



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE

Διπλωματική εργασία:

**Ανάπτυξη μετρητικής διάταξης για την μέτρηση παροχής αέρα
με χρήση πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης και πλήρως
εκτυπωμένης δομής με ενσωματωμένη πιεζοαντίσταση**

**Development of an air flow measurement device employing a
piezoelectric membrane and a 3D printed structure containing
a piezoresistor**

Ιωάννης Γ. Ματσούκας
Α.Μ.: 51115058

Επιβλέπων Καθηγητής:
Δημήτριος Ν. Παγώνης

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023

- Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή -



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE

Πτυχιακή εργασία:

Ανάπτυξη μετρητικής διάταξης για την μέτρηση παροχής αέρα με χρήση πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης και πλήρως εκτυπωμένης δομής με ενσωματωμένη πιεζοαντίσταση

Συγγραφέας:

Ιωάννης Γ. Ματσούκας (51115058)

Επιβλέπων:

Δημήτριος Νικόλαος Παγώνης,
Αναπληρωτής Καθηγητής, ΠΑ.Δ.Α

Ημερομηνία εξέτασης:

03/02/2023

Εξεταστική Επιτροπή:

Δ.Ν. Παγώνης
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α

Δημήτριος Κουμπογιάννης
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α

Σοφία Πέππα
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
ΠΑ.Δ.Α

- Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή -

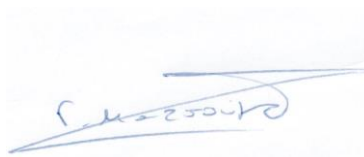
Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Ιωάννης Ματσούκας** του **Γεωργίου**, με αριθμό μητρώου **51115058** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής **Μηχανικών** του Τμήματος **Ναυπηγών Μηχανικών**, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



Ιωάννης Γ. Ματσούκας

- Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή -

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου καθηγητή μου Δρ. Δημήτριο Νικόλαο Παγώνη για την ανάθεση του θέματος. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη βοήθεια και τις συμβουλές για την επιτυχή περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας τόσο όσον αφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο όσο και την συνεργασία για στο εργαστηριακό μέρος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστώ τους οικείους μου για την εξαιρετικά σημαντική στήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα μεσούντος και του βαριού κλίματος που προέκυψε στη διάρκεια του κορονοϊού.

- Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή -

Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός τρισδιάστατου εκτυπωμένου αισθητήρα ροής αέρα. Πιο συγκεκριμένα, η αρχή λειτουργίας της διάταξης βασίζεται στο φαινόμενο καταστροφής στροβίλων (vortex shedding). Η απαραίτητη διαμόρφωση της μετρούμενης ροής πραγματοποιείται μέσω κατάλληλης διάταξης, βέλτιστης γεωμετρίας, εκτυπωμένη μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή ενώ μέσω πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης ή εκτυπωμένης δομής που εμπεριέχει πιεζοαντίσταση ανιχνεύεται η αντίστοιχη αναπτυσσόμενη πίεση, από την οποία εξάγεται η τιμή της ροής.

Συγκεκριμένα, στην συγκεκριμένη εργασία αρχικά ερευνήθηκε η βέλτιστη γεωμετρία της διάταξης διαμόρφωσης της ροής. Ολοκληρώνοντας την αρχική μελέτη και την κατασκευή της ζητούμενης διάταξης διαμόρφωσης με βέλτιστη γεωμετρία ακολούθησε η διερεύνηση για την επιτυχή αντικατάσταση της αρχικής πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης με κατάλληλη εκτυπωμένη πάνω στην οποία είναι ολοκληρωμένη πιεζοηλεκτρική αντίσταση. Ο σκοπός της εν λόγω αντικατάστασης ήταν εξέλιξη της μετρητικής διάταξης σε ένα πλήρως εκτυπωμένο αισθητήρα, ο οποίος μπορεί να εκτυπωθεί άμεσα μέσω ενός τυπικού εμπορικού τρισδιάστατου εκτυπωτή, με χαμηλό κόστος και απλότητα στην κατασκευή ανοίγοντας το δρόμο για νέες αντίστοιχες εφαρμογές.

Λέξεις κλειδιά: φαινόμενο καταστροφής στροβίλων, απόρριψη δίνης, πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, πιεζοαντίσταση, αισθητήρας ροής, τρισδιάστατη εκτύπωση, τετραδιάστατη εκτύπωση

- Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή -

Abstract

The subject of this work is the study, design and fabrication of a 3D printed airflow sensor. More specifically, the operating principle of the device is based on the vortex shedding phenomenon. The necessary shaping of the measured flow is performed by a suitable 3D printed structure of optimal geometry while the corresponding developed pressure, from which the flow value is extracted, is detected by means of a piezoelectric membrane or a printed structure containing a piezoresistor.

Initially, the optimal geometry of the flow shaping structure was first investigated while its fabrication employing additive manufacturing was performed. An appropriate investigation followed in order to successfully replace the original piezoelectric membrane with a suitable 3D printed one, on which a piezoelectric resistor is integrated. The purpose of this replacement was to evolve the resulting measurement device into a fully 3D printed sensor, which can be printed at low cost, directly via a standard commercial 3D printer, paving the way for new corresponding applications.

Key words: *vortex shedding, piezoelectric effect, piezoresistor, air flow sensor, additive manufacturing, 3D printing, 4D printing*

- Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή -

Περιεχόμενα

1	Θεωρητική Επισκόπηση Πιεζοηλεκτρισμού.....	1
1.1	Ιστορική αναδρομή πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.....	1
1.1.1	Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	1
1.2	Πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	3
1.2.1	Ιδιότητες πιεζοηλεκτρικών υλικών.....	4
1.2.2	Πιεζοηλεκτρικά κεραμικά.....	5
1.2.3	Τιτανικός Ζirkονιούχος Μόλυβδος (PZT).....	5
1.2.4	Φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF).....	6
1.2.5	Κρύσταλλοι.....	6
1.3	Μαθηματική περιγραφή πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.....	7
1.4	Εφαρμογές πιεζοηλεκτρισμού	11
1.4.1	Εφαρμογή σε μη καταστροφικούς ελέγχους	11
1.4.2	Πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες.....	12
1.4.3	Ενεργοποιητές	16
1.4.4	Πιεζοηλεκτρικά ηχεία.....	18
1.4.5	Περισταλτικές αντλίες (Peristaltic pumps Jet dispensers).....	19
1.4.6	Αισθητήρες.....	20
1.4.7	Αισθητήρες ροής	23
2	Θεωρητική Επισκόπηση Τρισδιάστατης εκτύπωσης	25
2.1	Τρισδιάστατη εκτύπωση	25
2.1.1	Γενικά στοιχεία.....	25
2.1.2	Η ιστορία της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	26
2.1.3	Πλεονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	27
2.1.4	Μειονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	28
2.2	Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	29
2.2.1	Σχεδίαση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD).....	29
2.2.2	Αρχείο STL.....	30
2.3	Μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	31
2.3.1	Εκτυπωτές με εξώθηση υλικού	31
2.3.2	Εκτυπωτές με πολυμερισμό	33
2.3.3	Εκτυπωτές με τεχνολογία σύντηξης σκόνης μετάλλου.....	34
2.3.4	Εκτυπωτές με τεχνολογία σύντηξης σκόνης πολυμερών.....	35
2.4	Εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης	36

2.4.1	Αυτοκινητοβιομηχανία.....	37
2.4.2	Ιατρική	38
2.4.3	Οδοντιατρική	39
2.4.4	Εκπαίδευση	40
2.4.5	Αρχιτεκτονική	41
3	Σχεδιασμός και κατασκευή τρισδιάστατης εκτυπωμένης αισθητήριας διάταξης με πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης	43
3.1	Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό και εκτύπωση της δομής .	43
3.2	Όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν	46
3.3	Προπαρασκευαστική διαδικασία για τον σχεδιασμό του μοντέλου	49
3.3.1	Καθορισμός διαστάσεων διάταξης	49
3.3.2	Επιλογή υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσθετική κατασκευή της δομής	51
3.4	Διαδικασία σχεδιασμού του 3D μοντέλου.....	52
3.5	Διαδικασία μετρήσεων.....	67
3.6	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	69
3.6.1	Συγκεντρωτικοί πίνακες τιμών	69
3.6.2	Διαγράμματα συχνότητας σήματος εξόδου σε σχέση με την εκάστοτε ταχύτητα ροής.....	71
3.6.3	Διαγράμματα μέγιστης και ελάχιστης αναπτυσσόμενης τάσης ως προς τις θέσεις σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.....	74
4	Τρισδιάστατη εκτυπωμένη μεμβράνη με ενσωματωμένη πιεζο-αντίσταση για την ανίχνευση παραμόρφωσης.....	78
4.1	Καθορισμός γεωμετρίας της μεμβράνης με ενσωματωμένη πιεζοαντίσταση.....	78
4.1.1	Επιλογή τρισδιάστατων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την δομή.	80
4.2	Υλοποίηση του φυσικού μέρους.....	84
4.3	Αποτελέσματα με χρήση τρισδιάστατης μεμβράνης πιεζοαντίστασης.....	89
4.3.1	Ανόπτηση του υλικού	89
4.3.2	Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός - Στατικές μετρήσεις	91
4.3.3	Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός - Δυναμικές μετρήσεις	93
5	Συμπεράσματα και προτάσεις	105
5.1	Συμπεράσματα	105
5.2	Προτάσεις.....	106
6	Βιβλιογραφία.....	108
7	Πηγές εικόνων	113
8	Παράρτημα.....	116

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1-1 Σκαριφηματική αναπαράσταση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σε μοριακό επίπεδο. Πηγή:(Vives.A.A, 2008)	2
Εικόνα 1-2 Σκαριφηματική αναπαράσταση με βέλη της πόλωσης του υλικού. Πηγή:(comsol.com, 2014).....	4
Εικόνα 1-3 Σκαριφηματική αναπαράσταση του ευθύ και του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Πηγή:(appro pdf piezoelectric material thermal material analogy)	4
Εικόνα 1-4 Σκαριφηματική αναπαράστασης των διευθύνσεων στους τρεις άξονες. Πηγή:(sensortechcanada.com).....	9
Εικόνα 1-5 Σκαριφηματική αναπαράστασης της λειτουργίας μη καταστροφικού ελέγχου με χρήση υπερήχων. Πηγή:(indiastudychannel.org, 2012).....	12
Εικόνα 1-6 Σκαριφηματική αναπαράσταση που απεικονίζει τις τρεις φάσεις λειτουργίας αυτού του τύπου πιεζοηλεκτρικού κινητήρα, (a)στατικότητα κινητήρα , (b)αργή επέκταση, (c)γρήγορη συστολή. Πηγή:(en.wikipedia.org, 2008)	13
Εικόνα 1-7 Αναπαράσταση λειτουργίας πιεζοηλεκτρικού κινητήρα τύπου inhworm. Πηγή:(en.wikipedia.org, 2008)	14
Εικόνα 1-8 Αναπαράσταση λειτουργίας πιεζοηλεκτρικού κινητήρα τύπου inhworm. Πηγή:(en.wikipedia.org, 2008)	15
Εικόνα 1-9 Πιεζοηλεκτρικό κινητήρα που βασίζεται στην παραγωγή υπερήχων για την λειτουργία του. Πηγή:(en.wikipedia.org, 2008).....	15
Εικόνα 1-10 Σκαρίφημα λειτουργίας ενεργοποιητή κάμψης πριν και μετά την εφαρμογή τάσης. Πηγή: (linearmotiontips.com, 2015)	16
Εικόνα 1-11 Ενεργοποιητής στοίβας χωρίς και με εφαρμογή εξωτερικού φορτίου. Πηγή:(motioncontroltips.com,2015).....	17
Εικόνα 1-12 Ενεργοποιητής σωλήνα. Πηγή: (linearmotiontips.com, 2015)	18
Εικόνα 1-13 Πιεζοηλεκτρικό ηχείο. Πηγή: (wikipedia.com, 2007).....	19
Εικόνα 1-14 Σκαριφηματική αναπαράσταση της πιεζοηλεκτρικής αντλίας, (a) στατικότητα της αντλίας, (b) είσοδος ρευστού στην αντλία, (c) λειτουργία της αντλίας. Πηγή:(Xingqi. L., Xiaopeng. L., et al., 2022)	20
Εικόνα 1-15 Τα μέρη που αποτελούν έναν Αισθητήρα επιτάχυνσης. Πηγή: (tech-hounds.com, 2020).....	21
Εικόνα 1-16 Μηχανισμός για την παραγωγή και λήψη υπερήχων. Πηγή: (fierceelectronics, 2017).....	22
Εικόνα 1-17 Σκαρίφημα διάταξης για την εφαρμογή μέτρησης της στάθμης των ρευστών. Πηγή: fierceelectronics, 2017).....	22
Εικόνα 1-18 Αισθητήρας μέτρησης ροής με χρήση υπερήχων “Doppler”. Πηγή: (instrumetnationtools.com,)	23
Εικόνα 1-19 Αισθητήρας μέτρησης ροής με χρήση καθυστέρησης υπερηχητικών. Πηγή: (CeramTec).....	24
Εικόνα 2-1 Σκαριφηματική αναπαράσταση των μεθόδων αφαίρεσης των δομών στήριξης και φινιρίσματος της επιφάνειας. Πηγή:(fabballo.com, 2017)	28
Εικόνα 2-2 Σχηματική αναπαράσταση εκτυπωτή με τεχνολογία εξώθησης υλικού. Πηγή:(3D PRINT.com)	32
Εικόνα 2-3 Σκαρίφημα απεικόνισης της λειτουργίας με την μέθοδο εκτύπωσης Πηγή:(ALL3dp.com, 2018).....	33
Εικόνα 2-4 Διαδικασία μεθόδου εκτύπωσης SLA. Πηγή:(Redwood, B., et al., 2017)	34

Εικόνα 2-5 Αφαίρεση σκόνης με σκοπό τον καθαρισμό του εκτυπωμένου αντικειμένου. Πηγή: (Crites, S., 2020).....	35
Εικόνα 2-6 Δημιουργία στρώματος μέσω τήξης σκόνης. Πηγή:(ALL3DP.com, 2022)	36
Εικόνα 2-7 Αμάξι κατασκευασμένο από τρισδιάστατο εκτυπωτή. Πηγή:(3erp.com, 2018).....	37
Εικόνα 2-8 Εξ ολοκλήρου εκτυπωμένο πιστόνι αυτοκινήτου. Πηγή: (XJET.com, 2022).....	38
Εικόνα 2-9 Φωτογραφική αναπαράσταση τρισδιάστατα εκτυπωμένου προσθετικού ποδιού. Πηγή:(garage.hp.com, 2019).....	39
Εικόνα 2-10 Εμφυτεύματα δοντιών εκτυπωμένα με τρισδιάστατο εκτυπωτή. Πηγή:(owandy.com, 2020).....	39
Εικόνα 2-11 Χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην εκπαίδευση. Πηγή:(3D PRINTING.COM, 2020).....	40
Εικόνα 2-12 Σκαριφηματική αναπαράστατη τρισδιάστατου εκτυπωτή για την κατασκευή σπιτού. Πηγή: (Arhcitizer)	41
Εικόνα 3-1 Το περιβάλλον του "Autodesk Fusion 360" Αρχειακό υλικό.	44
Εικόνα 3-2 Το περιβάλλον του προγράμματος slicer Ultimaker Cura. Αρχειακό υλικό.	44
Εικόνα 3-3 Το περιβάλλον του προγράμματος "kickstart" του παλμογράφου. Αρχειακό υλικό	45
Εικόνα 3-4 Φωτογραφική αναπαράσταση του παλμογράφου που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις. Αρχειακό υλικό.....	46
Εικόνα 3-5 Τροφοδοτικό που τροφοδοτεί με τάση την μεμβράνη. Αρχειακό υλικό ..	47
Εικόνα 3-6 Φωτογραφική αναπαράσταση του πολυμέτρου. Αρχειακό υλικό.....	48
Εικόνα 3-7 Μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα για την παροχή αέρα. Πηγή: Αρχειακό υλικό.	49
Εικόνα 3-8 Σκαριφηματική αναπαράσταση της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης. Πηγή: "PI Ceramic GmbH".....	50
Εικόνα 3-9 Σχέδιο δύο διαστάσεων της δομής. Αρχειακό υλικό	50
Εικόνα 3-10 Σχέδιο δύο διαστάσεων του τριγωνικού "bluff body". Αρχειακό υλικό..	50
Εικόνα 3-11 Υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης "ABS". Αρχειακό υλικό	51
Εικόνα 3-12 Χαρακτηριστικά αποτελέσματα προσομοιώσεων που έγιναν με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη θέση για τα σώματα-εμπόδια Πηγή:(koubogiannis, 2016).....	53
Εικόνα 3-13 Σχεδιασμός άνω μέρους διάταξης στο σχεδιαστικό πρόγραμμα "Fusion 360", στην φωτογραφία ξεχωρίζουν οι εγκοπές για να μπορέσει να κουμπώσει η διάταξη. Αρχειακό υλικό.....	55
Εικόνα 3-14 Ολοκληρωμένη σχεδίαση διάταξης στο σχεδιαστικό πρόγραμμα "Fusion 360". Αρχειακό υλικό.	55
Εικόνα 3-15 Εκτυπωτής τρισδιάστατης εκτύπωσης Αρχειακό υλικό	56
Εικόνα 3-16 Κάτοψη από το μεσαίο το μεσαίο κάτω τμήμα της δομής. Διακρίνονται οι εγκοπές για τα "bluff bodies" και οι εγκοπές για την σύνδεση με τα άλλα δύο κομμάτια. Αρχειακό υλικό	56
Εικόνα 3-17 Κάτοψη της εκτυπωμένης δομής όπου διακρίνεται και η εγκοπή για την τοποθέτηση της μεμβράνης. Αρχειακό υλικό	57
Εικόνα 3-18 Κάτοψη του πάνω τμήματος της δομής με βελάκι φαίνεται η περιοχή όπου τοποθετείται η μεμβράνη. Αρχειακό υλικό	57
Εικόνα 3-19 Τμήμα από την δομή όπου διακρίνονται και οι βοηθητικές δομές "supports" της υποδοχής για να κουμπώσουν τα τμήματα μεταξύ τους. Αρχειακό υλικό.....	58
Εικόνα 3-20 Στιγμιότυπο κατά την διάρκεια δημιουργίας αυλακιού για την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη. Αρχειακό υλικό.....	58

Εικόνα 3-21 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της δομής που τοποθετείται πάνω από την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη. Αρχειακό υλικό	59
Εικόνα 3-22 Φυσικό μοντέλο της δομής που χρησιμοποιείται για να κρατάει την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη. Αρχειακό υλικό.....	59
Εικόνα 3-23 Τρισδιάστατη αναπαράσταση των τριγωνικών "bluff body". Αρχειακό υλικό.....	60
Εικόνα 3-24 Φυσικό μοντέλο μετά το πέρας της εκτύπωσης για τα τριγωνικά "bluff bodies". Αρχειακό υλικό.....	60
Εικόνα 3-25 Τρισδιάστατη αναπαράσταση συνδέσμου μεταξύ του σωλήνα και της διάταξης Αρχειακό υλικό.....	61
Εικόνα 3-26 Φυσικό μοντέλο μετά το πέρας της εκτύπωσης για τη σύνδεση του σωλήνα με την διάταξη. Αρχειακό υλικό.	61
Εικόνα 3-27 Τρισδιάστατη αναπαράσταση συνδέσμου μετατροπές 2" σε 1" Αρχειακό υλικό.....	62
Εικόνα 3-28 Φυσικό μοντέλο συνδέσμου μετατροπές 2" σε 1" Αρχειακό υλικό.....	62
Εικόνα 3-29 Σύνδεση που χωρίζεται σε δύο κατευθύνσεις με υποδοχή για να μπαίνουν οι δύο βάνες. Αρχειακό υλικό.....	63
Εικόνα 3-30 Φυσικό μοντέλο για τον διαχωρισμό της ροής. Αρχειακό υλικό.....	63
Εικόνα 3-31 Αναπαράσταση της αφα με βάνες για τον έλεγχο της ροής. Αρχειακό υλικό.....	64
Εικόνα 3-32 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της βάσης. Αρχειακό υλικό.....	65
Εικόνα 3-33 Φυσικό μοντέλο της βάσης. Αρχειακό υλικό.....	65
Εικόνα 3-34 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της φλάντζας για τις συνδέσεις των κομματιών. Αρχειακό υλικό.....	66
Εικόνα 3-35 Αναπαράσταση της τελικής δομής. Αρχειακό υλικό.....	66
Εικόνα 3-36 Σκαριφηματική αναπαράσταση των θέσεων για τα "bluff bodies". Πηγή:(koubogianis, 2016).....	69
Εικόνα 3-37 Διάγραμμα συχνότητας-ταχύτητας αέρα για συνδυασμό θέσεων P0&P1 έως και P0&P6.	72
Εικόνα 3-38 Διάγραμμα συχνότητας- ταχύτητας αέρα για συνδυασμό θέσεων P0&P6 έως και P0&P9.	72
Εικόνα 3-39 Διάγραμμα συχνότητας-ταχύτητας για μία θέση σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (P0, P4 και P6).	73
Εικόνα 3-40 Συγκεντρωτικό διάγραμμα για μία θέση (P4) και για συνδυασμό δύο θέσεων(P0&P4).....	73
Εικόνα 3-41 Διάγραμμα μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης για κάθε συνδυασμό δύο θέσεων σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.	74
Εικόνα 3-42 Διάγραμμα ελάχιστης αναπτυσσόμενης τάσης για κάθε συνδυασμό δύο σωμάτων-εμποδίων.	74
Εικόνα 3-43 Διάγραμμα μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.....	75
Εικόνα 3-44 Διάγραμμα ελάχιστης αναπτυσσόμενης τάσης για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.....	75
Εικόνα 3-45 Ενδεικτική κυματομορφή του σήματος εξόδου για τον συνδυασμό θέσεων (P0&P4) και ταχύτητα 4m/s.	76
Εικόνα 3-46 Ενδεικτική κυματομορφή του σήματος εξόδου για τον συνδυασμό θέσεων (P0&P4) και ταχύτητα 24m/s.....	77
Εικόνα 4-1 Σχέδιο δύο διαστάσεων της τρισδιάστατης εκτυπωμένης μεμβράνης. Αρχειακό υλικό	79
Εικόνα 4-2 Υλικό εκτύπωσης "PLA". Αρχειακό υλικό	80
Εικόνα 4-3 Υλικό εκτύπωσης "ASA". Αρχειακό υλικό.....	81

Εικόνα 4-4 Υλικό εκτύπωσης "Nylon-Conductive". Αρχειακό υλικό	82
Εικόνα 4-5 Δισδιάστατο σχέδιο δοκιμίου. Αρχειακό υλικό	84
Εικόνα 4-6 Εκτυπωμένα δοκιμιά. Αρχειακό υλικό	85
Εικόνα 4-7 Εκτυπωμένη μεμβράνη με υλικά «PLA» για τη βάση και «NYLON CONDUCTIVE» για τα αγώγιμα μέρη – Διακρίνεται η απαραίτητη διασύνδεση με χρήση των ωμικών επαφών. Αρχειακό υλικό.....	86
Εικόνα 4-8 Φωτογραφική αναπαράσταση κεφαλής εκτυπωτή. Αρχειακό υλικό	87
Εικόνα 4-9 Στιγμιότυπο κατά την διάρκεια όμως εκτύπωσης των δοκιμίων. Αρχειακό υλικό.....	88
Εικόνα 4-10 Εκτυπωμένη μεμβράνη με υλικά «ASA-NYLON CONDUCTIVE». Αρχειακό υλικό	88
Εικόνα 4-11 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου για μεμβράνη ASA χωρίς ανόπτηση.	92
Εικόνα 4-12 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου για μεμβράνη ASA με ανόπτηση.....	92
Εικόνα 4-13 Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου με μέγιστο άνοιγμα και στραγγαλισμό της ροής.	94
Εικόνα 4-14 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου για μέγιστη ροή.....	95
Εικόνα 4-15 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου για μηδενική ροή.....	96
Εικόνα 4-18 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου με ενδιάμεσο χρόνο δέκα λεπτών για κάθε βήμα ροής.....	97
Εικόνα 4-19 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου με ενδιάμεσο χρόνο δέκα λεπτών για κάθε βήμα ροής.....	98
Εικόνα 4-20 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου με ενδιάμεσο χρόνο είκοσι λεπτών για κάθε βήμα ροής.....	99
Εικόνα 4-21 Ενδεικτικό διάγραμμα συνδυασμό δύο θέσεων σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.....	101
Εικόνα 4-22 Ενδεικτικό διάγραμμα για μία θέση σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.	101
Εικόνα 4-23 Συγκεντρωτικό διάγραμμα συνδυασμού δύο θέσεων σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.....	103
Εικόνα 4-24 Συγκεντρωτικό διάγραμμα για μονή θέση σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.	103

- Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή -

1 Θεωρητική Επισκόπηση Πιεζοηλεκτρισμού

1.1 Ιστορική αναδρομή πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους αδερφούς «*Jacque*» και «*Pierre Curie*» το 1880, όπου ανακάλυψαν ότι σε ορισμένα κρυσταλλικά υλικά όπως είναι για παράδειγμα ο χαλαζίας, όταν ασκηθεί σε αυτά μία πίεση τότε παράγουν μία τάση η οποία είναι και ανάλογη της πίεσης. Από εκεί προέρχεται και το όνομά του φαινομένου το οποίο πηγάζει από την λέξη '*Piezo*' η οποία προέρχεται από την ελληνική λέξη πίεση. Ένα χρόνο αργότερα ο «*Lippmann*» συνήγαγε το αντίστροφο του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου από μαθηματική άποψη, το οποίο και επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους αδερφούς «*Curie*» την ίδια χρονιά.

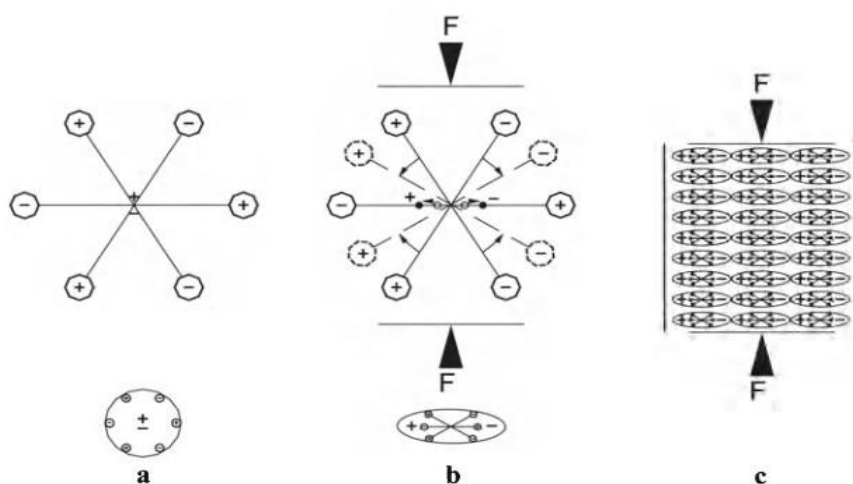
Η πρώτη πρακτική εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου έγινε κατά την διάρκεια του πρώτου παγκοσμίου πόλεμου, για τη δημιουργία διατάξεων σόναρ ενώ προηγουμένως, οι εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών εφαρμογών λάμβαναν χώρα μόνο σε εργαστηριακούς χώρους καθαρά για την διεξαγωγή πειραμάτων. Η βασική δομή του σόναρ ήταν ένα λεπτό κρύσταλλος «*quartz*», ο οποίος βρισκόταν τοποθετημένος ανάμεσα σε δύο ατσάλινες πλάκες.

Κατά την διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου ανακαλύφθηκαν νέα συνθετικά υλικά που παράγονταν από τιτάνιο τα οποία παρουσίαζαν υψηλές πιεζοηλεκτρικές σταθερές και ονοματίστηκαν σιδηροηλεκτρικά και πιεζοκεραμικά υλικά. Τις επόμενες δεκαετίες η συνεχιζόμενη έρευνα για υλικά υψηλότερης απόδοσης είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κάποιων άλλων υλικών όπως είναι το «*Zirconate titanate*» «*PZT*» το οποίο χρησιμοποιείται μέχρι τις μέρες μας ενώ πλέον τόσο το «*PZT*» όσο και το «*quartz*» παίζουν καθοριστικό ρόλο σε διάφορες εφαρμογές.

1.1.1 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η ικανότητα κάποιων υλικών να παράγουν μία τάση όταν ασκείται σε αυτά μία δύναμη και το αντίστροφο, όταν το υλικό δέχεται μία ηλεκτρική τάση να αποδίδει μία μηχανική παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα πριν το υλικό υποβληθεί σε οποιαδήποτε εξωτερική φόρτιση τα θετικά και τα αρνητικά φορτία του κάθε μορίου συμπίπτουν μεταξύ τους ενώ όταν το υλικό υποβληθεί σε μία

κατάλληλη φόρτιση τότε προκαλείται διαχωρισμός μεταξύ των θετικών και των αρνητικών φορτίων δημιουργώντας δίπολα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αντίθετοι πόλοι που βρίσκονται εσωτερικά στο υλικό να αλληλο-ακυρώνονται και να εμφανίζονται στην επιφάνεια του, σταθερά φορτία. Το αποτέλεσμα είναι αμφίδρομο, δηλαδή με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στο υλικό μπορεί να μετατοπιστεί το υλικό, ενώ, η φορά της μετατόπισης εξαρτάται από την πολικότητα του φορτίου. Επίσης, σε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου παράγει θερμότητα, η οποία αυξάνει την κινητική ενέργεια των μορίων. Η αύξηση αυτή της κινητικής ενέργειας στα μόρια του υλικού δημιουργεί μία ενιαία περιοχή πολικότητας.



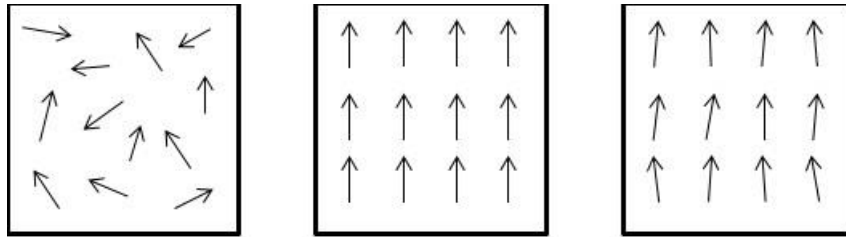
Εικόνα 1-1 Σκαριφηματική αναπαράσταση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σε μοριακό επίπεδο.
Πηγή:(Vives.A.A, 2008)

Στην εικόνα 1-1 διακρίνεται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε μοριακό επίπεδο. Στην εικόνα (1-1a) τα μόρια του υλικού βρίσκονται στην αρχική τους κατάσταση διότι δεν ασκείται καμία εξωτερική δύναμη (τα θετικά και τα αρνητικά φορτία του υλικού συμπίπτουν μεταξύ τους). Στην εικόνα (1-1b) στο υλικό ασκείται μία εξωτερική δύναμη η οποία προκαλεί διαχωρισμό μεταξύ των θετικών και των αρνητικών φορτίων του υλικού και αλλοίωση στην εσωτερική του δομή, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία διπόλων. Στην εικόνα (1-1c) παρουσιάζεται η αλληλο-ακύρωση των γειτονικών αντίθετων πόλων και η δημιουργία στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού ενός σταθερού ηλεκτρικού φορτίου. Αυτό έχει ως επακόλουθο την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και ως εκ' τούτου το αποτέλεσμα αυτό ονομάζεται πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

1.2 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

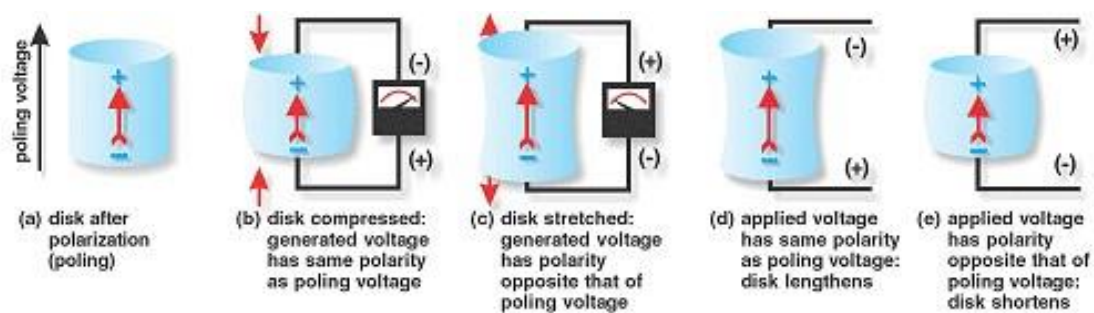
Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να βρεθούν στην φύση όπως είναι για παράδειγμα ο χαλαζίας ή να δημιουργηθούν με τεχνητό τρόπο μέσω της διαδικασίας της πόλωσης. Πολύ συνοπτικά, κατά την διαδικασία της πόλωσης και για θερμοκρασία κάτω από την θερμοκρασία *Currie* (αποτελεί ένα κρίσιμο σημείο για κάθε πιεζοηλεκτρικό υλικό καθώς καθορίζει την πόλωση και τα πιεζοηλεκτρικά χαρακτηριστικά του), το υλικό, το οποίο αποτελείται από ηλεκτρικά δίπολα με τυχαίο προσανατολισμό, δέχεται ένα υψηλής έντασης σταθερό ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικών διπολικών ροπών, εξαναγκάζοντας τα δίπολα να ευθυγραμμιστούν προς την ίδια προκαθορισμένη κατεύθυνση. Όταν αφαιρεθεί το ηλεκτρικό πεδίο σχεδόν όλα τα δίπολα διατηρούν τον προσανατολισμό τους, επομένως το υλικό παρουσιάζει πλέον πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες (βλ. εικόνα 1-2). Αν το εν λόγω υλικό αφηθεί σε θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία *Curie* ή εφαρμοστεί σε αυτό υψηλής έντασης ηλεκτρικό πεδίο με φορά αντίθετη από την κατεύθυνση της πόλωσης τότε το υλικό θα αποπολωθεί. Τα δίπολα των μοναδιαίων κυψελίδων που βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο τείνουν να ευθυγραμμίζονται μεταξύ τους και να συγκροτούν περιοχές με ομοιόμορφες διπολικές ροπές. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την συμμετρία του κρυστάλλου ενώ για να μπορέσει να εμφανιστεί, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να μην υπάρχει κέντρο συμμετρίας μεταξύ των θετικών και των αρνητικών φορτίων στις κρυσταλλικές δομές του πλέγματος.

Τα υλικά τα οποία εμφανίζουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι οι πολυμερές μεμβράνες, τα πιεζοκεραμικά υλικά, και οι φυσικοί και οι τεχνητοί μονοκρύσταλλοι. Στους φυσικούς μονοκρύσταλλους ανήκουν κάποια υλικά όπως το αλάτι «*Rochelle*», ο κρύσταλλος χαλαζίας, η τουρμαλίνη και το τοπάζι. Άλλα πιο γνωστά και δημοφιλή πιεζοηλεκτρικά πολυκρυσταλλικά υλικά είναι η πολυμερές μεμβράνη «*PVDF*» και από κεραμικά υλικά το τιτανικό βάριο «*BaTiO3*» και το τιτανικό ζirkονιούχο μόλυβδο «*PZT*».



