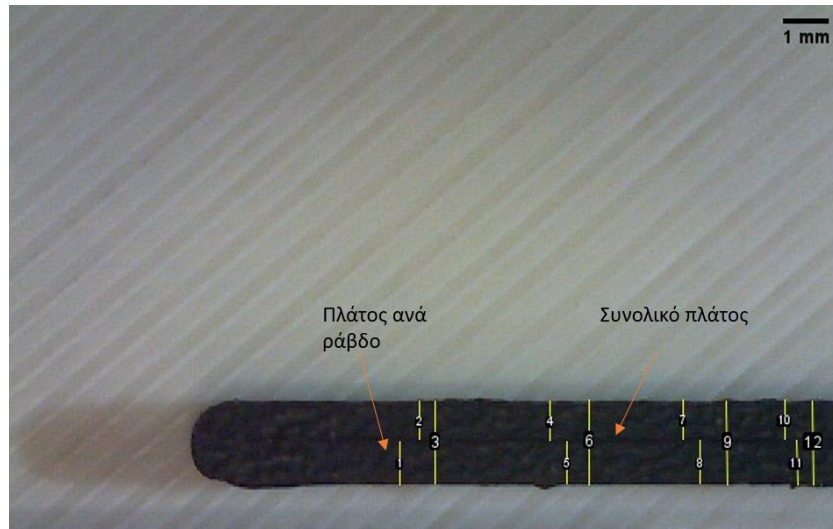
**Πίνακας 22:** Λόγοι S/N για διάμετρο ακροφυσίου 0.8 mm.

A/A	S/N (Αντίσταση)	S/N (Διαστατική Ακρίβεια)
1	-16,1236	15,7160
2	-13,2552	22,5476
3	-10,6296	24,1602
4	-13,9794	22,1547
5	-12,2557	27,6313
6	-10,6296	28,7850
7	-13,4420	31,3826
8	-13,0643	28,9816
<b>9</b>	<b>-11,3640</b>	<b>20,2815</b>

Στον Πίνακα 23 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι συνδυασμοί παραμέτρων που προτείνει η ανάλυση Taguchi για κάθε διάμετρο ακροφυσίου. Με βάση τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Taguchi, φαίνεται πως η απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης είναι βέλτιστη για θερμοκρασίες 225 και 230 °C και ταχύτητες εκτύπωσης 35 και 25 mm/s αντίστοιχα για τα δύο διαφορετικά ακροφύσια. Το ύψος στρώσης και ο πολλαπλασιαστής εξώθησης έχουν σταθερές προτεινόμενες τιμές, 0.30 mm και 1.2 αντίστοιχα. Για τις αποκρίσεις τη βέλτιστης διαστατικής ακρίβειας οι προτεινόμενες τιμές για το ύψος στρώσης είναι 0.30 και 0.25 mm και οι ταχύτητες εκτύπωσης 15 και 25 mm/s αντίστοιχα για τα δύο διαφορετικά ακροφύσια. Η θερμοκρασία ακροφυσίου και ο πολλαπλασιαστής εξώθησης έχουν σταθερές προτεινόμενες τιμές 230 °C και 1.2 αντίστοιχα.

**Πίνακας 23:** Βέλτιστοι συνδυασμοί παραμέτρων που προτείνει η ανάλυση Taguchi για κάθε διάμετρο ακροφυσίου.

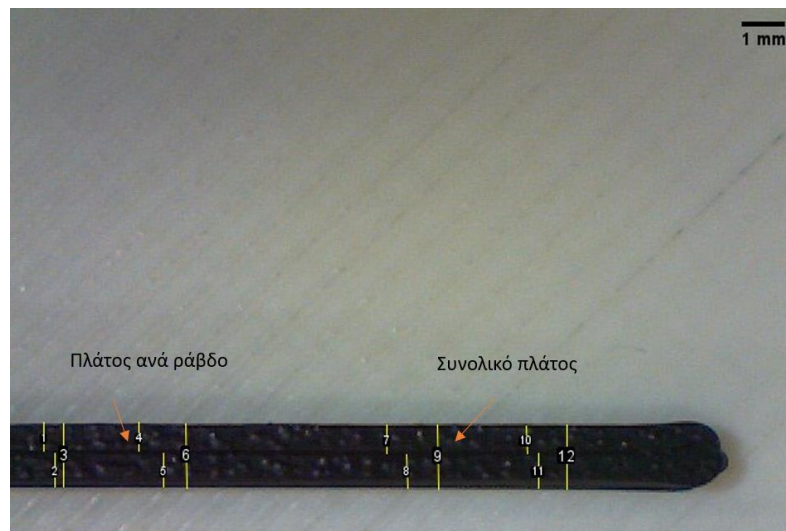
	Θερμοκρασία Ακροφυσίου (°C)	Ύψος Στρώσης (mm)	Πολλαπλασιαστής Εξώθησης	Ταχύτητα Εκτύπωσης (mm/s)
Διαστατική ακρίβεια (0.6 mm)	230	0.30	1.2	15
Ηλεκτρική αντίσταση (0.6 mm)	230	0.30	1.2	35
Διαστατική ακρίβεια (0.8 mm)	230	0.25	1.2	25
Ηλεκτρική αντίσταση (0.8 mm)	225	0.30	1.2	25



**Σχήμα 48:** Εκτύπωση επιβεβαίωσης μικρότερης ηλεκτρικής αντίστασης (διάμετρος ακροφυσίου εκτύπωσης 0.8mm).

Από τη στιγμή που ο προτεινόμενος συνδυασμός παραμέτρων δεν ταυτίζεται με τον συνδυασμό κάποιου από τα πειράματα που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί, είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση ενός πειράματος (εκτύπωση) επιβεβαίωσης.

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι εκτυπώσεις επιβεβαίωσης (ηλεκτρική αντίσταση για 0.6 και 0.8 διάμετρο ακροφυσίου και διαστατική ακρίβεια 0.6 και 0.8 διάμετρο ακροφυσίου), υπολογίστηκαν οι λόγοι S/N. Παρατηρήθηκε ότι οι λόγοι S/N με ακροφύσιο 0.6mm είχαν τις μεγαλύτερες τιμές, ενώ με ακροφύσιο 0.8mm παρατηρήθηκε το ίδιο μόνο για την απόκριση της διαστατικής ακρίβειας. Κάτι παρόμοιο δεν παρατηρήθηκε στην εκτύπωση επιβεβαίωσης για την ηλεκτρική αντίσταση με ακροφύσιο 0.8mm.



**Σχήμα 49:** Εκτύπωση επιβεβαίωσης καλύτερης διαστατικής ακρίβειας (διάμετρος ακροφυσίου εκτύπωσης 0.6mm).

**Πίνακας 24:** Αποκρίσεις και λόγοι S/N εκτύπωσης επιβεβαίωσης για διάμετρο ακροφυσίου 0.6 mm.

A/A	Απόκλιση Πλάτους/Ράβδο	Απόκλιση Συνολικού Πλάτους	S/N (Διαστατική Ακρίβεια)	Ηλεκτρική Αντίσταση (kΩ)	S/N (Ηλεκτρική Αντίσταση)
1	0,102750	0,56500	7,8280	13,3	-22,4770
2	0,065375	0,47200	9,4489	9,5	-19,5545
3	0,012500	0,35550	11,9881	6,7	-16,5215
4	0,066500	0,43200	10,1989	11,4	-21,1381
5	0,045125	0,30925	13,1126	8,2	-18,2763
6	0,011250	0,38950	11,1965	7,1	-17,0252
7	0,010000	0,41000	10,7520	11,5	-21,2140
8	0,018875	0,38725	11,2402	8,2	-18,2763
9	0,080125	0,21150	15,9217	6,6	-16,3909
<b>10</b>	<b>0,052125</b>	<b>0,19175</b>	<b>17,0460</b>	<b>4,8</b>	<b>-136248</b>

**Πίνακας 25:** Αποκρίσεις και λόγοι S/N εκτύπωσης επιβεβαίωσης για διάμετρο ακροφυσίου 0.8 mm.

A/A	Απόκλιση Πλάτους/Ράβδο	Απόκλιση Συνολικού Πλάτους	S/N (Διαστατική Ακρίβεια)	Ηλεκτρική Αντίσταση (kΩ)	S/N (Ηλεκτρική Αντίσταση)
1	0,128375	0,19275	15,7160	6,4	-16,1236
2	0,08125	0,08125	22,5476	4,6	-13,2552
3	0,043125	0,07625	24,1602	3,4	-10,6296
4	0,087875	0,06675	22,1547	5,0	-13,9794
5	0,010750	0,05775	27,6313	4,1	-12,2557
6	0,051375	0,00250	28,7850	3,4	-10,6296
7	0,037625	0,00625	31,3826	4,7	-13,4420
8	0,017875	0,04700	28,9816	4,5	-13,0643
9	0,047250	0,12850	20,2815	3,7	-11,3640
<b>10</b>	<b>0,009250</b>	<b>0,03150</b>	<b>32,6849</b>	<b>3,9</b>	<b>-11.8212</b>

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Taguchi, μελετήθηκαν περαιτέρω μέσω της ανάλυσης διακύμανσης (Analysis of Variance – ANOVA) ώστε να εκτιμηθεί η συνεισφορά της κάθε παραμέτρου (θερμοκρασία ακροφυσίου, ύψος στρώσης, πολλαπλασιαστική εξώθησης, ταχύτητα εκτύπωσης) στην ηλεκτρική αντίσταση. Επιπλέον, μέσω της ανάλυσης διακύμανσης θα καταστεί δυνατή η εκτίμηση της θεωρητικά βέλτιστης απόκρισης (theoretical optimum response,  $Y_{opt}$ ) με βάση τις παραμέτρους που επιδρούν σημαντικότερα σε αυτή.

Η ανάλυση διακύμανσης πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστικά φύλλα του προγράμματος Microsoft Office Excel. Στον Πίνακα 26, παρατίθεται ο πίνακας Taguchi με τις αποκρίσεις της ηλεκτρικής αντίστασης και τον υπολογισμένο λόγο S/N για τις εκτυπώσεις με διάμετρο ακροφυσίου 0.8mm. Ακόμη υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών και δημιουργήθηκε ένας πίνακας με τους καλύτερους λόγους σήματος προς θόρυβο των παραγόντων ο οποίος προέκυψε από την ανάλυση Taguchi.

**Πίνακας 26:** Πίνακας με όλες τις παραμέτρους και τα επίπεδα τους, τις αποκρίσεις σε ηλεκτρική αντίσταση και τους λόγους S/N.

Πειράματα	Θερμοκρασία Ακροφυσίου (°C)	Ύψος Στρώσης (mm)	Πολλαπλασιαστής Εξώθησης	Ταχύτητα Εκτύπωσης (mm/s)	S/N	Ηλεκτρική Αντίσταση (kΩ)
1	220	0,20	1	15	-16,1236	6,4
2	220	0,25	1,1	25	-13,2552	4,6
3	220	0,30	1,2	35	-10,6296	3,4
4	225	0,20	1,1	35	-13,9794	5
5	225	0,25	1,2	15	-12,2557	4,1
6	225	0,30	1	25	-10,6296	3,4
7	230	0,20	1,2	25	-13,4420	4,7
8	230	0,25	1	35	-13,0643	4,5
9	230	0,30	1,1	15	-11,3640	3,7
<b>Μέση Τιμή (Average Value)</b>					<b>-12.7492</b>	

**Πίνακας 27:** Ανάλυση Taguchi

Λόγοι S/N για κάθε παράμετρο και επίπεδο				
	Θερμοκρασία Ακροφυσίου	Ύψος Στρώσης	Πολλαπλασιαστής Εξώθησης	Ταχύτητα Εκτύπωσης
<b>Επίπεδο 1</b>	-13.34	-14.51	-13.27	-13.25
<b>Επίπεδο 2</b>	-13.29	-12.86	-12.87	-12.44
<b>Επίπεδο 3</b>	-12.62	-10.87	-12.11	-12.56

**Πίνακας 28:** Ανάλυση των μεταβλητών.

Factor	Sum of squares	DOF	Variance	Contribution (%)
<b>Nozzle temperature</b>	0.9698	2	0.4849	3.897445401
<b>Layer height</b>	19.9322	2	9.9661	80.10379585
<b>Extrusion multiplier</b>	2.0832	2	1.0416	8.37199243
<b>Print speed</b>	1.1466	2	0.5733	4.60797164
<b>Total</b>	24.8829656	8		11.52421172

Όπου Total είναι το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς του S/N κάθε πειράματος με το μέσο όρο όλων των S/N, και το percent contribution υπολογίζεται από τον λόγο του Sum of squares ως προς το συνολικό άθροισμα των Sum of squares.

Η επίδραση της κάθε παραμέτρου στην εκτύπωση, υπολογίζεται από την διαίρεση της μεταβλητής Sum of squares με την μεταβλητή total. Παρατηρώντας ότι η συνεισφορά των παραμέτρων extrusion multiplier, printing speed και nozzle temperature είναι μικρότερη από 10% δημιουργήθηκε ένας καινούριος πίνακας ανάλυσης μεταβλητών που περιέχει τις πιο κυρίαρχες παραμέτρους.

**Πίνακας 29:** Ανάλυση των μεταβλητών με την μεγαλύτερη συνεισφορά.

Factor	Sum of squares	DOF	Variance	F	Confidence	Contribution (%)
Nozzle temperature	0.9698	2	0.1216			3.897445401
Layer height	19.9322	2	10.6932	12.9595	0.98948	80.10379585
Extrusion multiplier	2.08322	2	0.0309			8.37199243
Print speed	1.1466	2	0.1204			4.60797164
error	4.95076564	6	0.82513			19.89620415
total	24.8829656					

όπου η τιμή της μεταβλητής F εκφράζει την διακύμανση εντός των δειγμάτων, και υπολογίζεται από τον λόγο Var της κάθε παραμέτρου ως προς το Var του Error.