Εικόνα 1-2 Σκαριφηματική αναπαράσταση με βέλη της πόλωσης του υλικού.
Πηγή: (comsol.com, 2014)

1.2.1 Ιδιότητες πιεζοηλεκτρικών υλικών



Εικόνα 1-3 Σκαριφηματική αναπαράσταση του ευθέ και του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.
Πηγή: (americanpiezo.com)

Στην παραπάνω εικόνα διακρίνονται τα διαφορετικά αποτελέσματα εφαρμογής του ευθέος και αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σε κατάλληλο υλικό. Αρχικά, στην εικόνα (1-3a) το υλικό βρίσκεται σε ηρεμία στην αρχική του κατάσταση καθώς δεν εφαρμόζεται κάποια τάση ή κάποια δύναμη σε αυτό. Στην εικόνα (1-3b) ασκείται στο υλικό μία θλιπτική τάση. Με την εφαρμογή της τάσης παρατηρείται στους ακροδέκτες η ανάπτυξη μίας ηλεκτρικής τάσης η οποία είναι ίδιας πολικότητας με αυτή της αρχικής πόλωσης του. Η ενέργεια αυτή είναι το αποτέλεσμα του ευθέος πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Στην εικόνα (1-3c) στο υλικό εφαρμόζεται τάση εφελκυσμού στο υλικό με αποτέλεσμα αυτό να παραμορφωθεί αντίστοιχα. Με την εφαρμογή της τάσης παρατηρείται στους ακροδέκτες η ανάπτυξη μίας ηλεκτρικής τάσης η οποία είναι αντίθετης πολικότητας με αυτή της αρχικής πόλωσης του. Η ενέργεια αυτή είναι επίσης το αποτέλεσμα του ευθέος πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Στην εικόνα (1-3d) παρατηρείται ότι στο υλικό εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση ανάστροφης πολικότητας από την αρχική τάση πόλωσης του υλικού (κατά την κατασκευή του). Η ενέργεια αυτή προκαλεί το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Ως αποτέλεσμα, το υλικό παραμορφώνεται (επιμήκυνση-αύξηση του αρχικού μήκους).

Τέλος στην εικόνα (1-3ε) εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση ίδιας πολικότητας με την αρχική τάση πόλωσης του υλικού. Η ενέργεια αυτή επίσης προκαλεί το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο παραμορφώνοντας το υλικό (μείωση του αρχικού μήκους).

1.2.2 Πιεζοηλεκτρικά κεραμικά

Τα πολυκρυσταλλικά πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά θεωρούνται από τα πιο σημαντικά υλικά σε σύγκριση με άλλα υλικά που εμφανίζουν πιεζοηλεκτρισμό καθώς παρουσιάζουν πολύ καλές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Επίσης, μπορούν να κατασκευαστούν με αποδοτικό τρόπο, είναι οικονομικά, ανθεκτικά και χημικά αδρανή. Για τους παραπάνω λόγους, χρησιμοποιούνται σε πολυάριθμες εφαρμογές. Τα πιο κοινά και πολυχρησιμοποιούμενα πιεζοκεραμικά υλικά θεωρούνται το τιτανικό βάριο « $BaTiO_3$ » και ο τιτανικός ζirkονιούχος μόλυβδος « PZT ». Να σημειωθεί ότι η ανακάλυψη των συγκεκριμένων υλικών άνοιξε τον δρόμο για την δημιουργία πληθώρα εφαρμογών.

Γενικότερα, τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα σκληρά και στα μαλακά πιεζοκεραμικά υλικά.

- Ο μαλακός « PZT » έχει υψηλότερη πιεζοηλεκτρική σταθερά αλλά και μεγαλύτερες απώλειες λόγω της εσωτερικής τριβής. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ευαισθησία π.χ. σε αισθητήρες και σε μη καταστροφικούς ελέγχους.
- Από την άλλη μεριά το σκληρό « PZT » έχει χαμηλότερη τριβή στο υλικό και κατά συνέπεια μειωμένες απώλειες, ενώ οι ιδιότητές του δεν επηρεάζονται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή τάση όπως και στην παραγωγή υπερήχων.

1.2.3 Τιτανικός Ζirkονιούχος Μόλυβδος (PZT)

Ο τιτανιούχος ζirkονιούχος μόλυβδος ανακαλύφθηκε από το ινστιτούτο τεχνολογίας του Τόκιο το 1950, θεωρείται από τα πλέον πολυχρησιμοποιούμενα πιεζοκεραμικά υλικά, καθώς είναι ένα υλικό το οποίο χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς, μιας και έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Το υλικό αυτό αποτελείται από ενώσεις ζirkονίου και τιτανίου. Το πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να βελτιστοποιηθεί ανάλογα με την εφαρμογή που απαιτείται, δηλαδή να αλλάξει η

αναλογία του υλικού ως προς τις προσμίξεις από τις οποίες αποτελείται αυξάνοντας έτσι την απόδοση και την αντοχή στις εκάστοτε συνθήκες που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Επίσης, ένα πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να κατασκευαστεί με οικονομικό τρόπο σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη καθιστώντας το ιδανικό για πολλές εφαρμογές. Σε σύγκριση με άλλα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά θεωρείται το καλύτερο καθώς έχει πολύ μεγάλη ευαισθησία ενώ λειτουργεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

1.2.4 Φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF)

Το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο «*PVDF*» είναι ένα πολυμερές ημικρυσταλλικό υλικό. Η πιεζοηλεκτρική πολυμερή αυτή μεμβράνη παρόλο που συγκριτικά με τα κεραμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά όπως είναι το «*PZT*» έχει μικρότερη πιεζοηλεκτρική σταθερά έχει αρκετά καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι έχει μικρό κόστος κατασκευής, ενώ μία μεμβράνη «*PVDF*» έχει δυνητικά πολύ μικρό πάχος έως και της τάξης των μικρόμετρων και μπορεί να κατασκευαστεί σε διαφορετικά σχήματα ανάλογα με την εφαρμογή. Επίσης, είναι αρκετά εύκαμπτη και ταυτόχρονα έχει μεγάλη μηχανική αντοχή και αντοχή στην υγρασία. Η θερμοκρασία Curie του υλικού είναι περίπου ίση με 110 βαθμούς κελσίου επομένως αποτελεί ιδανικό υλικό για ορισμένες εφαρμογές που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, οι μεμβράνες «*PVDF*» έχουν μεγάλη έξοδο τάσης συγκριτικά με άλλα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Λόγω των άνω ιδιοτήτων χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ευαισθησία και μεγάλο εύρος ζώνης όπως για παράδειγμα σε αισθητήρες ανίχνευσης κραδασμών, ενεργοποιητές, μικρόφωνα καθώς και συσκευές υπέρυθρων. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μικρο-γεννήτρια για τον λόγο ότι παράγει υψηλή έξοδο τάσης.

1.2.5 Κρύσταλλοι

Στην φύση υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός φυσικών πιεζοηλεκτρικών υλικών όπως είναι ο χαλαζίας ή το αλάτι «*Rochelle*». Οι κρύσταλλοι που βρίσκονται στη φύση όπως ο χαλαζίας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια, όπως για παράδειγμα σε ρολόγια και σε σταθεροποιητές συχνότητας, ενώ χρησιμοποιούνται ευρέως στην καθημερινότητα σε αναπτήρες για την παραγωγή σπινθηρισμού. Έχουν

υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και πολύ καλή γραμμικότητα. Το μειονέκτημα τους συγκριτικά με τα πιεζοκεραμικά υλικά είναι ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις ενεργοποιητών καθώς έχουν μικρή πιεζοηλεκτρική σταθερά.

1.3 Μαθηματική περιγραφή πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως τα πιεζοηλεκτρικά υλικά γενικότερα έχουν την ικανότητα μετά την εφαρμογή σε αυτά μιας δύναμης να παράγουν μία ηλεκτρική τάση. Επομένως, ο πιεζοηλεκτρισμός γενικά περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση μεταξύ της ηλεκτρικής και της μηχανικής συμπεριφοράς ενός μέσου. Γενικότερα, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά για χαμηλή μηχανική καταπόνηση, δηλαδή, η πυκνότητα του αναπτυσσόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι ανάλογη της εξωτερικής δύναμης που ασκείται πάνω στο υλικό. Παρακάτω παρουσιάζεται η μαθηματική περιγραφή στην οποία περιγράφονται οι ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Η ένταση ενός ηλεκτρικού πεδίου σε ένα μέσο ορίζεται από την ένταση του πεδίου E και την διηλεκτρική μετατόπιση. Η διηλεκτρική μετατόπιση ορίζεται από τον εξής τύπο:

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (1-a)$$

όπου:

D : η διηλεκτρική μετατόπιση [$\frac{C}{m^2}$]. Εκφράζει το μέσο ποσοστό ηλεκτρικού φορτίου ανά μονάδα επιφανείας

ε : η ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού. Εκφράζει την ικανότητα που έχει ένα υλικό να επιτρέπει ή να μην επιτρέπει την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό

E : η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου [$\frac{V}{m}$]. Εκφράζει την μεταβολή του δυναμικού

Η μηχανική συμπεριφορά του μέσου ορίζεται από τον νόμο του Hooke και ισχύει η εξής σχέση:

$$S = s \cdot T \quad (1-b)$$

όπου:

S : τροπή (*strain*) εκφράζει την παραμόρφωση του υλικού.

s^E : η ελαστικότητα του υλικού [$\frac{m^2}{N}$]. Όταν δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο δηλαδή $E=0$,

η ελαστικότητα του υλικού είναι το αντίστροφο του μέτρου *Young*.

T: μηχανική καταπόνηση (*stress*), η συνολική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας [$\frac{N}{m^2}$].

Η αλληλεπίδραση μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του μέσου περιγράφεται παρακάτω από τις δύο γραμμικές σχέσεις. Να σημειωθεί ότι ενώ οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να γραφτούν σε διάφορες μορφές, αρχικά δημοσιεύθηκαν από την επιτροπή προτύπων IEEE Ultrasonics:

$$S = s^E \cdot T + d^t \cdot E \quad (\text{αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο}) \quad (1-c)$$

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \quad (\text{ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο}) \quad (1-d)$$

όπου:

ε^T : η ηλεκτρική διαπερατότητα, υπό σταθερή δύναμη.

s^E : η ελαστικότητα του υλικού, υπό σταθερό ηλεκτρικό πεδίο E [$\frac{N}{m^2}$].

d: ο πίνακας πιεζοηλεκτρικών σταθερών [$\frac{C}{N}$].

d^t : ο πίνακας για το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (ανάστροφος πίνακας d).

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να μετασχηματιστούν ως εξής:

$$T = \frac{S}{s^E} - \frac{d \cdot E}{s^E}$$

$$D = \frac{d \cdot E}{s^E} + \varepsilon^T \cdot \left(1 - \frac{d^2}{s^E \cdot \varepsilon^T}\right) \cdot E$$

Ισχύουν επίσης οι σχέσεις:

$$C^E = \frac{1}{s^E}$$

$$e = \frac{d}{s^E}$$

$$\varepsilon^S = \varepsilon^T - \frac{d^2}{s^E}$$

όπου:

C^E : μέτρο ελαστικότητας *Young* [$\frac{N}{m^2}$].

e: πιεζοηλεκτρική σταθερά σύζευξης [$\frac{C}{m^2}$].

e^t : ο πίνακας για το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (ανάστροφος πίνακας e).

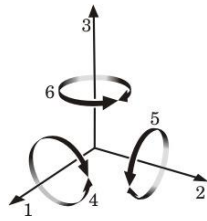
ε^S : η ηλεκτρική διαπερατότητα, υπό σταθερή τροπή (*strain*).

Με βάση τις σχέσεις (2-c) και (2-d) και με αντικατάσταση των παραπάνω σχέσεων προκύπτουν οι εξής μορφές:

$$S = C^E \cdot S - e^t \cdot E \quad (\text{αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο}) \quad (1-e)$$

$$D = e \cdot S + \varepsilon^S \cdot E \quad (\text{ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο}) \quad (1-f)$$

Όπως ήδη έχει αναφερθεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση μεταξύ της ηλεκτρικής και της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού. Η κατεύθυνση της αρχικής πόλωσης του υλικού συνήθως ορίζεται ως ο άξονας z σε ένα ορθογωνικό σύστημα αξόνων x,y,z. Στην εικόνα 1-4, οι άξονες x,y,z παριστάνονται με τους δείκτες 1,2,3 και η διάτμηση γύρω από τους άξονες αυτούς παριστάνεται με τους δείκτες 4,5,6. Αντίστοιχα, κάθε πιεζοηλεκτρική σταθερά έχει δύο δείκτες για να υποδηλώσουν τις κατευθύνσεις των δύο σχετικών μεγεθών. Ο πρώτος δείκτης δίνει την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου που σχετίζεται με την τάση που παράγεται ή εφαρμόζεται στο υλικό ενώ ο δεύτερος δίνει την κατεύθυνση της μηχανικής δύναμης ή της τροπής (*strain*).



Εικόνα 1-4 Σκαριφηματική αναπαράσταση των διευθύνσεων στους τρεις άξονες.
Πηγή: (sensortechcanada.com)

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σχέσεις υπολογισμού των πιεζοηλεκτρικών σταθερών που αντιστοιχούν στο ευθύ πιεζοηλεκτρικό και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T_j} \right)^E \quad (\text{ευθύ})$$

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial S_j}{\partial E_i} \right)^T \quad (\text{αντίστροφο}) \quad (1-g)$$

$$e_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial S_j} \right)^E \quad (\text{ευθύ})$$

$$e_{ij} = - \left(\frac{\partial T_j}{\partial E_i} \right)^S \quad (\text{αντίστροφο}) \quad (1-h)$$

Σε γραμμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά οι εξισώσεις 2-c & 2-d μπορούν να περιγραφούν και από τους παρακάτω πίνακες.

Για το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1-i)$$

Για το ερθό πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ισχύει η παρακάτω σχέση

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1-k)$$

- Για υλικό PVDF ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$[d]_{PVDF} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-l)$$

- Για υλικό PZT ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$[d]_{PZT} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-m)$$

1.4 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρισμού

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού χρησιμοποιείται σήμερα σε πάρα πολλές εφαρμογές. Ενώ η εκμετάλλευση του πιεζοηλεκτρισμού έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, σε πολλούς κλάδους και τομείς, η σχετική τεχνολογία έχει ακόμα περιθώριο για βελτίωση σε ότι αφορά στην απόδοση των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Για τον λόγο αυτόν άλλωστε πραγματοποιούνται συνεχώς επιστημονικές μελέτες με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης και της λειτουργίας συνολικά των σχετικών συσκευών, οι οποίες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα.

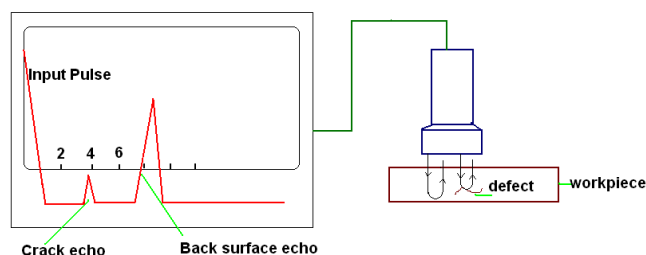
Η συνεχής εξέλιξη και μελέτη για την αξιοποίηση της συγκομιδής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου θεωρείται ότι θα συμβάλει στη μετάβαση της ανθρωπότητας σε μια πιο πράσινη παραγωγή ενέργειας χωρίς την εκπομπή βλαβερών αερίων στην ατμόσφαιρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της κατεύθυνσης αυτής είναι η εκμετάλλευση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σε πλάκες στα πεζοδρόμια έτσι ώστε να συλλέγουν ενέργεια μέσω της πίεσης και των κραδασμών που ασκούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εφαρμογές του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

1.4.1 Εφαρμογή σε μη καταστροφικούς ελέγχους

Η ανάγκη για τον έλεγχο αστοχίας των υλικών χωρίς την καταστροφή τους, είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κατάλληλων διατάξεων. Καθώς υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μη καταστροφικών ελέγχων στην παρούσα ενότητα θα ασχοληθούμε με τον μη καταστροφικό έλεγχο μέσω πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, με εφαρμογές όπως είναι ο μη καταστροφικός έλεγχος των συγκολλήσεων, η μέτρηση πάχους από ελάσματα και άλλες πολυάριθμες εφαρμογές.

Οι εν λόγω συσκευές εκμεταλλεύονται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιώντας εύκαμπτα φύλλα πιεζοηλεκτρικών πολυμερών για την εκπομπή και λήψη υπερηχητικών κυμάτων. Τα υπερηχητικά κύματα προσκρούουν πάνω στην επιφάνεια υπό έλεγχο και ανακλώνται πίσω στον δέκτη παρέχοντας πληροφορίες για την εσωτερική δομή μέσω της ανάλυσης των ανακλάσεων των υπερήχων. Ως αποτέλεσμα, πραγματοποιείται ανίχνευση για τυχόν μηχανικές αστοχίες ή ανομοιομορφίες του υλικού. Η εκπομπή συχνοτήτων από τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς κυμαίνεται από 0.1 έως 10 MHz.

Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή για έλεγχο των προϊόντων χωρίς αυτή να χρειάζεται να σταματάει δίνοντας ασφαλή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, ένα άλλο πλεονέκτημα που έχει, είναι ότι αντίστοιχες διατάξεις ελέγχου έχουν μικρό μέγεθος, χαμηλό βάρος με αντοχή στη διάβρωση. Επιπροσθέτως, δίνεται η δυνατότητα να υπάρχουν τοποθετημένες σε δομές μόνιμες συστοιχίες συσκευών μη καταστροφικού ελέγχου έτσι ώστε να παρακολουθείται συνεχώς η σωστή λειτουργία τους αλλά και να ανιχνευθεί εγκαίρως τυχόν αστοχία των υλικών στην εκάστοτε δομή.



Εικόνα 1-5 Σκαριφηματική αναπαράσταση της λειτουργίας μη καταστροφικού ελέγχου με χρήση υπερήχων.
Πηγή: (indiastudychannel.org, 2012)

1.4.2 Πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες

Οι πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, εκτελώντας περιστροφικές ή παλινδρομικές κινήσεις. Ανάλογα την κίνηση που εκτελούν χαρακτηρίζονται ως γραμμικοί ή ως περιστροφικοί πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες προκειμένου να παράγουν κίνηση βασίζονται στην αλλαγή του σχήματος κατάλληλου πιεζοηλεκτρικού κεραμικού, όταν εφαρμόζεται σε αυτό τάση, μέσω του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

Στους πιεζοηλεκτρικούς κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως «PZT» πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία είναι σκληρά με αντοχή στην υψηλή θερμοκρασία. Τα πλεονεκτήματα που έχουν οι εν λόγω κινητήρες είναι ότι μπορούν να εκτελούν με ακρίβεια σταθερές μικρές μετατοπίσεις χωρίς απώλεια της θέσης τους όταν δεν τροφοδοτούνται. Η ακρίβειά των πιεζοηλεκτρικών κινητήρων μπορεί να φτάσει και την κλίμακα των νανόμετρων, με ταχύτητα που δεν ξεπερνάει τα 2.9 km/h και με συχνότητα λειτουργίας πάνω από 5 MHz. Επίσης, ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να κατασκευαστούν με πολύ μικρές διαστάσεις.

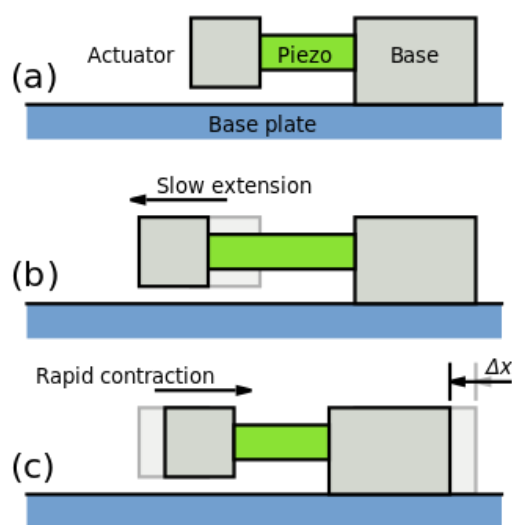
Οι πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε έλεγχο κίνησης ακριβείας, σε φακούς εστίασης καθώς και σε μικροσκοπία. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πιεζοηλεκτρικών κινητήρων. Οι βασικές κατηγορίες είναι οι κινητήρες με ράβδο ολίσθησης (*Slip stick*), *Inchworm*, *Piezo walk*, και υπερήχων (*Ultrasonic*). Στην συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη αναφορά στον κάθε τύπο.

- Κινητήρες με ράβδο ολίσθησης (*Slip stick motors*)

Οι συγκεκριμένοι κινητήρες εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της αδράνειας, σε συνδυασμό με τη διαφορά μεταξύ της στατικής και της δυναμικής τριβής.

Ο κινητήρας αποτελείται από έναν ενεργοποιητή ο οποίος τοποθετείται στο ένα άκρο, έναν κινητήριο άξονα και από ένα κινούμενο μέρος ή συρόμενο μπλοκ. Η κίνηση του κινητήρα είναι γραμμική και αναλόγως την εφαρμοζόμενη τάση αλλάζει και το μήκος του κινούμενου μέρους. Αρχικά ο κινητήρας λειτουργεί με αργή επέκταση έτσι ώστε να μην ξεπερνιέται η στατική τριβή και ο ολισθητήρας να κινείται μαζί με το σημείο επαφής. Στην συνέχεια όταν φτάσει στην μέγιστη απόσταση γίνεται μία ταχεία συστολή έτσι ώστε να ξεπεραστεί η στατική τριβή στον ενεργοποιητή, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καθαρή μετατόπιση του (βλ. εικόνα 1-6).

Οι κινητήρες αυτοί έχουν την δυνατότητα να παρέχουν κίνηση με μεγάλη ακρίβεια, ενώ παρέχουν την καλύτερη αναλογία δύναμης και μεγέθους. Τέλος, οι κινητήρες αυτοί είναι ιδιαίτερα οικονομικοί.



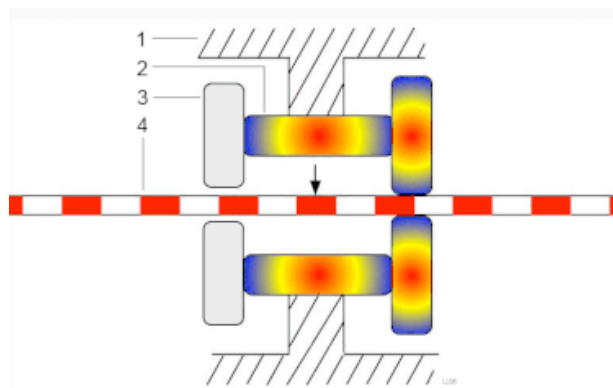
Εικόνα 1-6 Σκαριφηματική αναπαράσταση που απεικονίζει τις τρεις φάσεις λειτουργίας αυτού του τύπου πιεζοηλεκτρικού κινητήρα, (a)στατικότητα κινητήρα, (b)αργή επέκταση, (c)γρήγορη συστολή.

Πηγή:(en.wikipedia.org, 2008)

- **Κινητήρας τύπου «Inchworm»**

Το όνομα του κινητήρα προκύπτει εξαιτίας της κίνησης που ακολουθεί που θυμίζει σκουλήκι (*worm*), κάνοντας χρήση πιεζοηλεκτρικών κεραμικών. Συγκεκριμένα, αποτελείται από τρεις ομάδες πιεζοηλεκτρικών, δύο από αυτές χρησιμοποιούνται για το κλείδωμα/σταθεροποίηση του κεντρικού άξονα εναλλάξ, ενώ η τρίτη ομάδα, για την ίδια την μετακίνηση του κεντρικού άξονα, παρέχοντας έτσι την κίνηση του (βλ. εικόνα 1-7).

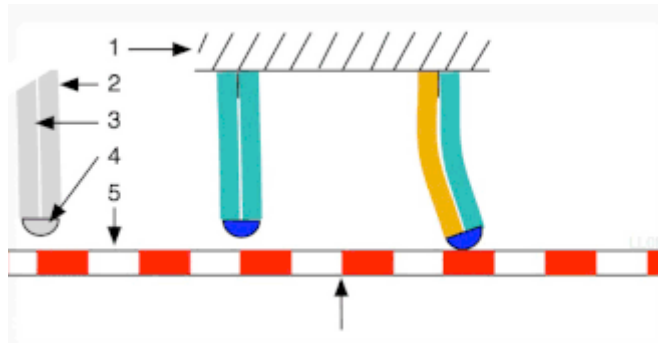
Οι κινητήρες αυτοί προσφέρουν πολύ υψηλή ακρίβεια και ακαμψία με ακρίβεια μετακίνησης νανομέτρων. Σε περίπτωση που δεν βρίσκεται σε τροφοδοσία ο κινητήρας μπορεί με την εφαρμογή τάσης να κλειδώσει η θέση του.



Εικόνα 1-7 Αναπαράσταση λειτουργίας πιεζοηλεκτρικού κινητήρα τύπου inchworm.
Πηγή: (en.wikipedia.org, 2008)

- **Κινητήρες τύπου «Piezo walk»**

Οι συγκεκριμένοι πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες μοιάζουν ως προς την λειτουργία τους με τους κινητήρες «inchworm». Διαθέτουν πολλούς πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε έναν καθοδηγούμενο δρομέα (βλ. εικόνα 1-8) και λειτουργούν με συντονισμένες κινήσεις σε διαμήκειες και εγκάρσιες κατευθύνσεις. Οι συγκεκριμένες διατάξεις προσφέρουν μία εξαιρετική ακαμψία και δυνάμεις συγκράτησης ενώ επιπλέον προσφέρουν σημαντική ακρίβεια κίνησης που φτάνει τις τάξεις των νανομέτρων. Οι εν λόγω κινητήρες μπορεί να επιτύχουν υψηλές δυνάμεις αλλά το μειονέκτημά τους είναι ότι δεν μπορούν να αναπτύξουν υψηλές ταχύτητες.



Εικόνα 1-8 Αναπαράσταση λειτουργίας πιεζοηλεκτρικού κινητήρα τύπου inhomorm.
Πηγή: (en.wikipedia.org, 2008)

- Κινητήρες υπερήχων (*ultrasonic motors*)

Ένας πιεζοηλεκτρικός κινητήρας υπερήχων χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικά υλικά για την παραγωγή υπερηχητικών κυμάτων που προκαλούν δόνηση και περιστροφή του ρότορα. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε σχήμα δακτυλίου συστέλλονται και διαστέλλονται ανάλογα με την εφαρμοζόμενη διαφορά του δυναμικού, δημιουργώντας έτσι υπερηχητικά κύματα. Οι κινητήρες αυτοί μπορούν να κατασκευαστούν σε πολύ μικρό μέγεθος και λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση σε πολύ υψηλή συχνότητα (100-200 KHz) και υψηλές ταχύτητες.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου πιεζοηλεκτρικού κινητήρα είναι ότι έχει υψηλή ροπή εξόδου και γρήγορη απόκριση. Το βασικό μειονέκτημα του είναι ότι τα απαραίτητα εξαρτήματα που τον αποτελούν είναι επιρρεπή σε φθορές. Οι κινητήρες υπερήχων χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Μία χαρακτηριστική εφαρμογή τους είναι στην μετακίνηση του φακού σε σύγχρονες κάμερες για την αυτόματη εστίαση.



Εικόνα 1-9 Πιεζοηλεκτρικό κινητήρας που βασίζεται στην παραγωγή υπερήχων για την λειτουργία του.
Πηγή: (en.wikipedia.org, 2008)

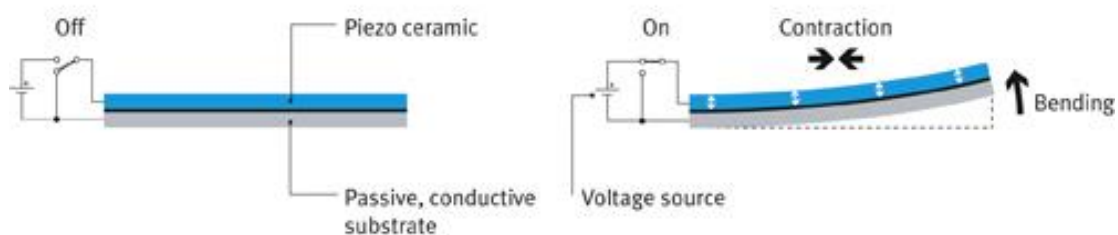
1.4.3 Ενεργοποιητές

Οι ενεργοποιητές εκμεταλλεύονται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για την μετατροπή της ηλεκτρικής τάσης σε μηχανική κινητική ενέργεια. Οι συσκευές αυτές παράγουν μικρές μετατοπίσεις με μεγάλη ακρίβεια και με ανάπτυξη υψηλών δυνάμεων. Επίσης, ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι ότι εκπέμπουν λίγη θερμότητα και δεν καταναλώνουν μεγάλη ισχύ όταν λειτουργούν. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι ενεργοποιητών. Στην επόμενη ενότητα αναφέρονται οι αντίστοιχες βασικές κατηγορίες, οι ενεργοποιητές τύπου κάμψης, στοίβας και σωλήνα.

- Ενεργοποιητές κάμψης

Όταν εφαρμόζεται μία τάση στον ενεργοποιητή κάμψης έχει ως αποτέλεσμα να παράγεται μία ισχυρή μηχανική δύναμη ως απόκριση της τάσης. Οι συγκεκριμένοι ενεργοποιητές μπορούν να επιτύχουν μετατόπιση αρκετών χιλιοστών σε χαμηλούς χρόνους απόκρισης, ωστόσο η δύναμη που αναπτύσσουν είναι σχετικά χαμηλή της τάξης μερικών «Newton».

Για την κατασκευή ενός ενεργοποιητή κάμψης δύο πιεζοηλεκτρικοί κεραμικοί δίσκοι (οι οποίοι έχουν αντίθετη κατεύθυνση αρχικής πόλωσης) συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους ενώ είναι είναι παράλληλα συνδεδεμένοι στην τροφοδοσία (τάση). Η κάμψη στον ενεργοποιητή προκαλείται όταν εφαρμόζεται η τάση στους δύο δίσκους οπότε όταν ο ένας δίσκος συστέλλεται ο άλλος διαστέλλεται.

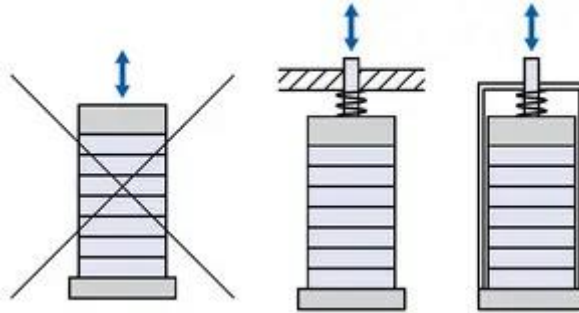


Εικόνα 1-10 Σκαρίφημα λειτουργίας ενεργοποιητή κάμψης πριν και μετά την εφαρμογή τάσης.
Πηγή: (linearmotiontips.com, 2015)

- Ενεργοποιητές στοίβας

Οι ενεργοποιητές στοίβας αποτελούνται από πολλά στρώματα πιεζοκεραμικών υλικών τα οποία δρουν ταυτόχρονα. Στην συγκεκριμένη κατηγορία, με την εφαρμογή

κατάλληλης ηλεκτρικής τάσης, ο ενεργοποιητής δημιουργεί μία γραμμική μετατόπιση (βλ. εικόνα 1-11) ενώ το μέγεθος της δύναμης που αναπτύσσεται εξαρτάται από την επιφάνεια διατομής του. Ανάλογα με τον ενεργοποιητή και τη λειτουργία του, η παρεχόμενη τάση ξεκινάει από τα 200V και μπορεί να φτάσει έως και 1000V. Διακρίνονται σε ενεργοποιητές στοίβας υψηλής και χαμηλής τάσης αντίστοιχα, ενώ ανάλογα με τον τύπο τους αλλάζει και ο τρόπος κατασκευής τους. Η μετατόπιση ενεργοποιητή στοίβας είναι πολύ μικρή περίπου της τάξης των μικρόμετρων.

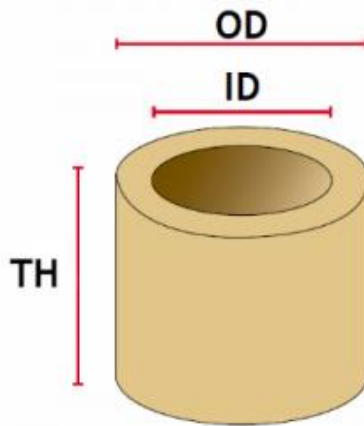


Εικόνα 1-11 Ενεργοποιητής στοίβας χωρίς και με εφαρμογή εξωτερικού φορτίου.
Πηγή: (motioncontroltips.com,2015).

- Ενεργοποιητές σωλήνα

Οι συγκεκριμένοι ενεργοποιητές εκμεταλλεύονται επίσης το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για να δημιουργήσουν μετατοπίσεις κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Στους πιεζοκεραμικούς σωλήνες οι οποίοι είναι ακτινικά πολωμένοι όταν εφαρμόζεται τάση μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού ηλεκτροδίου αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συστέλλονται ακτινικά, αλλά και αξονικά (βλ. εικόνα 1-12) ανάλογα με την αρχική πόλωσή τους.

Οι ενεργοποιητές σωλήνα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μικρή κίνηση ακριβείας, όπως είναι για παράδειγμα σε μηχανισμούς σάρωσης σε μικροσκόπια, καθώς και σε μικροαντλίες όπου απαιτείται πολύ μικρή παροχή της τάξης των νανολίτρων και σε εκτυπωτές «inkjet».



Εικόνα 1-12 Ενεργοποιητής σωλήνα.
Πηγή: (linearmotiontips.com, 2015)

1.4.4 Πιεζοηλεκτρικά ηχεία

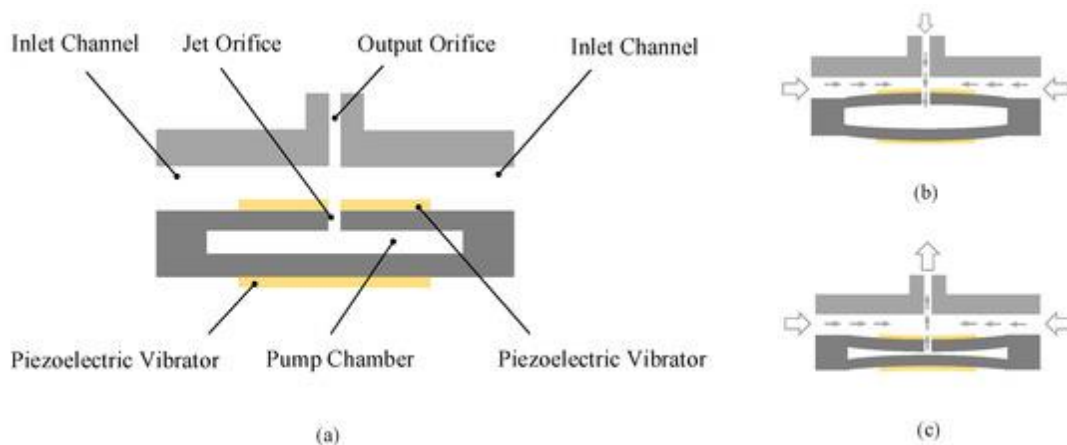
Το πιεζοηλεκτρικό ηχείο δύναται να παράγει ήχο κάνοντας χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών, κατάλληλων διαφραγμάτων και ταλαντωτών (*resonators*). Περιληπτικά, το ηχείο αποτελείται από έναν δίσκο πιεζοηλεκτρικού υλικού «*PZT*» (βλ. εικόνα 1-13) ο οποίος έχει την δυνατότητα να κάμπτεται περιοδικά όταν εφαρμόζεται σε αυτόν μία εναλλασσόμενη τάση, εξαιτίας της παραμόρφωσης που υφίσταται, παράγοντας ένα ηχητικό κύμα σε συγκεκριμένη συχνότητα στο ακουστικό φάσμα. Τα πιεζοκεραμικά ηχεία λειτουργούν συνήθως σε ένα εύρος συχνοτήτων 1-5 HZ αλλά επίσης και σε συχνοτήτες έως 100 KHZ για εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η παραγωγή υπερήχων. Το βασικό πλεονέκτημα του πιεζοηλεκτρικού ηχείου έναντι των κανονικών ηχείων είναι ότι είναι ανθεκτικά σε υπερφορτώσεις. Επίσης έχουν χαμηλή κατανάλωση και είναι ιδιαίτερος ανθεκτικά. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ένταση ενώ μπορούν να κατασκευαστούν σε μικρό μέγεθος και δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία. Οι κυριότερες εφαρμογές του πιεζοηλεκτρικού ηχείου είναι η κατασκευή ηχείων τύπου *tweeters*, η δημιουργία ηχείων για ρολόγια καθώς και η χρήση τους σε ακουστικά, καθώς έχουν μικρή κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 1-13 Πιεζοηλεκτρικό ηχείο.
Πηγή: (wikipedia.com, 2007).

1.4.5 Περισταλτικές αντλίες (Peristaltic pumps Jet dispensers)

Οι περισταλτικές αντλίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου υπάρχει ανάγκη για μεταφορά ελάχιστης καθώς και ακριβής ποσότητας υγρών και αερίων. Οι αντλίες αυτές είναι κατάλληλες για μικροσκοπικά συστήματα βιοχημικής ανάλυσης για την μεταφορά καθώς και τον έλεγχο της ροής σε μικρορευστά. Στις περισταλτικές αντλίες υπάρχει ένας μηχανισμός που βασίζεται σε ένα κατάλληλο πιεζοκεραμικό δίσκο «PZT», ή μία πιεζοκεραμική μεμβράνη, όπου βρίσκεται εξωτερικά της ροής. Οι συσκευές αυτές αποτελούνται γενικά από έναν ή και περισσότερους θαλάμους που δημιουργούνται από την παραμόρφωση του πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή και κατάλληλων βαλβίδων για την διαχείριση της μεταφοράς της ροής του ρευστού. Επίσης, υπάρχουν δύο βασικές διατάξεις βαλβίδων για την είσοδο και την έξοδο του ρευστού όπου λειτουργούν ως ανεπίστροφες βαλβίδες έτσι ώστε να μην επιστρέφει το ρευστό στην αντίρροπη κατεύθυνση. Οι πιεζοηλεκτρικές αντλίες είναι κατάλληλες κυρίως για υγρά με χαμηλό ιξώδες. Ως βασικό μειονέκτημα, λόγω των απαραίτητων βαλβίδων αντεπιστροφής όπου είναι εγκατεστημένες, ο βαθμός τους απόδοσης είναι μειωμένος (λόγω της σύντομης κόπωσης αλλά και πιθανής φραγής του ρευστού από τις βαλβίδες). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αρχή λειτουργίας μίας πιεζοηλεκτρικής αντλίας.



Εικόνα 1-14 Σκαριφηματική αναπαράσταση της πιεζοηλεκτρικής αντλίας, (a) στατικότητα της αντλίας, (b) είσοδος ρευστού στην αντλία, (c) λειτουργία της αντλίας.
Πηγή: (Xingqi, L., Xiaopeng, L., et al., 2022)

1.4.6 Αισθητήρες

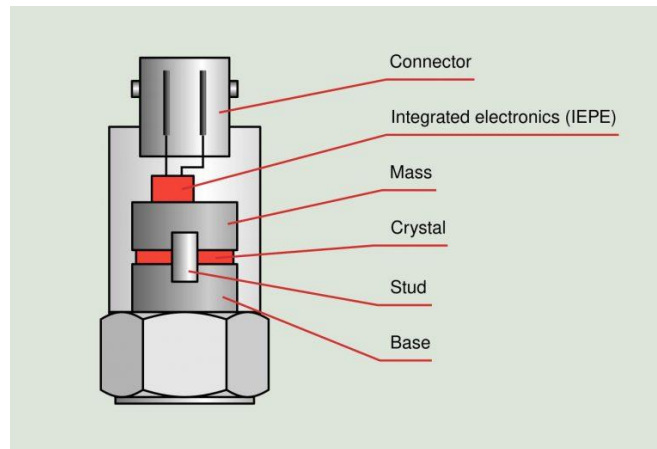
Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έτσι ώστε να μετρήσουν μία μηχανική δύναμη που ασκείται σε αυτούς. Πιο συγκεκριμένα οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες βασίζονται στην μετατροπή της ηλεκτρομηχανικής ενέργειας με σκοπό τη μέτρηση δύναμης, επιτάχυνσης και πίεσης.

Στους συγκεκριμένους αισθητήρες χρησιμοποιούνται πιεζοκεραμικά υλικά. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων είναι ότι έχουν υψηλό συντελεστή ελαστικότητας ενώ είναι σημαντικό επίσης ότι δεν έχουν ευαισθησία σε εξωτερικά ηλεκτρικά πεδία και στην ακτινοβολία. Αυτός είναι και ο λόγος άλλωστε που μπορούν να πραγματοποιούν μετρήσεις σε αντίστοιχα περιβάλλοντα.

- Αισθητήρες επιτάχυνσης

Οι μετρήσεις των μηχανικών επιταχύνσεων είναι πολύ σημαντικές για πολλές εφαρμογές καθώς παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις μηχανικές ταλαντώσεις, τις ιδιοσυχνότητες και τις δονήσεις διάφορων δομών. Η πλειοψηφία των αισθητήρων επιτάχυνσης βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και αποτελούνται από έναν πιεζοηλεκτρικό κεραμικό δίσκο («*quartz crystal*») ο οποίος είναι συζευγμένος με κατάλληλη σεισμική μάζα (βλ. εικόνα 1-15). Όταν ο αισθητήρας δονείται ασκείται πίεση στον πιεζοηλεκτρικό στοιχείο παράγοντας μία αντίστοιχη τάση. Η μεταβολή της μετρούμενης τάσης είναι ανάλογη της επιτάχυνσης. Οι εν λόγω

αισθητήρες είναι ικανοί να ανιχνεύουν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων με γραμμικότητα σε όλο το φάσμα της μέτρησης.



Εικόνα 1-15 Τα μέρη που αποτελούν έναν Αισθητήρα επιτάχυνσης.
Πηγή: (tech-hounds.com, 2020)

- Αισθητήρες στάθμης ρευστών

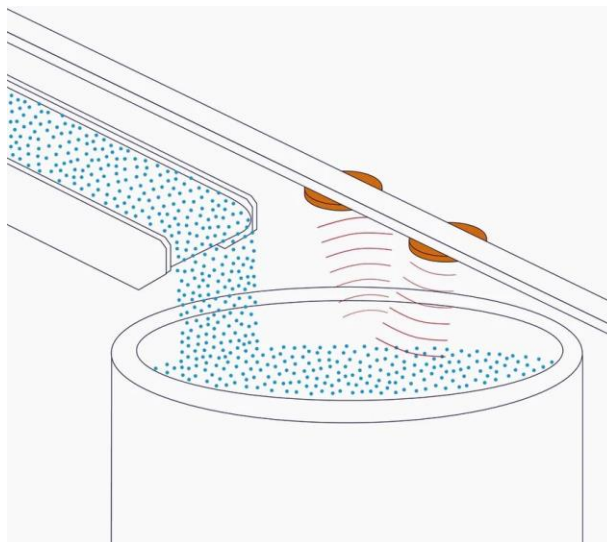
Γενικότερα υπάρχουν διαφορετικοί τύποι αισθητήρων για την μέτρηση της στάθμης των ρευστών. Οι πιο σύγχρονοι όμως αισθητήρες χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά στοιχεία για την εκπομπή υπερηχητικών παλμών από ένα σταθερό σημείο. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε πολύ μεγάλο βαθμό και στην αυτοκινητοβιομηχανία σε πολλές εφαρμογές όπως είναι η μέτρηση της στάθμης καυσίμου, της στάθμης του λαδιού του κινητήρα και του κιβωτίου ταχυτήτων καθώς και σε άλλες εφαρμογές.

Πολύ περιληπτικά, σε ότι αφορά στην αρχή λειτουργίας τους, οι συγκεκριμένες διατάξεις λειτουργούν και ως πομποί και ως δέκτες, μεταδίδοντας κατά διαστήματα ηχητικούς παλμούς στο επίπεδο της επιφάνειας και λαμβάνοντας πίσω την ανάκλαση του ηχητικού παλμού καθώς ανακλάται από την επιφάνεια. Ο χρόνος μεταξύ εκπομπής και λήψης του ηχητικού κύματος προσδιορίζει και την απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και της προς μέτρηση επιφάνειας και επομένως και την στάθμη του ρευστού. Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από το πόσο καλά αντανακλάται ο ηχητικός παλμός πάνω στην επιφάνεια του ρευστού.



Εικόνα 1-16 Μηχανισμός για την παραγωγή και λήψη υπερήχων.
Πηγή: (fierceelectronics, 2017).

Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν τη στάθμη του υγρού ακόμα και όταν η απόσταση μεταξύ του πομπού και της επιφάνειας δεν είναι ομοιόμορφη καθ' όλο το ύψος. Επιπρόσθετα είναι μικροί σε μέγεθος και μπορούν να ενσωματωθούν σε σωλήνες με μικρή διάμετρο με σκοπό τον περιορισμό των μεγάλων ταλαντώσεων στις μετρήσεις του ύψους του υγρού που προκαλούνται από τις μετατοπίσεις της κίνησης του ρευστού (σύννηθες πρόβλημα π.χ. στις δεξαμενές καυσίμου οχημάτων).



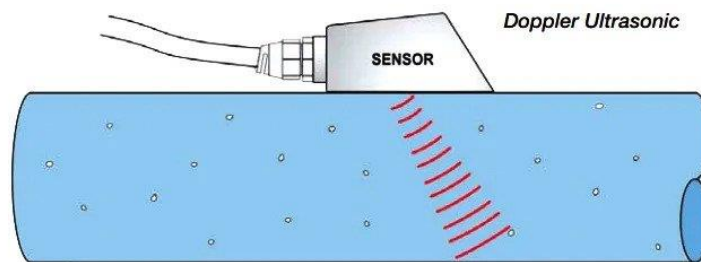
Εικόνα 1-17 Σκαρίφημα διάταξης για την εφαρμογή μέτρησης της στάθμης των ρευστών.
Πηγή: fierceelectronics, 2017).

1.4.7 Αισθητήρες ροής

Οι πιεζοηλεκτρικοί μετρητές ροής χρησιμοποιούν-εκμεταλλεύονται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για την μετάδοση και λήψη υπερήχων. Ανάλογα με την εκάστοτε μέτρηση του ρευστού αν είναι υγρό ή αέριο επιλέγεται και η ανάλογη συχνότητα. Για τα αέρια η συχνότητα λειτουργίας κυμαίνεται στα 100-200kHz ενώ για τα υγρά κυμαίνεται σε ένα εύρος της τάξης των MHz. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετρητές ροής εκτός από την μέτρηση της ροής σε ένα ρευστό έχουν και την δυνατότητα να μετρήσουν την συγκέντρωση ορισμένων ουσιών στο ρευστό. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων ροής οι οποίοι αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

- Μετρητές ροής «DOPPLER»

Οι μετρητές ροής του φαινομένου *Doppler* χρησιμοποιούν ένα πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα για την μετάδοση και λήψη υπερηχητικών κυμάτων. Η μέτρηση της ταχύτητας ροής προκύπτει από την μετατόπιση της αρχικής συχνότητας (από 640 kHz έως 1 MHz) μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου κύματος πάνω στις φυσαλίδες ή σε σωματίδια που υπάρχουν στο ρευστό καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ρευστού τόσο μεγαλύτερη είναι και η μετατόπιση της συχνότητας μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου κύματος. Να σημειωθεί ότι οι μετρητές υπερήχων «*Doppler*» χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική για την μέτρηση της ροής του αίματος.



Εικόνα 1-18 Αισθητήρας μέτρησης ροής με χρήση υπερήχων “Doppler”.
Πηγή: (instrumentationtools.com,)

- **Μετρητής καθυστέρησης υπερήχων (*Propagation type US sensor*)**

Ο συγκεκριμένος τύπος μετρητή ροής χρησιμοποιεί δύο πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς κάθετα διατεταγμένους, ως προς την κατεύθυνση της ροής οι οποίοι λειτουργούν ως πομπός και ως δέκτης (βλ. εικόνα 1-19) για συχνότητες από 1 MHz έως 2 MHz). Η ταχύτητα της ροής καθορίζεται μεταξύ της διαφοράς του χρόνου διάδοσης και λήψης του κύματος προς την κατεύθυνση της ροής και αντίθετα από αυτήν. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι μπορεί να πραγματοποιείται σε μέτρηση όπου δεν υπάρχουν φυσαλίδες ή σωματίδια.



Εικόνα 1-19 Αισθητήρας μέτρησης ροής με χρήση καθυστέρησης υπερηχητικών.
Πηγή: (CeramTec)

2 Θεωρητική Επισκόπηση Τρισδιάστατης εκτύπωσης

Με το συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική θεωρητική επισκόπηση της εργασίας που εστιάζει στην κατανόηση των κύριων εννοιών που αφορά στη τρισδιάστατη εκτύπωση. Να σημειωθεί ότι η εννοιολογική αυτή ανάπτυξη είναι απαραίτητη για την κατανόηση των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν για την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, πραγματοποιείται μία ιστορική αναδρομή της τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς και τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα που την διέπουν, ενώ στη συνέχεια, παρατάσσονται οι κύριες μέθοδοι της τεχνολογίας και τα απαραίτητα «τεχνολογικά εργαλεία» που απαιτούνται για την πραγματοποίηση αυτής.

Τέλος, αναφέρονται οι τομείς στους οποίους λαμβάνει χώρα η τρισδιάστατη εκτύπωση σήμερα, αλλά και συγκεκριμένες εφαρμογές σε αυτούς τους τομείς. Επίσης, μέσα από το συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθενται οι βασικές γνώσεις που απαιτούνται για την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης αλλά και η δυναμική που ήδη έχει στο σύγχρονο ταχέως εξελισσόμενο περιβάλλον.

2.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση

2.1.1 Γενικά στοιχεία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων στερεών αντικειμένων από ένα ψηφιακό αρχείο. Συγκεκριμένα, με τη χρήση προσθετικών διαδικασιών, -δηλαδή την τοποθέτηση διαδοχικών στρωμάτων «layers» τα οποία προσκολλώνται κάθε φορά με τα προηγούμενα στρώματα-, επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός τρισδιάστατου εκτυπωμένου αντικειμένου.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εργασίες κατεργασίας, όπως η μηχανική κατεργασία, (αφαιρετικές μέθοδοι) μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα σπατάλη υλικού σε βαθμό που μπορεί να φτάσει έως και το 90%. Αντίθετα, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία διαδικασία η οποία δημιουργεί αντικείμενα με την προσθήκη υλικού, στρώμα προς στρώμα. Είναι σημαντικό ότι με την τελευταία μπορούν να εκτυπωθούν γεωμετρίες με πολύπλοκα χαρακτηριστικά χωρίς επιπλέον κόστος. Η τρισδιάστατη εκτύπωση λοιπόν

είναι μία ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία καθώς για τη δημιουργία της ξοδεύεται ακριβώς το υλικό που απαιτείται.

Τα τελευταία χρόνια η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν είναι πλέον μια βιομηχανική διαδικασία μόνο, αφού η «3d printing» τεχνολογία έχει γίνει προσιτή σε μικρές εταιρείες καθώς και σε ιδιώτες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εκτυπωτές να είναι πλέον οικονομικοί και να υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά υλικά προς το ευρύ κοινό, κάτι που δεν γινόταν παλιότερα.

2.1.2 Η ιστορία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η μέθοδος ταχείας πρωτοτυποποίησης που εμφανίστηκε στις αρχές του 1980 ήταν η πρώτη μορφή τρισδιάστατης εκτύπωσης με σκοπό την κατασκευή οικονομικών πρωτοτύπων. Οι πρώτες προσπάθειες τρισδιάστατης εκτύπωσης έγιναν τον Μάιο του 1980 στην Ιαπωνία από τον «*Dr Hideo Kadoma*», ο οποίος δημιούργησε ένα σύστημα ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων «*RP*» (***Rapid Prototyping***) με φωτοπολυμερή υλικά. Τρία χρόνια αργότερα έγινε η πρώτη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης με την τεχνολογία «*SLA*» (***Stereolithography***) που καταχωρήθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον «*Charles Hull*» το 1983. Το 1987 ο «*Carl Deckard*» κατοχυρώνει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία με την μέθοδο «*SLS*» (***Sintering Beam Melting***). Την ίδια ακριβώς χρονιά ο «*Larry Hornbeck*» της εταιρίας Texas Instruments δημιούργησε την μέθοδο εκτύπωσης «*DLP*» (***Digital Light Processing***) στην οποία χρησιμοποιούσε μία πηγή φωτός και μικροκαθρέπτες για να καθοδηγεί την ακτινοβολία του φωτός επιλεκτικά πάνω σε ένα υπόστρωμα (*BED*) με φωτοπολυμερές υλικό.

Με το πέρας μιας διετίας ο «*Scott Crump*» συνιδρυτής της «*Stratassys*» καταθέτει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την μέθοδο «*FDM*» (***Fused Filament Fabrication***). Η μέθοδος αυτή είναι βασισμένη στο μοντέλο ανοιχτού κώδικα «*Rep-Rap*». Την ίδια χρονιά ιδρύθηκε από τον «*Hans Longer*» στην Γερμανία η «*EOS GMBH*» ο οποίος επικεντρώθηκε στην εξέλιξη και δημιουργία της μεθόδου με τεχνολογία «*LS*» (***Laser Sintering***). Το 1990 πούλησε το πρώτο μοντέλο με την ονομασία «*STEREOS*». Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε η μέθοδος «*DMLS*» (***Direct Metal Laser Sintering***) από την ίδια εταιρεία μαζί με ένα τμήμα της «*Electrolux Finland*» η οποία και στην συνέχεια εξαγοράστηκε από την «*EOS GMBH*».

Στα μέσα του 2000 ο κατασκευαστικός βιομηχανικός κλάδος άρχισε να δίνει μεγάλη έμφαση σε αυτές τις τεχνολογίες και να εξελίξει τα συστήματα για να λειτουργήσουν σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Το 2009 ο «Δρ *Bowyer*» συνέλαβε στην ιδέα ενός ανοιχτού κώδικα για τρισδιάστατους εκτυπωτές με τεχνολογία εναπόθεσης υλικού με την ονομασία «*Rep-Rap*». Συνεπώς, τον Ιανουάριο του 2009 κυκλοφόρησε ο πρώτος, εμπορικά διαθέσιμος, εκτυπωτής -σε μορφή «κιτ»- ο οποίος ήταν βασισμένος στην ιδέα ανοιχτού κώδικα «*Rep-Rap*» με την ονομασία «*BFB Repman*». Το τελικό προϊόν-εκτυπωτής αποτελούσε προϊόν συναρμολόγησης των τμημάτων του δίνοντας, από τη μια, τη δυνατότητα στο χρήστη να τον συναρμώσει μόνος του και από την άλλη στην εταιρία να μειώσει τον όγκο στη μεταφορά του προϊόντος. Στην συνέχεια, ακολούθησε η εταιρεία «*Makerbot Industries*» εφαρμόζοντας την ίδια φιλοσοφία και δίνοντας τη σκυτάλη σε άλλες εταιρίες του χώρου.

Οι εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης ακόμα και σήμερα είναι συνεχώς εξελισσόμενες ενώ αποτελούν αντικείμενο έρευνας. Συνεπώς, τόσο οι μέθοδοι όσο και τα υλικά βελτιώνονται διαρκώς με την πάροδο του χρόνου. Οι εφαρμογές εστιάζονται εκτός από τη κατασκευαστική βιομηχανία στην ιατρική, στην αεροδιαστημική, στην αυτοκινητοβιομηχανία ενώ με τον καιρό όλο και περισσότεροι κλάδοι χρησιμοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση για να βελτιώσουν την απόδοση στη λειτουργία τους και να μειώσουν το κόστος των προϊόντων τους.

2.1.3 Πλεονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης

Σήμερα, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης δίνει τη δυνατότητα για κατασκευή πρωτοτύπων όχι μόνο στην ευρύτερη βιομηχανία αλλά και σε ατομικό επίπεδο. Παράλληλα, επιτρέπει πλέον να εκτυπωθούν αντικείμενα με πολύπλοκες γεωμετρίες κάτι που δεν μπορεί να δημιουργηθεί με τις παραδοσιακές διαδικασίες. Βέβαια, όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του προς εκτύπωση μοντέλου, αναλογικά αυξάνεται και το απαραίτητο χρονικό διάστημα για την εκτύπωσή του. Επομένως, είναι σημαντικό πλέον η διαδικασία της παραγωγής ενός μοντέλου να είναι όσο πιο σύντομη γίνεται και αυτό δεν εξαρτάται μόνο από την εκτύπωση του, αλλά και από τη διαδικασία του σχεδιασμού του (δημιουργία ενός κατάλληλου ψηφιακού αρχείου «*STL*»).

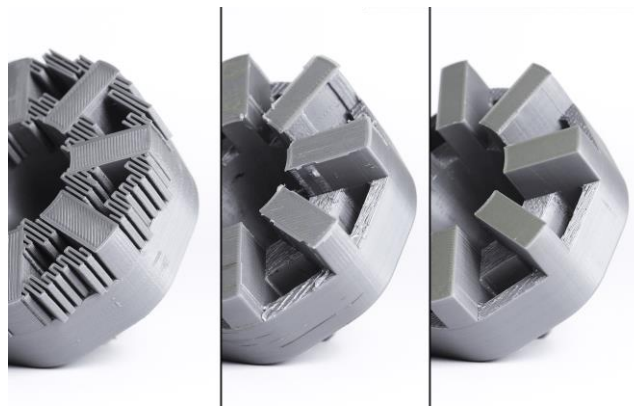
Η τρισδιάστατη εκτύπωση πλεονεκτεί ως προς τη δημιουργία ελαφρών και ανθεκτικών εξαρτημάτων στις ίδιες διαστάσεις με ένα κοινό εξάρτημα που έχει κατασκευαστεί με τον παραδοσιακό τρόπο, γεγονός που βελτιώνει την απόδοση και το κόστος μιας

κατασκευής. Επιπρόσθετα, η τρισδιάστατη εκτύπωση δίνει τη δυνατότητα να φτιαχτούν πρωτότυπα σε σύντομο χρονικό διάστημα, πιο οικονομικά σε σύγκριση με τη δημιουργία πρωτοτύπων με μηχανική κατεργασία.

Τα παραπάνω σημαντικά οφέλη αποδεικνύουν τους κύριους λόγους για τους οποίους η τρισδιάστατη εκτύπωση εξελίσσεται ημέρα με την ημέρα τόσο σε μεθόδους και τεχνολογίες όσο και σε υλικά, βρίσκοντας εφαρμογή σε όλο και περισσότερους κλάδους της βιομηχανίας.

2.1.4 Μειονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι ο περιορισμός ως προς τα υλικά, καθώς δεν μπορούν όλα τα πλαστικά και τα μέταλλα να αποτελούν προϊόν εκτύπωσης. Επίσης, το τελικό μοντέλο μετά την εκτύπωση χρειάζεται επεξεργασία στην περίπτωση όπου υπάρχουν δομές στήριξης αλλά επίσης και για την επεξεργασία των προκυπτουσών εξωτερικών επιφανειών, καθώς το δημιουργημένο με στρώσεις μοντέλο παρουσιάζει γενικότερα τραχιές εξωτερικές επιφάνειες. Για το λόγο αυτό, συνήθως είναι αναγκαίο ένα τελικό στάδιο επεξεργασίας όπου γίνεται καθάρισμα, ώστε να αφαιρεθεί τυχόν υπολειπόμενο -προστιθέμενο υλικό, καθώς και εξομάλυνση για να επιτευχθεί το απαιτούμενο φινιρίσμα. Στην παρακάτω εικόνα (βλ. εικόνα 2-1) παρουσιάζεται η αρχική μορφή του μοντέλου με τις επιπρόσθετες δομές στήριξης, η μορφή του μετά την αφαίρεση αυτών καθώς και η τραχιά επιφάνεια του μοντέλου, και η διαμόρφωση αυτής μέσω μικρής κατεργασίας για την εξομάλυνση της επιφάνειας.



Εικόνα 2-1 Σκαριφηματική αναπαράσταση των μεθόδων αφαίρεσης των δομών στήριξης και φινιρίσματος της επιφάνειας.

Πηγή: (fabbalo.com, 2017)

Να σημειωθεί ότι καθώς η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι πρακτικά η δημιουργία ενός μοντέλου με διαδοχική εναπόθεση υλικού σε επίπεδα, υπάρχει μία περίπτωση να αποκολληθούν οι εν λόγω στρώσεις. Το πρόβλημα αυτό παρατηρείται κυρίως σε εκτυπωτές τεχνολογίας «*FDM*» (*Fused Filament Fabrication*). Επιπροσθέτως, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές γενικότερα έχουν ένα περιορισμό ως προς το μέγεθος των μοντέλων που μπορούν να εκτυπωθούν. Μία λύση σε αυτό είναι να εκτυπωθούν σε ξεχωριστά μέρη και στο τέλος να ενωθούν, κάτι που αυξάνει όμως το χρόνο και το κόστος της εκτύπωσης. Ως αποτέλεσμα, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την γρήγορη παραγωγή εξαρτημάτων, εντούτοις σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να επιβραδυνθεί η συνολική διαδικασία, είτε εξαιτίας της απαραίτητης μικρής έκτασης κατεργασίας που πρέπει να εφαρμοστεί στο τελικό στάδιο, είτε λόγω κάποιων περιορισμών που έχουν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές.

2.2 Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Πριν πραγματοποιηθεί μία εκτύπωση απαιτούνται κάποια βασικά βήματα ανεξάρτητα από την επιλεγμένη μέθοδο εκτύπωσης. Το πρώτο βήμα είναι να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο μέσω ενός λογισμικού σχεδίασης με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή «*CAD*», όπου και πραγματοποιείται η ψηφιακή μοντελοποίηση. Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση ακολουθεί το δεύτερο βήμα όπου πρέπει να αποθηκευτεί το αρχείο σε μορφή που να μπορεί να αναγνωριστεί από τον εκτυπωτή. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αρχείου, παρακάτω αναλύουμε το αρχείο «*STL*» το οποίο είναι το πιο διαδεδομένο και αυτό που χρησιμοποιήσαμε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2.1 Σχεδίαση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (*CAD*)

Όπως έχει αναφερθεί η αρχική διαδικασία που ακολουθείται από τους μηχανικούς ή τους σχεδιαστές πριν τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου. Η πιο κοινή μέθοδος ψηφιακής αποτύπωσης είναι η χρήση κατάλληλου λογισμικού τύπου «*CAD*» (*Computer-Aided Design*) μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Με το εν λόγω λογισμικό μπορεί να γίνει παραγωγή τόσο δισδιάστατων όσο και τρισδιάστατων σχεδίων, καθώς και ανάλυση αλλά και βελτιστοποίηση αυτών

με χρήση κατάλληλου γραφικού περιβάλλοντος, μειώνοντας δραστικά τον απαραίτητο χρόνο για την παραγωγή τους αλλά και βελτιώνοντας γενικότερα την ποιότητα του σχεδιασμού. Το τελικό μοντέλο («CAD») που παράγεται έχει ενσωματωμένες διάφορες πληροφορίες για το σχέδιο του μοντέλου όπως είναι για παράδειγμα οι διεργασίες, οι διαστάσεις, οι ανοχές, ακολουθώντας συγκεκριμένα κριτήρια εφαρμογής.

2.2.2 Αρχείο STL

Για την τρισδιάστατη εκτύπωση ενός εξαρτήματος το μοντέλο «CAD» πρέπει να μετατραπεί σε κατάλληλη αναγνωρίσιμη μορφή για τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ως αποτέλεσμα, το αρχείο «CAD» μετατρέπεται σε ένα αρχείο «STL» (*Standard Triangle Language*) μία μορφή αρχείου εγγενής με το λογισμικό «CAD» η οποία δημιουργήθηκε από την εταιρεία «3d Systems». Περιληπτικά, το συγκεκριμένο αρχείο χρησιμοποιεί τρίγωνα και πολύγωνα για την περιγραφή των επιφανειών ενός αντικειμένου απλοποιώντας το αρχικό μοντέλο. Αυτή η μορφή πλέον υποστηρίζεται από πλήθος πακέτων λογισμικών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το αρχείο «STL» περιγράφει τις γεωμετρίες της επιφάνειας του τρισδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιώντας ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (οι συντεταγμένες είναι αρνητικές και θετικές) ενώ δεν υπάρχουν πληροφορίες κλίμακας καθώς οι διαστάσεις του μοντέλου είναι σε αδιάστατες μονάδες («*arbitrary units*»).

Στο πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση του μοντέλου που περιέχεται στο αρχείο «STL» (πρόγραμμα «*Slicer*») το σχέδιο χωρίζεται πλέον κατάλληλα σε επίπεδα ενώ η γεωμετρία του για κάθε επίπεδο περιγράφεται από έναν αριθμητικού ελέγχου κώδικα «*g*», δηλαδή μία γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου η οποία χρησιμοποιείται στις κατεργασίες για τον έλεγχο αυτοματοποιημένων μηχανών «*CNC*» ή (πλέον) τρισδιάστατων εκτυπωτών. Μέσω του άνω προγράμματος ο χειριστής μπορεί να καθορίσει τις παραμέτρους εκτύπωσης του εξαρτήματος/μοντέλου, όπως είναι η θέση υποστήριξης και το ύψος του αρχικού επιπέδου. Να σημειωθεί ότι συνήθως κάθε εταιρεία κατασκευής εκτυπωτών έχει το δικό της πρόγραμμα τύπου «*Slicer*».

2.3 Μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης

Γενικά, υπάρχουν αρκετές κατηγορίες εκτυπωτών και διαφορετικοί μέθοδοι εκτύπωσης ανάλογα με τη διαδικασία που ακολουθούν ως προς την εναπόθεση υλικού κατά την εκτύπωση καθώς και ως προς τα εκτυπώσιμα υλικά. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους έχει διάφορους περιορισμούς αλλά και πλεονεκτήματα, τα οποία αφορούν στις ανοχές, στις μηχανικές ιδιότητες, στην ταχύτητα αλλά και στα υλικά που χρησιμοποιούν.

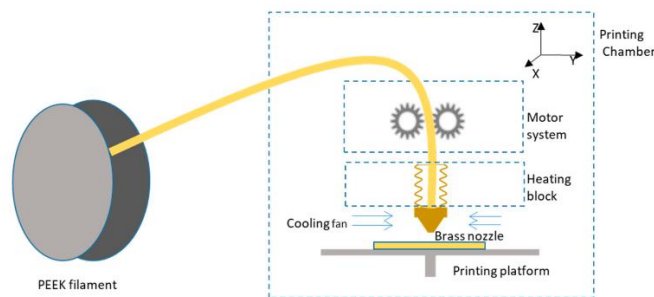
Συνολικά, οι κύριες μέθοδοι εκτύπωσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε έξι κατηγορίες ενώ στην παρούσα εργασία αναφέρονται ενδεικτικά οι τέσσερις (η επιλεγμένη και άλλες τρεις). Συγκεκριμένα, αναφέρονται η εκτύπωση με εξώθηση υλικού, η εκτύπωση με πολυμερισμό, η εκτύπωση με συνδετικό υλικό, και η μέθοδος με σύντηξη πούδρας.

2.3.1 Εκτυπωτές με εξώθηση υλικού

Η μέθοδος εκτύπωσης με εξώθηση υλικού χρησιμοποιεί ένα θερμοπλαστικό υλικό σε σχήμα νήματος το οποίο θερμαίνεται μέσα σε ένα ακροφύσιο και εναποτίθεται πάνω σε μία πλατφόρμα κατασκευής στρώμα προς στρώμα μέχρις ότου σχηματιστεί ένα συμπαγές μοντέλο. Στην μέθοδο αυτή ανήκει η κατηγορία εκτύπωσης *Fused Filament Fabrication FFM* ή *Fused Deposition Modelling FDM* (η διαφορά έγκειται στο εάν είναι θερμαινόμενος ο χώρος εκτύπωσης). Η συγκεκριμένη κατηγορία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι αυτή που επιλέχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας. Η εν λόγω διαδικασία εκτύπωσης θεωρείται μία από τις πιο διαδεδομένες και προσιτές μεθόδους εκτύπωσης από άποψη κόστους ενώ χρησιμοποιείται σε εκτυπωτές χαμηλού κόστους αλλά και σε εκτυπωτές για την βιομηχανία. Ωστόσο, τα διαθέσιμα νήματα παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους τόσο ως προς το κόστος όσο και ως προς τις ιδιότητες του υλικού ενώ οι διαφορές μεταξύ των βιομηχανικών εκτυπωτών και των εκτυπωτών για ιδιωτική χρήση εστιάζονται στην ακρίβεια εκτύπωσης, στην ανάλυση του εκτυπωμένου εξαρτήματος καθώς και στο ελεγχόμενο περιβάλλον εκτύπωσης (ρυθμιζόμενη θερμοκρασία και υγρασία επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερα εξαρτήματα). Καθώς όμως η αναβάθμιση του υλισμικού (*hardware*) και των υλικών βελτιώνονται συνεχώς, οι εκτυπωτές χαμηλού κόστους έχουν εξελιχθεί σε πολύ

μεγάλο βαθμό και μπορούν να τυπώσουν εξαρτήματα με πολύ καλή ακρίβεια και αντοχή.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι συγκεκριμένοι εκτυπωτές λειτουργούν με την τήξη πλαστικού νήματος μέσω ενός θερμαινόμενου εξωθητή «*extruder*» ο οποίος εναποθέτει σε μία πλατφόρμα («*bed*») στρώματα υλικού το ένα πάνω στο άλλο. Κάθε στρώμα ψύχεται και σκληραίνει αμέσως αφού εκχυθεί και έτσι επιτυγχάνεται η σύνδεση μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων. Η πλατφόρμα είναι θερμαινόμενη έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να οδηγήσει σε παραμόρφωση (στρεβλώσεις) στο μοντέλο.