Η μεταβλητή confidence υπολογίζεται από την συνάρτηση του Microsoft Office Excel *fdist* σύμφωνα με τον τύπο  $confidence = 1 - fdist$

Επιλέγοντας συντελεστή εμπιστοσύνης 95% και σύμφωνα με τους τύπους (αριθμός)

**Πίνακας 30:** Υπολογισμός μεταβλητών

<b>F<sub>0.05(2,6)</sub></b>	5.1433
<b>Ne</b>	3
<b>Ve</b>	0.8251

Όπου Ne είναι ίσο με τον λόγο των αριθμό των εκτυπώσεων προς τους βαθμούς ελευθερίας συν 1

Και Ve είναι το error της μεταβλητής Var

Προκύπτει από τους τύπους (5.9 , 5.12 , 5.13) ότι

**Πίνακας 31:** Αποτελέσματα

<b>Y<sub>opt</sub></b>	-10.87
<b>C.F.</b>	1.18938
<b>C.I.</b>	(-12.059381, -9.68062)

Η ηλεκτρική αντίσταση που μετρήθηκε στην εκτύπωση επιβεβαίωσης ανήκει στο εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης.

**Πίνακας 32:** Παρουσίαση αποτελεσμάτων για εκτύπωση με διάμετρο ακροφυσίου 0.8mm

Διάμετρος ακροφυσίου	Εκτύπωση επιβεβαίωσης (kΩ)	Εκτύπωση επιβεβαίωσης (S/N)	Διάστημα εμπιστοσύνης(Ohm)	Διάστημα εμπιστοσύνης (S/N)
<b>0.8mm</b>	3.9	-11.8212	(3.048,4.008)	(-12.059381, -9.68062)

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε για τα αποτελέσματα των εκτυπώσεων με διάμετρο ακροφυσίου 0.6mm

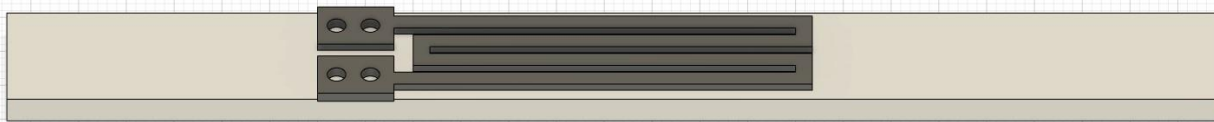
Πίνακας 33: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για εκτύπωση με διάμετρο ακροφυσίου 0.6mm.

Διάμετρος ακροφυσίου 0.6mm	Εκτύπωση επιβεβαίωσης (kΩ)	Εκτύπωση επιβεβαίωσης (S/N)	Διάστημα εμπιστοσύνης(Ohm)	Διάστημα εμπιστοσύνης (S/N)
	5.0	-13.9794	(5.2104,5.7296)	(-15.162557, -14.3374)

Παρατηρείται ότι η απόκριση στην ηλεκτρική αντίσταση του πειράματος (εκτύπωσης) επιβεβαίωσης με διάμετρο ακροφυσίου 0.6mm δεν ανήκει στο διάστημα εμπιστοσύνης που υπολογίστηκε. Γνωρίζουμε από τη στιγμή που επιλέχθηκε συντελεστής εμπιστοσύνης 95%, ότι υπάρχει 5% πιθανότητα η απόκριση του πειράματος επιβεβαίωσης να μην ανήκει στο διάστημα εμπιστοσύνης που υπολογίστηκε.

### 6.1.3. Τελικός Σχεδιασμός και Παραμετροποίηση 3D εκτύπωσης πιεζοαντιστατικού αισθητήρα.

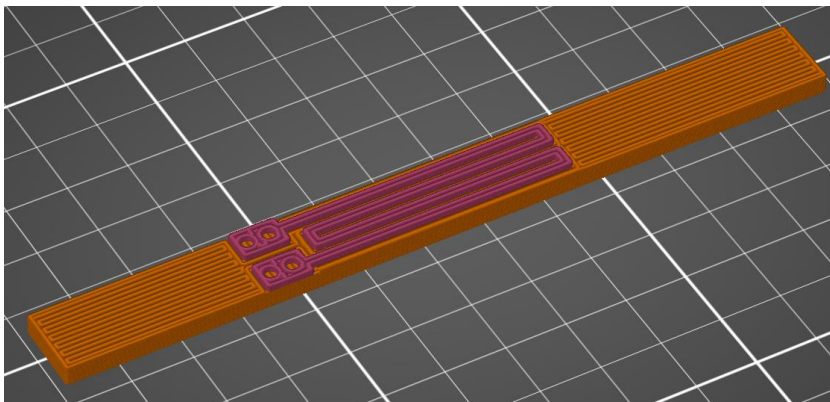
Ο τελικός σχεδιασμός του πιεζοαντιστατικού αισθητήρα πραγματοποιήθηκε με γνώμονα τις προτεινόμενες παραμέτρους εκτύπωσης όπως αυτές αναπαράχθηκαν κατά την Ανάλυση Taguchi. Ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική με τον πειραματικό σχεδιασμό, προκρίθηκαν συνθήκες 3D εκτύπωσης που αφορούν τη χρήση και των δύο διαμέτρων εξώθησης, 0.6 και 0.8 mm. Επιπροσθέτως, δεδομένης της μελέτης απόκρισης της αντίστασης υπό συνθήκες κάμψης, ο CAD σχεδιασμός της συνολικής διάταξης πραγματοποιήθηκε με βάση το πρότυπο «ASTM D790». Το ψηφιακό μοντέλο που σχεδιάστηκε είχε διαστάσεις 127 mm (μήκος), 12.7 mm (πλάτος) και 3.2 mm (ύψος), ενώ ο αγωγίμος δρόμος περιείχε τις κατάλληλες υποδοχές (οπές διαμέτρου 1.7 mm) για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων μέτρησης.



Σχήμα 50: CAD σχέδιο του πιεζοαντιστατικού αισθητήρα όπως σχεδιάστηκε μέσω του προγράμματος Autodesk Fusion 360®.

Όσον αφορά στην παραμετροποίηση της 3D εκτύπωσης, πραγματοποιήθηκε με στόχο το συνδυασμό των βέλτιστων παραμέτρων εκτύπωσης για το υπόστρωμα και για τον αγωγίμο δρόμο. Με βάση αυτό, και μέσω του προγράμματος CAM Prusa Slicer®, συνδυάστηκαν τα προφίλ εκτύπωσης των δύο διαφορετικών θερμοπλαστικών νημάτων, του TPU (Crealty®, υπόστρωμα) και το σύνθετο TPU/Carbon Black (NinjaTek Eel®, αγωγίμος δρόμος). Για την παραμετροποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες τιμές παραμέτρων όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 23. Δεδομένου ότι οι παράμετροι «ύψος στρώσης» και «ταχύτητα εκτύπωσης» δεν μπορούν να οριστούν για κάθε είδος θερμοπλαστικού νήματος, έγινε τροποποίηση του αναπαράχθέντα g-κώδικα (g-code), ώστε οι τιμές αυτών να αλλάξουν κατά τη μετάβαση από το απλό TPU στο σύνθετο TPU/Carbon Black. Αντίθετα, οι παράμετροι «θερμοκρασία ακροφυσίου» και «πολλαπλασιαστής εξώθησης» ορίστηκαν αυτόνομα για κάθε υλικό.





Σχήμα 51: CAM σχέδιο του πιεζοαντιστατικού αισθητήρα όπως αυτό παραμετροποιήθηκε μέσω του προγράμματος Prusa Slicer®.

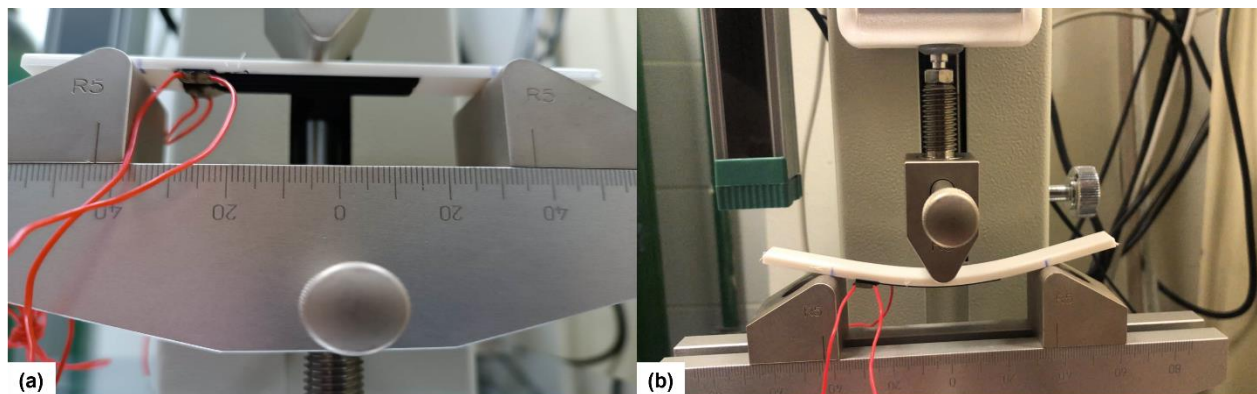
## Κεφάλαιο 7: Χαρακτηρισμός Λειτουργικότητας Πιεζοαντιστατικού Αισθητήρα

### 7.1 Προετοιμασία δειγμάτων πιεζοαντιστατικών αισθητήρων

Για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας του πιεζοαντιστατικού αισθητήρα, χρησιμοποιήθηκαν 3D εκτυπωμένα δείγματα με χρήση των βέλτιστων παραμέτρων για ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης, έχοντας κατασκευαστεί με δύο διαφορετικά ακροφύσια (διάμετροι 0.6 mm και 0.8 mm). Για την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης τοποθετήθηκαν στα άκρα του αγωγίμου δρόμου ηλεκτρόδια, οι επαφές των οποίων ενισχύθηκαν με χρήση αγωγίμης πάστας αργύρου. Τα δείγματα ξηράνθηκαν σε θερμοκρασία 40 °C για 24 ώρες και ακολούθως οι συνδέσεις σταθεροποιήθηκαν με χρήση εποξικής ρητίνης.

### 7.2 Πειραματική διάταξη χαρακτηρισμού λειτουργικότητας πιεζοαντιστατικού αισθητήρα

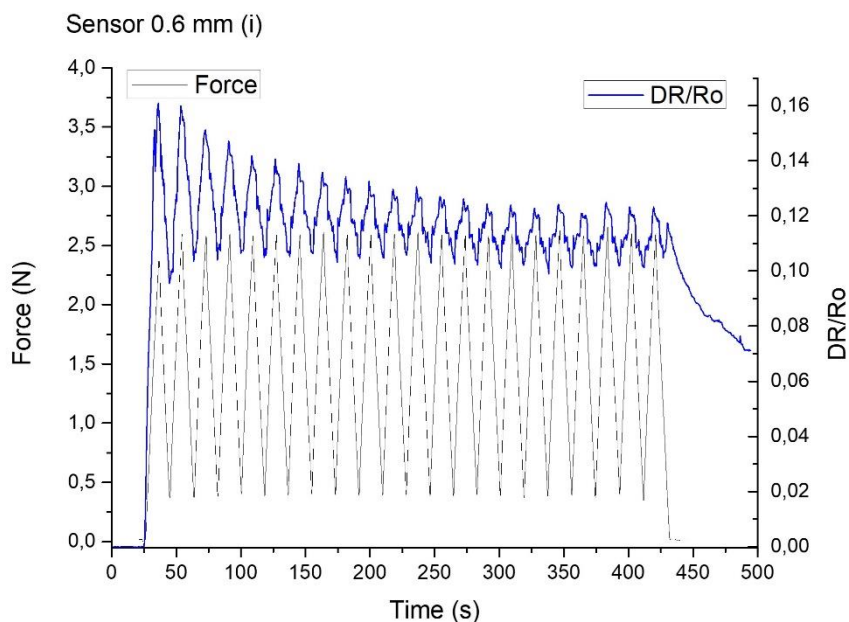
Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν οριζόντια στην βάση μέτρησης με τον αγωγίμο δρόμο προς τα κάτω. Τα ηλεκτρόδια συνδέθηκαν με σταθερή πηγή συνεχούς (DC) ρεύματος. Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε είναι το Keithley 2400 Sourcemeter. Η ένταση DC ρεύματος που εφαρμόστηκε ήταν 10 mA. Πριν από την έναρξη της μηχανικής καταπόνησης μετρήθηκε η ηλεκτρική αντίσταση για τέσσερις αισθητήρες. Δύο αισθητήρες εκτυπωμένους με διάμετρο ακροφυσίου 0.6 mm και δύο με 0.8 mm. Για τις δοκιμές μηχανικής καταπόνησης χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Stepper Motor Powered Test Stand (Sauter®) με ταχύτητα κίνησης εμβόλου κάμψης 30 mm/s. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε 15 κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης με μέγιστη δύναμη καταπόνησης 5 N. Κάθε κύκλος είχε διάρκεια 20s (φόρτιση 10s – αποφόρτιση 10s). Για αμεσότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων τα δείγματα ονοματίστηκαν **S06\_1** και **S06\_2** για τις εκτυπώσεις με ακροφύσιο διαμέτρου 0.6 mm, και **S08\_1** και **S08\_2** για τις εκτυπώσεις με ακροφύσιο διαμέτρου 0.8 mm.



Σχήμα 52: Κατάσταση δείγματος πριν (a) και κατά τη διάρκεια της μηχανικής καταπόνησης (b).