Εικόνα 2-2 Σχηματική αναπαράσταση εκτυπωτή με τεχνολογία εξώθησης υλικού.
Πηγή: (3D PRINT.com)

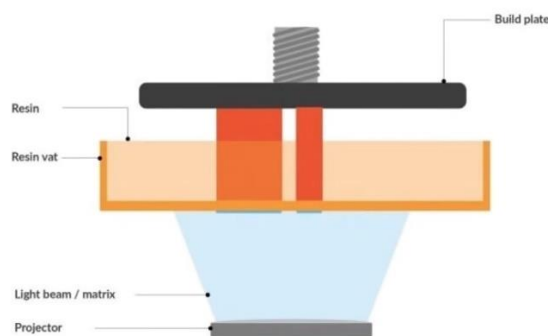
Πρέπει να επισημανθεί ότι για πολύπλοκες γεωμετρίες οι οποίες προεξέχουν, απαιτείται μια επιπρόσθετη δομή στήριξης για να υποστηρίξει τοπικά το μοντέλο. Το εναποθέν υλικό στήριξης είναι πρακτικά ένα πλέγμα με όσο το δυνατόν χαμηλό όγκο, δηλαδή μία δομή που αφαιρείται σχετικά εύκολα μετά το πέρας της εκτύπωσης. Η δομή στήριξης μειονεκτεί στο ότι επιδρά πάνω στην επιφάνεια επαφής για την οποία απαιτείται επεξεργασία ώστε να γίνει λεία. Ωστόσο, για τις δομές στήριξης που έχουν αναπτυχθεί υδατοδιαλυτά υλικά μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση, οι δομές αφαιρούνται πολύ εύκολα παρουσία νερού χωρίς να χρειάζεται κάποια περαιτέρω επεξεργασία. Αυτό είναι πολύ σημαντικό διότι σε μοντέλα με πολύπλοκες γεωμετρίες (που μπορεί να είναι αδύνατο να αφαιρεθεί η βοηθητική δομή στήριξης, π.χ. εσωτερικά του μοντέλου) τα υδατοδιαλυτά υλικά δρουν καταλυτικά ως προς το πρόβλημα.

2.3.2 Εκτυπωτές με πολυμερισμό

Οι εκτυπωτές με τεχνολογία πολυμερισμού χρησιμοποιούν κατάλληλη φωτοπολυμερική ρητίνη, η οποία στερεοποιείται όταν εκτίθεται σε υπεριώδες φως. Οι πιο κοινές μέθοδοι είναι η στερεολιθογραφία «SLA» (*Stereolithography*) και η «DLP» (*Digital Light Processing*). Οι μέθοδοι αυτοί αναλύονται παρακάτω.

- *DLP (Digital Light Processing)*

Η πηγή του φωτός αποτελείται από μία λάμπα υπεριώδους φωτός «UV». Μέσω μίας σειράς μικροκατόπτρων ελέγχεται το σημείο όπου εστιάζει η δέσμη του φωτός, δημιουργώντας το κατάλληλης γεωμετρίας μοτίβο πάνω από την επιφάνεια της πλατφόρμας εκτύπωσης. Να σημειωθεί ότι η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με αυτή της στερεολιθογραφίας η οποία αναφέρεται παρακάτω, με τη μόνη διαφορά ότι αντί για πηγή *Laser* χρησιμοποιείται μία συμβατική πηγή φωτός. Η παρουσία της δέσμης φωτός στην φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη έχει ως αποτέλεσμα να σκληραίνει τοπικά δημιουργώντας έτσι ένα στρώμα του μοντέλου. Στην συνέχεια η πλατφόρμα εκτύπωσης ανεβαίνει και δημιουργείται το επόμενο στρώμα ενώ η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δημιουργηθεί το συνολικό μοντέλο. Όταν το μοντέλο περιέχει πολύπλοκες γεωμετρίες δημιουργούνται επιπρόσθετες δομές στήριξης οι οποίες αφαιρούνται μετά το πέρας της εκτύπωσης.



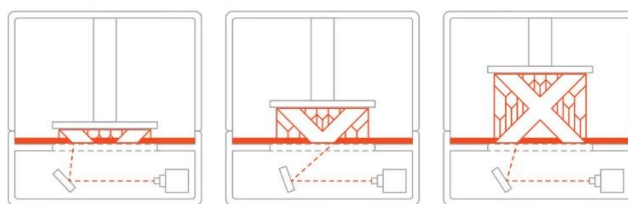
Εικόνα 2-3 Σκαρίφημα απεικόνισης της λειτουργίας με την μέθοδο εκτύπωσης
Πηγή: (ALL3dp.com, 2018)

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου εκτύπωσης σε σχέση με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας (βλ. επόμενη υποενότητα) είναι η ταχύτητα της εκτύπωσης και το μικρότερο κόστος λειτουργίας. Επίσης, η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει υψηλής

ακρίβειας μοντέλα αλλά τα τελικά μοντέλα από φωτοπολυμερή υλικά είναι εύθραυστα και δεν έχουν υψηλή αντοχή στην καταπόνηση.

- *Stereolithography (SLA)*

Η συγκεκριμένη μέθοδος εκτύπωσης χρησιμοποιεί μία δέσμη *laser* η οποία σε συνδυασμό με μικρο-καθρέπτες εκπέμπεται προσανατολισμένα πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι φωτοπολυμερές το οποίο παρουσία του *laser* δημιουργεί μία στέρεα δομή. Όπως και στη διαδικασία *DLP* παρουσία του *laser* δημιουργείται ένα πρώτο στρώμα ενώ μόλις ολοκληρωθεί η πλατφόρμα μετακινείται προς τα πάνω για τη δημιουργία ενός δεύτερου κ.ο.κ. Και σε αυτή την μέθοδο εκτύπωσης για πολύπλοκες γεωμετρίες απαιτούνται δομές στήριξης οι οποίες αφαιρούνται από το μοντέλο στο τελικό στάδιο της κατασκευής.



Εικόνα 2-4 Διαδικασία μεθόδου εκτύπωσης *SLA*.
Πηγή: (Redwood, B., et al., 2017)

Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται από τις πιο ακριβείς μεθόδους με παραγόμενα μοντέλα υψηλής ακρίβειας. Το μειονέκτημα που έχει η συγκεκριμένη μέθοδος όπως και η μέθοδος «*DLP*» είναι ότι τα μοντέλα δεν έχουν υψηλή αντοχή στην κρούση, έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής, ενώ είναι ευαίσθητα στην ηλιακό φως. Επίσης, συγκριτικά με την μέθοδο «*DLP*» είναι πιο αργή.

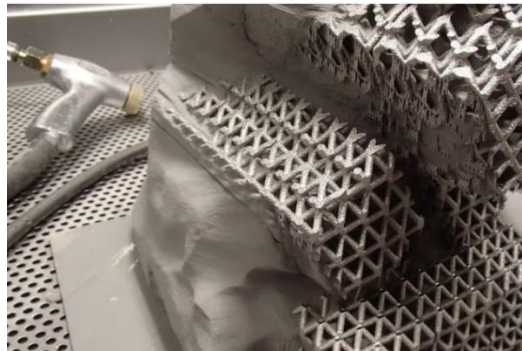
2.3.3 Εκτυπωτές με τεχνολογία σύντηξης σκόνης μετάλλου

Η συγκεκριμένη κατηγορία εκτυπωτών βασίζεται στην τήξη μετάλλου. Περιληπτικά, οι εν λόγω εκτυπωτές χρησιμοποιούν σκόνη μετάλλου ως δομικό υλικό ενώ μέσω μίας κατάλληλης θερμικής πηγής προκαλούν την σύντηξη της σκόνης δημιουργώντας έτσι ένα μεταλλικό στρώμα τη φορά. Ως αποτέλεσμα, με την εν λόγω τεχνική είναι εφικτή η δημιουργία πολύ ανθεκτικών εξαρτημάτων. Η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των

βασικών κατηγοριών της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Παρακάτω παρουσιάζεται περιληπτικά η μέθοδος *EBM*.

- *EBM (Electron Beam Melting)*

Η εκτύπωση με αυτή την τεχνολογία αναπτύχθηκε από την σουηδική εταιρεία «*Arcam*». Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί υλικό σε μορφή πούδρας ενώ ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων. Με την τεχνολογία *EBM* μπορούν να δημιουργηθούν πλήρως πυκνά εξαρτήματα σε διάφορα κράματα μετάλλων. Για τον λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορες εφαρμογές στην βιομηχανία. Τέλος, έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και στην εκτύπωση εμφυτευμάτων στην ιατρική βιομηχανία.



Εικόνα 2-5 Αφαίρεση σκόνης με σκοπό τον καθαρισμό του εκτυπωμένου αντικειμένου.
Πηγή: (Crites, S., 2020)

2.3.4 Εκτυπωτές με τεχνολογία σύντηξης σκόνης πολυμερών

Στην συγκεκριμένη κατηγορία εκτύπωσης χρησιμοποιείται και πάλι μία πηγή θερμότητας έτσι ώστε να συντήξει την σκόνη πολυμερούς δημιουργώντας ένα συμπαγές στρώμα. Και αυτοί οι εκτυπωτές δημιουργούν πολύ ανθεκτικά εξαρτήματα. Βασική μέθοδος εκτύπωσης είναι η «*SLS*» (*Sintering Beam Melting*) η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

- *SLS (Sintering Beam Melting)*

Η μέθοδος εκτύπωσης «*SLS*» (*Sintering Beam Melting*) είναι κατάλληλη για παραγωγή υψηλής αντοχής λειτουργικών εξαρτημάτων καθώς και για εκτύπωση εξαρτημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία ενώ παρέχει υψηλή ακρίβεια. Περιληπτικά, στην μέθοδο αυτή

εκτύπωσης υπάρχει ένας κάδος μέσα στον οποίο εναποτίθεται το υλικό πολυμερούς σε μορφή πούδρας. Η σύντηξη της σκόνης γίνεται μέσω δέσμης *laser* επιλεκτικά δημιουργώντας έτσι κάθε φορά ένα συμπαγές κοκκώδες στρώμα σκόνης. Η μέθοδος αυτή είναι επιρρεπής σε παραμορφώσεις και συρρικνώσεις στο μοντέλο/εξάρτημα και για τον λόγο αυτόν ο κάδος που περιέχει την σκόνη, ως υλικό εκτύπωσης, είναι θερμαινόμενος έτσι ώστε να ρυθμίζεται η θερμοκρασία του υλικού κατάλληλα και να μην δημιουργούνται παραμορφώσεις στο μοντέλο από τις αλλαγές της θερμοκρασίας. Επιπροσθέτως, για να αποφευχθεί πλήρως η παραμόρφωση στο μοντέλο μετά το πέρας της εκτύπωσης το μοντέλο αφήνεται να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου μέσα στον εκτυπωτή ενώ στην συνέχεια αφαιρείται και καθαρίζεται από την σκόνη του κάδου. Επειδή το μοντέλο αρχικά δημιουργήθηκε από σκόνη η επιφάνεια είναι κοκκώδης και για τον λόγο αυτόν πρέπει να πραγματοποιηθεί κατάλληλη κατεργασία ώστε να γίνει πιο λεία η επιφάνειά του.



Εικόνα 2-6 Δημιουργία στρώματος μέσω τήξης σκόνης.
Πηγή: (ALL3DP.com, 2022)

Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου συγκριτικά με άλλες είναι ότι δεν χρειάζονται επιπρόσθετες δομές στήριξης, όπου απαιτείται. Όμως, η μέθοδος αυτή απαιτεί πολύ ακριβό εξοπλισμό και εξειδικευμένο προσωπικό για τον χειρισμό του. Πλην τούτων, το γεγονός ότι το μοντέλο αφήνεται να κρυώσει μετά το πέρας της εκτύπωσης αυξάνει τον χρόνο κατασκευής του.

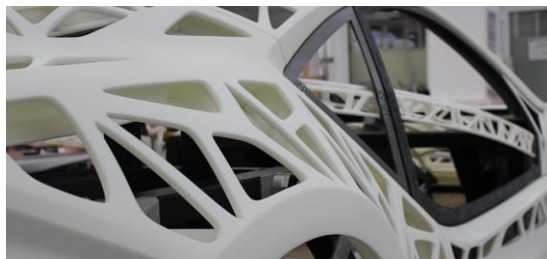
2.4 Εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην βιομηχανία αρχικά εστίαζε στη γρήγορη δημιουργία πρωτότυπων με πολυάριθμες εφαρμογές. Μέσω της τεχνολογίας αυτής άλλωστε είναι δυνατές οι πολλαπλές επαναλήψεις κατασκευής ενός πρωτοτύπου

με σχετικά μικρό κόστος, με στόχο τη βελτιστοποίησή του. Στη βιομηχανία πλέον η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται και για εφαρμογές χύτευσης ενώ όλο και περισσότερες εφαρμογές κερδίζουν έδαφος σε διάφορους τομείς καθώς με την πάροδο του χρόνου, τόσο η τεχνολογία όσο και τα υλικά κατασκευής εξελίσσονται συνεχώς. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες βασικές εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται σήμερα η τρισδιάστατη εκτύπωση σε τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ιατρικής, της οδοντιατρικής, της αρχιτεκτονικής αλλά και της εκπαίδευσης.

2.4.1 Αυτοκινητοβιομηχανία

Η ανάγκη για τη δημιουργία όλο και πιο περίπλοκων εξαρτημάτων και κατασκευών που δεν μπορούσαν να γίνουν με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής δημιούργησε την ανάγκη για την εισαγωγή των τρισδιάστατων εκτυπωτών στην αυτοκινητοβιομηχανία. Συγκεκριμένα, στην συγκεκριμένη βιομηχανία οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία νέων εξαρτημάτων έτσι ώστε να αξιολογήσουν τη λειτουργικότητά τους. Για τα πρωτότυπα σε κανονική κλίμακα συνήθως γίνεται χρήση εκτυπωτών τύπου «FFF» (*Fused Filament Fabrication*) και «FDM» (*Fused Deposition Modeling*). Μία άλλη εφαρμογή των εκτυπωτών είναι η χρήση του εκτυπωμένου αντικειμένου ως καλούπι, ώστε να γίνει χύτευση και να δημιουργηθεί ένα μεταλλικό αντικείμενο. Επίσης, για παλαιά αμάξια (κυρίως ιστορικής αξίας-αντίκες), των οποίων η παραγωγή έχει σταματήσει και είναι δύσκολο να βρεθούν ή να κατασκευαστούν ανταλλακτικά, πολλές εταιρείες δημιουργούν εκτυπωμένα μεταλλικά ανταλλακτικά. Η εκτύπωση ανταλλακτικών κατόπιν ζήτησης μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος του ανταλλακτικού και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος ενώ επιπλέον βοηθάει στην συνέχιση ζωής ενός αυτοκινήτου.



Εικόνα 2-7 Αμάξι κατασκευασμένο από τρισδιάστατο εκτυπωτή.
Πηγή:(3erp.com, 2018)

Ορισμένες εταιρείες αξιοποιούν επίσης την τρισδιάστατη εκτύπωση για να κατασκευάσουν πιο ελαφρά ανταλλακτικά ώστε να βελτιώσουν την απόδοση του αυτοκινήτου, μειώνοντας το βάρος του ενώ ταυτόχρονα διατηρώντας την απόδοση και την αντοχή των εξαρτημάτων (βλ. εικόνα 2-8). Υπάρχουν, ήδη, εταιρείες που δραστηριοποιούνται στη δημιουργία όλο και περισσότερων εκτυπωμένων μερών του αυτοκινήτου καθώς και εξαρτημάτων, τα οποία εκτυπώνονται σε πολλούς εκτυπωτές ταυτόχρονα και στη συνέχεια συναρμολογούνται.



Εικόνα 2-8 Εξ ολοκλήρου εκτυπωμένο πιστόνι αυτοκινήτου.
Πηγή: (XJET.com, 2022)

2.4.2 Ιατρική

Ο ιατρικός τομέας είναι ένας δυναμικός τομέας σε ότι αφορά στην ανάπτυξη των δυνατοτήτων της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό οφείλεται στην ολοένα και αυξανόμενη χρήση τρισδιάστατων εξαρτημάτων όπως είναι για παράδειγμα ακουστικά βαρηκοΐας, προσθετικά μέλη και πληθώρα άλλων εφαρμογών που βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, όπως είναι για παράδειγμα εκτυπωμένοι ιστοί.

Τα εκτυπωμένα προσθετικά μέλη σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνονται και να προσαρμόζονται ακριβώς στις εκάστοτε ανάγκες και στο σώμα κάθε ασθενούς. Τα πλεονεκτήματα που έχουν τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέλη έναντι των προ υπαρχόντων (κατασκευασμένα από τιτάνιο) είναι το μικρό κόστος, το μειωμένο βάρος, η στιβαρή κατασκευή τους και το γεγονός ότι δεν προκαλούν πόνο στον ασθενή. Επίσης μπορούν να προσαρμοστούν πλήρως και δεν απαιτούν μετεγχειρουργικές επεμβάσεις.



Εικόνα 2-9 Φωτογραφική αναπαράσταση τρισδιάστατα εκτυπωμένου προσθετικού ποδιού.
Πηγή: (garage.hp.com, 2019)

2.4.3 Οδοντιατρική

Στην οδοντιατρική η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία εμφυτευμάτων τα οποία να είναι προσαρμοσμένα στις ανάγκες του ασθενούς, καθώς σε συνδυασμό με κατάλληλο σαρωτή μπορούν να δημιουργηθούν ακριβή αντίγραφα δοντιών. Τα εμφυτεύματα αυτά έχουν υψηλή ακρίβεια και περίπλοκη γεωμετρία ενώ έχουν την ακριβή μορφολογία ενός δοντιού. Ωστόσο, η εν λόγω τεχνολογία βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο αν και εξελίσσεται ταχέως. Πέρα από τα εμφυτεύματα υπάρχει και η δυνατότητα εκτύπωσης εξαρτημάτων και εργαλείων, απαραίτητα στην οδοντιατρική σε μικρό χρονικό διάστημα με ελάχιστο κόστος.



Εικόνα 2-10 Εμφυτεύματα δοντιών εκτυπωμένα με τρισδιάστατο εκτυπωτή.
Πηγή: (owandy.com, 2020)

Το βασικό πλεονέκτημα των τρισδιάστατων εκτυπωμένων εμφυτευμάτων και δοντιών είναι ότι μειώνεται το κόστος για τον ασθενή καθώς μειώνεται η τιμή του εμφυτεύματος. Ταυτόχρονα ο ορθοδοντικός θα μπορεί πλέον να κατασκευάζει στο εργαστήριό του εμφυτεύματα αλλά και κατάλληλα εργαλεία με μικρότερο κόστος.

Να αναφερθεί ότι ήδη η «3D Systems» έχει φτιάξει εκτυπωτές με ρητίνη ειδικά σχεδιασμένους για ορθοδοντικές εφαρμογές, όπου χρησιμοποιεί περισσότερα από 30 υλικά ειδικά σχεδιασμένα για ορθοδοντική χρήση. Τα υλικά αυτά καλύπτουν μία σειρά εφαρμογών όπως νάρθηκες, προσθετικά και άλλο ορθοδοντικά μοντέλα. Το σύστημα δίνει τη δυνατότητα να δημιουργεί πολλά μοντέλα στοιβαγμένα το ένα πάνω στο άλλο, μειώνοντας τον χρόνο εκτύπωσης και αυξάνοντας την παραγωγή. Είναι χαρακτηριστικό ότι η «SmarTech Analysis», μια εταιρεία έρευνας αγοράς, που ειδικεύεται στους τρισδιάστατους εκτυπωτές πρόσφατα δημοσίευσε μία έκθεση για την τρισδιάστατη εκτύπωση στην οδοντιατρική, στην οποία περιλαμβάνει ανάλυση των τεχνολογιών, διαδικασιών και υλικών που χρησιμοποιούνται στα οδοντιατρικά εργαστήρια και τις κλινικές. Σύμφωνα με την εν λόγω έρευνα, αναμένεται μία δυναμική αύξηση της χρήσης εκτυπωτών στην οδοντιατρική στο άμεσο μέλλον.

2.4.4 Εκπαίδευση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε πανεπιστήμια αλλά και σε σχολεία για εκπαιδευτικούς σκοπούς καθώς δίνει τη δυνατότητα στους μαθητευόμενους να υλοποιήσουν νέες ιδέες με χαμηλό κόστος, να αναπτύξουν τις δεξιότητές τους καθώς και να εξοικειωθούν με το αντικείμενο (π.χ. φοιτητές ιατρικής). Πολλά πανεπιστήμια πλέον χρησιμοποιούν εκτυπωτές για να δημιουργήσουν πρωτότυπα, καθώς και να κάνουν έρευνα για την επίλυση διάφορων προβλημάτων. Επιπροσθέτως, μέσω κατάλληλων τρισδιάστατων λειτουργικών μοντέλων, οι φοιτητές μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας τους αλλά και της διαδικασίας κατασκευής.



*Εικόνα 2-11 Χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην εκπαίδευση.
Πηγή: (3D PRINTING.COM, 2020)*

2.4.5 Αρχιτεκτονική

Στην αρχιτεκτονική οι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κλίμακας μοντέλων ακριβείας (μακέτες) της τελικής αναμενόμενης κατασκευής. Μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης προσφέρεται μία γρήγορη και οικονομική παραγωγή μοντέλου στην οποία εμφανίζονται όλες οι λεπτομέρειες απευθείας από το σχεδιαστικό πρόγραμμα «CAD», και έτσι δίνεται η δυνατότητα στον πελάτη να δει με κάθε λεπτομέρεια πώς θα είναι η τελική πραγματική κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη επικοινωνία με τον πελάτη και αντίστοιχη ανατροφοδότηση. Να σημειωθεί επίσης, ότι ορισμένοι αρχιτέκτονες / μηχανικοί ή ερευνητές επιδιώκουν πλέον τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης ως άμεση μέθοδο κατασκευής. Οι εκτυπωτές που ήδη χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική σε οικοδομικές κλίμακες λειτουργούν όπως και οι κοινοί εκτυπωτές εναποθέτοντας αλληπάλληλα στρώματα οικοδομικού όμως υλικού (σκυροδέματος). Η τρισδιάστατη εκτύπωση σε αυτές τις κατασκευές μπορεί να προσφέρει λύσεις σε περίπλοκες κατασκευές που με τον παραδοσιακό τρόπο θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθούν. Επίσης, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η μείωση του κόστους κατασκευής καθώς υπολογίζεται ακριβώς η ποσότητα του εναποτιθέμενου αναγκαίου υλικού και έτσι δεν γίνεται σπατάλη και δεν υπάρχουν απόβλητα. Τέλος, ένα ουσιαστικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η εξοικονόμηση του χρόνου κατασκευής.



Εικόνα 2-12 Σκαριφηματική αναπαράστατη τρισδιάστατου εκτυπωτή για την κατασκευή σπιτού.
Πηγή: (Architizer)

Αξίζει να αναφερθεί επίσης, ότι σε αντίστοιχο τομέα της διαστημικής, η NASA και η ESA μελετάνε ήδη αντίστοιχες μεθόδους για τρισδιάστατες εκτυπωμένες κατασκευές στη Σελήνη και στον Άρη, με κυριότερο πλεονέκτημα την ανάγκη μεταφοράς μόνο του εκτυπωτή -τα δομικά υλικά θα βασίζονται σε πετρώματα ή νερό (πάγο) ή σε

συνδυασμό αυτών. Σήμερα, η *NASA* ήδη χρησιμοποιεί τρισδιάστατους εκτυπωτές στον διεθνή διαστημικό σταθμό για την κατασκευή εργαλείων και εξαρτημάτων.

3 Σχεδιασμός και κατασκευή τρισδιάστατης εκτυπωμένης αισθητήριας διάταξης με πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης

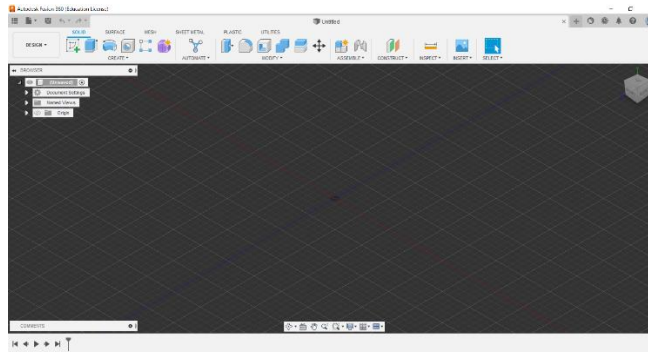
Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παράσχει μία πλήρη περιγραφή όλης της διαδικασίας που ακολουθήσαμε, για την επιτυχή προσθετική κατασκευή αισθητήριας διάταξης με χρήση κατάλληλης πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης (εμπορικά διαθέσιμη). Συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζονται τα απαραίτητα λογισμικά και όργανα μέτρησης για την διεξαγωγή των μετρήσεων. Στη συνέχεια, γίνεται λόγος για την διαδικασία της σχεδίασης και της κατασκευής της δομής καθώς και την μεθοδολογία που ακολουθήσαμε στην πορεία των μετρήσεων, ενώ ταυτόχρονα, αναφέρονται τα προβλήματα που προέκυψαν αλλά και οι τρόποι που χρησιμοποιήσαμε για την αντιμετώπισή τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις – ηλεκτρικό χαρακτηρισμό που διεξάχθηκαν.

3.1 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό και εκτύπωση της δομής

- *Autodesk fusion 360*

Το «*Fusion 360*» είναι ένα λογισμικό σχεδίασης το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρεία «*Autodesk*». Το λογισμικό αυτό έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλές τόσο σε φοιτητές όσο και σχεδιαστές καθώς χρησιμοποιείται κατά κόρον για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Μέσω του «*Fusion 360*» δίνεται η δυνατότητα για σχεδιασμό και μοντελοποίηση αντικειμένων σε δύο και τρεις διαστάσεις, ενώ περιλαμβάνει επίσης, ενσωματωμένες λειτουργίες όπως είναι η παραμετρική σχεδίαση, η βελτιστοποίηση σχεδίασης, η δυναμική ανάλυση, η κινηματική προσομοίωση καθώς και πληθώρα άλλων λειτουργιών. Η ενσωμάτωση όλων των παραπάνω λειτουργιών σε ένα λογισμικό βοηθάει τους μηχανικούς να σχεδιάζουν και να μελετούν μία κατασκευή, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για εναλλαγή και χρήση διαφορετικών πλατφόρμων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πολυπλοκότητα και ο χρόνος σχεδίασης.

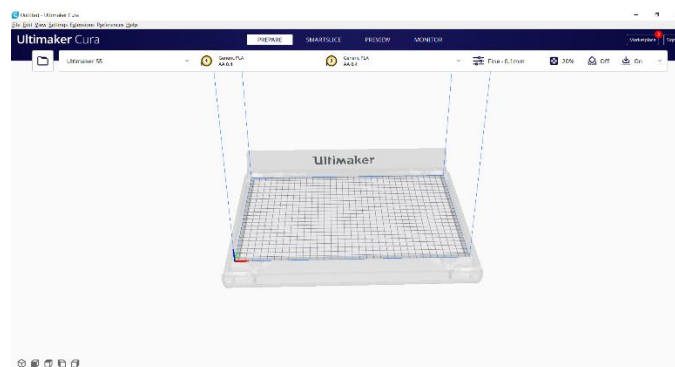
Στην παρούσα εργασία, το εν λόγω σχεδιαστικό πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για την σχεδίαση όλων των τμημάτων της δομής αλλά και τον έλεγχο της συναρμολόγησης των επιμέρους τμημάτων με σκοπό τη διόρθωση τυχόν αστοχιών.



Εικόνα 3-1 Το περιβάλλον του "Autodesk Fusion 360"
Αρχαιακό υλικό.

- Λογισμικό *Ultimaker Cura*

Το εν λόγω λογισμικό είναι ένα λογισμικό τύπου «κοπής» (*slicer*) που χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη εκτύπωση και ανήκει στην εταιρεία κατασκευής τρισδιάστατων εκτυπωτών «*Ultimaker*». Το λογισμικό αυτό εκτελεί το απαραίτητο ενδιάμεσο στάδιο (μεταξύ της εκτύπωσης και του σχεδιασμού του μοντέλου) τεμαχίζοντας το μοντέλο κατάλληλα σε πολλά επίπεδα στρώματα. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέγει σημαντικές ρυθμίσεις όπως η ταχύτητα της εκτύπωσης, η θερμοκρασία του φορέα «*bed*» και του ακροφυσίου «*nozzle*», τον χρόνο και το κόστος εκτύπωσης, τις βοηθητικές πρόσθετες δομές, καθώς και πληθώρα άλλων δυνατοτήτων οι οποίες συνεχώς με την πάροδο του χρόνου εμπλουτίζονται και βελτιώνονται.



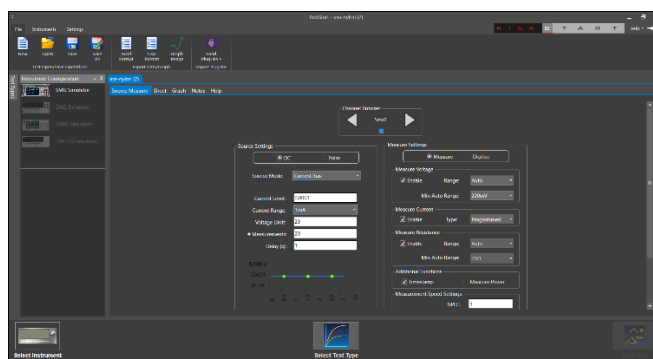
Εικόνα 3-2 Το περιβάλλον του προγράμματος slicer *Ultimaker Cura*.
Αρχαιακό υλικό.

Το λογισμικό αυτό υποστηρίζει τύπους αρχείων όπως «*STL*» «*3MF*» και «*OBJ*» ενώ διαθέτει και την επιλογή για την αγορά επιπρόσθετων πακέτων, δίνοντας την

δυνατότητα στους χρήστες να επιλέγουν υλικά από τρίτους κατασκευαστές. Συνεπώς, το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για να καθορίσουμε όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις του εκτυπωτή τόσο με βάση τις απαιτήσεις που είχε το κάθε υλικό όσο και με βάση τις απαιτήσεις για τη δημιουργία του κάθε μοντέλου, όπως είναι για παράδειγμα επιπρόσθετες δομές στήριξης.

Keithley KickStart

Το λογισμικό «*Keithley KickStart*» είναι ένα λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρεία «*Tektronix*» και είναι ένα μέσο προγραμματισμού του ελεγκτή και της οθόνης μεταξύ του χειριστή και του τροφοδοτικού.



Εικόνα 3-3 Το περιβάλλον του προγράμματος "kickstart" του παλμογράφου.
Αρχειακό υλικό

Το λογισμικό αυτό δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης των μετρήσεων και των δεδομένων. Οι χειριστές έχουν την ικανότητα να καταγράφουν δεδομένα και να παρουσιάζουν τα δεδομένα σε πίνακα τιμών και με γραφικά σε διαγράμματα. Τέλος ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η γρήγορη προβολή των δεδομένων και επιπλέον ότι ο χειριστής μπορεί να τοποθετήσει πολλές σειρές δεδομένων με σκοπό να φανούν με γραφικό τρόπο διάφορες λεπτομέρειες. Μπορεί επίσης, και να ανακαλύψει τυχόν ανωμαλίες στα δεδομένα και να σκοπεύει στη γρήγορη διόρθωσή τους. Τα δεδομένα εξάγονται σε μορφή «*CSV*» και «*Excel*» για επιπρόσθετη ανάλυση.

Συγκεκριμένα το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να τροφοδοτηθεί με ρεύμα η μεμβράνη αλλά και να ρυθμίσει και τον εκάστοτε χρόνο των κάθε μετρήσεων που απαιτούνται για τις πειραματικές μετρήσεις.

3.2 Όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν

Στη συγκεκριμένη ενότητα κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθούν περιληπτικά οι διατάξεις/όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του χαρακτηρισμού του εκτυπωμένου αισθητήρα.

- *Παλμογράφος GW-INSTEK (GDS-1072B)*

Ο παλμογράφος είναι ένα σημαντικό ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης καθώς μέσω αυτού μπορεί να γίνει δισδιάστατη γραφική αναπαράσταση ενός ή περισσότερων σημάτων ως συνάρτηση του χρόνου ως κυματομορφή. Η κυματομορφή αυτή μπορεί μετέπειτα να αναλυθεί και να προκύψουν πληθώρα στοιχείων όπως είναι για παράδειγμα το μέγιστο πλάτος της, η συχνότητά της, ο χρόνος ανόδου και πολλές άλλες σημαντικές πληροφορίες.

Για τις ανάγκες του εργαστηρίου διατίθεται ένας παλμογράφος της εταιρείας «GW INSTEK» μοντέλο «GDS-1072B», οπότε με βάση τον συγκεκριμένο παλμογράφο πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες μετρήσεις. Επίσης, με χρήση κατάλληλου προγράμματος, μέσω της διαθέσιμης σειριακής θύρας έγινε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε ψηφιακή μορφή, τόσο σε μορφή εικόνας αρχείου «JPG,PNG», όσο και σε δεδομένα της μορφής «CSV», ώστε να είναι δυνατή η μετέπειτα αξιοποίηση/επεξεργασία της πληροφορίας.



Εικόνα 3-4 Φωτογραφική αναπαράσταση του παλμογράφου που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.
Αρχειακό υλικό

- *Ψηφιακό ανεμόμετρο UNI-T (UT-363)*

Το ανεμόμετρο είναι ένα όργανο που καταγράφει την ταχύτητα και τη θερμοκρασία του ανέμου. Η κλίμακα μέτρησης που χρησιμοποιείται είναι συνήθως (Bft) και (m/s). Το όργανο αυτό μέτρησης χρησιμοποιήθηκε στην εργασία ως αναφορά για την μέτρηση της παροχής του αέρα μέσω της αισθητήριας διάταξης.

-Τροφοδοτικό ρεύματος **KEITHLEY**

Το τροφοδοτικό ρεύματος είναι μία συσκευή που μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα στην απαιτούμενη κάθε φορά σταθερή τάση, ρεύμα και συχνότητα χωρίς διαταράξεις και скаμπανεβάσματα σε αυτές τις ρυθμίσεις καθιστώντας το πολύ χρήσιμο για ηλεκτρονικά κυκλώματα και πειραματικές διατάξεις.



*Εικόνα 3-5 Τροφοδοτικό που τροφοδοτεί με τάση την μεμβράνη.
Αρχειακό υλικό*

Στο πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες των μετρήσεων από τον εξοπλισμό του εργαστηρίου το τροφοδοτικό ρεύματος της εταιρείας «TEKTRONIX» που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία με ρεύμα της μεμβράνης. Η έξοδος του δεν υπερβαίνει τα 20 volt καλύπτοντας πλήρως τις απαιτήσεις ισχύος που απαιτούνται για την διάταξή μας. Μέσω προγράμματος μπορεί να δοθεί εντολή για την τάση και την ένταση του ρεύματος καθώς και να προκαθοριστεί ο χρόνος διάρκειας της τροφοδοσίας. Μέσω του ίδιου προγράμματος εξάγονται τα δεδομένα.

-Πολύμετρο

Το πολύμετρο είναι ένα όργανο ακριβείας το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση της έντασης, της τάσης και της αντίστασης και μπορεί να είναι αναλογικό ή ψηφιακό. Γι' αυτό και καθίσταται πρακτικό και απαραίτητο εργαλείο για μετρήσεις. Στο πλαίσιο

της εργασίας το ψηφιακό πολύμετρο που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο ήταν της εταιρείας «DT ELECYTONICS» με σκοπό να μετρηθεί την εσωτερική αντίσταση των μεμβρανών και των δοκιμίων.