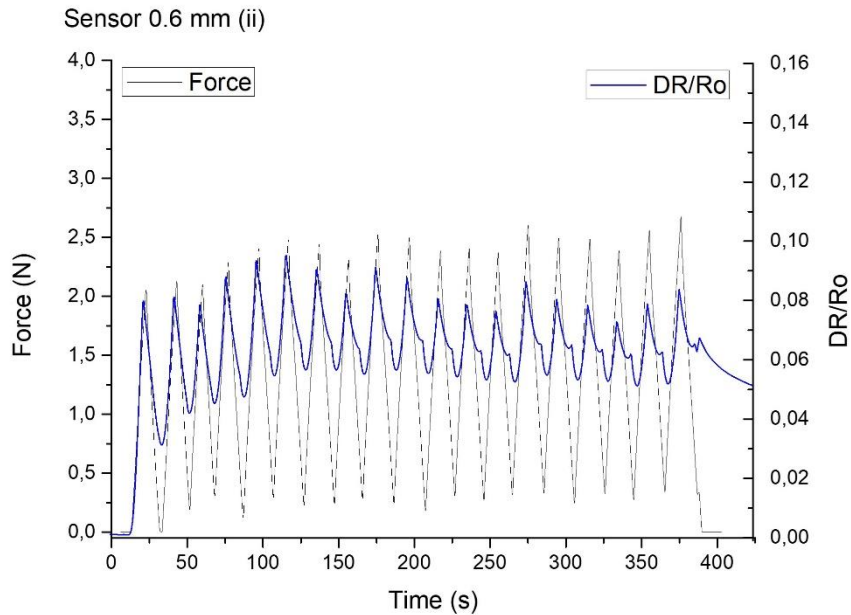
### 7.3 Αποτελέσματα Χαρακτηρισμού Λειτουργικότητας Πιεζοαντιστατικού Αισθητήρα

Στο Σχήμα 53 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δείγμα S06\_1 Παρατηρείται πως κατά την φόρτιση η κλασματική αντίσταση ( $DR/R_o$ ) αυξάνει, ενώ κατά την αποφόρτιση μειώνεται. Η ακολουθία ηλεκτρικού σήματος και φόρτισης/αποφόρτισης, επιβεβαιώνει πως η διαμόρφωση των ηλεκτρικών επαφών, είναι ικανή να ακολουθήσει το εφαρμοζόμενο φορτίο, επιβεβαιώνοντας την απόκριση του αισθητήρα στην καμπτική καταπόνηση. Οι ελάχιστες αποκλίσεις μεταξύ μέγιστης ( $(DR/R_o)_{max}$ ) και ελάχιστης ( $(DR/R_o)_{min}$ ) κλασματικής αντίστασης, μπορούν να αποδοθούν σε παραμένουσες τάσεις, που έχουν προκληθεί κατά την καταπόνηση του δείγματος λόγω κάμψης ή από την σκλήρυνση της εποξικής ρητίνης. Οι εν λόγω παραμένουσες τάσεις αλλοιώνουν το αγωγίμο δίκτυο φορέων που έχει δημιουργηθεί κατά την εναπόθεση του αντίστοιχου σύνθετου θερμοπλαστικού υλικού με αποτέλεσμα την αλλαγή της κλασματικής αντίστασης.



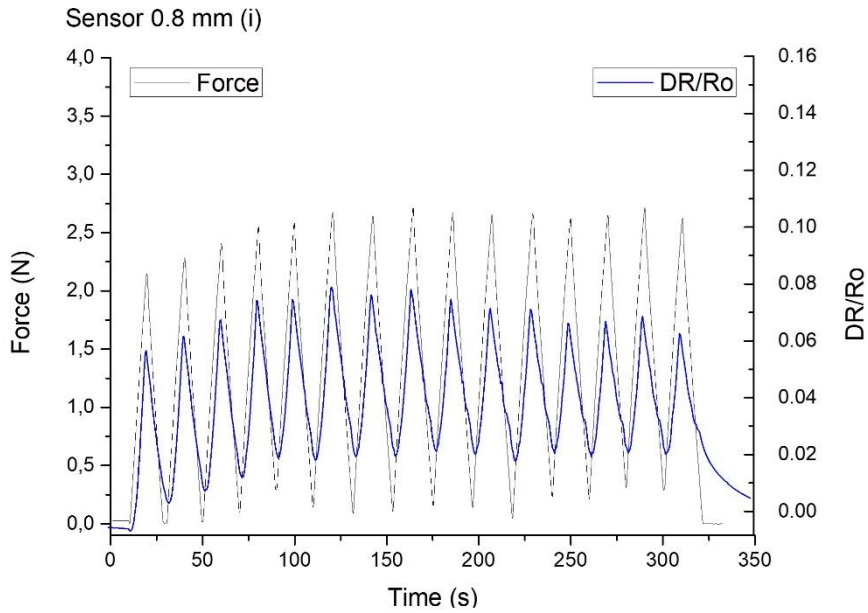
Σχήμα 53: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δείγμα S06\_1

Στο Σχήμα 54 δίνονται τα αποτελέσματα για το δείγμα **S06\_2**. Η καταγραφή του σήματος έχει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του **S06\_1** με την διαφορά πως στον **S06\_2** η κλασματική αντίσταση ολοένα και μειώνεται με το πέρασ περισσότερων κύκλων φόρτισης. Η αλλαγή αυτή, συνεπάγεται σε αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υπό μελέτη συστήματος.

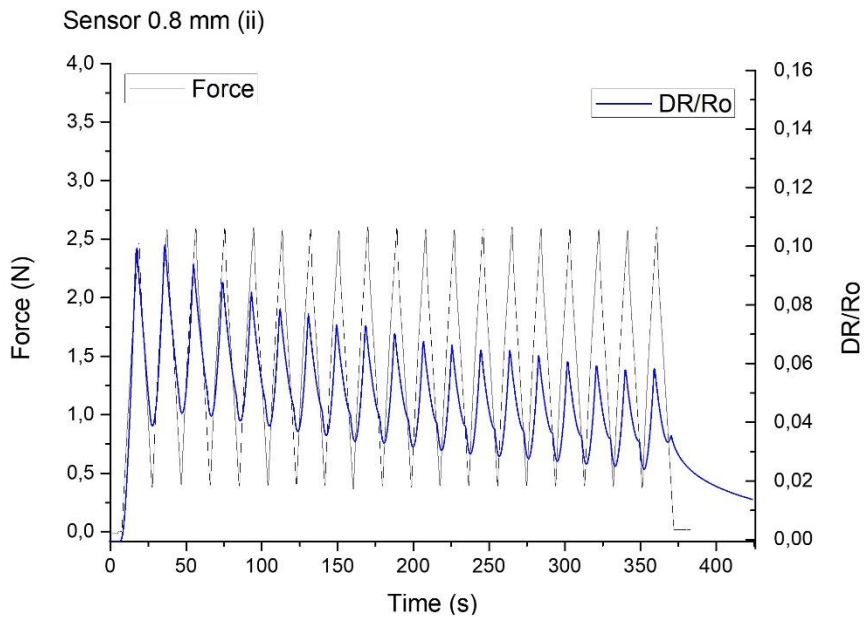


**Σχήμα 54:** Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δείγμα **S06\_2**

Στο Σχήμα 55 δίνονται τα αποτελέσματα για το δείγμα **S08\_1**. Η καταγραφή του σήματος έχει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του **S06\_2**. Η διαφορά είναι ότι ο ρυθμός μείωσης της κλασματικής αντίστασης είναι αρκετά μικρότερη του αισθητήρα 2.



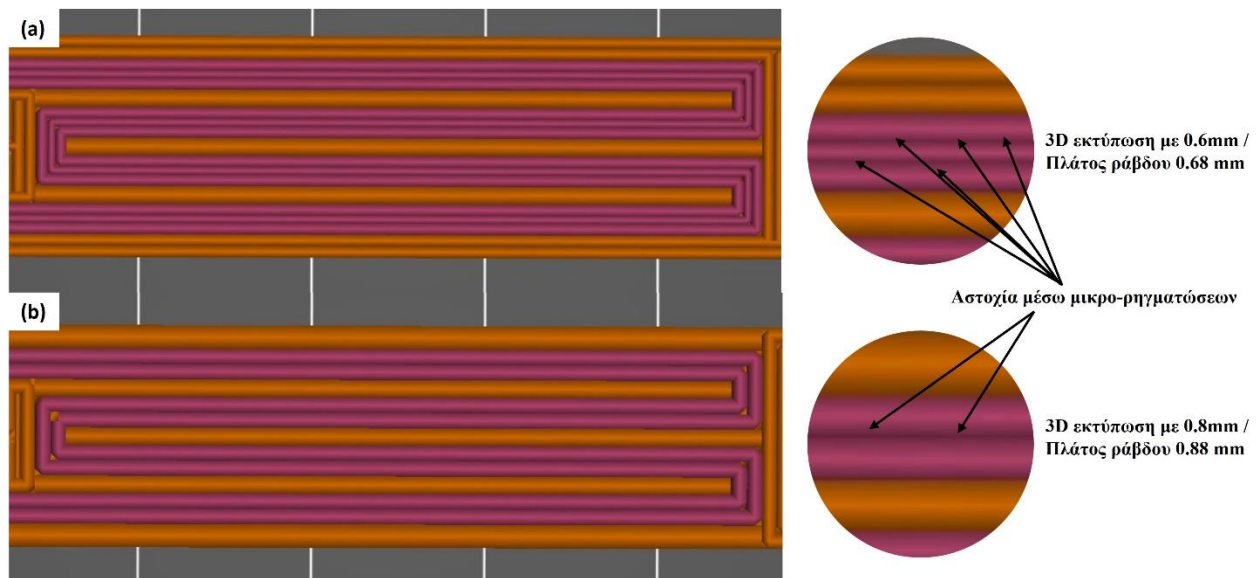
Σχήμα 55: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δείγμα S08\_1



Σχήμα 56: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δείγμα S08\_2

Στο Σχήμα 56 δίνονται τα αποτελέσματα για το δείγμα S08\_2. Η ακολουθία ηλεκτρικού σήματος και φόρτισης/αποφόρτισης παραμένει ίδια και σε αυτόν τον αισθητήρα, ωστόσο δεν παρατηρείται μια αντίστοιχη σταθεροποίηση στην μέγιστη και ελάχιστη τιμή της κλασματικής αντίστασης με αυτή του δείγματος S08\_1.

Συμπερασματικά, για τις περιπτώσεις των αισθητήρων που εκτυπώθηκαν με χρήση ακροφυσίου 0.8 mm παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος μεταβολής της αντίστασης (DR) κατά την καταπόνηση, σε σχέση με τα αντίστοιχα που κατασκευάστηκαν με ακροφύσιο 0.6 mm. Το εν λόγω εύρημα μπορεί να αποδοθεί στη δημιουργία περισσότερων σημείων αστοχίας στα δείγματα S06\_1 και S06\_2, συγκριτικά με τα S08\_1 και S08\_2. Κατά την κάμψη των δοκιμίων, ο αγωγίμος δρόμος καταπονείται μηχανικά, γεγονός που επιφέρει αστοχίες μεταξύ των επαπτόμενων γραμμών (ράβδων) του αγωγίμου νήματος, άρα και υποβάθμιση του αγωγίμου δικτύου που έχει σχηματιστεί κατά την 3D εκτύπωση. Όπως περιγράφεται και στο Σχήμα 57, τα δείγματα S06\_1 και S06\_2 περιέχουν τρεις επαπτόμενες ράβδους αγωγίμου νήματος, ενώ τα S08\_1 και S08\_2 μόνο δύο. Συνεπάγεται έτσι ότι τα δείγματα S06\_1 και S06\_2 έχουν περισσότερα σημεία αστοχίας (μικρο-ρηγματώσεις) μεταξύ των ράβδων σε σχέση με τα S08\_1 και S08\_2. Η διαφορά στον αριθμό των ράβδων οφείλεται στη χρήση διαφορετικών διαμέτρων ακροφυσίου που συνεπάγεται το αντίστοιχο πλάτος εξώθησης (0.68 και 0.88 mm).



Σχήμα 57: Κάτοψη δειγμάτων S06 (a) και S08 (b) κατά την παραμετροποίηση τους στο πρόγραμμα CAM. Στο σχήμα διακρίνεται η διαφορά στον αριθμό των ράβδων αγωγίμου νήματος συναρτήσει της διαμέτρου ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε.

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

### 8.1 Συμπεράσματα

Η 3D εκτύπωση ενός αισθητήρα παραμόρφωσης πρόκειται για μια πολυπαραγοντική διαδικασία που περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του αισθητήρα, την παραμετροποίηση της 3D εκτύπωσης και την τελική αξιολόγηση της λειτουργικότητας του. Λόγω της παρουσίας μεγάλου αριθμού παραμέτρων και πολλαπλών παραγόντων η βέλτιστη ρύθμιση των παραμέτρων της 3D εκτύπωσης, η οποία απαιτείται για την επίτευξη ακρίβειας καθίσταται ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία από πλευράς πειραμάτων άρα και χρόνου και κόστους υλικών. Για την αποφυγή εκτεταμένου αριθμού πειραμάτων δοκιμών-σφάλματος, ακολουθήθηκε η μέθοδος Taguchi τόσο για τη μελέτη κατασκευής του υποστρώματος όσο και του αγωγίμου δρόμου.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων του υποστρώματος με διάμετρο ακροφυσίου 0.6 mm έδειξαν τις βέλτιστες συνθήκες παραμετροποίησης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Taguchi πρότειναν ακριβώς τις ίδιες συνθήκες παραμετροποίησης και για τις δυο διαμέτρους ακροφυσίου εκτός

από την ταχύτητα εκτύπωσης. Αυτό υποδηλώνει την επίδραση που έχει η ταχύτητα εκτύπωσης στην κατασκευή του υποστρώματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του ακροφυσίου τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα TPU που εναποτίθεται στο υπόστρωμα κατά την ίδια χρονική περίοδο.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων του αγωγίμου δρόμου έδειξαν ως βέλτιστες συνθήκες παραμετροποίησης ως προς την διαστατική ακρίβεια με διάμετρο ακροφυσίου 0.6 mm τις α) θερμοκρασία ακροφυσίου 230 °C, β) ύψος στρώσης 0.30 mm γ) πολλαπλασιαστής εξώθησης 1.2 , δ) ταχύτητα εκτύπωσης 15 mm/s ενώ με διάμετρο ακροφυσίου 0.8 mm τις α) θερμοκρασία ακροφυσίου 230 °C, β) ύψος στρώσης 0.25 mm γ) πολλαπλασιαστής εξώθησης 1.2 , δ) ταχύτητα εκτύπωσης 25 mm/sec.