Εικόνα 3-6 Φωτογραφική αναπαράσταση του πολυμέτρου.
Αρχειακό υλικό

Εξοπλισμός παροχής αέρα (Air blower)

Μέσω του συγκεκριμένου μηχανήματος δημιουργείται εξαναγκασμένη ροή αέρα (μεγάλης ταχύτητας). Η λειτουργία της είναι σχετικά απλή, συγκεκριμένα, η επιθυμητή παροχή επιτυγχάνεται μέσω ενός μονοφασικού κινητήρα, συζευγμένου σε κατάλληλη πτερωτή, η οποία περικλείεται από ένα μεταλλικό περίβλημα. Το εν λόγω μηχάνημα χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών στην βιομηχανία.



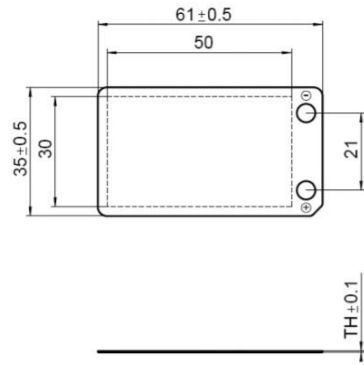
Εικόνα 3-7 Μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα για την παροχή αέρα.
Πηγή: Αρχαιακό υλικό.

Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός στο εργαστήριο διαθέτει ένα ασύγχρονο ηλεκτρικό 220V AC με πυκνωτή για την εκκίνησή του. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία της κατάλληλης παροχής αέρα προς μέτρηση από την αισθητήρια διάταξη.

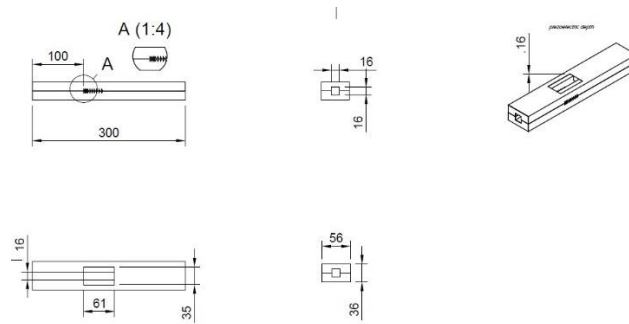
3.3 Προπαρασκευαστική διαδικασία για τον σχεδιασμό του μοντέλου

3.3.1 Καθορισμός διαστάσεων διάταξης

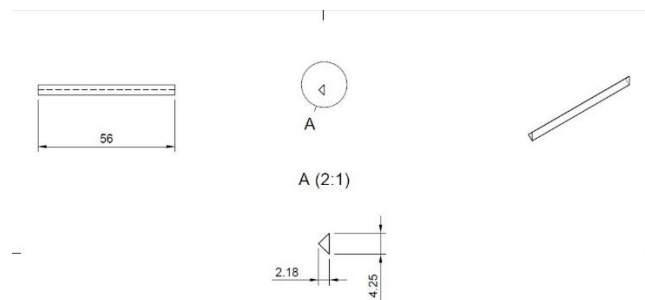
Η διάταξη υπό ανάπτυξη αποτελείται από τρία βασικά μέρη, την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη, τα τριγωνικά σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (*bluff bodies*) για την δημιουργία της δίνης, και την βασική μονάδα μέσα από την οποία διέρχεται η ροή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα σχέδια σε δισδιάστατη μορφή που χρησιμοποιήσαμε για την διάταξή μας. Να σημειωθεί ότι η γεωμετρία της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης είναι δεδομένη καθώς είναι διαθέσιμη εμπορικά (παρουσιάζεται στο σχήμα 3-8). Επίσης, η γεωμετρία των εμποδίων βασίζεται σε προ υπάρχουσα μελέτη και θεωρείται επίσης δεδομένη [koubogiannis, 2016].



Εικόνα 3-8 Σκαριφηματική αναπαράσταση της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης.
Πηγή: "PI Ceramic GmbH"



Εικόνα 3-9 Σχέδιο δύο διαστάσεων της δομής.
Αρχειακό υλικό



Εικόνα 3-10 Σχέδιο δύο διαστάσεων του τριγωνικού "bluff body".
Αρχειακό υλικό

3.3.2 Επιλογή υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσθετική κατασκευή της δομής

-Ακρυλονιτρίλιο-Βουταδιένιο-Στυρένιο (ABS)

Το υλικό «ABS» θεωρείται από τα πιο χρησιμοποιούμενα πλαστικά υλικά σήμερα καθώς το συναντάμε παντού, τόσο σε παιχνίδια όσο και σε ηλεκτρικές συσκευές.

Στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι από τα πλέον δημοφιλή υλικά καθώς είναι οικονομικό και έχει καλές μηχανικές ιδιότητες. Είναι ένα σκληρό υλικό, έχει αντοχή στη θερμότητα και στην κρούση, μπορεί να κατεργασθεί εύκολα και να έχει ένα καλό φινίρισμα. Τέλος, μπορεί να τηχθεί και να ψυχθεί (απαραίτητη διαδικασία της εκτύπωσης) χωρίς να απωλέσει τις μηχανικές του ιδιότητες. Θα πρέπει να τονισθεί όμως ότι σαν δομικό υλικό θεωρείται αρκετά δύσκολο καθώς κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης θα πρέπει να υπάρχει ελεγχόμενο περιβάλλον χωρίς απότομες εναλλαγές στη θερμοκρασία, τόσο κατά την εκτύπωση του μοντέλου όσο και κατά την ψύξη του, για να αποφευχθούν ρωγμές ή αποκόλληση του από τον φορέα (*bed*) του εκτυπωτή. Επίσης, έχει υψηλό βαθμό συρρίκνωσης κάτι που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σαν παράμετρος στη σχεδίαση του μοντέλου.



Εικόνα 3-11 Υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης «ABS».
Αρχαιακό υλικό

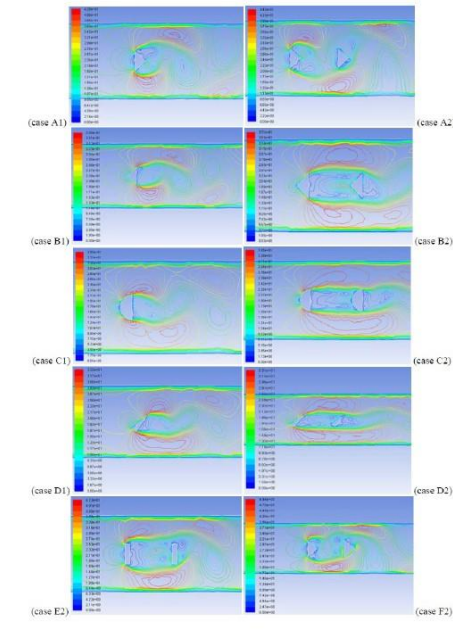
Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το υλικό «ABS» της εταιρείας «FIBERFORCE». Παρακάτω, παρατίθεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης του συγκεκριμένου υλικού σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Nozzle Temperature	240-260 °C
Bed Temperature	100-120 °C
Fan Speed	0%(max.25%)
Bed Adhesion	Clean with ethanol
Print Speed	40-80 mm/sec
Top/Bottom Thickness	0.8-1.0 mm
Layer Height	0.1-0.2 mm

Πίνακας 3-1 Πίνακας με τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης για το υλικό «ABS» της εταιρείας «FIBERFORCE» σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

3.4 Διαδικασία σχεδιασμού του 3D μοντέλου

Η πρώτη ενέργεια που πραγματοποιήθηκε αρχικά, μέσω της μελέτης των κατάλληλων βιβλιογραφικών αναφορών, ήταν ο καθορισμός των ακριβών διαστάσεων της δομής αλλά και η κατανόηση της αρχής λειτουργίας της. Συγκεκριμένα, με βάση τις εν λόγω αναφορές αντλήθηκαν οι απαραίτητες πληροφορίες για τη γεωμετρία και τις επιμέρους διαστάσεις της βασικής διάταξης (π.χ. μήκος εισόδου φορέα), των σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια «*bluff bodies*», αλλά και για την αναμενόμενη λειτουργία της διάταξης σύμφωνα με τις προϋπάρχουσες προσομοιώσεις. Στην εικόνα 3-12 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα προσομοίωσης από την αναφορά *Koubogiannis et al*, 2016, για διαφορετικές θέσεις ενός ή δύο σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.



Εικόνα 3-12 Χαρακτηριστικά αποτελέσματα προσομοιώσεων που έγιναν με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη θέση για τα σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.
Πηγή: (koubogiannis, 2016)

Να σημειωθεί ότι στην εν λόγω μελέτη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές (μέσω προσομοίωσης) για διάφορα σχήματα/συνδυασμό σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια με σκοπό να βρεθεί το βέλτιστο σχήμα για την παραγωγή δίνης που οδηγεί σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφορά πίεσης. Με βάση τη συγκεκριμένη μελέτη, το καλύτερο σχήμα για τα σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (*bluff bodies*) είναι το τριγωνικό. Να σημειωθεί επίσης, ότι σε ό,τι αφορά τις θέσεις όπου θα τοποθετηθούν αλλά και τον αριθμό των «*bluff bodies*» ο προτεινόμενος συνδυασμός (στην συγκεκριμένη αναφορά) θεωρήθηκε ότι αποτελεί τον βέλτιστο.

Σε δεύτερο στάδιο, αναζητήθηκε η βέλτιστη γεωμετρία/τοπολογία της δομής συνολικά ώστε να είναι εφικτό να τροποποιείται η θέση και ο αριθμός των σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια χωρίς να είναι απαραίτητες εκτεταμένες αλλαγές (βλ. επανεκτύπωση), για την άμεση εξαγωγή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

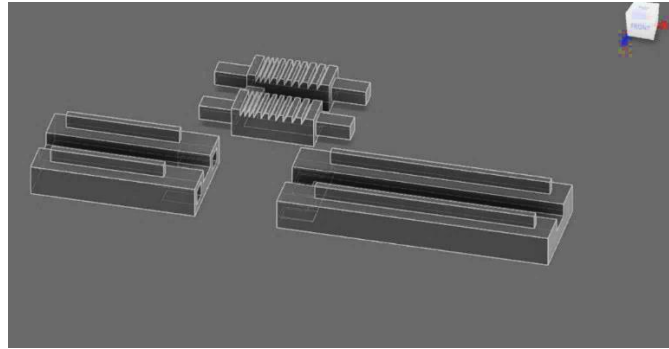
Ο συνολικός σχεδιασμός έγινε εξ' ολοκλήρου με το σχεδιαστικό πρόγραμμα «*Fusion 360*». Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση για τη βασική δομή, για τα «*bluff bodies*» αλλά και όλων των λοιπών εξαρτημάτων που προέκυψαν μετέπειτα. Στον εν λόγω σχεδιασμό λήφθηκαν υπ' όψιν επίσης, οι ανοχές που απαιτούνται, λόγω της συρρίκνωσης του υλικού του νήματος που ορίζει ο κατασκευαστής κατά την εκτύπωση. Για το σκοπό αυτό, αρχικά εκτυπώθηκαν κατάλληλα δοκίμια-δοκιμής (test

samples) ώστε να μετρηθούν οι προκύπτουσες ανοχές (με παχύμετρο) ανάλογα με τη θερμοκρασία του εξωθητή (*extruder*) και του φορέα (*bed*) του εκτυπωτή, με σκοπό να γίνει έλεγχος της συρρίκνωσης του υλικού με βάση τη θερμοκρασία.

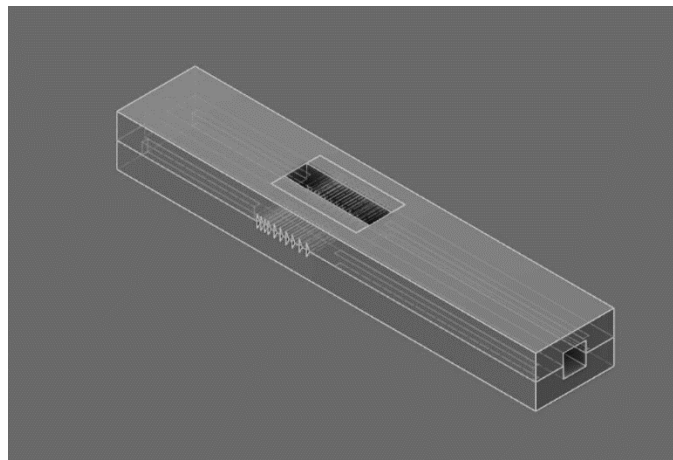
Περίληπτικά, η διαδικασία προσθετικής κατασκευής της συνολικής δομής μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως. Μόλις σχεδιάστηκε η δομή και τα σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια έγινε αποθήκευσή τους σε ένα αρχείο τύπου «*STL*» έτσι ώστε να είναι στην κατάλληλη μορφή για να εισαχθεί στο λογισμικό του εκτυπωτή. Μέσω του προγράμματος του εκτυπωτή πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες ρυθμίσεις που αφορούν στην επιλογή του υλικού και στις θερμοκρασίες. Τέλος, μέσω του ίδιου προγράμματος, επιλέχθηκε η πυκνότητα που θα έχει το μοντέλο καθώς και η ανάλυση της εκτύπωσης.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι με την εισαγωγή της γεωμετρίας της δομής στο πρόγραμμα «*slicer*» του εκτυπωτή προέκυψε ως πρόβλημα το γεγονός ότι η τελική δομή δεν χώραγε στο φορέα (*bed*) του εκτυπωτή λόγω περιορισμού στο διαθέσιμο χώρο εκτύπωσης. Επίσης, λόγω του μεγάλου μεγέθους της, ο χρόνος που απαιτούνταν για την εκτύπωση ήταν πολύ μεγάλος -συνολικά τέσσερις ημέρες.

Για τους παραπάνω λόγους πραγματοποιήθηκε κατάλληλος επανασχεδιασμός της συνολικής δομής, η οποία πλέον διαχωρίστηκε σε έξι μικρότερα μέρη (βλ. εικόνες 3-13 & 3-14). Με τον τρόπο αυτό, η δομή εκτυπώθηκε σε κατάλληλα για συναρμολόγηση μικρότερα τμήματα. Για να μπορέσουν να συνδεθούν τα επιμέρους τμήματα μεταξύ τους, δημιουργήθηκαν αντίστοιχες εσοχές και προεξοχές. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές εικόνες από το περιβάλλον του σχεδιαστικού προγράμματος, όπου φαίνεται η κατάλληλη γεωμετρία των τμημάτων έτσι ώστε να συνδέονται εύκολα μεταξύ τους αλλά και η ολόκληρη η δομή όταν είναι πλέον συναρμολογημένη. Να σημειωθεί ότι τα τμήματα συναρμολογήθηκαν αρχικά εικονικά στο σχεδιαστικό πρόγραμμα ώστε να γίνει σε πραγματικό χρόνο ο απαραίτητος έλεγχος πριν την εκτύπωση. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχθηκε τυχόν σχεδιαστική αστοχία ή κάτι που δεν έχει προβλεφθεί κατά την μελέτη, που θα δημιουργούσε πρόβλημα στο τελικό εκτυπωμένο μοντέλο.

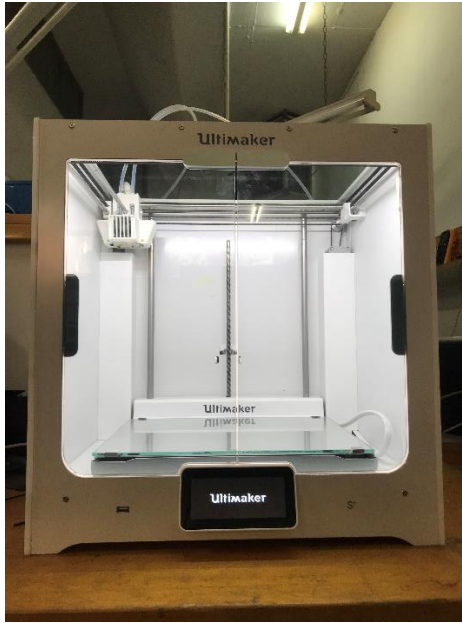


Εικόνα 3-13 Σχεδιασμός άνω μέρους διάταξης στο σχεδιαστικό πρόγραμμα "Fusion 360", στην φωτογραφία ξεχωρίζουν οι εγκοπές για να μπορέσει να κουμπώσει η διάταξη.
Αρχειακό υλικό.



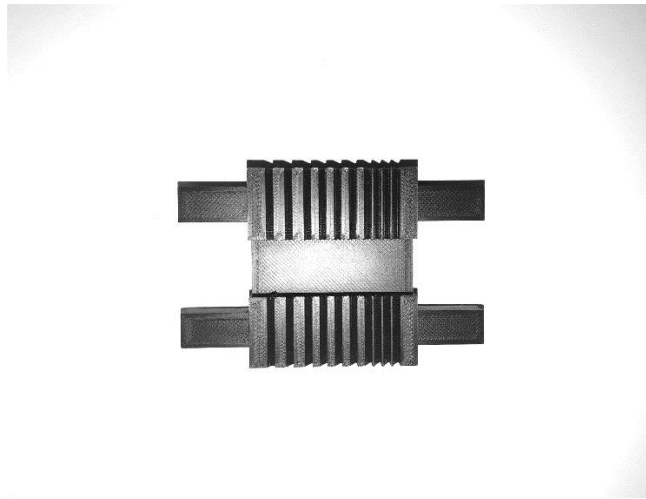
Εικόνα 3-14 Ολοκληρωμένη σχεδίαση διάταξης στο σχεδιαστικό πρόγραμμα "Fusion 360".
Αρχειακό υλικό.

Η δομή κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου από υλικό «ABS» έτσι ώστε να είναι συμπαγής και να μην έχει πρόβλημα ευθραυστότητας. Τόσο η συνολική δομή όσο και τα υπόλοιπα εξαρτήματα, για τα οποία προέκυψε η ανάγκη σε μετέπειτα στάδια της εργασίας, εκτυπώθηκαν μέσω του εκτυπωτή «Ultimaker s5» (βλ. εικόνα3-15) ο οποίος χρησιμοποιείται για τις ανάγκες του εργαστηρίου.

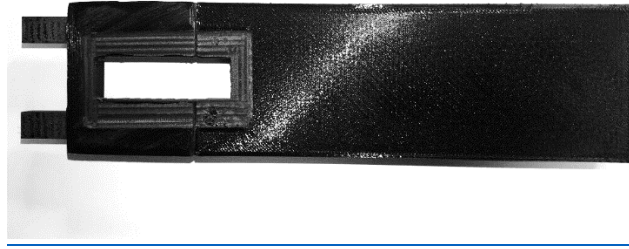


*Εικόνα 3-15 Εκτυπωτής τρισδιάστατης εκτύπωσης
Αρχειακό υλικό*

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια τμήματα της δομής μετά το πέρας της εκτύπωσης.



*Εικόνα 3-16 Κάτοψη από το μεσαίο το μεσαίο κάτω τμήμα της δομής. Διακρίνονται οι εγχοπές για τα "bluff bodies" και οι εγχοπές για την σύνδεση με τα άλλα δύο κομμάτια.
Αρχειακό υλικό*



Εικόνα 3-17 Κάτοψη της εκτυπωμένης δομής όπου διακρίνεται και η εγκοπή για την τοποθέτηση της μεμβράνης.
Αρχειακό υλικό



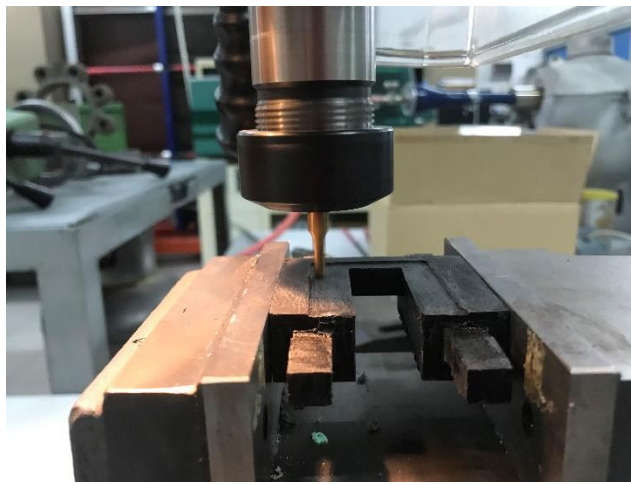
Εικόνα 3-18 Κάτοψη του πάνω τμήματος της δομής με βελάκι φαίνεται η περιοχή όπου τοποθετείται η μεμβράνη.
Αρχειακό υλικό

Να σημειωθεί ότι τα εκτυπωμένα μοντέλα που προέκυψαν ήταν πολύ ανθεκτικά και δεν υπήρχε κάποιο πρόβλημα ευθραυστότητας. Στην παρακάτω εικόνα (βλ. 3-19) διακρίνονται με βελάκια οι περιοχές όπου υπάρχουν βοηθητικές δομές «*supports*» για την εκτύπωση. Στις περιοχές αυτές έχουν δημιουργηθεί οι απαραίτητες εγκοπές για τη συναρμογή των επιμέρους τμημάτων. Οι βοηθητικές δομές που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό τη συγκράτησή επιφανειών (προεξοχές αλλά και οι εσοχές του μοντέλου) που ήταν αιωρούμενες. Μετά το πέρας της εκτύπωσης, οι βοηθητικές αυτές δομές αφαιρέθηκαν ενώ η επιφάνεια καθαρίστηκε και επεξεργάστηκε με σκοπό να λειανθεί.



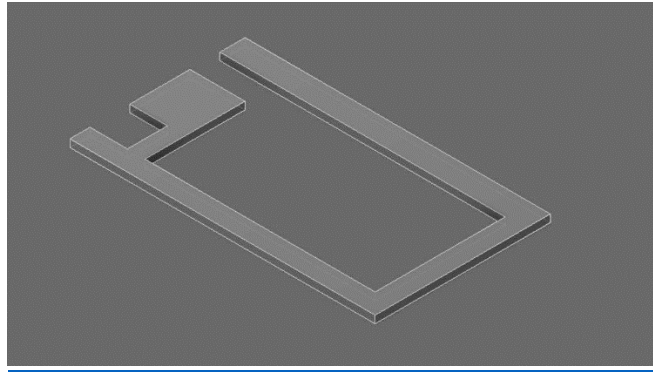
Εικόνα 3-19 Τμήμα από την δομή όπου διακρίνονται και οι βοηθητικές δομές "supports" της υποδοχής για να κουμπώσουν τα τμήματα μεταξύ τους.
Αρχειακό υλικό

Επίσης, καθώς το πάνω μέρος της δομής τυπώθηκε αρχικά, σε επαφή με τον φορέα (*bed*), το πρόβλημα που προέκυψε ήταν ότι δεν τυπώθηκε η απαραίτητη εγκοπή για την στήριξη της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης. Για το σκοπό αυτό, μετά την εκτύπωση πραγματοποιήθηκε κατάλληλη μηχανουργική κατεργασία κάνοντας χρήση φρέζας (βλ. εικόνα 3-20) έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα εκ' νέου κατάλληλο αυλάκι μέσα στο οποίο θα εφαρμόζει η μεμβράνη ώστε να και να αποφευχθεί η όποια μετατόπισή της.

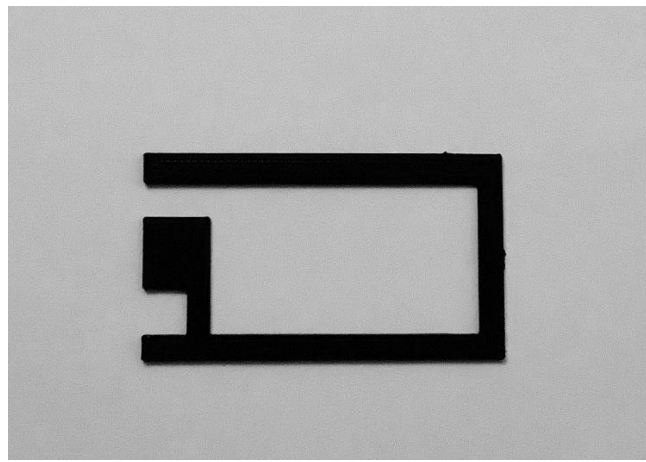


Εικόνα 3-20 Στιγμιότυπο κατά την διάρκεια δημιουργίας αυλακιού για την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη.
Αρχειακό υλικό

Επίσης, καθώς η πιεζοηλεκτρική μεμβράνη δεν συγκρατείται στην πάνω επιφάνειά της, σχεδιάστηκε και εκτυπώθηκε κατάλληλη δομή συγκράτησης με βάση τη γεωμετρία της (βλ. εικόνες 3-21 & 3-22).

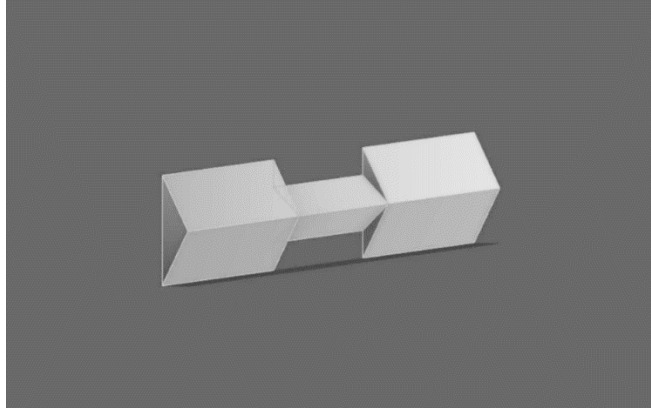


Εικόνα 3-21 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της δομής που τοποθετείται πάνω από την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη.
Αρχιαιακό υλικό

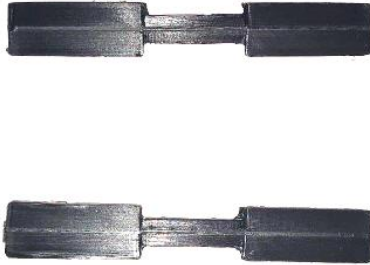


Εικόνα 3-22 Φυσικό μοντέλο της δομής που χρησιμοποιείται για να κρατάει την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη.
Αρχιαιακό υλικό

Στην συνέχεια σχεδιάστηκαν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα τα τριγωνικά σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια «*bluff bodies*». Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο εκτυπωτής έχει την ικανότητα να εκτυπώνει μοντέλα με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Αυτό μας βοήθησε στην δημιουργία των τριγωνικών σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια επειδή το μέγεθος τους είναι αρκετά μικρό. Για να μην σπάνε οι άκρες των σωμάτων κάθε φορά που θα γίνεται αλλαγή των θέσεων έγινε μία διαπλάτυνσή τους στην περιοχή η οποία εισέρχεται στα πλευρικά τοιχώματα της διάταξης. Αντίστοιχα, στο κεντρικό σημείο της μετρητικής διάταξης (στην περιοχή της ροής) το μέγεθος τους διατηρήθηκε ως έχει (βλ. εικόνες 3-23,3-24).

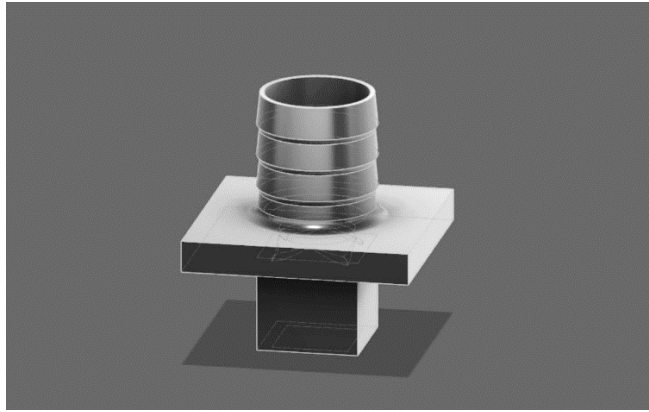


Εικόνα 3-23 Τρισδιάστατη αναπαράσταση των τριγωνικών "bluff body".
Αρχειακό υλικό



Εικόνα 3-24 Φυσικό μοντέλο μετά το πέρας της εκτύπωσης για τα τριγωνικά "bluff bodies".
Αρχειακό υλικό

Για να μπορέσει να διασυνδεθεί ο σωλήνας παροχής αέρα με την διάταξη σχεδιάστηκε και εν συνεχεία τυπώθηκε ένας σύνδεσμος από κυκλική σε τετραγωνική διατομή με κατάλληλη εσοχή. Η τετραγωνική διατομή έχει κατάλληλη γεωμετρία ώστε να ασφαλίζει («σφηνώνει») μέσα στην διάταξη χωρίς να υπάρχουν απώλειες της ροής. Καθώς η διάμετρος του σωλήνα είναι 19mm, καταλήγοντας σε τετραγωνική διατομή 16 mm^2 , για να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερη στένωση στην ροή έγινε προσπάθεια μείωσης του πάχους του συνδέσμου (βλ. εικόνες 3-25, 3-26).

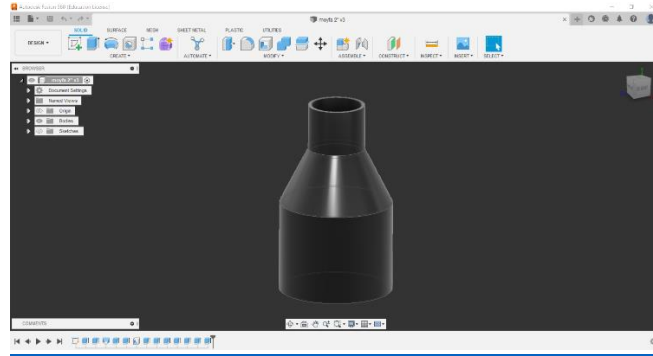


*Εικόνα 3-25 Τρισδιάστατη αναπαράσταση συνδέσμου μεταξύ του σωλήνα και της διάταξης.
Αρχαιακό υλικό*



*Εικόνα 3-26 Φυσικό μοντέλο μετά το πέρας της εκτύπωσης για τη σύνδεση του σωλήνα με την διάταξη.
Αρχαιακό υλικό.*

Επίσης, για να είναι εφικτή η σύνδεση της συνολικής δομής με τον εξοπλισμό παροχής αέρα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί σύνδεσμος από δύο σε μία ίντσα η οποίος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε επιτυχώς, έχοντας ως αποτέλεσμα να εξοικονομηθεί ο χρόνος που απαιτούνταν για την εύρεση αντίστοιχου έτοιμου εξαρτήματος στο εμπόριο, να μειωθεί το κόστος κατασκευής και να κατασκευαστεί με την απαιτούμενη ακρίβεια για τις συγκεκριμένες/επιθυμητές ανάγκες του πειράματος. Παρακάτω παρουσιάζεται ο σύνδεσμος τόσο στο σχεδιαστικό περιβάλλον όσο και στο φυσικό μοντέλο μετά την επιτυχή εκτύπωσή του.



*Εικόνα 3-27 Τρισδιάστατη αναπαράσταση συνδέσμου μετατροπές 2" σε 1".
Αρχειακό υλικό*

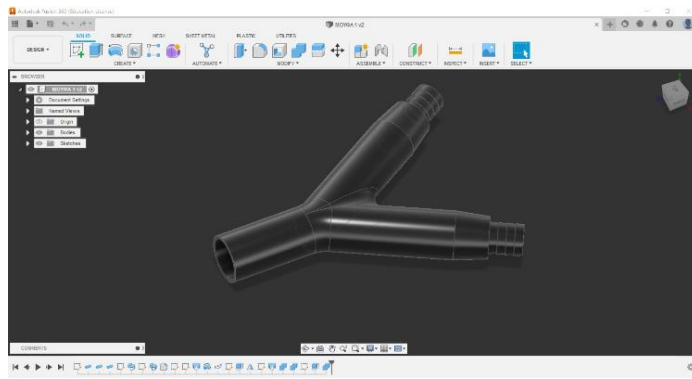


*Εικόνα 3-28 Φυσικό μοντέλο συνδέσμου μετατροπές 2" σε 1".
Αρχειακό υλικό*

Ένα πρόβλημα που προέκυψε κατά τη διάρκεια του χαρακτηρισμού της μετρητικής διάταξης ήταν το γεγονός ότι ο κινητήρας του μηχανήματος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή αέρα είναι μονοφασικός ασύγχρονος με πυκνωτή, ο οποίος διαθέτει πηνίο συνδεδεμένο με ένα δευτερεύον τύλιγμα για την εκκίνηση του κινητήρα. Για τον λόγο αυτό δεν είναι εφικτή η τοποθέτηση ροοστάτη στον κινητήρα (βλ. εικόνα3-7) για την ρύθμιση των στροφών του και συνεπώς της παροχής αέρα.

Το πρόβλημα αυτό οδήγησε στην υλοποίηση μίας ιδέας με σκοπό να ρυθμιστεί η ροή χειροκίνητα με δύο βάνες. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε ένας διαχωριστής της ροής με σκοπό να συνδέεται με τον σύνδεσμο και να διαχωρίζει την παρεχόμενη ροή σε δύο διαδρομές όπου είναι τοποθετημένες αντίστοιχα δύο βάνες για τον επιμέρους έλεγχο της ροής. Ο διαχωριστής αυτός της ροής έχει διάμετρο εισόδου μία ίντσα και εξόδους

(δύο ακροφύσια) διαμέτρου 19mm (βλ. εικόνα3-29). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μοντέλο που σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό περιβάλλον.



*Εικόνα 3-29 Σύνδεση που χωρίζεται σε δύο κατευθύνσεις με υποδοχή για να μπαίνουν οι δύο βάνες.
Αρχειακό υλικό*

Για την εκτύπωσή του το μοντέλο τέθηκε όρθιο στο φορέα (*bed*) του εκτυπωτή. Αυτό βοήθησε στο να μην χρησιμοποιήσουμε επιπρόσθετες βοηθητικές δομές καθώς οι εσωτερικές δομές μέσα στο μοντέλο είναι πολύ δύσκολο να απομακρυνθούν, και να εκτυπωθεί όλο σε μία εκτύπωση. Παρακάτω παρουσιάζεται το εκτυπωμένο μοντέλο-διακρίνονται οι λεπτομέρειες στα ακροφύσια για να τοποθετηθούν οι δύο σωλήνες.



*Εικόνα 3-30 Φυσικό μοντέλο για τον διαχωρισμό της ροής.
Αρχειακό υλικό*

Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται η συνολική διάταξη που αναπτύχθηκε με σκοπό τον έλεγχο της παροχής αέρα μέσω δύο βανών. Από τις δύο βάνες, η μία είναι περιστροφική και άλλη είναι διακόπτης σφαιρική. Η δεύτερη μένει ανοιχτή σε σταθερή

θέση χωρίς να την περιστρέφουμε. Αντίθετα ο έλεγχος της ροής γίνεται από την περιστροφική βάννα. Με την περιστροφική βάννα ελέγχεται ακριβώς η επιθυμητή ροή - ανάλογα αν περιστρέφεται αριστερόστροφα ή δεξιόστροφα- πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο την επιθυμητή αύξηση ή μείωση της ροής. Πρέπει να σημειωθεί ότι ως μειονέκτημα της συγκεκριμένης λύσης, σε κάθε ρύθμιση της παροχής είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται μέτρηση (με χρήση του εμπορικού ροόμετρου) της ταχύτητας του αέρα που εξέρχεται από τον σωλήνα, το οποίο είναι αρκετά χρονοβόρο.