Η διαφορά του ύψους στρώσης και της ταχύτητας εκτύπωσης στις βέλτιστες συνθήκες παραμετροποίησης πιθανότατα σχετίζεται με την επιρροή της διαμέτρου του ακροφυσίου. Μια μεγαλύτερη διάμετρος ακροφυσίου επιτρέπει μεγαλύτερη ποσότητα υλικού να εκχωρηθεί σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ταχύτητα εκτύπωσης. Η αλλαγή στο ύψος στρώσης πιθανότατα να οφείλεται στο ότι μια μεγαλύτερη διάμετρος ακροφυσίου οδηγεί γενικά σε μικρότερο ύψος στρώσης. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα ακροφύσιο μεγαλύτερης διαμέτρου μπορεί να εξωθήσει περισσότερο υλικό ανά μονάδα χρόνου, επιτρέποντας σε κάθε στρώμα να δημιουργηθεί πιο γρήγορα και πιο λεπτό.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων του αγωγίμου δρόμου έδειξαν ως βέλτιστες συνθήκες παραμετροποίησης ως προς την ηλεκτρική αντίσταση με διάμετρο ακροφυσίου 0.6 mm α) θερμοκρασία ακροφυσίου 230 °C, β) ύψος στρώσης 0.30 mm γ) πολλαπλασιαστής εξώθησης 1.2 , δ) ταχύτητα εκτύπωσης 35 mm/sec ενώ με διάμετρο ακροφυσίου 0.8 mm τις α) θερμοκρασία ακροφυσίου 225 °C, β) ύψος στρώσης 0.30 mm γ) πολλαπλασιαστής εξώθησης 1.2 , δ) ταχύτητα εκτύπωσης 25 mm/sec.

Οι διαφορές στις βέλτιστες παραμέτρους για την ελάχιστη ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ των δύο διαμέτρων ακροφυσίου μπορούν να αποδοθούν στις διαφορετικές δυνατότητες εξώθησης κάθε ακροφυσίου. Το ακροφύσιο με διάμετρο 0.6 mm έχει μικρότερη διάμετρο, γεγονός που υποδηλώνει ότι το υλικό εναποτίθεται με μεγαλύτερη ακρίβεια, επιτρέποντας καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας εκτύπωσης. Απεναντίας, το ακροφύσιο 0.8 mm έχει μεγαλύτερη διάμετρο, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να εξωθήσει περισσότερο υλικό ανά μονάδα χρόνου.

Από την περαιτέρω ανάλυση των παραγόντων που έγινε ως προς την ηλεκτρική αντίσταση, παρατηρήθηκε ότι η παράμετρος με την μεγαλύτερη συνεισφορά ανεξαρτήτως διαμέτρου ακροφυσίου είναι το ύψος στρώσης με μεγάλη διαφορά από την δεύτερη που είναι ο πολλαπλασιαστής εξώθησης.

Οι μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης κατά την μηχανική καταπόνηση, επιβεβαίωσαν καταρχάς τη λειτουργικότητα των αισθητήρων, την ικανότητα δηλαδή μεταβολής (αύξησης) της ηλεκτρικής αντίστασης του αγωγίμου δρόμου κατά την φόρτιση και την επακόλουθη αύξηση της κατά την αποφόρτιση. Ωστόσο, διακυμάνσεις στην απόδοση των αισθητήρων παρατηρήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις δειγμάτων. Δεδομένου ότι η διαδικασία κατασκευής είναι αυτοματοποιημένη και σταθερή από πλευράς παραμέτρων (σχεδιαστικών και κατασκευαστικών), θεωρείται πιθανή η διακύμανση της απόδοσης (ηλεκτρικής αγωγιμότητας) του ηλεκτρικά αγωγίμου θερμοπλαστικού νήματος που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, η επιλογή συγκεκριμένων παραμέτρων εκτύπωσης για βελτιστοποίηση δεν αποκλείει το ενδεχόμενο, επιπρόσθετα είδη παραμέτρων να επηρεάζουν έμμεσα τη λειτουργικότητα των αισθητήρων.

## 8.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση της διαδικασίας 3D εκτύπωσης πιεζοαντιστατικών αισθητήρων με χρήση εμπορικά διαθέσιμων θερμοπλαστικών υλικών. Οι αισθητήρες κατασκευάστηκαν θέτοντας στο επίκεντρο παραμέτρους που εντοπίστηκαν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Ωστόσο, οι διακυμάνσεις στην απόδοση των αισθητήρων οδηγεί στην πρόταση και εύρεση λύσεων για περαιτέρω βελτιστοποίηση της συνολικής διαδικασίας. Εν συντομία, οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα παρουσιάζονται ακολούθως:

α. Περαιτέρω μελέτη της βιβλιογραφίας και εντοπισμός σχεδιαστικών και κατασκευαστικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργικότητα των πιεζοαντιστατικών αισθητήρων που έχουν κατασκευαστεί μέσω 3D εκτύπωσης (π.χ. προσανατολισμός εναπόθεσης υλικού, πλάτος εναποτιθέμενων ράβδων).

β. Χρήση επιπλέον διαμέτρων ακροφυσίων (0.2 mm και 1.0 mm) και μελέτη της επίδρασης τους στην κατασκευαστική ακρίβεια και την ηλεκτρική απόκριση των αισθητήρων.

γ. Διερεύνηση περισσότερων επιλογών σύνθετων θερμοπλαστικών υλικών για την κατασκευή του αγώγιμου δρόμου του αισθητήρα, με διαφορετικές θερμοπλαστικές μήτρες σε σχέση με το TPU (π.χ. πολυαμίδιο – PA) και διαφορετικά αγώγιμα εγκλείσματα σε σχέση με το Carbon Black (π.χ. νανοσωλήνες άνθρακα – CNTs).

## Βιβλιογραφία

1. Φιλίππιδου Μυρτώ-Κυριακή (2019 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)) Εύκαμπτες διατάξεις αισθητήρων [Internet]. [cited 2022 Jun 15]. Available from: <https://freader.ekt.gr/eadd/index.php?doc=46259#page/52/mode/2up>
2. What is STRAIN | Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd. [Internet]. [cited 2022 Dec 3]. Available from: [https://tml.jp/e/knowledge/strain\\_gauge/about.html](https://tml.jp/e/knowledge/strain_gauge/about.html)
3. Χαλκιάς Γ. Ανάπτυξη αισθητήρων παραμόρφωσης με χρήση γραφενίου και πολυδιμεθυλοσιλοξάνης Διπλωματική εργασία.
4. ΤΕΙ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ.
5. Majumder S, Deen MJ. Smartphone Sensors for Health Monitoring and Diagnosis. Sensors 2019, Vol 19, Page 2164 [Internet]. 2019 May 9 [cited 2022 Dec 5];19(9):2164. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2164/htm>
6. Sci-Hub | Application of 3D Printing for Smart Objects with Embedded Electronic Sensors and Systems. Advanced Materials Technologies, 1(1), 1600013 | 10.1002/admt.201600013 [Internet]. [cited 2022 Dec 11]. Available from: <https://sci-hub.se/10.1002/admt.201600013>
7. ΤΕΙ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ.
8. Roh JS. Wearable Textile Strain Sensors. Fashion & Textile Research Journal [Internet]. 2016 Dec 31 [cited 2022 Jun 15];18(6):733–45. Available from: <https://doi.org/10.5805/SFTI.2016.18.6.733>
9. Tsouti V, Mitrakos V, Broutas P, Chatzandroulis S. Modeling and Development of a Flexible Carbon Black-Based Capacitive Strain Sensor. IEEE Sens J. 2016 May 1;16(9):3059–67.
10. Characterising the Surface Micromachining Process - Carbon Nanotubes [Internet]. [cited 2023 Feb 6]. Available from: <https://www.texaspowerfulsmart.com/carbon-nanotubes-2/characterising-the-surface-micromachining-process.html>
11. Thermoplastic elastomer - Wikipedia [Internet]. [cited 2022 Jun 15]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic\\_elastomer](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic_elastomer)
12. Christ JF, Aliheidari N, Ameli A, Pötschke P. 3D printed highly elastic strain sensors of multiwalled carbon nanotube/thermoplastic polyurethane nanocomposites. Mater Des. 2017 Oct 5;131:394–401.



13. Christ JF, Aliheidari N, Pötschke P, Ameli A. Bidirectional and Stretchable Piezoresistive Sensors Enabled by Multimaterial 3D Printing of Carbon Nanotube/Thermoplastic Polyurethane Nanocomposites. [cited 2022 Dec 5]; Available from: [www.mdpi.com/journal/polymers](http://www.mdpi.com/journal/polymers)
14. Zhao Y, Liu Y, Li Y, Hao Q. Development and Application of Resistance Strain Force Sensors. *Sensors* 2020, Vol 20, Page 5826 [Internet]. 2020 Oct 15 [cited 2022 Dec 6];20(20):5826. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/20/5826/htm>
15. Alamusu, Hu N, Fukunaga H, Atope S, Liu Y, Li J. Piezoresistive Strain Sensors Made from Carbon Nanotubes Based Polymer Nanocomposites. *Sensors* 2011, Vol 11, Pages 10691-10723 [Internet]. 2011 Nov 11 [cited 2022 Jun 15];11(11):10691–723. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/11/10691/htm>
16. Vidakis N, Petousis M, Kourinou M, Velidakis E, Mountakis N, Fischer-Griffiths PE, et al. Additive manufacturing of multifunctional polylactic acid (PLA)—multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) nanocomposites. <https://doi.org/10.1080/20550324.2021.2000231> [Internet]. 2021 [cited 2023 Jan 26];7(1):184–99. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/20550324.2021.2000231>
17. Kondawar SB, Patil PT. Conducting Polymer Nanocomposites for Sensor Applications. In 2017. p. 223–67.
18. Li Y, Liao Y, Su Z. Graphene-functionalized polymer composites for self-sensing of ultrasonic waves: An initiative towards “sensor-free” structural health monitoring. *Compos Sci Technol*. 2018 Nov 10;168:203–13.
19. Khan T, Irfan MS, Ali M, Dong Y, Ramakrishna S, Umer R. Insights to low electrical percolation thresholds of carbon-based polypropylene nanocomposites. *Carbon N Y*. 2021 May 1;176:602–31.
20. Development of an Equation to Model Electrical Conductivity of Polymer-Based Carbon Nanocomposites. 2014;
21. Li Y, Liao Y, Su Z. Graphene-functionalized polymer composites for self-sensing of ultrasonic waves: An initiative towards “sensor-free” structural health monitoring. *Compos Sci Technol*. 2018 Nov 10;168:203–13.
22. Novoselov KS, Geim AK, Morozov S v, Jiang D, Katsnelson MI, Grigorieva I v, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. 2005;

23. Ku-Herrera JJ, Avilés F, Seidel GD. Self-sensing of elastic strain, matrix yielding and plasticity in multiwall carbon nanotube/vinyl ester composites. *Smart Mater Struct* [Internet]. 2013 Jun 27 [cited 2022 Jun 15];22(8):085003. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/22/8/085003>
24. Lima AMF, de Castro VG, Borges RS, Silva GG. Electrical conductivity and thermal properties of functionalized carbon nanotubes/polyurethane composites. *Polimeros*. 2012;22(2):117–24.
25. Fu X, Ramos M, Al-Jumaily AM, Meshkinzar A, Huang X. Stretchable strain sensor facilely fabricated based on multi-wall carbon nanotube composites with excellent performance. *J Mater Sci* [Internet]. 2019 Feb 1 [cited 2022 Sep 21];54(3):2170–80. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-018-2954-4>
26. Carbon Black Research Paper - 1315 Words | Internet Public Library [Internet]. [cited 2022 Dec 29]. Available from: <https://www.ipl.org/essay/Carbon-Black-Literature-Review-PCCL4BWSWU>
27. Castro E v, Novoselov KS, Morozov S v, Peres NMR, Lopes JMB, Santos D, et al. Biased Bilayer Graphene: Semiconductor with a Gap Tunable by the Electric Field Effect. 2007;
28. Llobet E. Carbon nanomaterials. *Advanced Nanomaterials for Inexpensive Gas Microsensors: Synthesis, Integration and Applications*. 2019 Jan 1;55–84.
29. De S, Higgins TM, Lyons PE, Doherty EM, Nirmalraj PN, Blau WJ, et al. Silver nanowire networks as flexible, transparent, conducting films: Extremely high DC to optical conductivity ratios. *ACS Nano*. 2009 Jul 28;3(7):1767–74.
30. Sci-Hub | Fused Filament Fabrication Three-Dimensional Printing Multi-Functional of Polylactic Acid/Carbon Black Nanocomposites. *C*, 7(3), 52 | 10.3390/c7030052 [Internet]. [cited 2022 Dec 11]. Available from: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.3390/c7030052>
31. Na SI, Kim SS, Jo J, Kim DY. Efficient and flexible ITO-free organic solar cells using highly conductive polymer anodes. *Advanced Materials*. 2008 Nov 3;20(21):4061–7.
32. Chang YM, Wang L, Su WF. Polymer solar cells with poly(3,4-ethylenedioxythiophene) as transparent anode. *Org Electron*. 2008;9(6):968–73.
33. Pang S, Hernandez Y, Feng X, Müllen K. Graphene as transparent electrode material for organic electronics. *Advanced Materials*. 2011 Jul 5;23(25):2779–95.

34. Zhu Y, Murali S, Cai W, Li X, Suk JW, Potts JR, et al. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications. *Advanced Materials*. 2010 Sep 15;22(35):3906–24.
35. Guo CX, Guai GH, Li CM. Graphene based materials: Enhancing solar energy harvesting. *Adv Energy Mater*. 2011 May;1(3):448–52.
36. Fasolino A, Los JH, Katsnelson MI. Intrinsic ripples in graphene. *Nat Mater*. 2007;6(11):858–61.
37. Lee C, Wei X, Kysar JW, Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science (1979)*. 2008 Jul 18;321(5887):385–8.
38. Blake P, Brimicombe PD, Nair RR, Booth TJ, Jiang D, Schedin F, et al. Graphene-based liquid crystal device. *Nano Lett*. 2008 Jun;8(6):1704–8.
39. Novoselov KS, Geim AK, Morozov S v., Jiang D, Zhang Y, Dubonos S v., et al. Electric field in atomically thin carbon films. *Science (1979)*. 2004 Oct 22;306(5696):666–9.
40. Gomez De Arco L, Zhang Y, Schlenker CW, Ryu K, Thompson ME, Zhou C. Continuous, highly flexible, and transparent graphene films by chemical vapor deposition for organic photovoltaics. *ACS Nano*. 2010 May 25;4(5):2865–73.
41. Viculis LH, Mack JJ, Kaner RB. A chemical route to carbon nanoscrolls. *Science (1979)*. 2003 Feb 28;299(5611):1361.
42. Liu X, Lin T, Zhou M, Bi H, Cui H, Wan D, et al. A novel method for direct growth of a few-layer graphene on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film. *Carbon N Y*. 2014 May;71:20–6.
43. Kim KB, Lee CM, Choi J. Catalyst-free direct growth of triangular nano-graphene on all substrates. *Journal of Physical Chemistry C*. 2011 Aug 4;115(30):14488–93.
44. Lee CM, Choi J. Direct growth of nanographene on glass and postdeposition size control. *Appl Phys Lett*. 2011 May 2;98(18).
45. Zhang L, Shi Z, Wang Y, Yang R, Shi D, Zhang G. Catalyst-free growth of nanographene films on various substrates. *Nano Res*. 2011;4(3):315–21.
46. Ding X, Ding G, Xie X, Huang F, Jiang M. Direct growth of few layer graphene on hexagonal boron nitride by chemical vapor deposition. *Carbon N Y*. 2011 Jun;49(7):2522–5.
47. Rümeli MH, Bachmatiuk A, Scott A, Börrnert F, Warner JH, Hoffman V, et al. Direct low-temperature nanographene cvd synthesis over a dielectric insulator. *ACS Nano*. 2010 Jul 27;4(7):4206–10.

48. Davis BA, Gramann PJ, Osswald TA, Rios AC, Hanser C, Utracki LA. I Z L O G K N J I G A Compression Molding Clay-Containing Polymeric Nanocomposites. 2004;
49. FT-IR spectra of GNP dispersed in a) cyclohexane, b) PGMEA, c) DEGDME... | Download Scientific Diagram [Internet]. [cited 2023 Feb 7]. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/FT-IR-spectra-of-GNP-dispersed-in-a-cyclohexane-b-PGMEA-c-DEGDME-and-d-isopropanol\\_fig4\\_281720343](https://www.researchgate.net/figure/FT-IR-spectra-of-GNP-dispersed-in-a-cyclohexane-b-PGMEA-c-DEGDME-and-d-isopropanol_fig4_281720343)
50. Quist AP, Pavlovic E, Oscarsson S. Recent advances in microcontact printing. *Anal Bioanal Chem.* 2005 Feb;381(3):591–600.
51. Li HW, Muir BVO, Fichet G, Huck WTS. Nanocontact printing: A route to sub-50-nm-scale chemical and biological patterning. *Langmuir.* 2003 Mar 18;19(6):1963–5.
52. Li D, Guo LJ. Micron-scale organic thin film transistors with conducting polymer electrodes patterned by polymer inking and stamping. *Appl Phys Lett.* 2006 Feb;88(6).
53. Benor A, Wagner V, Knipp D. Microstructuring by microcontact printing and selective surface dewetting. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures.* 2007;25(4):1321.
54. Sci-Hub | Chemical structure change of a KRF-laser irradiated PET fiber surface. *Journal of Applied Polymer Science*, 71(12), 2027–2031 | 10.1002/(sici)1097-4628(19990321)71:12<2027::aid-app12>3.0.co;2-k [Internet]. [cited 2022 Jun 15]. Available from: [https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990321\)71:12%3C2027::AID-APP12%3E3.0.CO;2-K](https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990321)71:12%3C2027::AID-APP12%3E3.0.CO;2-K)
55. Watanabe H, Takata T, Tsuge M. Polymer surface modification due to excimer laser radiation—Chemical and physical changes in the surface structure of poly(ethylene terephthalate). *Polym Int.* 1993;31(3):247–54.
56. Pugmire DL, Waddell EA, Haasch R, Tarlov MJ, Locascio LE. Surface characterization of laser-ablated polymers used for microfluidics. *Anal Chem.* 2002 Feb 15;74(4):871–8.
57. Sci-Hub | Role of characterization techniques in evaluating the material properties of nanoparticle-based polymer materials. *Polymer Nanocomposite-Based Smart Materials*, 21–39 | 10.1016/b978-0-08-103013-4.00002-9 [Internet]. [cited 2023 Jan 26]. Available from: <https://sci-hub.ru/https://sci-hub.st/10.1016/B978-0-08-103013-4.00002-9>

58. Muthukumar C, Jusuarockiam N, Krishnasamy S kumar, T SMK, Jawaid M, Ridwan IM, et al. Role of characterization techniques in evaluating the material properties of nanoparticle-based polymer materials. *Polymer Nanocomposite-Based Smart Materials*. 2020;21–39.
59. Sci-Hub | Microscopy and Spectroscopy Techniques for Characterization of Polymeric Membranes. *Membranes*, 10(2), 33 | 10.3390/membranes10020033 [Internet]. [cited 2023 Jan 26]. Available from: <https://sci-hub.ru/https://doi.org/10.3390/membranes10020033>
60. Χαρακτηρισμός Νανοδομημένων Υλικών - Μυστηρίδου Εμμανουέλα | PDF [Internet]. [cited 2022 Jun 15]. Available from: <https://www.scribd.com/doc/45108732/%CE%A7%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82-%CE%9D%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%B7%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD-%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD-%CE%9C%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%AF%CE%B4%CE%BF%CF%85-%CE%95%CE%BC%CE%BC%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CF%85%CE%AD%CE%BB%CE%B1>
61. Trushinski BJ, Dickson JM, Smyth T, Childs RF, McCarry BE. Polysulfonamide thin-film composite reverse osmosis membranes. *J Memb Sci*. 1998 May 27;143(1–2):181–8.
62. Krishnamoorti R. Strategies for dispersing nanoparticles in polymers. *MRS Bull*. 2007;32(4):341–7.
63. Sci-Hub | Design, Synthesis and Architectures of Hybrid Nanomaterials for Therapy and Diagnosis Applications. *Polymers*, 10(5), 527 | 10.3390/polym10050527 [Internet]. [cited 2023 Jan 26]. Available from: <https://sci-hub.ru/https://sci-hub.se/10.3390/polym10050527>
64. "ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ".
65. Kallipos: Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής και Τριδιάστατης Εκτύπωσης [Internet]. [cited 2023 Jan 26]. Available from: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/4524>
66. Stereolithography (SLA) 3D Printing Guide [Internet]. [cited 2022 Jun 19]. Available from: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
67. Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. 2021;
68. What is FFF?: Fused filament fabrication technology for 3D printing [Internet]. [cited 2022 Jun 19]. Available from: <https://ultimaker.com/learn/what-is-fff-fused-filament-fabrication-technology-for-3d-printing>

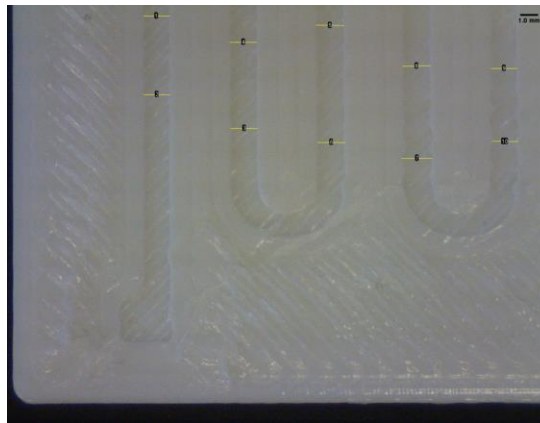
69. Original Prusa i3 MK3S+ | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa [Internet]. [cited 2023 Jan 26]. Available from: <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/>
70. Handbook of Thermoplastics - Βιβλία Google [Internet]. [cited 2022 Jun 19]. Available from:  
[https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=kjg0CwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=handbook+of+thermoplastics+olagoke+olabisi&ots=pVSX87T5QC&sig=2AX18QNgU9yIrlgEHQbS5a deUE4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=handbook%20of%20thermoplastics%20olagoke%20olabisi&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=kjg0CwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=handbook+of+thermoplastics+olagoke+olabisi&ots=pVSX87T5QC&sig=2AX18QNgU9yIrlgEHQbS5a deUE4&redir_esc=y#v=onepage&q=handbook%20of%20thermoplastics%20olagoke%20olabisi&f=false)
71. Plastic Co-Extrusion Process | Gemini Group [Internet]. [cited 2022 Jun 29]. Available from: <https://geminigroup.net/plastics/profile-extrusion-gpi-sp/processes/single-co-extrusion/>
72. Abels C, Qualtieri A, Lober T, Mariotti A, Chambers LD, de Vittorio M, et al. Bidirectional biomimetic flow sensing with antiparallel and curved artificial hair sensors. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2019;10(1):32–46.
73. Liu H, Zhang H, Han W, Lin H, Li R, Zhu J, et al. 3D Printed Flexible Strain Sensors: From Printing to Devices and Signals. *Advanced Materials*. 2021 Feb 1;33(8).
74. Roy RK. A PRIMER ON THE TAGUCHI METHOD SECOND EDITION. 2010 [cited 2022 Nov 25]; Available from: [www.sme.org/store](http://www.sme.org/store)
75. Εργασία Μ. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ».
76. Sci-Hub | Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. *Journal of Cleaner Production*, 53, 195–203 | 10.1016/j.jclepro.2013.03.049 [Internet]. [cited 2022 Nov 25]. Available from: <https://sci-hub.se/http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.049>
77. Roy RK. A primer on the Taguchi method. Society of Manufacturing Engineers; 2010. 304 p.
78. Zhang Z, Gkartzou E, Jestin S, Semitekolos D, Pappas PN, Li X, et al. 3D Printing Processability of a Thermally Conductive Compound Based on Carbon Nanofiller-Modified Thermoplastic Polyamide 12. *Polymers* 2022, Vol 14, Page 470 [Internet]. 2022 Jan 25 [cited 2022 Dec 3];14(3):470. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/3/470/htm>

79. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Mater Des.* 2009;30:4243–52.
80. Lokesh N, Praveena BA, Sudheer Reddy J, Vasu VK, Vijaykumar S. Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature. *Mater Today Proc.* 2022 Jan 1;52:1288–93.
81. Sharma K, Kumar K, Singh KR, Rawat MS. Optimization of FDM 3D printing process parameters using Taguchi technique. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* [Internet]. 2021 Jul 1 [cited 2023 Feb 6];1168(1):012022. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1168/1/012022>
82. Hikmat M, Rostam S, Ahmed YM. Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology. *Results in Engineering.* 2021 Sep 1;11:100264.
83. Garg N, Rastogi V, Kumar P. Process parameter optimization on the dimensional accuracy of additive manufacture Thermoplastic Polyurethane (TPU) using RSM. [cited 2023 Feb 7]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.309>
84. Experimental study on dimensional accuracy of freeform fabricated thermoplastic polyurethane.
85. Kechagias JD, Vidakis N, Petousis M. Parameter effects and process modeling of FFF-TPU mechanical response. *Materials and Manufacturing Processes.* 2021;
86. Ahammed SR, Praveen AS. Optimization parameters effects on electrical conductivity of 3D printed circuits fabricated by direct ink writing method using functionalized multiwalled carbon nanotubes and polyvinyl alcohol conductive ink. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization* [Internet]. 2021 [cited 2023 Feb 7];12:7. Available from: [https://www.ijsmdo.org/articles/smdo/full\\_html/2021/01/smdo210059/smdo210059.html](https://www.ijsmdo.org/articles/smdo/full_html/2021/01/smdo210059/smdo210059.html)
87. Medición de Torque utilizando STRAIN GAGE – Finilager [Internet]. [cited 2022 Dec 5]. Available from: <https://www.finilager.bo/servicios-de-ingenieria/medicion-de-torque-utilizando-strain-gage/>

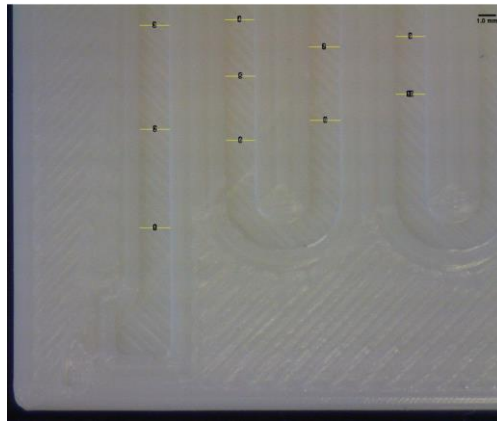
88. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
89. Alqaheem Y, Alomair AA. Microscopy and spectroscopy techniques for characterization of polymeric membranes. Membranes (Basel). 2020 Feb 1;10(2).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### 3D Εκτυπώσεις υποστρώματος με χρήση ακροφυσίου διαμέτρου 0.6mm

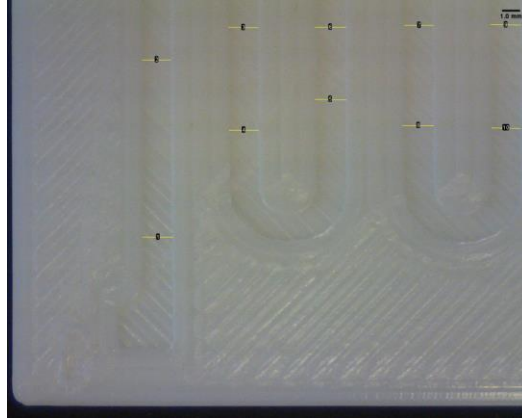


Σχήμα 58: φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 1 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