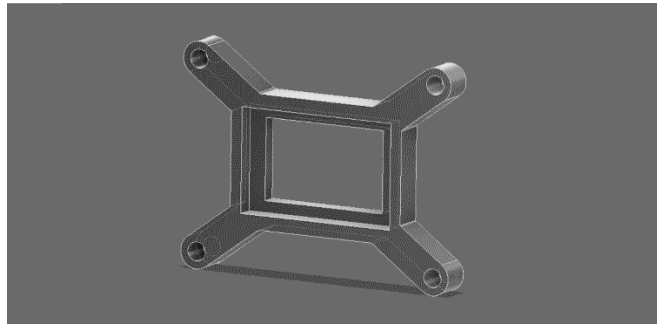
Εικόνα 3-31 Αναπαράσταση της διάταξης με βάννες για τον έλεγχο της ροής.
Αρχειακό υλικό

Στην συνέχεια ακολούθησε η μελέτη για την αποφυγή τυχόν απωλειών στη ροή μέσω της μετρητικής δομής ή μετακίνηση τμημάτων της ίδιας της δομής καθώς εκτυπώθηκε σε έξι βασικά επιμέρους τμήματα. Ως αποτέλεσμα, θεωρητικά είναι πιθανό να υπάρχουν κάποια κενά μετά τη συναρμογή ή να γίνει μετακίνηση κάποιων τμημάτων της εξαιτίας της σημαντικής ροής του αέρα (αύξηση πίεσης εσωτερικά) που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Μία λύση που εφαρμόστηκε ήταν να τοποθετηθεί κόλλα μεταξύ των τμημάτων. Επειδή όμως τα τρίγωνα σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να αφαιρούνται και να επανατοποθετούνται σε άλλη θέση κάθε φορά, τοποθετήθηκε κόλλα μόνο στα σημεία όπου ενωνόντουσαν τα βασικά επιμέρους τμήματα.

Για να μειωθούν περαιτέρω οι απώλειες, χωρίς να επηρεάζονται τα σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια πραγματοποιήθηκε επίσης η σχεδίαση δύο κατάλληλων βάσεων συγκράτησης. Συγκεκριμένα, οι βάσεις αυτές δημιουργήθηκαν με σκοπό να

συγκρατούν την διάταξη μέσω τεσσάρων κοχλιών έτσι ώστε να μην υπάρχουν απώλειες και να μην είναι εφικτή η όποια μετακίνηση μεταξύ τους (βλ. εικόνα 3-32).

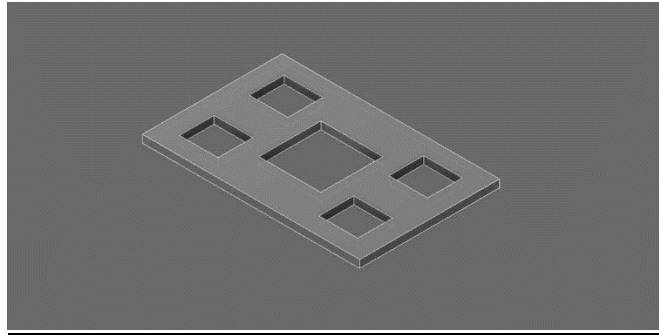


*Εικόνα 3-32 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της βάσης.
Αρχεϊακό υλικό*



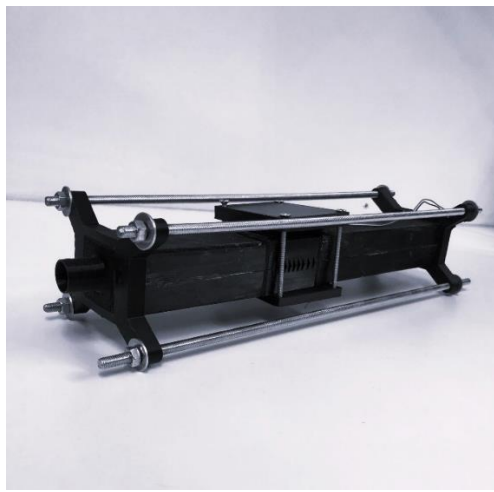
*Εικόνα 3-33 Φυσικό μοντέλο της βάσης.
Αρχεϊακό υλικό*

Μία τελευταία βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε στην μετρητική δομή είναι ο σχεδιασμός ενός κατάλληλου παρεμβύσματος (βλ. εικόνα 3-34) μεταξύ των περιοχών που έρχονται σε επαφή κατά τη συναρμογή των βασικών επιμέρους τμημάτων. Καθώς το παρέμβυσμα είναι κατασκευασμένο από δομικό υλικό «TPU» είναι ελαστικό (σαν το καουτσούκ) ενώ σε συνδυασμό με τις δύο βάσεις συγκράτησης οδηγεί στην εξάλειψη τυχόν απωλειών στη ροή.



Εικόνα 3-34 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της φλάντζας για τις συνδέσεις των κομματιών.
Αρχαιακό υλικό

Στην παρακάτω φωτογραφία διακρίνεται η τελική μετρητική διάταξη με όλες τις βελτιστοποιήσεις που έγιναν με σκοπό να μειωθούν οι απώλειες και να αυξηθεί η αναπτυσσόμενη πίεση εσωτερικά που ασκείται στην μεμβράνη λόγω των δινών. Να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα για μετακίνηση των σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (*bluff bodies*) χωρίς να απαιτείται ο οποιαδήποτε επανασχεδιασμός της γεωμετρίας ή εκτύπωση, σπαταλώντας χρόνο.



Εικόνα 3-35 Αναπαράσταση της τελικής δομής.
Αρχαιακό υλικό

3.5 Διαδικασία μετρήσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία των μετρήσεων που ακολουθήθηκε όσον αφορά στις θέσεις για τα σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια, θεωρώντας ένα ή συνδυασμό δύο σωμάτων. Να σημειωθεί ότι για όλες τις θέσεις το εύρος ταχύτητας ροής ήταν ίδιο ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Βασικός σκοπός είναι να προσδιοριστεί ο συνδυασμός όπου εμφανίζεται η μέγιστη διαφορά τάσης και η πραγματοποίηση μίας αρχικής σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα θεωρητικά της σχετικής δημοσίευση αναφοράς στην οποία βασίστηκε η βασική γεωμετρία της δομής (*Koubogiannis, 2016*).

- Διαδικασία που ακολουθήθηκε

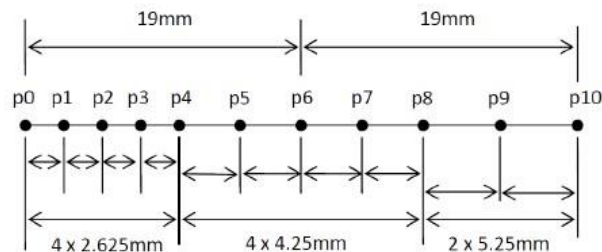
Πιο συγκεκριμένα για την διεξαγωγή των μετρήσεων έγινε χρήση μίας θέσης ή συνδυασμός δύο θέσεων σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια ενώ σε όλες τις μετρήσεις έγινε χρήση μόνο του σώματος τριγωνικής γεωμετρίας -τύπου **A** (σύμφωνα με *Koubogiannis, 2016*, βλ. εικόνα 3-10). Συνεπώς οι μετρήσεις χωρίστηκαν σε δύο βασικές κατηγορίες. Η μία κατηγορία αφορά στο συνδυασμό δύο θέσεων σωμάτων όπου και περιλαμβάνονται οι θέσεις P0 & P1 έως και P0 & P9 (βλ. εικόνα 3-36). Η δεύτερη κατηγορία αφορά σε μία μόνο θέση και περιλαμβάνει τις θέσεις: P0, P4 και P6.

Σε κάθε μέτρηση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέσω της περιστροφικής βάνας στη μετρητική διάταξη ρυθμίζεται ανάλογα η εκάστοτε επιθυμητή ταχύτητα ροής, η οποία αρχικά μετράται μέσω του ροόμετρου καθώς αυτή εξέρχεται από τον σωλήνα. Για τις τιμές της ροής, επιλέχθηκε ένα εύρος ταχυτήτων από 4 έως 24 m/s με βήμα 2 m/s, οπότε σε κάθε συνδυασμό θέσεων πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 μετρήσεις (υπό τις ίδιες συνθήκες εκτός της ροής) με σκοπό να γίνει σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων θεωρητικών. Συγκεκριμένα, ο σκοπός είναι να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ της μέγιστης διαφοράς πίεσης που αναφέρεται στην εν λόγω δημοσίευση (για τις συγκεκριμένες θέσεις σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια και ροών) και της μέγιστης διαφοράς τάσης που μετράται πειραματικά καθώς στα σημεία όπου εμφανίζεται η μέγιστη πίεση, θεωρητικά δημιουργείται και η μεγαλύτερη κάμψη στην πιεζοηλεκτρική μεμβράνη και συνεπώς (καθώς η ανάπτυξη τάσης στην πιεζοηλεκτρική μεμβράνη εξαρτάται από την πίεση που ασκείται σε αυτήν), προκύπτει η μέγιστη διαφορά δυναμικού. Στην επόμενη

ενότητα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν.

3.6 Αποτελέσματα μετρήσεων

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν τόσο για την συχνότητα του σήματος εξόδου της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης όσο και για τη διαφορά τάσης που αναπτύχθηκε. Να σημειωθεί ότι στους κάτωθι πίνακες παρουσιάζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της αναπτυσσόμενης διαφοράς δυναμικού που μετρήθηκε μαζί με την αντίστοιχη τιμή της εφαρμοζόμενης ροής αέρα (ταχύτητας αέρα) σε κάθε περίπτωση. Παράλληλα, παρουσιάζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της συχνότητας του σήματος εξόδου που μετρήθηκε για την ίδια εφαρμοζόμενη ροή.



Εικόνα 3-36 Σκαριφηματική αναπαράσταση των θέσεων για τα "bluff bodies".
Πηγή: (koubojiannis, 2016)

3.6.1 Συγκεντρωτικοί πίνακες τιμών

- Αναπτυσσόμενη διαφορά τάσης και συχνότητα (μέγιστη και ελάχιστη τιμή) για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια σε διαφορετικές θέσεις (P0, P4 και P6)

θέσεις bluff body	MAX				MIN			
	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ		ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΑΣΗΣ		ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ		ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΑΣΗΣ	
	v(m/s)	f(kHz)	v(m/s)	ΔV(mV)	v(m/s)	f(kHz)	v(m/s)	ΔV(mV)
0	20	0,20	18,00	48,40	4	0,67	4	22,80
4	20.7	0,29	16	54,8	6	0,819672	4	22,8
6	16	0,19	24,00	52,80	14	0,58	4	22,40

Πίνακας 3-2 Συγκεντρωτικός πίνακας που εμπεριέχει τις μέγιστες/ελάχιστες τιμές αναπτυσσόμενης διαφοράς τάσης και συχνότητας για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια με τις αντίστοιχες ταχύτητες αέρα που παρατηρήθηκαν

- Αναπτυσσόμενη διαφορά τάσης και συχνότητα (μέγιστη και ελάχιστη τιμή) για δύο σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια σε διαφορετικές θέσεις (P0 & P1 έως και P0 & P9)

Θέσεις bluff body	MAX				MIN			
	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ		ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΑΣΗΣ		ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ		ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΑΣΗΣ	
	v(m/s)	f(kHz)	v(m/s)	ΔV (mV)	v(m/s)	f(kHz)	v(m/s)	ΔV (mV)
0 ΚΑΙ 1	12	0,34	22,	47,20	4	0,83	4	17
0 ΚΑΙ 2	4	0,30	18	48	16	0,769231	4	12,2
0 ΚΑΙ 3	24	0,33	24	63,20	8	0,86	4	12
0 ΚΑΙ 4	8	0,26738	18	80,4	24	0,819672	4	19,2
0 ΚΑΙ 5	20.7	0,26	24	77,60	24	0,83	4	26,40
0 ΚΑΙ 6	16	0,25	18	77,2	22	1	4	20
0 ΚΑΙ 7	20.7	0,19	22	50,80	4	0,67	4	12
0 ΚΑΙ 8	14	0,341297	24	51,6	16	0,819672	4	10,8
0 ΚΑΙ 9	20.7	0,18	20.7	48,40	6	0,81	4	11,60

Πίνακας 3-3 Συγκεντρωτικός πίνακας που περιέχει τις μέγιστες/ελάχιστες τιμές αναπτυσσόμενης διαφοράς τάσης και συχνότητας για δύο σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια με τις αντίστοιχες ταχύτητες αέρα που παρατηρήθηκαν

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα των διαφορετικών μετρήσεων που έγιναν για όλο το εύρος των ταχυτήτων σε διαφορετικές θέσεις για τα σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (*bluff bodies*), παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη συχνότητα και η μέγιστη διαφορά τάσης δεν εμφανίζονται για την ίδια τιμή παροχής ή για την ίδια/ες θέση/εις των σωμάτων.

Από όλους τους συνδυασμούς θέσεων δύο σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια που δοκιμάστηκαν, οι μέγιστες τιμές αναπτυσσόμενης τάσης αφορούν στις P0 & P4, ενώ αντίστοιχα από τις μονές θέσεις αυτή που εμφανίζει την μεγαλύτερη διαφορά τάσης είναι η θέση P4. Επίσης, παρατηρείται ότι σε ορισμένους συνδυασμούς δύο σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια μετρούνται χαμηλότερες τιμές αναπτυσσόμενης διαφοράς τάσης συγκριτικά με ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι σε σχέση με την αντίστοιχη θεωρητική σύγκριση που πραγματοποιείται στη δημοσίευση αναφοράς (*koubogiannis*, 2016) μεταξύ ενός και δύο «*bluff bodies*», στα πειραματικά αποτελέσματα υπάρχει **συμφωνία σε σημαντικό βαθμό**. Συγκεκριμένα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη διαφορά πίεσης παρατηρείται σε συνδυασμό δύο θέσεων όπως και στα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Πιν. 3-5, 3-6). Η μέγιστη αναπτυσσόμενη διαφορά πίεσης που αναφέρεται στην εν λόγω δημοσίευση για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (περίπτωση A1) παρατηρήθηκε στη θέση

P0, συγκριτικά με τη θέση P4 σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στην περίπτωση συνδυασμού δύο θέσεων τριγωνικών σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (περίπτωση A2) υπάρχει ταύτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς η μέγιστη διαφορά πίεσης παρατηρήθηκε στις θέσεις P0&P4 όπως και στα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Πιν.3-7).

Case	A1	A2
ΔP [Pa]	165	240

Πίνακας 3-4 Αποτελέσματα διαφοράς πίεσης για ένα και δύο "bluff body" σύμφωνα με τη δημοσίευση. (πηγή: Kouboogiannis, 2016)

Τοπολογία	A1 (θέση P4)	A2
ΔV (mV)	54.8	80.4

Πίνακας 3-5 Διαφορά τάσης για ένα και δύο "bluff body" σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα.

ΘΕΣΗ/ ΘΕΣΕΙΣ	P0	P0 & P1	P0 & P2	P0 & P3	P0 & P4	P0 & P5	P0 & P6
MAX ΔV (mV)	48.4	47.2	48	63.2	80.4	77.8	77.2

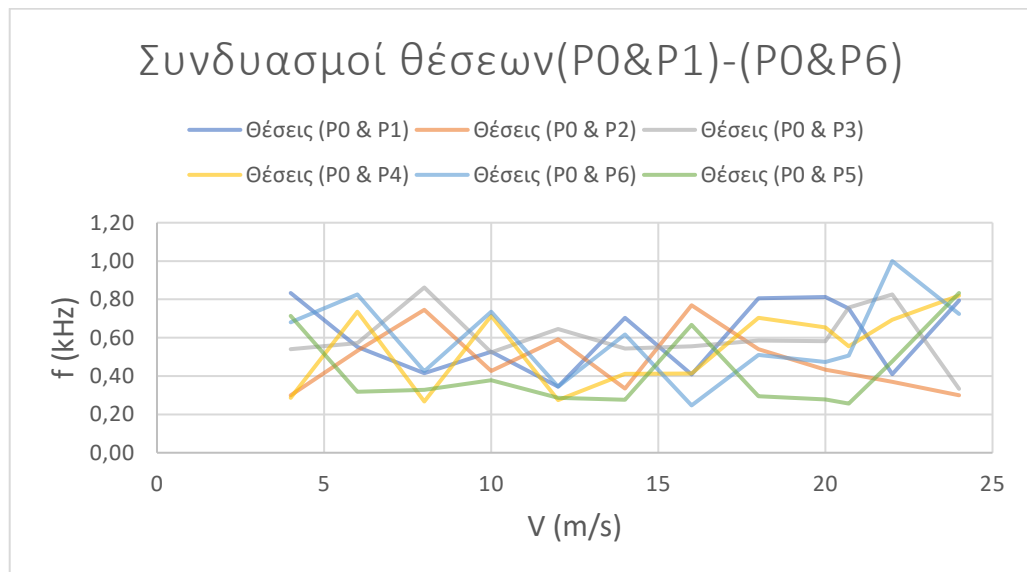
Πίνακας 3-6 Διαφορά τάσης για διαφορετικές θέσεις σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Για καλύτερη απεικόνιση των άνω αποτελεσμάτων, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πειραματικά αποτελέσματα.

3.6.2 Διαγράμματα συχνότητας σήματος εξόδου σε σχέση με την εκάστοτε ταχύτητα ροής

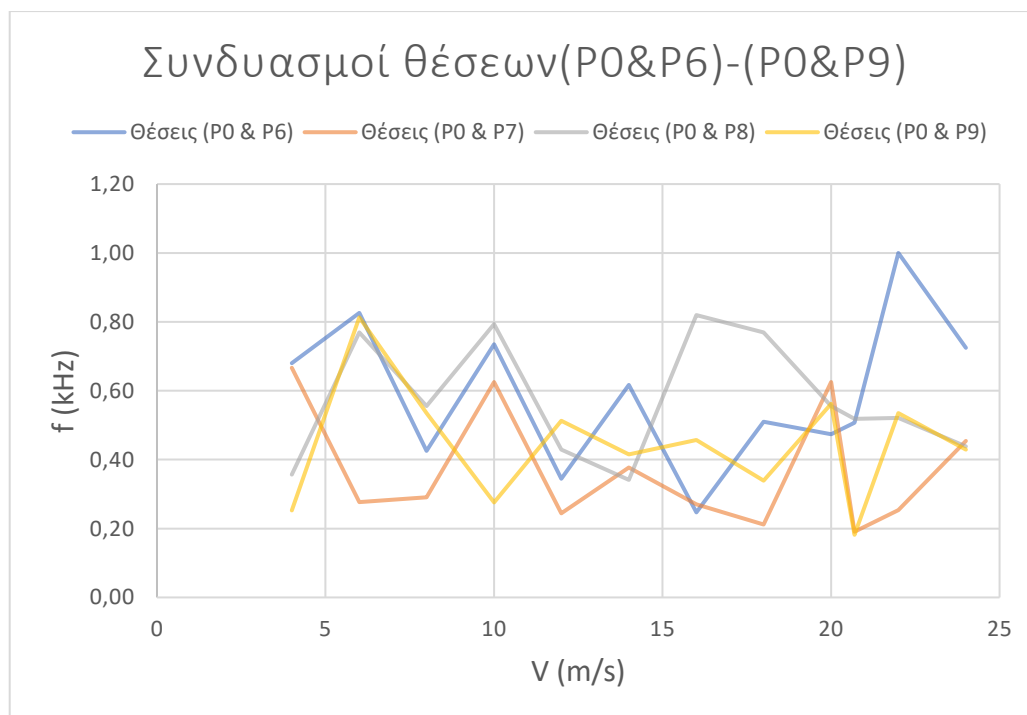
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα συχνότητας του αναπτυσσόμενου σήματος από την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη για κάθε ταχύτητα ροής. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις αφορούν τόσο σε μονή θέση όσο και συνδυασμό δύο θέσεων σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (βλ. εικόνα 3-36).

- Διάγραμμα συχνότητας για τον συνδυασμό σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (P0&P1) μέχρι (P0&P6)



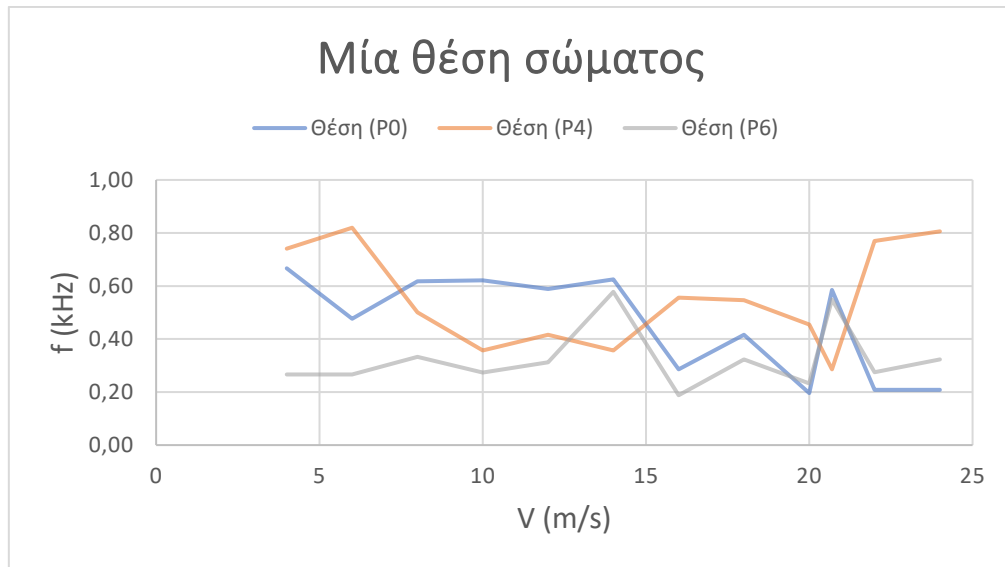
Εικόνα 3-37 Διάγραμμα συχνότητας-ταχύτητας αέρα για συνδυασμό θέσεων P0&P1 έως και P0&P6.

- Διάγραμμα συχνότητας για τον συνδυασμό σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (P0&P6) μέχρι (P0&P9)



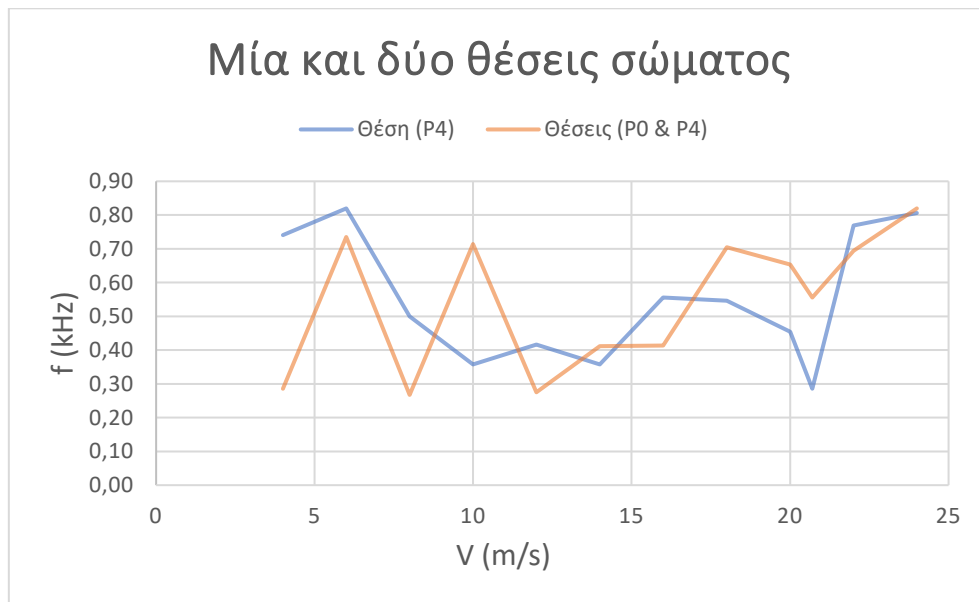
Εικόνα 3-38 Διάγραμμα συχνότητας- ταχύτητας αέρα για συνδυασμό θέσεων P0&P6 έως και P0&P9.

- Διάγραμμα συχνότητας για μία θέση σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (P0, P4 και P6)



Εικόνα 3-39 Διάγραμμα συχνότητας-ταχύτητας για μία θέση σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (P0, P4 και P6).

- Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενός σώματος (P4) και δύο σωμάτων (P4 και P6)

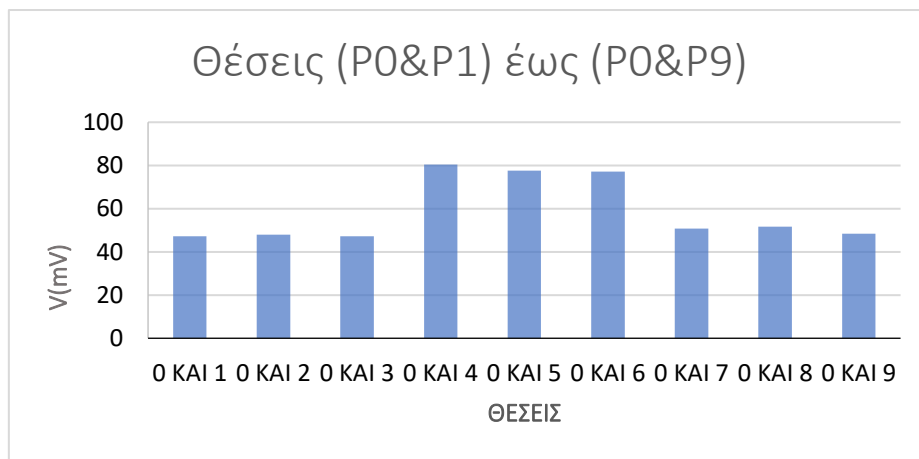


Εικόνα 3-40 Συγκεντρωτικό διάγραμμα για μία θέση (P4) και για συνδυασμό δύο θέσεων (P0 & P4).

3.6.3 Διαγράμματα μέγιστης και ελάχιστης αναπτυσσόμενης τάσης ως προς τις θέσεις σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια

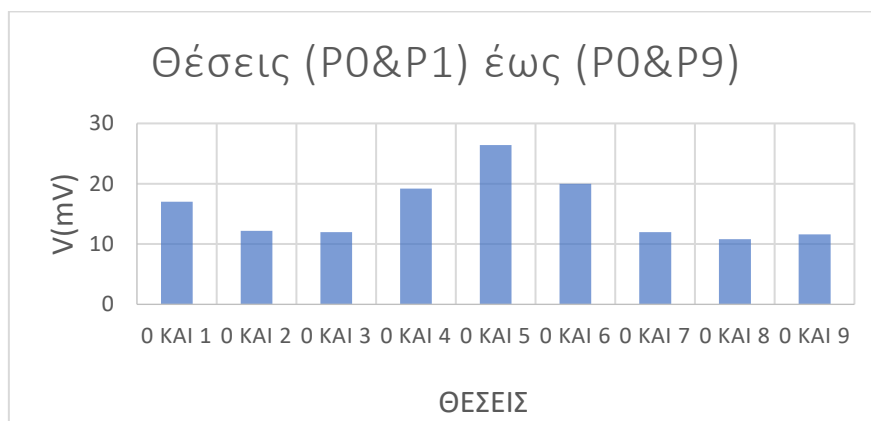
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα αναπτυσσόμενης τάσης στην πιεζοηλεκτρική μεμβράνη για κάθε ταχύτητα ροής. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις αφορούν τόσο σε ένα σώμα όσο και συνδυασμό δύο σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (βλ. πίνακα (3-36)).

- **Διάγραμμα μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης για συνδυασμό δύο σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (P0&P1) μέχρι (P0&P9)**



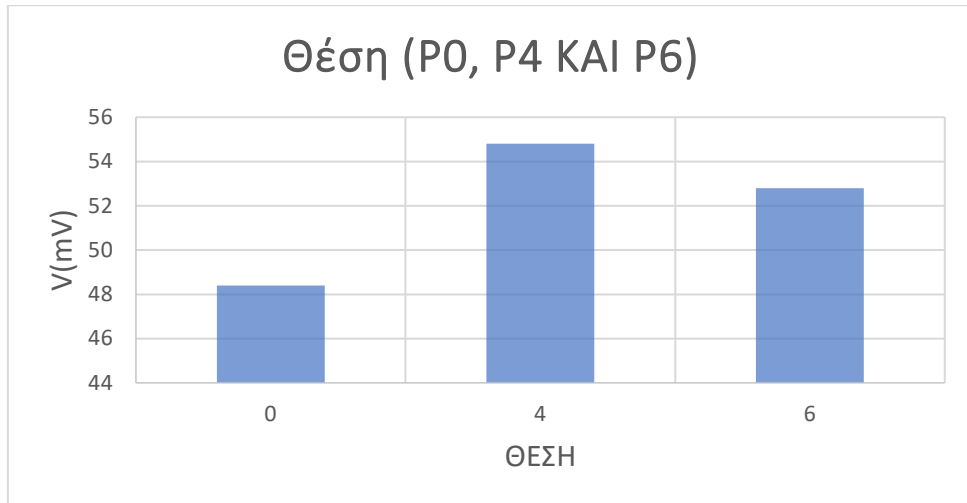
Εικόνα 3-41 Διάγραμμα μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης για κάθε συνδυασμό δύο θέσεων σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.

- **Διάγραμμα ελάχιστης αναπτυσσόμενης τάσης για συνδυασμό δύο σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (P0&P1) μέχρι (P0&P9)**



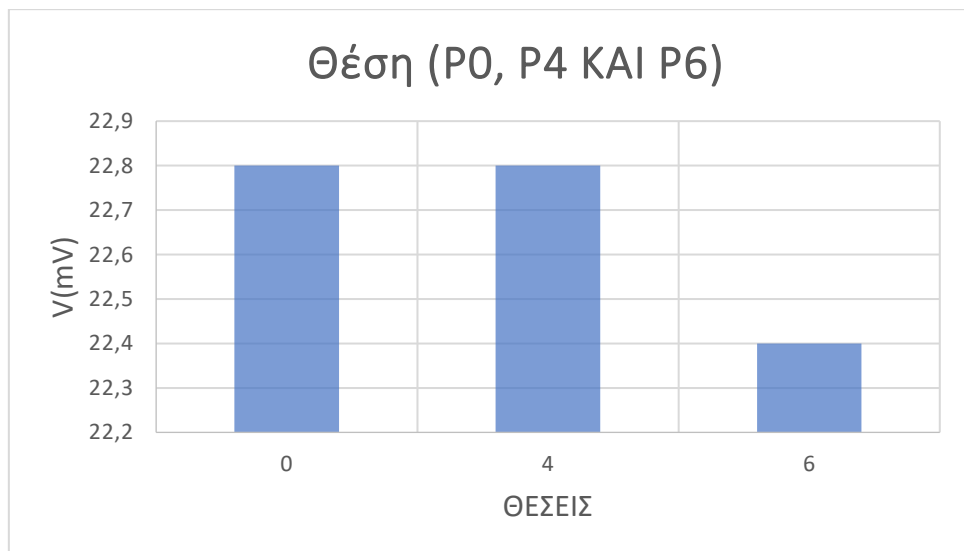
Εικόνα 3-42 Διάγραμμα ελάχιστης αναπτυσσόμενης τάσης για κάθε συνδυασμό δύο σώματων-εμποδίων.

- **Διάγραμμα μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια σε διαφορετικές θέσεις (P0, P4 και P6)**



Εικόνα 3-43 Διάγραμμα μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.

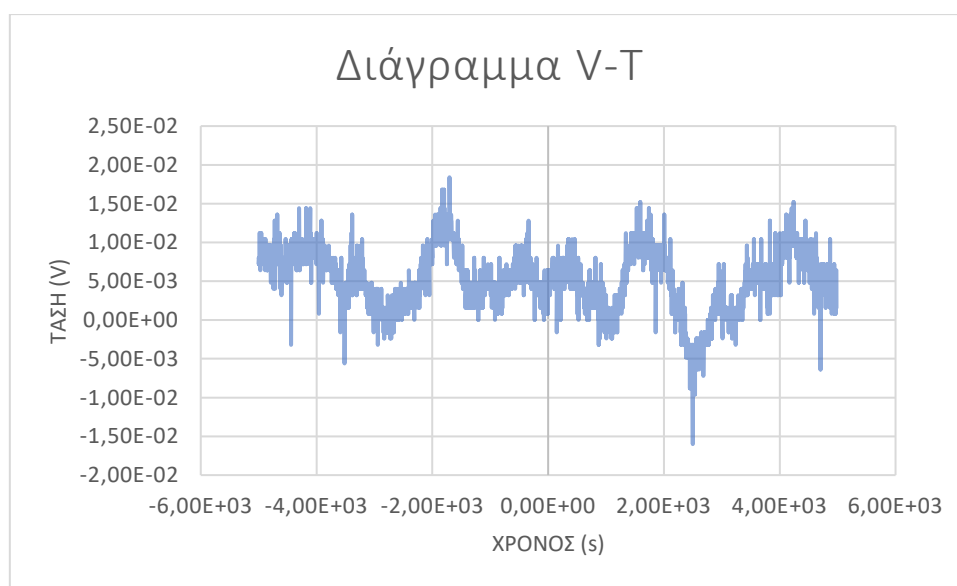
- **Διάγραμμα ελάχιστης αναπτυσσόμενης τάσης για μία θέση σώματος εμποδίου σε διαφορετικές (P0, P4 και P6)**



Εικόνα 3-44 Διάγραμμα ελάχιστης αναπτυσσόμενης τάσης για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ότι γενικότερα στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν υπάρχει σημαντικός θόρυβος, ο οποίος ιδανικά θα πρέπει να

απομονωθεί σε δεύτερο στάδιο. Ο θόρυβος αυτός είναι υψίσυχνος και πιθανότατα προέρχεται από εξωγενείς παράγοντες, όπως ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (ΗΜ) π.χ. από τη λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα, ο οποίος βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με τη μετρητική διάταξη. Ενδεικτικά, στα σχήματα 3-45 και 3-46 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές κυματομορφές του σήματος εξόδου, όπου είναι φανερή η παρουσία του θορύβου. Όπως φαίνεται και στα συγκεκριμένα διαγράμματα σε μικρές ταχύτητες ροής ο θόρυβος είναι πιο εμφανής (βλ. σχήμα 3-45), ενώ σε μεγαλύτερες δεν επηρεάζει σημαντικά τη μέτρηση (βλ. σχήμα 3-46). Αυτό πιθανότατα οφείλεται στη μικρή διαφορά πίεσης ΔP που αναπτύσσεται σε μικρότερες ροές καθώς η πιεζοηλεκτρική μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας έχει σημαντικό πάχος, δυσκολεύοντάς την έτσι να καμφθεί για μικρή διαφορά πίεσης. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες ταχύτητες ροής (μεγαλύτερη διαφορά πίεσης ΔP) ο θόρυβος φαίνεται να καλύπτεται από το αναπτυχθέν σήμα.



Εικόνα 3-45 Ενδεικτική κυματομορφή του σήματος εξόδου για τον συνδυασμό θέσεων (P0&P4) και ταχύτητα 4m/s.



Εικόνα 3-46 Ενδεικτική κυματομορφή του σήματος εξόδου για τον συνδυασμό θέσεων (P0&P4) και ταχύτητα 24m/s.