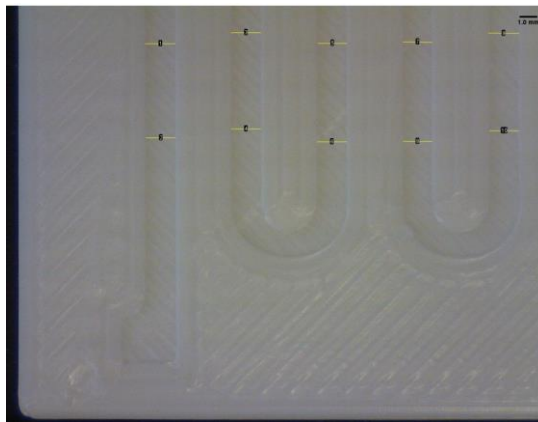


Σχήμα 59: φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 2 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

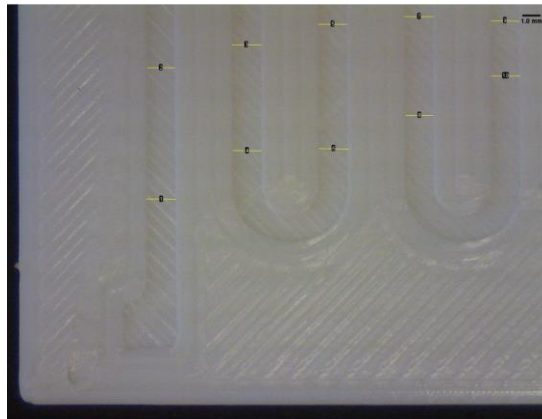




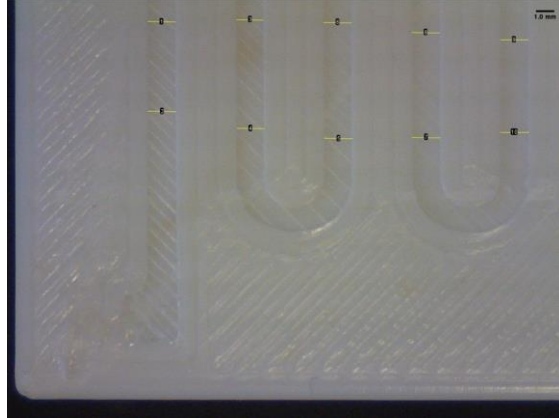
**Σχήμα 60:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 3 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



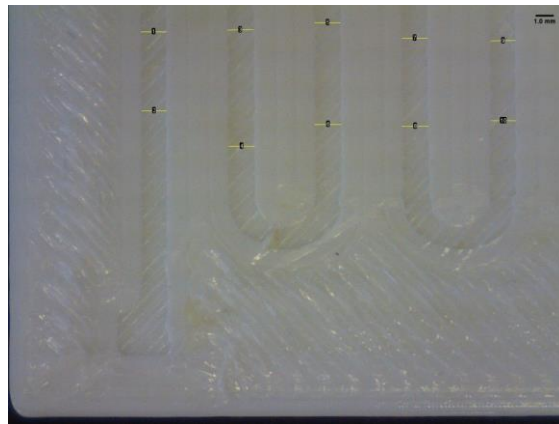
**Σχήμα 61:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 4 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



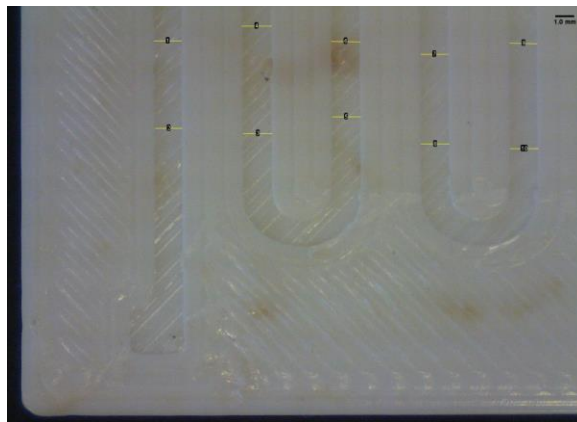
**Σχήμα 62:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 5 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



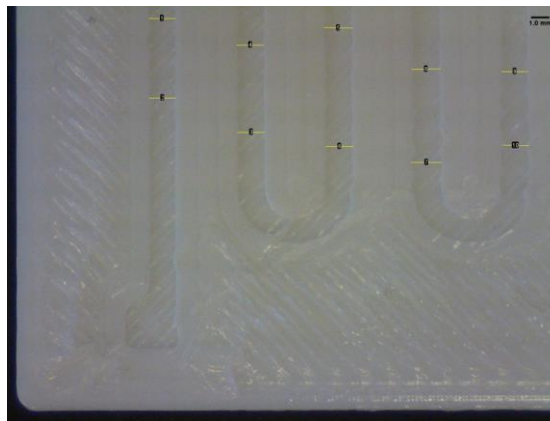
**Σχήμα 63:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 6 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 64:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 7 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

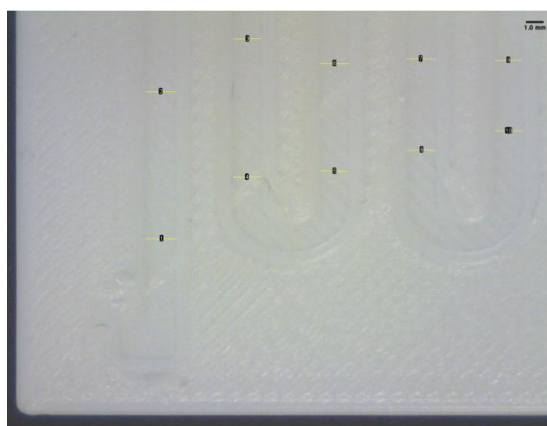


**Σχήμα 65:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 8 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

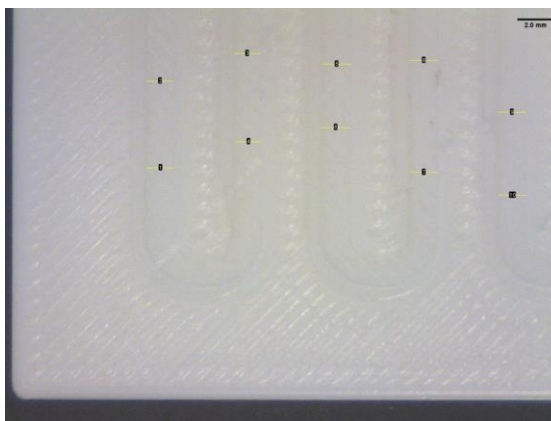


**Σχήμα 66:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 9 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

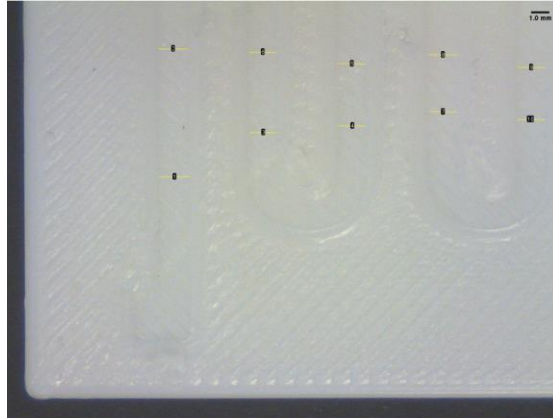
### 3D Εκτυπώσεις υποστρώματος με χρήση ακροφυσίου διαμέτρου 0.8mm



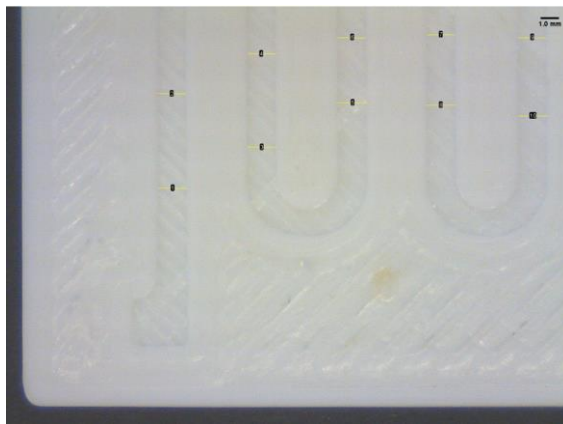
**Σχήμα 67:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 1 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



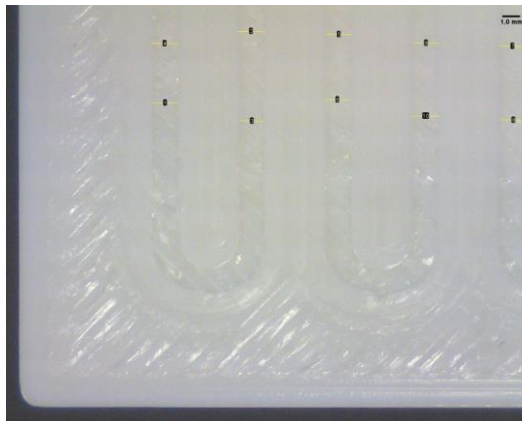
**Σχήμα 68:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 2 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 69:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 3 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



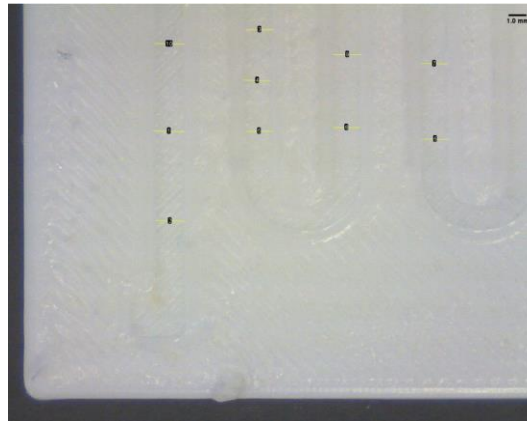
**Σχήμα 70:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 4 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 71:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 5 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 72:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 6 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 73:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 7 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 74:** φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 8 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



Σχήμα 75: φωτογραφίες από το υπόστρωμα εκτύπωσης 9 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

Πίνακας 34: Αποτελέσματα των μετρήσεων του υποστρώματος (3D εκτυπώσεις με ακροφύσιο 0.6mm).

Μέτρηση Πλάτος δρόμου	Εκτύπωση 1	Εκτύπωση 2	Εκτύπωση 3	Εκτύπωση 4	Εκτύπωση 5	Εκτύπωση 6	Εκτύπωση 7	Εκτύπωση 8	Εκτύπωση 9
1	1,718	1,816	1,425	1,528	1,61	1,603	1,436	1,527	1,459
2	1,84	1,711	1,414	1,558	1,524	1,546	1,442	1,503	1,486
3	1,767	1,661	1,4435	1,526	1,573	1,59	1,491	1,636	1,448
4	1,791	1,661	1,453	1,556	1,561	1,597	1,316	1,66	1,448
5	1,767	1,636	1,305	1,512	1,561	1,51	1,516	1,576	1,522
6	1,791	1,661	1,429	1,566	1,585	1,522	1,566	1,608	1,492
7	1,767	1,612	1,418	1,528	1,598	1,531	1,491	1,536	1,644
8	1,743	1,735	1,43	1,557	1,488	1,539	1,541	1,592	1,522
9	1,742	1,711	1,443	1,543	1,543	1,534	1,417	1,54	1,423
10	1,816	1,649	1,326	1,514	1,567	1,519	1,442	1,588	1,444
Μέση τιμή	1,7742	1,6853	1,40865	1,5388	1,561	1,5491	1,4888	1,5766	1,4888
Ονομαστική τιμή	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Απόκλιση	0,2258	0,3147	0,59135	0,4612	0,439	0,4509	0,5112	0,5234	0,5112

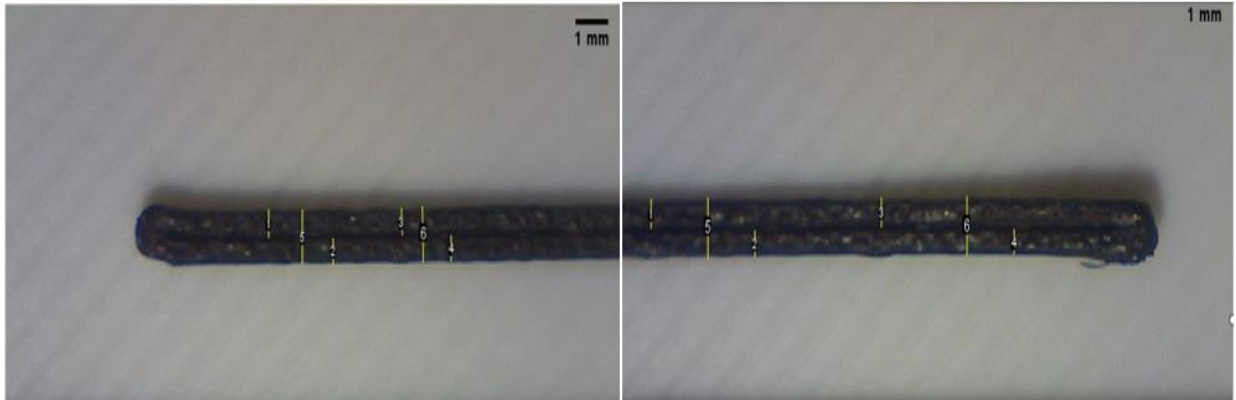
Πίνακας 35: Αποτελέσματα των μετρήσεων του υποστρώματος (3D εκτυπώσεις με ακροφύσιο 0.8mm).

Μέτρηση πλάτος δρόμου	Εκτύπωση 1	Εκτύπωση 2	Εκτύπωση 3	Εκτύπωση 4	Εκτύπωση 5	Εκτύπωση 6	Εκτύπωση 7	Εκτύπωση 8	Εκτύπωση 9
1	1.703	1,506	1,667	1,545	1,431	1,525	1,708	1,237	1,16
2	1.729	1,506	1,641	1,469	1,456	1,45	1,557	1,199	1,259
3	1.576	1,383	1,538	1,519	1,356	1,45	1,506	1,237	1,16
4	1.627	1,506	1,564	1,481	1,356	1,525	1,494	1,388	1,21
5	1.551	1,58	1,564	1,557	1,431	1,4	1,481	1,464	1,235
6	1.653	1,556	1,513	1,494	1,356	1,475	1,469	1,388	1,284
7	1.627	1,605	1,539	1,494	1,31	1,425	1,406	1,136	1,111

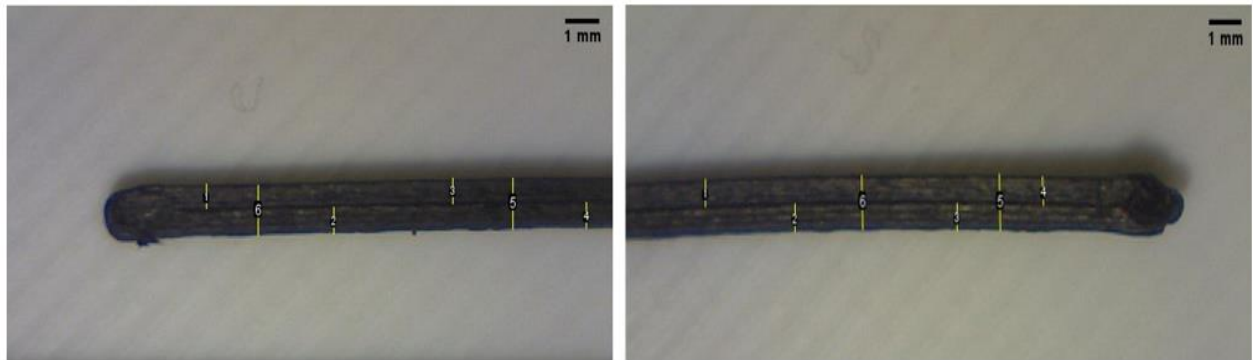
<b>8</b>	1,525	1,556	1,564	0,532	1,481	1,475	1,456	1,312	1,284
<b>9</b>	1,525	1,556	1,513	1,494	1,356	1,551	1,531	1,236	1,21
<b>10</b>	1,589	1,556	1,513	1,608	1,506	1,525	1,607	1,439	1,226
<b>Μέση τιμή</b>	1,6105	1,531	1,5616	1,5193	1,416	1,4801	1,5215	1,3036	1,2173
<b>Ονομαστική τιμή</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>απόκλιση</b>	0,3895	0,469	0,4384	0,4807	0,584	0,5199	0,4785	0,6964	0,7827

### 3D εκτυπώσεις αγωγίμου νήματος – Δείγματα απλής γεωμετρίας

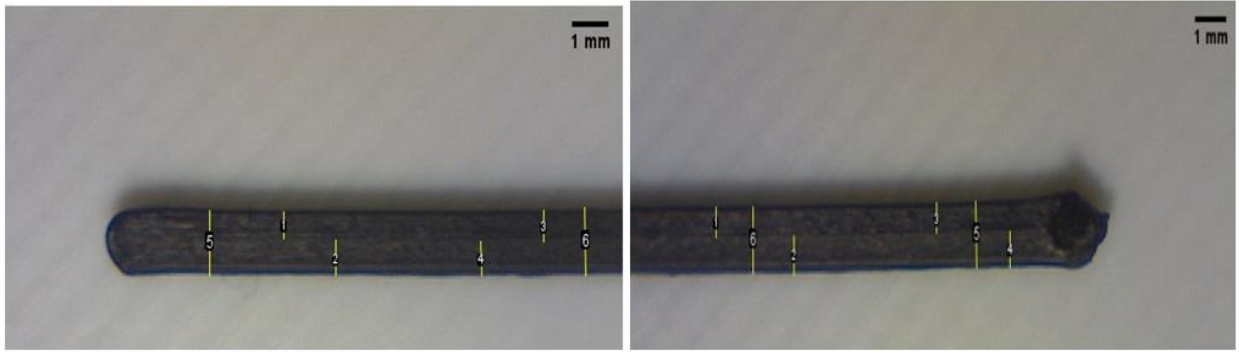
*3D εκτυπωμένοι αγωγίμοι δρόμοι με διάμετρο ακροφυσίου 0.6 mm*



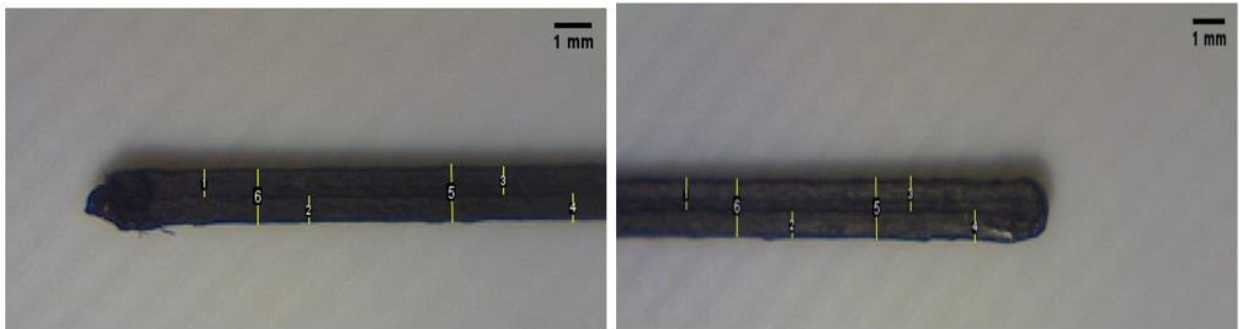
**Σχήμα 76:** φωτογραφίες από αγωγίμου δρόμου 1 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



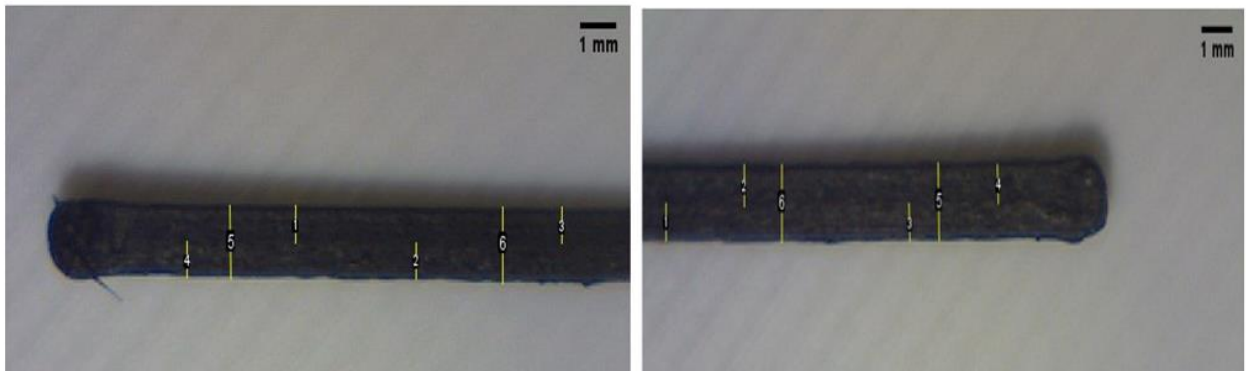
**Σχήμα 77:** φωτογραφίες από αγωγίμου δρόμου 2 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 78:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 3 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

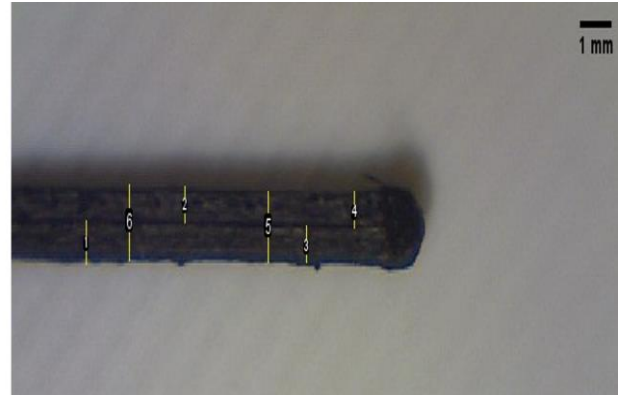
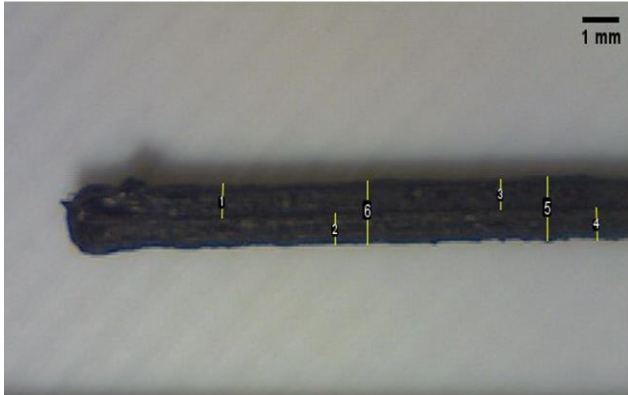


**Σχήμα 79:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 4 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

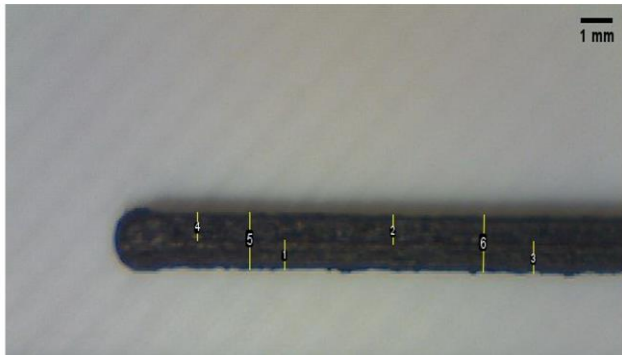


**Σχήμα 80:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 5 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

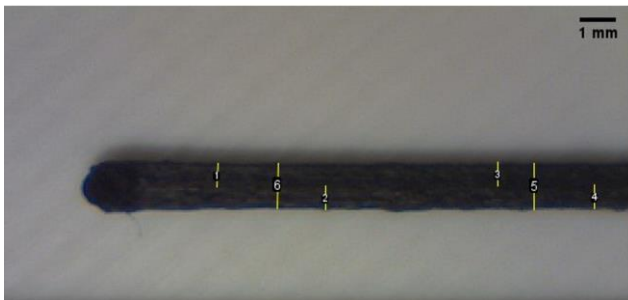




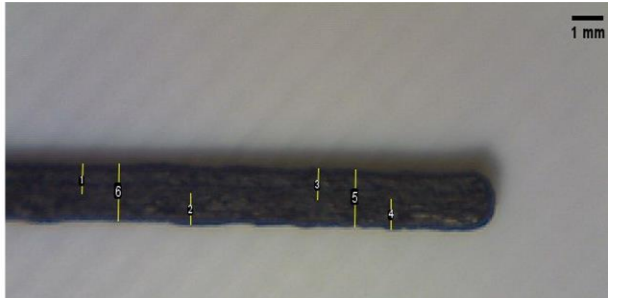
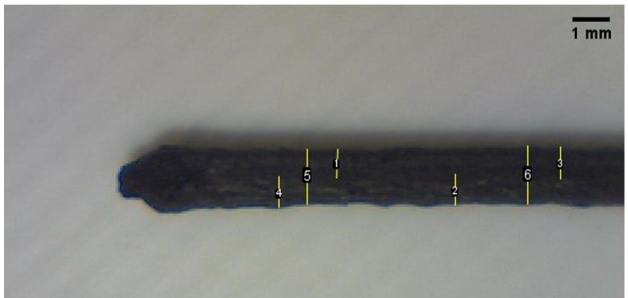
**Σχήμα 81:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 6 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 82:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 7 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

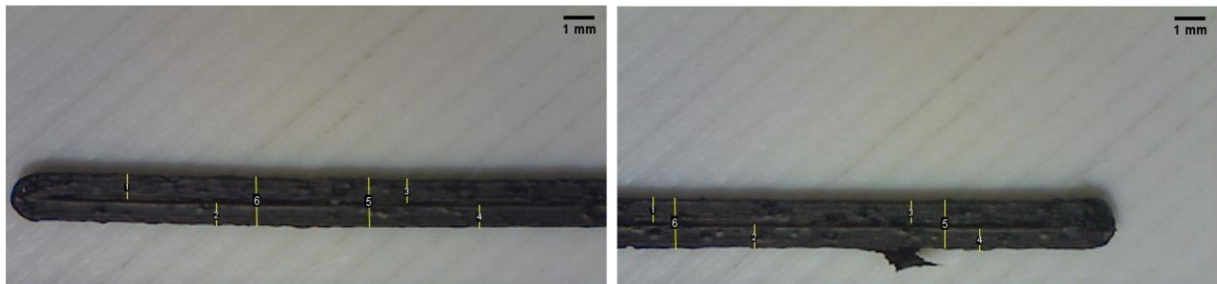


**Σχήμα 83:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 8 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

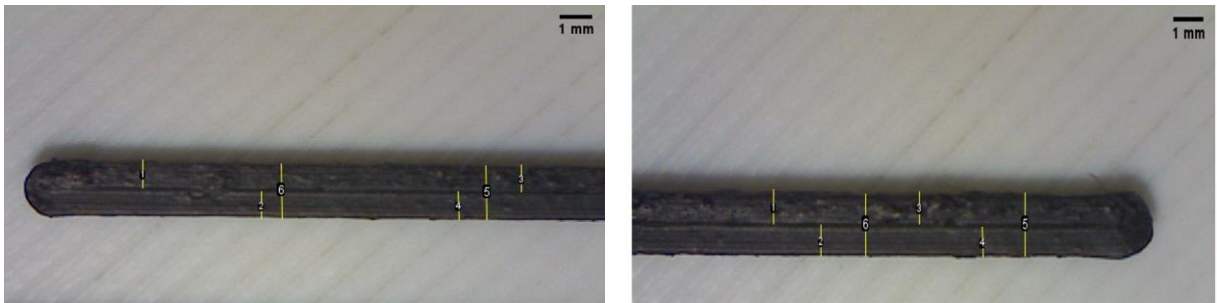


**Σχήμα 84:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 9 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

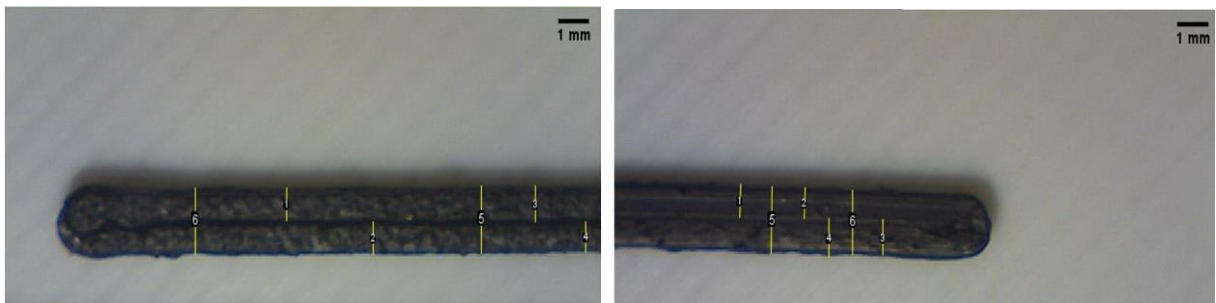
*3D εκτυπωμένοι αγώγιμοι δρόμοι με διάμετρο ακροφυσίου 0.8 mm*