4 Τρισδιάστατη εκτυπωμένη μεμβράνη με ενσωματωμένη πιεζο-αντίσταση για την ανίχνευση παραμόρφωσης

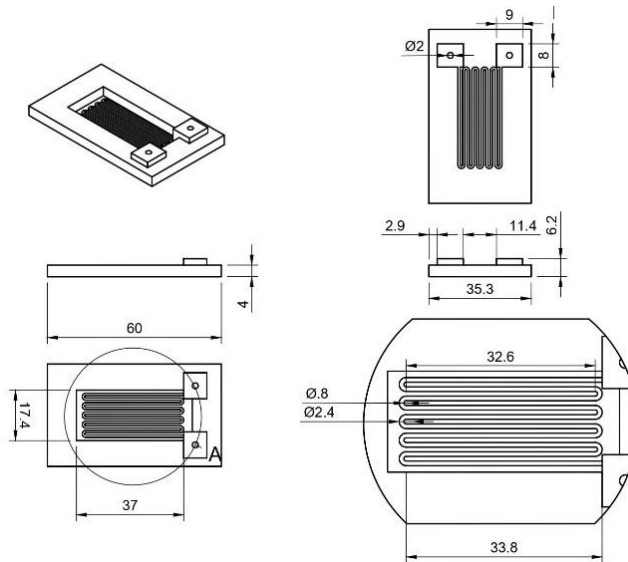
Η δημιουργία της τρισδιάστατης εκτυπωμένης μετρητικής διάταξης με χρήση πιεζοηλεκτρικού φαινομένου (βλ. χρήση πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης εμπορικά διαθέσιμη) μας έδωσε το έναυσμα να κατασκευάσουμε μία εκτυπωμένη μεμβράνη για την ανίχνευση παραμόρφωσης / αναπτυσσόμενης πίεσης μέσω πιεζοαντίστασης, η οποία είναι ενσωματωμένη σε αυτή. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε μία πλήρως εκτυπωμένη δομή η οποία θα μπορεί να ανιχνεύει την παροχή αέρα μέσα σε έναν αγωγό με βάση τη δομή που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Πέρα από την καινοτομία ως προς το θέμα της κατασκευής της, η εν λόγω τελική αισθητήρια δομή «ανοίγει τον δρόμο» για πλήθος εφαρμογών (βλ. πλήρως 3D εκτυπωμένους αισθητήρες).

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να εξηγήσει τα βασικά επιμέρους βήματα που ακολουθήσαμε για την περάτωση της εκτυπωμένης μεμβράνης. Πιο συγκεκριμένα, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται λόγος για τη βασική γεωμετρία/κατασκευή της μεμβράνης για την ανίχνευση της αναπτυσσόμενης πίεσης μέσω πιεζοαντίστασης, ενώ στην συνέχεια αναφέρεται το λογισμικό καθώς και τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήσαμε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Επίσης, γίνεται λόγος για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι προβληματισμοί που προέκυψαν. Να σημειωθεί ότι η μελέτη και η κατασκευή της μεμβράνης βασίστηκε σε εμπορικά διαθέσιμα υλικά για χρήση σε τρισδιάστατη εκτύπωση. Επιπροσθέτως, αναφέρεται η διαδικασία της κατασκευής της μεμβράνης και η απαραίτητη προετοιμασία για τις μετρήσεις. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τόσο για τις στατικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν όσο και για τις δυναμικές.

4.1 Καθορισμός γεωμετρίας της μεμβράνης με ενσωματωμένη πιεζοαντίσταση

Παρακάτω παρουσιάζεται το σχέδιο που αναπαριστά σε δισδιάστατη μορφή τις διαστάσεις της μεμβράνης. Γενικότερα, η μεμβράνη αποτελείται από τρία τμήματα: Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει μία λεπτή βάση από μη αγωγίμο υλικό, το δεύτερο τμήμα

περιλαμβάνει την απαραίτητη πιεζοαντίσταση (σε σχήμα μαιάνδρου), η οποία θα πρέπει να εκτυπωθεί κατευθείαν πάνω στο λεπτό στρώμα της βάσης. Τέλος, το τελευταίο τμήμα είναι οι απαραίτητες ηλεκτρικές επαφές (από αγώγιμο υλικό) για τη διασύνδεση της πιεζοαντίστασης με τα μετρητικά όργανα.



Εικόνα 4-1 Σχέδιο δύο διαστάσεων της τρισδιάστατης εκτυπωμένης μεμβράνης.
Αρχαιακό υλικό

Θα πρέπει να επισημάνουμε στο σημείο αυτό ότι η αρχή λειτουργίας πλέον της μετρητικής διάταξης βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης της πιεζοαντίστασης ανάλογα με την εφαρμογή (της αναπτυσσόμενης) πίεσης που ασκείται σε αυτήν. Πιο συγκεκριμένα, η αντίσταση γενικότερα, εξαρτάται από το μήκος και τη διατομή της αντίστασης, καθώς και από την ειδική αντίσταση του υλικού της όπως φαίνεται πιο αναλυτικά στον παρακάτω τύπο:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4-a)$$

όπου:

- A είναι η διατομή της αντίστασης
- L είναι το μήκος της αντίστασης
- ρ είναι η ειδική αγωγιμότητα του υλικού

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι διαστάσεις της πιεζοαντίστασης (που προφανώς εξαρτώνται από τη γεωμετρία της μεμβράνης) έχουν καταλυτικό ρόλο για την αρχική τιμή της μετρούμενης αντίστασης. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η μεταβολή της αντίστασης λόγω παραμόρφωσης αναμένεται να είναι περιορισμένη, ενώ η ευαισθησία

της διάταξης, για την ανίχνευση όποιας παραμόρφωσης, εξαρτάται από το αρχικό μήκος της. Για τον λόγο αυτό, σε όλες τις αντίστοιχες μετρητικές διατάξεις -μη κατασκευασμένων με τρισδιάστατη εκτύπωση- επιλέγεται η εν λόγω γεωμετρία «μυιάνδρου» για αύξηση του μήκους, στο μέγιστο δυνατό βαθμό για τη διαθέσιμη επιφάνεια.

4.1.1 Επιλογή τρισδιάστατων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την δομή.

-Πολυγαλακτικό Οξύ ή Πολυλακτίδιο-(PLA)

Το υλικό «PLA» είναι από τα πιο δημοφιλή και πολυχρησιμοποιούμενα υλικά που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη εκτύπωση καθώς δεν χρειάζεται πολύπλοκες απαιτήσεις και ρυθμίσεις για να εκτυπωθεί. Επίσης, δεν δημιουργεί προβλήματα αποκόλλησης από στο φορέα (*bed*) του εκτυπωτή ή παραμόρφωσης του μοντέλου όπως συμβαίνει με άλλα υλικά. Συγκριτικά με υλικά όπως «ABS» και «ASA» έχει πολύ μειωμένη αντοχή στη θερμότητα και στα χημικά και φθείρεται εύκολα όταν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με έκθεση στο εξωτερικό περιβάλλον.



Εικόνα 4-2 Υλικό εκτύπωσης "PLA".
Αρχειακό υλικό

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το υλικό «*Ultrafuse PLA*» της εταιρείας «*BASF*» διαμέτρου 2.85 mm, για την εκτύπωση του φορέα. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης του υλικού τα οποία δίνει ο κατασκευαστής.

Nozzle Temperature	210-230 °C
--------------------	------------

Bed Temperature	50-70 °C
Print Speed	40-80 mm/sec

Πίνακας 4-1 Πίνακας με τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης για το υλικό «*Ultrafuse PLA*» της εταιρείας «*BASF*» σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

-Ακρυλικό Στυρένιο Ακρυλονιτριλίου-(ASA)

Το «ASA» έχει παρόμοιες ιδιότητες με το «ABS» χωρίς όμως να έχει πολλά από τα μειονεκτήματά του. Πιο συγκεκριμένα, έχει υψηλή αντοχή στην κρούση, είναι σκληρό, έχει αρκετά καλή αντοχή σε χημικά και σε υψηλή θερμοκρασία (περίπου έως 110 °C) ενώ δεν επηρεάζεται από την υπεριώδη ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό είναι κατάλληλο για χρήση σε με έκθεση στο εξωτερικό περιβάλλον. Από την άλλη μεριά όμως παρουσιάζει δυσκολία στην εκτύπωση καθώς μπορεί να «σπάσει» το μοντέλο κατά την διάρκεια της εκτύπωσης. Ως λύση, θα πρέπει η εκτύπωση να γίνεται σε καλά ελεγχόμενο περιβάλλον χωρίς διακύμανση στη θερμοκρασία έτσι ώστε να μην αποκολληθεί ή να συρρικνωθεί το μοντέλο. Μετά το πέρας της εκτύπωσης, το μοντέλο θα πρέπει να κρυώσει σταδιακά για να μην δημιουργηθούν ρωγμές.



Εικόνα 4-3 Υλικό εκτύπωσης «ASA».
Αρχειακό υλικό

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το υλικό «*Ultrafuse ASA*» της εταιρείας «*BASF*» διαμέτρου 2.85 mm, για την εκτύπωση της βάσης της μεβράνης. Παρακάτω, παρατίθεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης του υλικού τα οποία δίνει ο κατασκευαστής.

Nozzle Temperature	260-280 °C
Bed Temperature	100-120 °C

Bed Adhesion	Spray, PC adhesive
Print Speed	30-60 mm/sec

Πίνακας 4-2 Πίνακας με τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης για το υλικό «Ultrafuse ASA» της εταιρείας «BASF» σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

-Αγώγιμη Θερμοπλαστική Πολυουρεθάνη-(NYLON-CONDUCTIVE)

Τα αγώγιμα νήματα για τους τρισδιάστατους εκτυπωτές χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές όπως είναι για παράδειγμα σε εκτυπωμένες ολοκληρωμένες πλακέτες («PCB») και άλλες εφαρμογές που αξιοποιούν την αγωγιμότητα που παρέχεται, της τάξεως κάποιων kOhm συνήθως, για την ηλεκτρική διασύνδεση ηλεκτρικών στοιχείων. Τα νήματα αυτά έχουν ως βασικό υλικό συνήθως ένα από τα κλασικά υλικά εκτύπωσης (όπως είναι το «PLA», το «NYLON» και άλλα υλικά), ενώ περιέχουν για να αποκτήσουν αγωγιμότητα, γραφίτοποιημένο άνθρακα (διάταξη των ατόμων άνθρακα στη μικροσκοπική μορφή του γραφίτη) καθώς και υλικό άλλων προσμίξεων.



Εικόνα 4-4 Υλικό εκτύπωσης "Nylon-Conductive".
Αρχαιακό υλικό

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το υλικό «Nylforce CNT Conductive» της εταιρείας «FIBERFORCE», διαμέτρου 2.85 mm, για την εκτύπωση της πιεζοαντίστασης καθώς και των απαραίτητων ηλεκτρικών επαφών. Παρακάτω

παρατίθεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης του υλικού τα οποία δίνει ο κατασκευαστής.

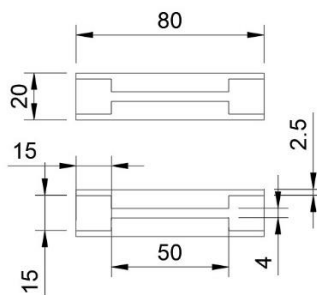
Nozzle Temperature	215 °C
Bed Temperature	30-50 °C (not necessary)
Roundness deviation	Max 3%
Print Speed	40-85 mm/sec
Surface Electric Resistivity	1E1 ohm

Πίνακας 4-3 Πίνακας με τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης για το υλικό «Nylforce CNT Conductive» της εταιρείας «FIBERFORCE» σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

4.2 Υλοποίηση του φυσικού μέρους

Πριν ξεκινήσει η κατασκευή της μεμβράνης με τη γεωμετρία που παρουσιάζεται στην ενότητα (4.4.2), αρχικά πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση και η κατασκευή κατάλληλων δοκιμίων. Τα δοκίμια αυτά βοήθησαν στο να μελετηθεί/εκτιμηθεί έστω και σε μία πρώτη-μη πλήρη προσέγγιση, πως συμπεριφέρεται το υλικό ως προς την ωμική του αντίσταση, όταν ασκηθεί σε αυτό μία εξωτερική δύναμη θλίψης ή εφελκυσμού, αλλά και σε τι ποσοστό επιστρέφει στην αρχική τιμή της όταν επανέλθει στην αρχική του γεωμετρία. Θα πρέπει να σημειώσουμε εδώ, ότι η αρχική ιδέα για τη χρήση αγωγίμου 3D νήματος για την κατασκευή πιεζοαντίστασης πηγάζει από το γεγονός ότι η αγωγιμότητα του νήματος προέρχεται από την παρουσία των νανοσωματιδίων άνθρακα και προφανώς εξαρτάται από την κατανομή τους μέσα στη «μήτρα» του μη αγωγίμου πολυμερούς. Συνεπώς, οποιαδήποτε παραμόρφωση της εκτυπωμένης δομής επηρεάζει την αρχική κατανομή τους και θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της αρχικής αντίστασης – κάτι που επαληθεύτηκε από τα προκύπτοντα αποτελέσματα.

Η εκτύπωση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με χρήση του ίδιου εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία της δομής όπως φαίνεται στην ενότητα (βλ. ενότητα 3.4, εικόνα 3-15). Μέσω του εν λόγω εκτυπωτή είναι δυνατή η ταυτόχρονη έγχυση δύο υλικών καθώς διαθέτει δύο κεφαλές, χωρίς να σταματάει η διαδικασία της εκτύπωσης και χωρίς να αλλοιώνεται η ποιότητα του μοντέλου. Το υλικό «PLA» χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως «βάση» πάνω στην οποία εκτυπώθηκε η δομή κατάλληλης γεωμετρίας από αγωγίμο υλικό «Nylforce CNT Conductive». Παρακάτω παρουσιάζονται δύο από τις γεωμετρίες δοκιμίων που εκτυπώθηκαν.



Εικόνα 4-5 Δισδιάστατο σχέδιο δοκιμίου.
Αρχειακό υλικό

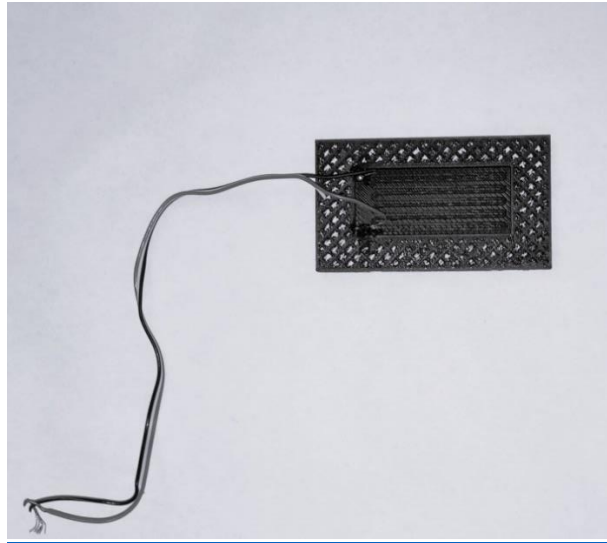


*Εικόνα 4-6 Εκτυπωμένα δοκίμια.
Αρχαιακό υλικό*

Μετά το πέρας της εκτύπωσης, μετρήθηκε η αρχική αντίσταση του κάθε δοκιμίου, με σκοπό να παρατηρηθεί πώς αυτή θα μεταβληθεί μετέπειτα. Στο δοκίμιο ασκήθηκε μία μικρή πίεση έτσι ώστε να εξακριβωθεί αν αλλάζει η εσωτερική αντίσταση του δοκιμίου από την εφαρμογή της δύναμης. Ως αποτέλεσμα, παρατηρήθηκε ότι η εσωτερική αντίσταση του δοκιμίου μεταβαλλόταν σημαντικά. Για λόγους σύγκρισης κρατήθηκε η συγκεκριμένη γεωμετρία δοκιμίου για τα υπόλοιπα δείγματα, με σκοπό να γίνουν πειραματικές μετρήσεις και να προκύψουν ασφαλή αποτελέσματα και συμπεράσματα. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του αγωγίμου υλικού για την επίτευξη της βέλτιστης-χαμηλότερης ωμικής αντίστασης στο εκτυπωμένο υλικό θα πρέπει να γίνει ανόπτηση. Μέσω της διαδικασίας της ανόπτησης η οποία αποτελεί μία θερμική επεξεργασία, μεταβάλλονται οι φυσικές, ή ακόμα και οι χημικές ιδιότητες του υλικού οδηγώντας έτσι το υλικό σε αλλαγή της σκληρότητας και της ολκιμότητας του. Σκοπός της ανόπτησης είναι να δημιουργήσει μία ομοιόμορφη και σταθερή δομή στα μόρια του υλικού. Κατά τη διαδικασία αυτή το υλικό θερμαίνεται ακριβώς πάνω από το ανώτερο κρίσιμο σημείο ανακρυστάλλωσής του, για κατάλληλο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια αφήνεται να κρυώσει σταδιακά μέχρις ότου φτάσει στην θερμοκρασία δωματίου.

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της ανόπτησης στα δοκίμια και διαπιστώθηκε ότι βγαίνουν ασφαλή αποτελέσματα, ακολούθησε η εκτύπωση της μεμβράνης πάνω στην οποία είναι ολοκληρωμένη η πιεζοαντίσταση σε σχήμα μαιάνδρου και οι ηλεκτρικές

επαφές όπως παρουσιάστηκε (βλ. ενότητα 4.1). Η βάση της μεμβράνης κατασκευάστηκε με χρήση «PLA» για δομικό υλικό.



Εικόνα 4-7 Εκτυπωμένη μεμβράνη με υλικά «PLA» για τη βάση και «NYLON CONDUCTIVE» για τα αγωγίμα μέρη
– Διακρίνεται η απαραίτητη διασύνδεση με χρήση των ωμικών επαφών.
Αρχαιακό υλικό

Στην παραπάνω εικόνα διακρίνεται η τρισδιάστατη εκτυπωμένη μεμβράνη η οποία έχει ως υλικό βάσης το «PLA» και αγωγίμα μέρη από το υλικό «Nylon Conductive». Στην εικόνα διακρίνονται στη μεμβράνη περιμετρικά κάποιες οπές -αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πυκνότητα υλικού εκτύπωσης (infill ratio) στις εν λόγω περιοχές επιλέχθηκε να είναι πολύ χαμηλή. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει τα παρακάτω αποτελέσματα:

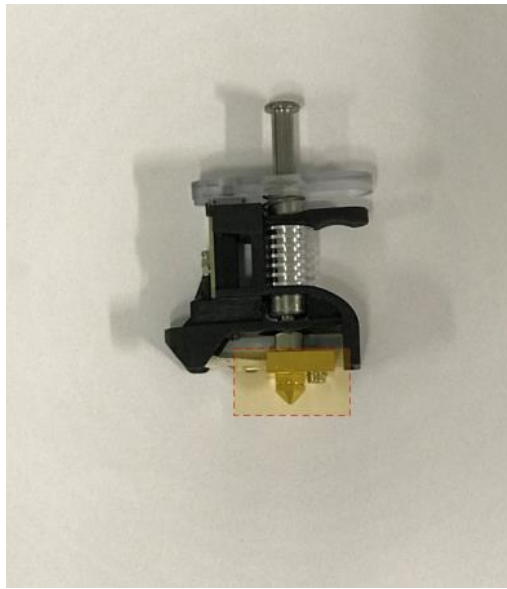
- Μειώνει τον χρόνο εκτύπωσης του μοντέλου
- Μειώνει το βάρος του
- Δεν επηρεάζει την μεμβράνη καθώς η βάση και η πιεζοαντίσταση είναι κατασκευασμένες με τη μέγιστη πυκνότητα υλικού εκτύπωσης

Στην μεμβράνη έγινε ανόπτηση με σκοπό να μειωθεί η εσωτερική αντίσταση του υλικού με τον ίδιο τρόπο όπως έγινε και με τα δοκίμια.

Ένα πρόβλημα που παρατηρήθηκε με τη χρήση του υλικού «PLA» ως βάση ήταν ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αντέχει χωρίς να αλλοιωθεί η δομή του είναι μέχρι 50 βαθμούς κελσίου. Το γεγονός αυτό περιορίζει τη δράση της ανόπτησης στο αγωγίμο υλικό όμως καθώς σύμφωνα με τον κατασκευαστή πρέπει να χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία μέχρι και 100 βαθμούς κελσίου για βέλτιστο αποτέλεσμα.

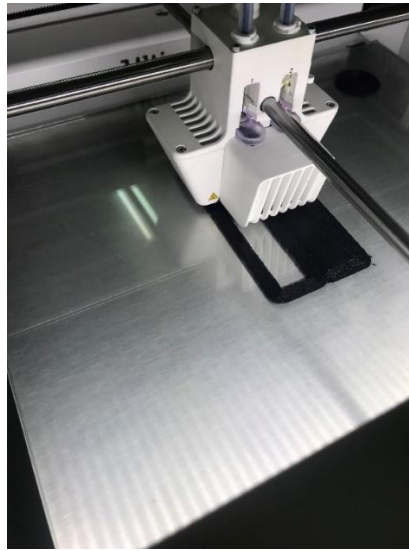
Ένα άλλο πρόβλημα που προέκυψε -και το οποίο δεν είχε προβλεφθεί- ήταν η σταδιακή αλλοίωση του εκτυπωμένου υλικού. Συγκεκριμένα, όταν η κεφαλή ξεκίνησε να τυπώνει το αγωγίμο υλικό, στις πρώτες στρώσεις και για χαμηλό ύψος το υλικό τυπωνόταν καλά χωρίς να γίνεται ψαθυρό. Όταν όμως αυξανόταν το ύψος της δομής για την δημιουργία των επαφών (*pads*) το υλικό γινόταν ψαθυρό και έσπαγε. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τυπώθηκαν αρκετές μεμβράνες με σκοπό να επιλυθούν τα άνω προβλήματα βελτιώνοντας την αρχική γεωμετρία, αλλά και τις ρυθμίσεις εκτύπωσης. Αρχικά ο σχεδιασμός βελτιώθηκε, αυξάνοντας τις επιφάνειες των ηλεκτρικών επαφών «*pads*», με σκοπό η κεφαλή να καλύπτει μεγαλύτερη επιφάνεια και να μην χαλάει τις επαφές. Η τελική γεωμετρία της δομής και το εκτυπωμένο μοντέλο φαίνονται παρακάτω (βλ. εικόνα 4-10). Στην εικόνα διακρίνεται η αντίσταση σε σχήμα μαιάνδρου καθώς και οι επαφές στην τελική της μορφή σύμφωνα και με τα σχέδια (βλ. ενότητα 4-1, εικόνα 4-1).

Επίσης, πραγματοποιήθηκε αντικατάστασή της κεφαλής εκτύπωσης με άλλη που διαθέτει ακροφύσιο με μεγαλύτερη διάμετρο και κωνικό σχήμα(βλ. εικόνα 4-8). Το κωνικό σχήμα της κεφαλής βοηθάει στην καλύτερη εξώθηση και εναπόθεση του υλικού κατά την διάρκεια της εκτύπωσης.

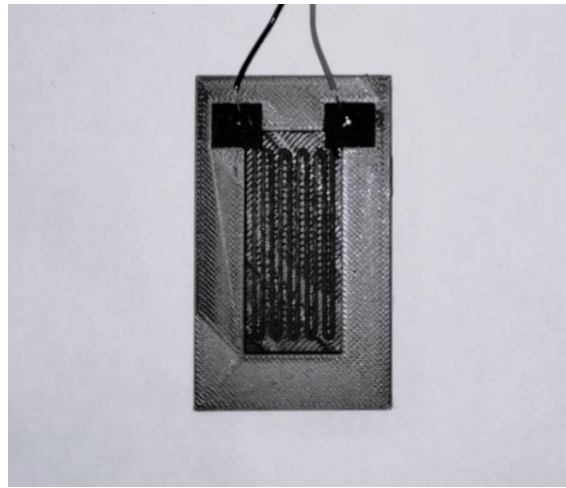


Εικόνα 4-8 Φωτογραφική αναπαράστασης κεφαλής εκτυπωτή.
Αρχαιακό υλικό

Μόλις ολοκληρώθηκαν οι αρχικές δοκιμαστικές μετρήσεις με υλικό βάσης το «ASA» (βλ. υποενότητα 4.1.1) το οποίο σαν υλικό έχει μεγαλύτερη αντοχή στη θερμοκρασία ενώ παρουσιάζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν και πάλι κατάλληλα δοκίμια με σκοπό να διεξαχθούν μετρήσεις και να γίνει σύγκριση μεταξύ των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται ένα στιγμιότυπο από την εκτύπωση των δοκιμίων με υλικό «ASA».



*Εικόνα 4-9 Στιγμιότυπο κατά την διάρκεια όμως εκτύπωσης των δοκιμίων.
Αρχειακό υλικό*



*Εικόνα 4-10 Εκτυπωμένη μεμβράνη με υλικό «ASA-NYLON CONDUCTIVE».
Αρχειακό υλικό*

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της εκτυπωμένης δομής είναι ότι στο αγώγιμο υλικό μπορούν να κολληθούν απευθείας καλώδια διασύνδεσης χωρίς να επηρεαστεί η αντίσταση του υλικού και χωρίς να ξεκολλάει -κάτι το οποίο παρατηρήθηκε και στις

δύο μεμβράνες που κατασκευάστηκαν (με χρήση *PLA* ή *ASA* ως βάση). Επίσης, για το συγκεκριμένο πάχος της βάσης, παρόλο που το «*ASA*» έχει μέτρο ελαστικότητας Young μικρότερο από το «*PLA*», αυτό δεν φαίνεται να προκαλεί κάποιο σημαντικό πρόβλημα στην επίτευξη της επιθυμητής παραμόρφωσης από την ανάπτυξη πίεσης, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για τις δύο κατηγορίες δοκιμίων (χρήση *PLA* ή *ASA*) ενώ πραγματοποιείται η σύγκριση μεταξύ των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

4.3 Αποτελέσματα με χρήση τρισδιάστατης μεμβράνης πιεζοαντίστασης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν στα δοκίμια και στις τελικές εκτυπωμένες μεμβράνες με βάση από «*PLA*» και «*ASA*» σε συνδυασμό με το αγώγιμο υλικό «*Nylon Conductive*». Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η επίδραση της ανόπτησης στην τελική τιμή της ωμικής αντίστασης της πιεζοαντίστασης και ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός, στατικός αλλά και δυναμικός (παρουσία ροής αέρα) που πραγματοποιήθηκε για την τελική μετρητική διάταξη.

4.3.1 Ανόπτηση του υλικού

Στο στάδιο αυτό έγινε μέτρηση της αρχικής αντίστασης του δοκιμίου σε θερμοκρασία δωματίου ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σταδιακή θέρμανση των δομών. Συγκεκριμένα, επαναλήφθηκαν σε κάθε διάταξη κατάλληλοι κύκλοι θέρμανσης - διάρκειας μίας ώρας, ξεκινώντας από μία χαμηλή θερμοκρασία μέχρι τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή. Στο τέλος κάθε κύκλου θέρμανσης πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της ωμικής αντίστασης της πιεζοαντίστασης για επαρκές χρονικό διάστημα έως ότου σταθεροποιηθεί η τιμή της.

Ως αποτέλεσμα όπως παρατηρείται και στους πίνακες (4-4 και 4-5) η τελική αντίσταση για το δοκίμιο με συνδυασμό υλικών «*PLA*» και «*Nylon Conductive*» είναι 15,8 kΩ ενώ η αντίστοιχη για το δοκίμιο με συνδυασμό υλικών «*ASA*» και «*Nylon Conductive*» είναι σχεδόν η μίση, 8.59 kΩ αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το «*ASA*» έχει ως μέγιστη θερμοκρασία θέρμανσης τους 100° C σε σύγκριση με το υλικό «*PLA*»

το οποίο έχει 60 °C αντίστοιχα, επομένως η χρήση του ASA ως βάση της δομής επιτρέπει την ανόπτηση του αγωγίμου υλικού σε σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία, βελτιώνοντας την αγωγιμότητά του.

Δοκίμιο (NYLON-PLA)		
resistor (ΚΩ)	time (hr)	temperature (°C)
17,7	0	25
16,93	1	40
16,87	1	50
15,97	1	60
15,8	2	60

Πίνακας 4-4 Αποτελέσματα ανόπτησης για δοκίμιο (Nylon Conductive -PLA)

Δοκίμιο (NYLON-ASA)		
resistor (ΚΩ)	time (hr)	temperature (°C)
9,18	0	25
8,96	1	70
8,8	1	80
8,72	1	90
8,59	1	100

Πίνακας 4-5 Αποτελέσματα ανόπτησης για δοκίμιο (Nylon Conductive -ASA)

Μεμβράνη (NYLON-ASA)		
resistor (ΚΩ)	time (hr)	temperature (°C)
68,1	0	25
66,5	2	100
62,1	2	100
60,2	2	100
59,3	2	100
57,2	2	100
54,6	2	100
54,1	2	100
52,2	2	100
52,8	2	100
50,4	2	100
49,44	2	100
49,2	2	100

Πίνακας 4-6 Αποτελέσματα ανόπτησης για την τελική μεμβράνη (Nylon Conductive -ASA)

Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία αυξήθηκε πέρα από τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία που αναφέρει ο κατασκευαστής έστω και σε μικρό

ποσοστό, αυτό που παρατηρήθηκε στην αγωγήμη δομή ήταν ότι η αντίσταση της αυξομειώνονταν χωρίς να εφαρμόζεται κάποια εξωτερική δύναμη, προφανώς λόγω μερικής καταστροφής της εσωτερικής δομής του υλικού. Επίσης, στον Πίνακα (4-6) παρουσιάζεται η αντίσταση της τελικής δομής της πιεζοαντίστασης σε σχήμα «μυιάνδρου» κατά τη διαδικασία της ανόπτησης. Παρατηρούμε ότι αντίστοιχα με τα δοκίμια, εμφανίζει μια σημαντική πτώση από την αρχική της τιμή όπως είναι λογικό.

4.3.2 Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός - Στατικές μετρήσεις

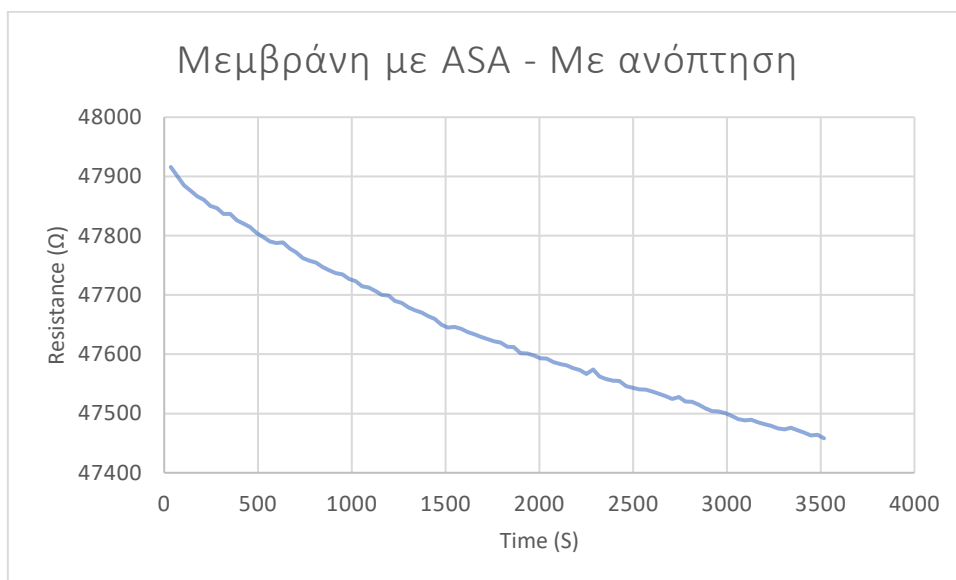
Με την ολοκλήρωση των αρχικών μετρήσεων της αντίστασης και την εξακρίβωση των βέλτιστων συνθηκών ανόπτησης προχωρήσαμε στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό της τελικής μετρητικής διάταξης, δηλαδή της δομής που παρουσιάστηκε (βλ. κεφάλαιο 3.4), για μέτρηση της παρεχόμενης ροής με χρήση του φαινομένου *Vortex Shedding* αλλά πλέον αντικαθιστώντας την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη με την πλήρως εκτυπωμένη μέσω προσθετικής κατασκευής μεμβράνη πιεζοαντίστασης.

Ως πρώτο βήμα σε οποιονδήποτε ηλεκτρικό χαρακτηρισμό αισθητήριας διάταξης πραγματοποιείται ο στατικός χαρακτηρισμός, δηλαδή η μέτρηση της τιμής του χαρακτηριστικού μεγέθους της αισθητήριας δομής (π.χ. τάση, αντίσταση κτλ), χωρίς την εφαρμογή του ερεθίσματος (ροή στην προκειμένη περίπτωση). Να επισημανθεί ότι το χαρακτηριστικό αυτό μέγεθος -αντίσταση της πιεζοαντίστασης στην εν λόγω διάταξη- αναμένεται να μεταβληθεί κατάλληλα, παρουσία της μετρούμενης φυσικής ποσότητας.

Με βάση τα παραπάνω, εφαρμόστηκε στην πιεζοαντίσταση ρεύμα συγκεκριμένης έντασης ενώ καταγράφηκε η αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα της για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και δειγματοληψία. Η τροφοδοσία της μεμβράνης γίνεται μέσω κατάλληλου τροφοδοτικού (βλ. κεφάλαιο. 3.2) όπου οι παράμετροι ρυθμίζονται μέσω συνεργαζόμενου προγράμματος από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή (βλ. κεφάλαιο. 3.1).



Εικόνα 4-11 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου για μεμβράνη ASA χωρίς ανόπτηση.



Εικόνα 4-12 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου για μεμβράνη ASA με ανόπτηση.

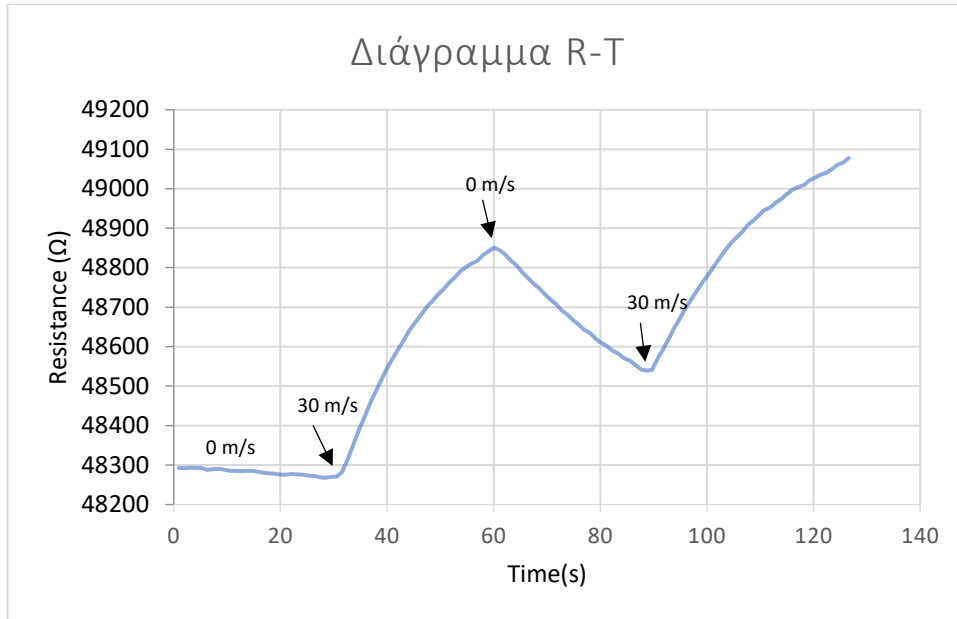
Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται η ωμική αντίσταση που μετρήθηκε στην ίδια διάταξη μεμβράνης (με χρήση υλικού ASA ως βάση) πριν και μετά την ανόπτηση. Να σημειωθεί ότι η αντίσταση προκύπτει από με εφαρμογή ρεύματος έντασης 10 mA και καταγράφοντας κατάλληλα την αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού. Στο πρώτο διάγραμμα παρατηρούμε ότι η αντίσταση αυξάνεται σταδιακά ενώ στη συνέχεια μειώνεται ξανά, πρακτικά υποδηλώνοντας ότι η αντίσταση του υλικού δεν έχει σταθεροποιηθεί. Στο δεύτερο διάγραμμα παρατηρούμε ότι αντίστασή της ακολουθεί μία ομαλή πτωτική πορεία. Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε συγκρίνοντας τις δύο

περιπτώσεις, μετά την ανόπτηση η αντίσταση του υλικού έχει μειωθεί δραστικά κατά 42% περίπου. Επίσης, καθώς η μέτρηση πραγματοποιείται για συγκεκριμένο χρόνο (3500 s) δεν μπορεί να προσδιοριστεί το σημείο στο οποίο σταθεροποιείται η τιμή της αντίστασης καθώς χρειάζεται περισσότερο χρόνο.