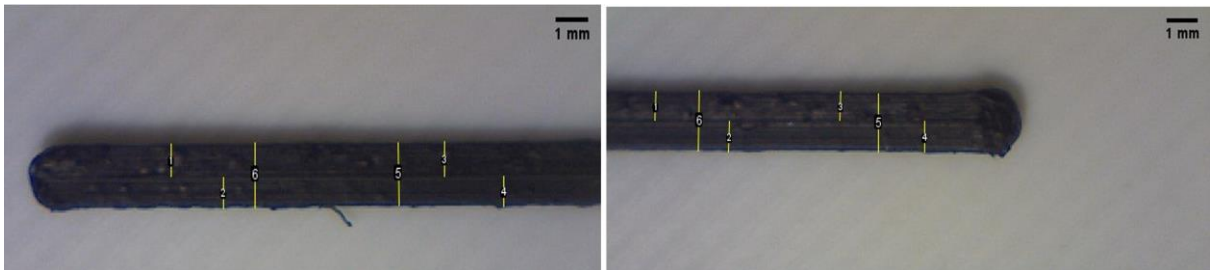
Σχήμα 85 φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 1 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



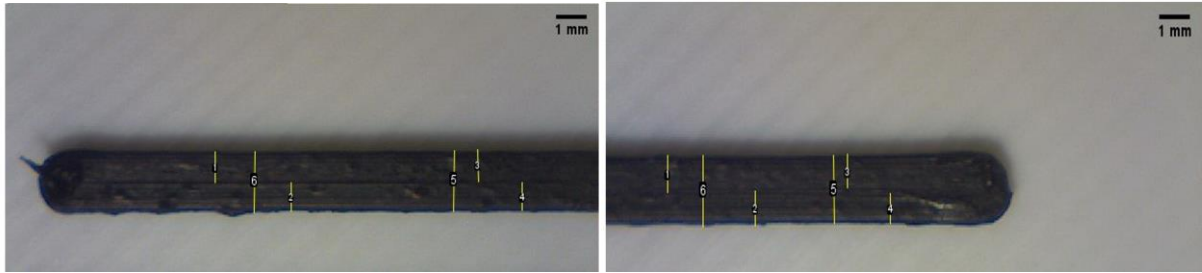
Σχήμα 86: φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 2 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



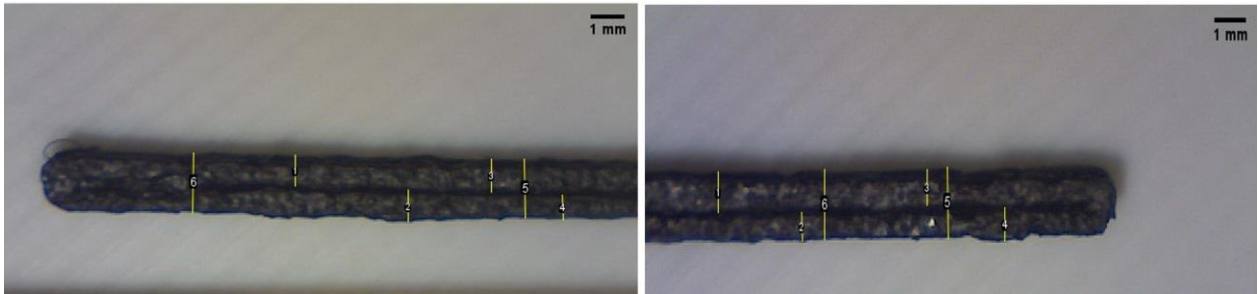
Σχήμα 87: φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 3 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



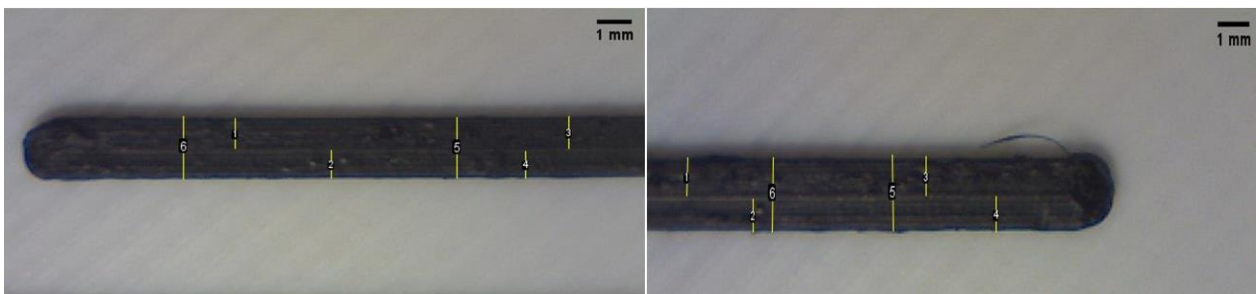
Σχήμα 88: φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 4 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



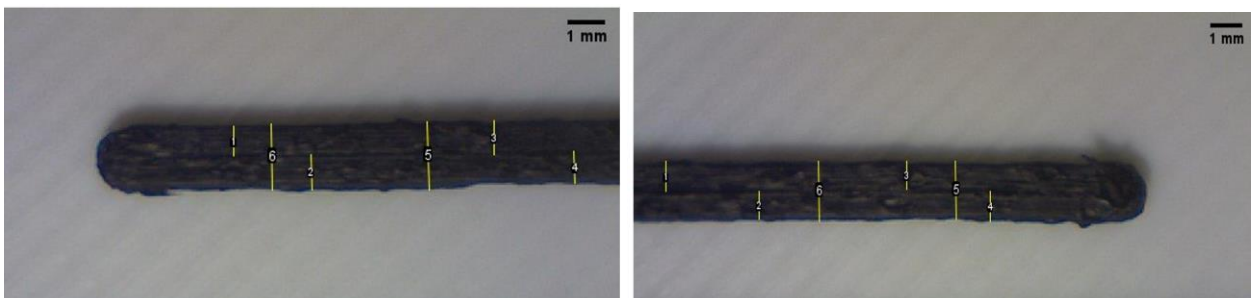
**Σχήμα 89:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 5 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



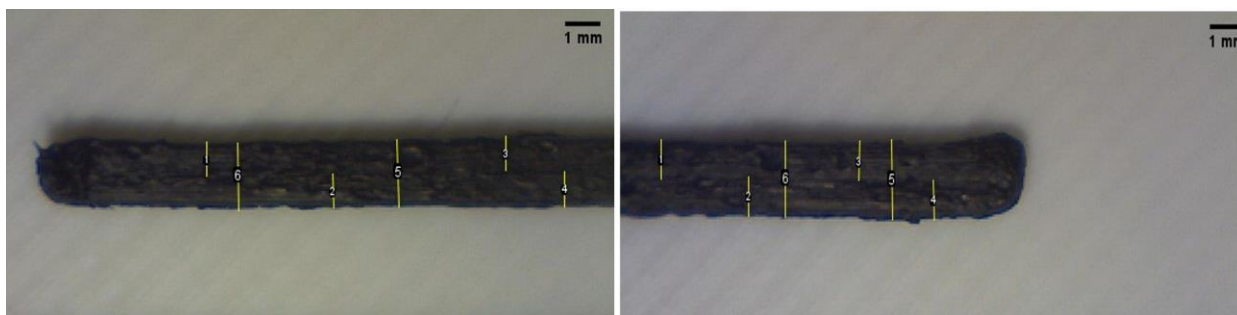
**Σχήμα 90:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 6 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 91:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 7 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



**Σχήμα 92:** φωτογραφίες από αγώγιμου δρόμου 8 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων



Σχήμα 93: φωτογραφίες από αγώγιμο δρόμο 9 από 9 σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων

Πίνακας 36: Μετρήσεις ράβδων (single track) δείγματος απλής γεωμετρίας εκτυπωμένο με ακροφύσιο διαμέτρου 0.6mm.

Μέτρηση ράβδων	Εκτύπωσ η 1	Εκτύπωσ η 2	Εκτύπωσ η 3	Εκτύπωσ η 4	Εκτύπωσ η 5	Εκτύπωσ η 6	Εκτύπωσ η 7	Εκτύπωσ η 8	Εκτύπωσ η 9
1	0,605	0,733	0,838	0,626	0,749	0,665	0,641	0,595	0,759
2	0,595	0,694	0,569	0,631	0,769	0,663	0,662	0,592	0,759
3	0,564	0,577	0,836	0,595	0,697	0,687	0,662	0,597	0,774
4	0,544	0,569	0,569	0,615	0,656	0,674	0,641	0,769	0,8
5	0,615	0,623	0,59	0,626	0,715	0,605	0,692	0,781	0,731
6	0,615	0,585	0,596	0,672	0,769	0,636	0,739	0,781	0,746
7	0,539	0,564	0,754	0,569	0,723	0,723	0,677	0,595	0,774
8	0,541	0,572	0,788	0,574	0,723	0,697	0,646	0,579	0,738
Μέση τιμή	0,57725	0,614625	0,6925	0,6135	0,725125	0,66875	0,67	0,661125	0,760125
Ονομαστικ ή τιμή	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
απόκλιση	0,10275	0,065375	0,0125	0,0665	0,045125	0,01125	0,01	0,018875	0,080125

Πίνακας 37: Μετρήσεις πάχους δείγματος απλής γεωμετρίας εκτυπωμένο με ακροφύσιο διαμέτρου 0.6 mm.

Μέτρηση πάχους δείγματος	Εκτύπωσ η 1	Εκτύπωσ η 2	Εκτύπωσ η 3	Εκτύπωσ η 4	Εκτύπωσ η 5	Εκτύπωσ η 6	Εκτύπωσ η 7	Εκτύπωσ η 8	Εκτύπωσ η 9
1	1,185	1,308	1,449	1,297	1,405	1,392	1,354	1,369	1,574
2	1,231	1,346	1,423	1,287	1,482	1,377	1,323	1,379	1,497
3	1,197	1,226	1,373	1,39	1,462	1,349	1,331	1,369	1,577
4	1,167	1,272	1,373	1,338	1,454	1,364	1,392	1,374	1,546
Μέση τιμή	1,195	1,288	1,4045	1,328	1,45075	1,3705	1,35	1,37275	1,5485
Ονομαστικ ή τιμή	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76
απόκλιση	0,565	0,472	0,3555	0,432	0,30925	0,3895	0,41	0,38725	0,2115

Πίνακας 38: Μετρήσεις ράβδων (single track) δείγματος απλής γεωμετρίας εκτυπωμένο με ακροφύσιο διαμέτρου 0.8 mm.

Μέτρηση	Εκτύπωσ	Εκτύπωσ	Εκτύπωσ	Εκτύπωσ	Εκτύπωσ	Εκτύπωσ	Εκτύπωσ	Εκτύπωσ	Εκτύπωσ
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

ράβδων	η 1	η 2	η 3	η 4	η 5	η 6	η 7	η 8	η 9
1	0,853	0,826	0,826	0,742	0,929	0,934	0,857	0,872	0,98
2	0,782	0,857	0,882	0,796	0,857	1,01	0,872	0,842	0,918
3	0,716	0,807	0,759	0,773	0,939	0,735	0,827	0,969	0,896
4	0,716	0,853	0,792	0,819	0,857	0,689	0,816	0,944	0,927
5	0,73	0,854	0,935	0,819	0,888	0,934	0,857	0,806	0,957
6	0,706	0,838	0,969	0,727	0,847	0,727	0,939	0,842	0,934
7	0,755	0,744	0,771	0,811	0,816	0,934	0,77	0,811	0,926
8	0,755	0,723	0,761	0,85	0,821	0,666	0,801	0,811	0,88
Μέση τιμή	0,751625	0,81275	0,836875	0,792125	0,86925	0,828625	0,842375	0,862125	0,92725
Ονομαστικ ή τιμή	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
απόκλιση	0,128375	0,06725	0,043125	0,87875	0,01075	0,051375	0,037625	0,017875	0,04725

Πίνακας 39: Μετρήσεις πάχους δείγματος απλής γεωμετρίας εκτυπωμένο με ακροφόσιο διαμέτρου 0.8 mm.

Μέτρηση πάχους δείγματος	Εκτύπωσ η 1	Εκτύπωσ η 2	Εκτύπωσ η 3	Εκτύπωσ η 4	Εκτύπωσ η 5	Εκτύπωσ η 6	Εκτύπωσ η 7	Εκτύπωσ η 8	Εκτύπωσ η 9
1	1,569	1,646	1,831	1,714	1,827	1,776	1,746	1,811	1,852
2	1,608	1,685	1,854	1,684	1,786	1,776	1,737	1,76	1,913
3	1,554	1,669	1,823	1,699	1,811	1,745	1,806	1,633	1,906
4	0,538	1,715	1,837	1,676	1,847	1,753	1,776	1,648	1,883
Μέση τιμή	1,56725	1,56725	0,83625	1,69325	1,81775	1,7625	1,76625	1,713	1,8885
Ονομαστικ ή τιμή	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76
απόκλιση	0,19275	0,19275	0,07625	0,06675	0,05775	0,0025	0,00625	0,047	0,1285