4.3.3 Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός - Δυναμικές μετρήσεις

Με την ολοκλήρωση του στατικού χαρακτηρισμού προχωρήσαμε στην εκπόνηση του δυναμικού, παρουσία της παροχής αέρα. Για τη διεξαγωγή των αντίστοιχων πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η υπάρχουσα μετρητική δομή που κατασκευάσαμε για την περίπτωση της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης (βλ. κεφάλαιο. 3.4), προσαρμόζοντας κατάλληλα σε αυτήν, την εκτυπωμένη μεμβράνη στο αυλάκι της δομής. Να σημειωθεί ότι ο συνδυασμός των δύο σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια που αρχικά επιλέχθηκαν ήταν στις θέσεις P0&P3. Σε πρώτη προσέγγιση η επιλογή αυτή αποσκοπούσε να διερευνηθεί η απόκριση της της εκτυπωμένης μεμβράνης.

Αρχικά, ως πρώτη εκτίμηση της λειτουργίας της συνολικής αισθητήριας δομής, η παροχή αέρα παίρνει απότομα μία μέγιστη τιμή και έπειτα μηδενίζεται (μέσω της αντίστοιχης βάνα ρύθμισης της παροχής), με σκοπό να εκτιμηθεί αρχικά εάν και πως αποκρίνεται ο αισθητήρας όταν εισέρχεται ροή στη δομή και όταν αντίστοιχα διακόπτεται, αλλά και τον χρόνο που απαιτείται για την απόκρισή του στο ερέθισμα. Για την εν λόγω διερεύνηση δεν ορίστηκε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα εφαρμογής / μη εφαρμογής της ροής και αντίστοιχα για τη διεξαγωγή των μετρήσεων καθώς η έναρξη και η διακοπή της ροής έγινε αυθαίρετα. Η εν λόγω διαδικασία επαναλήφθηκε κάνοντας έναν κύκλο μετρήσεων. Οι δοκιμές έγιναν με μεμβράνη κατασκευασμένη με συνδυασμό υλικών «ASA» και «Nylon-Conductive», στην οποία είχε πραγματοποιηθεί ανόπτηση. Παρακάτω παρουσιάζονται χαρακτηριστικά διαγράμματα από τις αρχικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

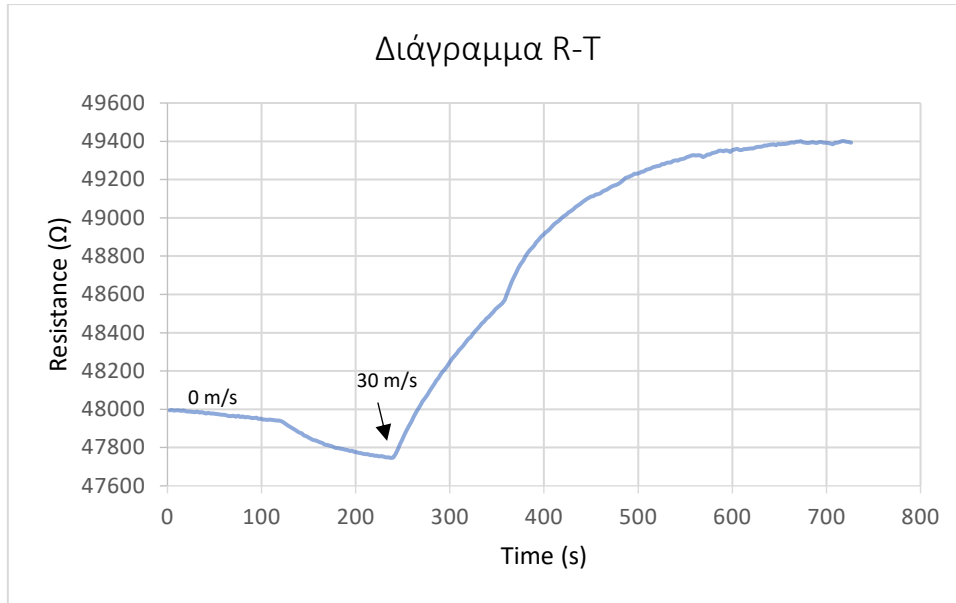


Εικόνα 4-13 Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου με μέγιστο άνοιγμα και στραγγαλισμό της ροής.

Από το άνω διάγραμμα το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η διάταξη ανταποκρίνεται επιτυχώς στην είσοδο της ροής ενώ η εύκαμπτη μεμβράνη (άρα και η πιεζοαντίσταση) παραμορφώνεται υποδηλώνοντας σαφώς την ανάπτυξη διαφοράς πίεσης λόγω του φαινομένου Vortex Shedding. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι αρχικά υπάρχει κάποια καθυστέρηση από την στιγμή που θα εισέρθει στη δομή η ροή μέχρις ότου αρχίσει να αυξάνεται η αντίσταση της μεμβράνης (0s έως 30s). Για χρόνο ίσο με 60s η ροή διακόπτεται (δεν αναπτύσσεται πλέον διαφορά πίεσης) με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντίσταση που παρατηρείται καθώς η μεμβράνη επιστρέφει στην αρχική της γεωμετρία, ενώ για χρόνο ίσο με 90s όπου επανέρχεται η ροή, η αντίσταση αυξάνεται, υποδηλώνοντας και πάλι την παραμόρφωση της μεμβράνης. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ότι ο χρόνος απόκρισης της πιεζοαντίστασης είναι σημαντικά αυξημένος καθώς στη μέγιστη ροή, μετά από την πάροδο 40s (δεύτερος κύκλος από 90s έως 130s), η τιμή της αντίστασης συνεχίζει να αυξάνεται.

- Εφαρμογή βήματος μέγιστης ροής αέρα

Η συγκεκριμένη μέτρηση ξεκίνησε αρχικά με μηδενική ροή αέρα ενώ στη συνέχεια η ροή τέθηκε στη μέγιστη τιμή της. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα.



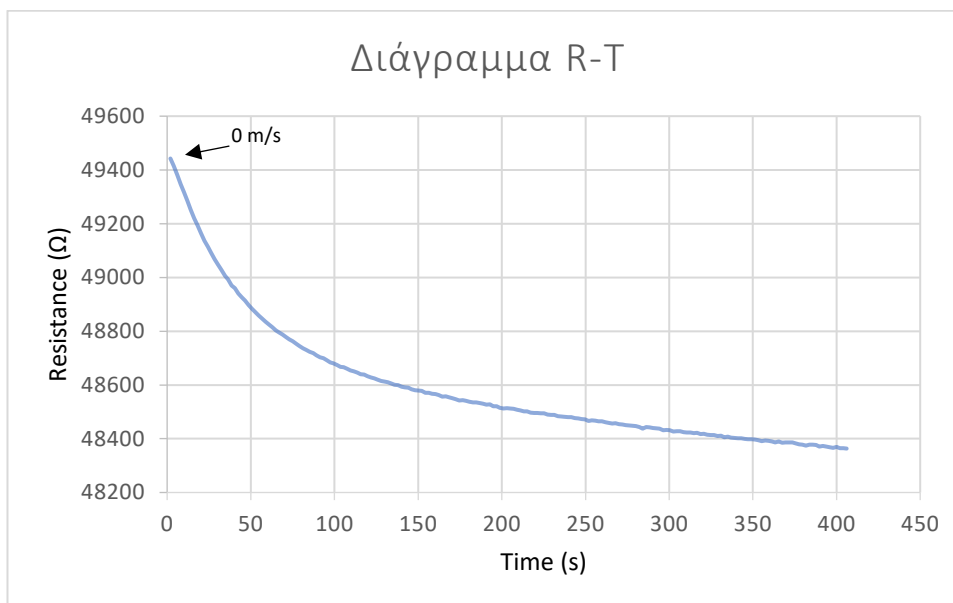
Εικόνα 4-14 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου για μέγιστη ροή.

Η εφαρμογή της μέγιστης ροής πραγματοποιήθηκε σε χρόνο $t=250s$. Παρατηρούμε ότι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η τιμή της πιεζοαντίστασης στη μέγιστη τιμή της είναι περίπου 450s (από 250s έως 700s). Η διαφορά στην αντίσταση είναι περίπου 1400Ω (από 48000Ω έως 49400Ω) που αντιστοιχεί σε μία μεταβολή 2.9% της αρχικής τιμής- ποσοστό μη αμελητέο και αξιοποιήσιμο για την μέτρηση της ροής. Αρχικά (για $t=0$), η αντίσταση ξεκινάει έχοντας τιμή ίση με 48000Ω ενώ στη συνέχεια μειώνεται στα 47780Ω (για $t=250s$). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεμβράνη δεν έχει φτάσει στην αρχική της κατάσταση από την μέτρηση που είχε προηγηθεί.

- Εφαρμογή μηδενικής ροής αέρα

Η συγκεκριμένη μέτρηση ξεκίνησε έχοντας εφαρμόσει ήδη τη μέγιστη ροή αέρα σε προηγούμενο βήμα. Όταν η αντίσταση της πιεζοαντίστασης έφτασε στην μέγιστη τιμή της, η ροή μηδενίστηκε (βλ. $t=0$) και καταγράφηκε η τιμή της αντίστασης. Όπως παρατηρούμε από το κάτωθι διάγραμμα, η μέγιστη αντίσταση που εμφάνισε η πιεζοαντίσταση είναι περίπου 49420Ω . Η ελάχιστη τιμή που καταγράφηκε χωρίς παρουσία ροής είναι περίπου 48350Ω που αντιστοιχεί σε μία μεταβολή 2.2% της αρχικής. Έχοντας υπόψη ότι η τιμή της αντίστασης δεν έχει σταθεροποιηθεί στο εν λόγω χρονικό διάστημα για το οποίο μετρήθηκε (0s έως 410s), η προκύπτουσα μεταβολή είναι σε συμφωνία με την αντίστοιχη που μετρήθηκε στην προηγούμενη

μέτρηση. Επίσης, ο χρόνος αποκατάστασης της αρχικής τιμής φαίνεται πως ξεπερνάει τα 410s.



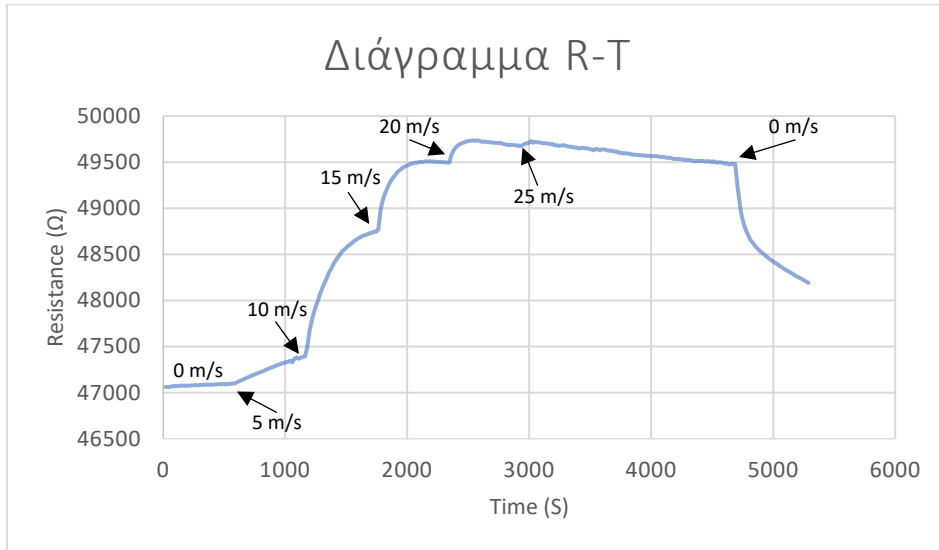
Εικόνα 4-15 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου για μηδενική ροή.

- **Δυναμικές μετρήσεις με διαφορετικό ρεύμα τροφοδοσίας της αντίστασης και χρόνο καταγραφής**

Στις επόμενες μετρήσεις έγινε χρήση του διαθέσιμου τροφοδοτικού, για να ρυθμιστεί σε διαφορετικά επίπεδα η ένταση του ρεύματος με την οποία θα τροφοδοτείται η πιεζοαντίσταση καθώς ο χρόνος και ο αριθμός των μετρήσεων. Ο λόγος είναι η διερεύνηση τυχόν θέρμανσης της αισθητήριας δομής που μπορεί να αλλοιώνει την τιμή της αντίστασης και ο χρόνος απόκρισης για τις διαφορετικές τιμές παροχής αέρα. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές από τις οποίες παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα. Σε όλες τις μετρήσεις επιλέχθηκε η βέλτιστη θέση και αριθμός σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (P0&P3), ενώ η ταχύτητα αέρα είχε τιμές από 0m/s έως 35m/s με βήμα 5m/s.

- **Μέτρηση Α: 0.1 mA ρεύμα διέγερσης – 10' χρόνος μέτρησης**

Στις συγκεκριμένες μετρήσεις το ρεύμα διέγερσης της πιεζοαντίστασης ήταν ίσο με 0.1mA ενώ η ροή αυξανόταν σταδιακά κάθε δέκα λεπτά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα R-T και V-T αντίστοιχα.

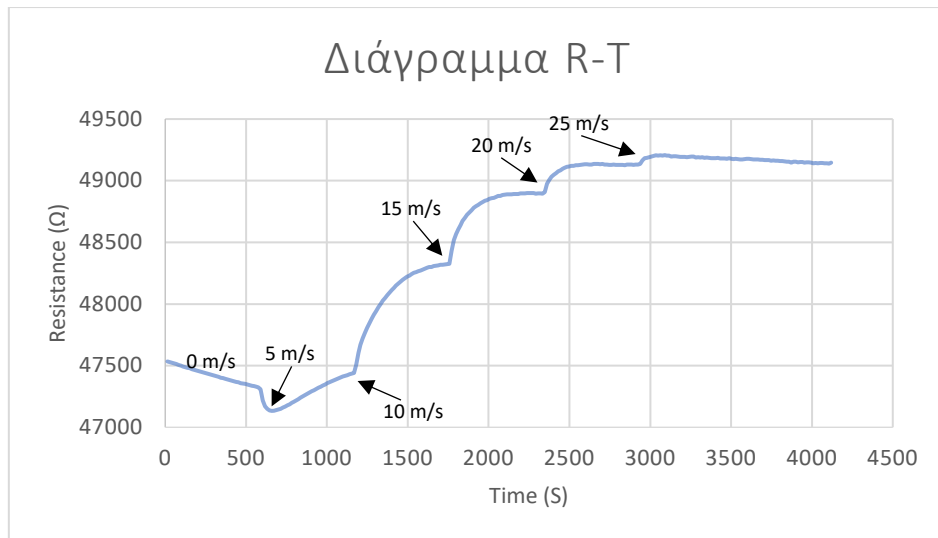


Εικόνα 4-16 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου με ενδιάμεσο χρόνο δέκα λεπτών για κάθε βήμα ροής.

Ένα βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα είναι ότι ο χρόνος εφαρμογής της ροής (10') είναι πολύ μικρότερος από τον απαιτούμενο χρόνο αποκατάστασης ειδικά για τις χαμηλές τιμές ροής (U : 0,5, 10 m/s). Αυτό πρακτικά είναι ορατό και στο άνω διάγραμμα καθώς δεν διακρίνονται ξεκάθαρα τα «σκαλοπάτια» που δημιουργούνται από το σταδιακό άνοιγμα της ροής στην καμπύλη της αντίστασης. Επίσης, για ροή με ταχύτητα μεγαλύτερη των 20-25 m/s εμφανίζεται κορεσμός (η τιμή της αντίστασης έχει αρχίσει σταδιακά να μην μεταβάλλεται με μεγαλύτερη ροή).

- **Μέτρηση Β: 0.025 mA ρεύμα διέγερσης – 10' χρόνος μέτρησης**

Στις συγκεκριμένες μετρήσεις το ρεύμα διέγερσης της πιεζοαντίστασης ήταν ίσο με 0.025mA ενώ η ροή αυξανόταν σταδιακά και πάλι κάθε δέκα λεπτά.



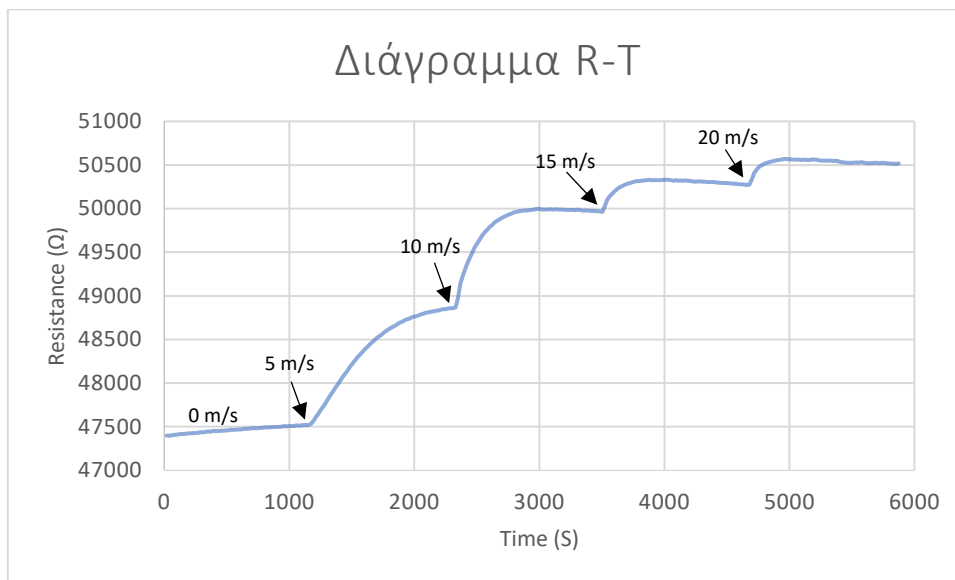
Εικόνα 4-17 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου με ενδιάμεσο χρόνο δέκα λεπτών για κάθε βήμα ροής.

Συγκριτικά με την προηγούμενη μέτρηση η μεμβράνη τροφοδοτήθηκε με μικρότερης έντασης ρεύμα και αυτό είχε ως τη βελτίωση της λειτουργίας της. Αυτό πρακτικά μπορεί και να διαπιστωθεί στο διάγραμμα καθώς η καμπύλη της αντίστασης παρουσιάζει μια πιο σταθερή τιμή για την ίδια διέγερση (ίδια τιμή ταχύτητας αέρα). Να σημειωθεί ότι η ροή αέρα είναι μηδενική μέχρι και για $t=600s$ όπου ξεκινάει με ταχύτητα $u=5m/s$.

Αρχικά (για $t=0$), παρατηρούμε ότι η αντίσταση ξεκινάει έχοντας μία τιμή 47500Ω ενώ στη συνέχεια μειώνεται στα 47250Ω (για $t=600s$). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αρχικά η μεμβράνη δεν έχει φτάσει στην αρχική της κατάσταση από την μέτρηση που είχε προηγηθεί. Επομένως, μετά από οποιαδήποτε εφαρμογή ροής που οδηγεί σε παραμόρφωση της μεμβράνης και αντίστοιχη αύξηση της αντίστασης της πιεζοαντίστασης, απαιτείται η παρέλευση σημαντικού χρονικού διαστήματος, χωρίς παρουσία ροής, για να επιστρέψει η μεμβράνη και αντίστοιχα η τιμή της αντίστασης στην αρχική της κατάσταση. Για να αποφευχθεί λοιπόν οποιαδήποτε εσφαλμένη μέτρηση θα πρέπει πριν την κάθε μέτρηση, η μεμβράνη να είναι σε ηρεμία για το απαιτούμενο διάστημα (το οποίο επιβεβαιώνεται καταγράφοντας την τιμή της αντίστασης).

- **Μέτρηση Γ: 0.0125 mA ρεύμα διέγερσης – 20' χρόνος μέτρησης**

Στις συγκεκριμένες μετρήσεις το ρεύμα διέγερσης της πιεζοαντίστασης ήταν ίσο με 0.0125mA ενώ η ροή αυξανόταν σταδιακά και πάλι κάθε είκοσι λεπτά. Παρακάτω παρουσιάζεται το διαγράμματα R-T.



Εικόνα 4-18 Διάγραμμα αντίστασης - χρόνου με ενδιάμεσο χρόνο είκοσι λεπτών για κάθε βήμα ροής.

Από το άνω διάγραμμα παρατηρείται ότι ο χρόνος των 20 λεπτών για κάθε τιμή της ροής είναι αρκετός ώστε να φανεί ξεκάθαρα η προκύπτουσα μεταβολή της αντίστασης. Επίσης, η μέγιστη ταχύτητα ροής για την οποία παρουσιάζεται κορεσμός αντιστοιχεί σε ταχύτητα αέρα 20 m/s.

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη ένταση ρεύματος διέγερσης είναι ίση με 0.0125A ενώ το απαιτούμενο χρονικό διάστημα παραμονής σε κάθε τιμή ροής αέρα είναι ίσο με 20 λεπτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούμε να συμπεράνουμε με ασφάλεια ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της έντασης ρεύματος τόσο μεγαλύτερη είναι η ολίσθηση που παρουσιάζεται στην τιμή της αντίστασης με σταθερή ροή αέρα. Ως πιο πιθανή αιτία για το παραπάνω, είναι η θέρμανση του αγωγίμου υλικού (*Nylon Conductive*) που οδηγεί σε αλλαγή τις εσωτερικής δομής του / διάταξης των αγωγίμων νανοσωματιδίων άνθρακα, επηρεάζοντας την αγωγιμότητά του. Στο παράρτημα Β' παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι δοκιμές/πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την εύρεση

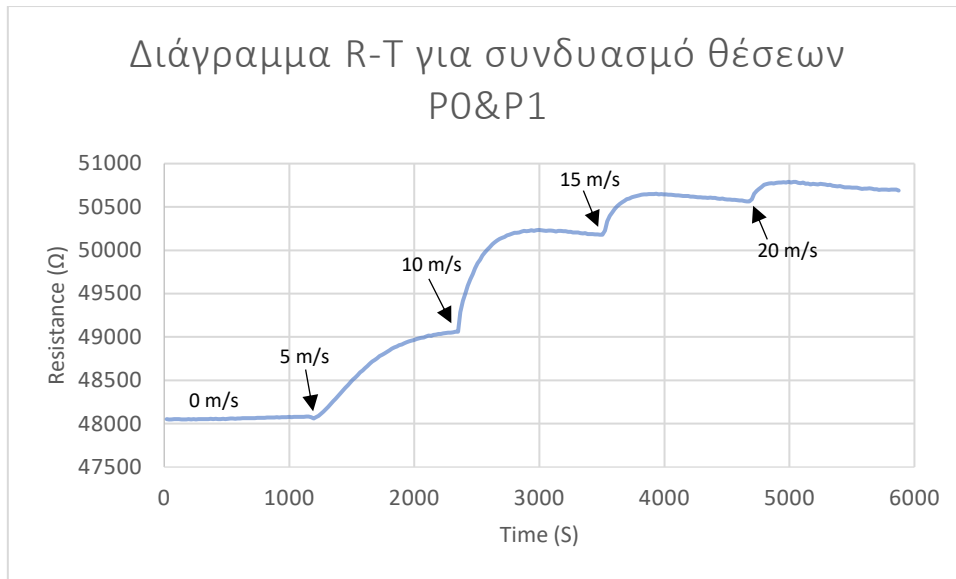
τόσο της βέλτιστης έντασης ρεύματος όσο και του χρόνου απόκρισης για κάθε τιμή της εφαρμοζόμενης ροής αέρα.

- **Διεξαγωγή μετρήσεων για διαφορετικούς συνδυασμούς σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (bluff bodies)**

Έχοντας καταλήξει στις βέλτιστες συνθήκες μέτρησης, πραγματοποιήθηκε ο δυναμικός ηλεκτρικός χαρακτηρισμός της τελικής αισθητήριας διάταξης για τις ίδιες τιμές παροχής αέρα αλλά με διαφορετικούς συνδυασμούς σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια κατά αντιστοιχία με τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης (βλ. ενότητα 3.6). Σκοπός των συγκεκριμένων πειραμάτων ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με χρήση των δύο διαφορετικών αισθητήριων δομών. Στην περίπτωση χρήσης της εκτυπωμένης πιεζοαντίστασης, για να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών θέσεων των σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια, η ροή αέρα εφαρμόζεται για το ίδιο χρονικό διάστημα, υπό τις ίδιες συνθήκες για κάθε συνδυασμό σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια. Συγκεκριμένα, μετά από μία σειρά πολυάριθμων δοκιμών επιλέχθηκαν οι τιμές ροής από 0m/s έως 20m/s (με βήμα 5m/s), με χρόνο διεξαγωγής 20 λεπτών για κάθε τιμή ροής και διέγερση με ρεύμα έντασης 0.0125A.

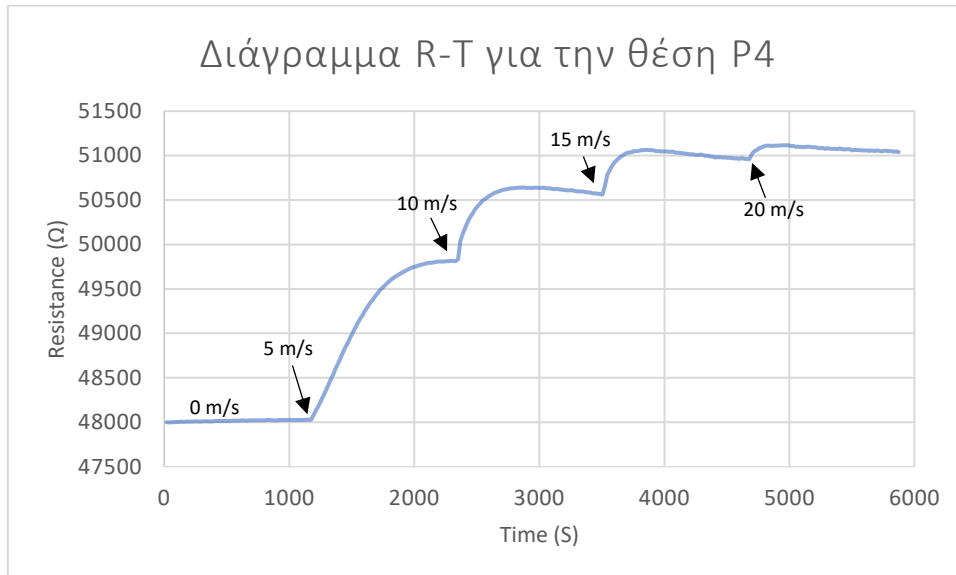
Θα πρέπει να τονισθεί ότι η κύρια διαφορά μεταξύ της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης και της τρισδιάστατης εκτυπωμένης μεμβράνης με πιεζοαντίσταση είναι ότι στην πιεζοηλεκτρική μεμβράνη μετράται η αναπτυσσόμενη διαφορά τάσης, ενώ στην τρισδιάστατη εκτυπωμένη μεμβράνη μετράται η μεταβολή στην αντίσταση λόγω παραμόρφωσης (και στις δύο περιπτώσεις). Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά-ενδεικτικά διαγράμματα τόσο για ένα όσο και για δύο σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (*bluff bodies*), σε διαφορετικούς συνδυασμούς θέσεων, όπως έχουν ήδη ορισθεί (βλ. ενότητα 3.6).

- **Μέτρηση Δ: Δύο εμπόδια σε συνδυασμό P0&P1**



Εικόνα 4-19 Ενδεικτικό διάγραμμα συνδυασμό δύο θέσεων σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.

- **Μέτρηση Ε: Ένα εμπόδιο στη θέση (P4)**



Εικόνα 4-20 Ενδεικτικό διάγραμμα για μία θέση σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.

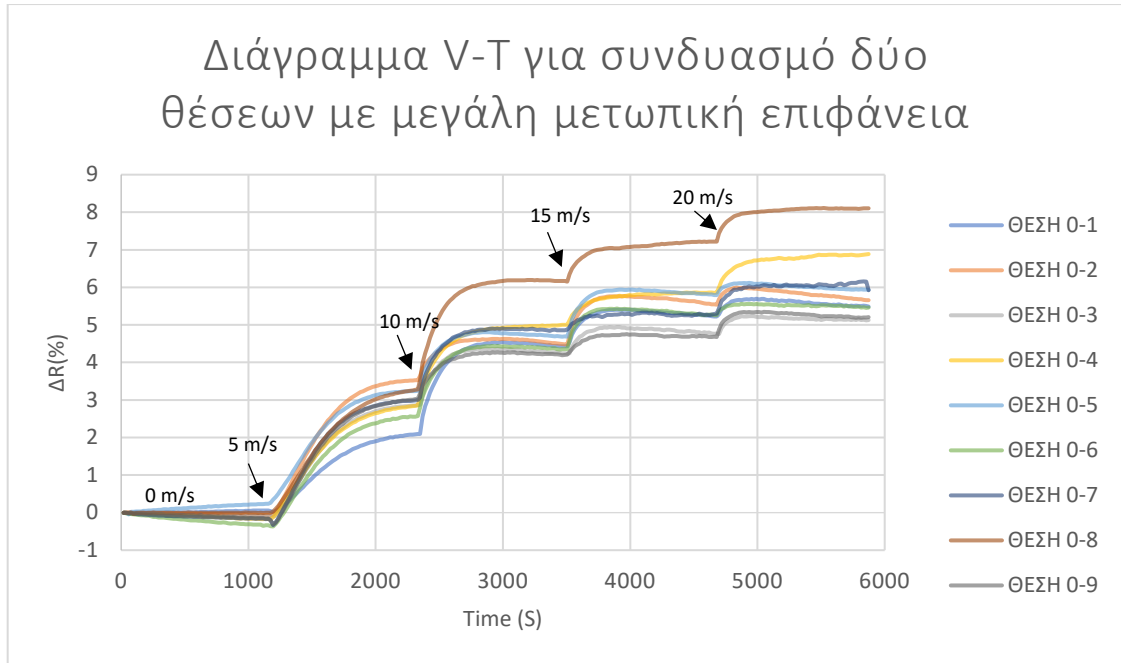
Τα παραπάνω διαγράμματα είναι ενδεικτικά για μία πρώτη σύγκριση μεταξύ της μονής και της διπλής θέσης σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια. Αρχικά και στις δύο περιπτώσεις η ροή είναι μηδενική ενώ ξεκινάει σε χρόνο $t=1340s$ περίπου. Στο πρώτο διάγραμμα για συνδυασμό δύο θέσεων (βλ εικόνα 4-21) η διαφορά στην αντίσταση

είναι περίπου 2000Ω (από 48050Ω έως 50050Ω) που αντιστοιχεί σε μία μεταβολή 4% της αρχικής τιμής. Στο δεύτερο διάγραμμα αντίστοιχα για μονή θέση (βλ εικόνα 4-22) η ροή ξεκινάει σε χρόνο που αντιστοιχεί σε $t=1250s$. Η διαφορά στην αντίσταση είναι περίπου 3010Ω (από 48000Ω έως 51010Ω) που αντιστοιχεί σε μία μεταβολή 5,9% της αρχικής τιμής.

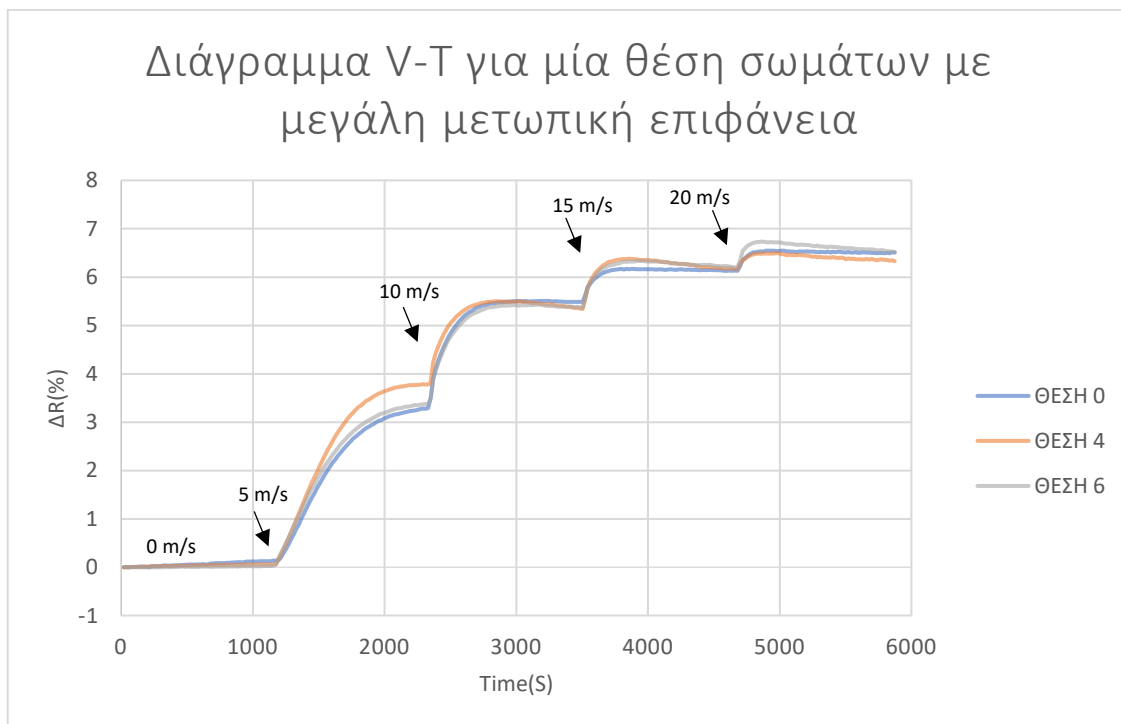
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι η συνολική μεταβολή της αντίστασης για ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια στην θέση (P4) είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την προκύπτουσα μεταβολή για δύο σώματα στις θέσεις P0 & P1. Από αυτό αποδεικνύεται ότι όπως και στην περίπτωση της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης, ένα σώμα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη μεταβολή συγκριτικά με κάποιους συνδυασμούς διπλών θέσεων (βλ. θέσεις P0&P1).

- **Συγκεντρωτικά διαγράμματα για ένα και δυο σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια για διαφορετικούς συνδυασμούς θέσεων**

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής αντίστασης ως προς τον χρόνο για διπλή και μονή θέση σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (*bluff bodies*) ώστε να διαπιστωθεί (με χρήση της εκτυπωμένης μεμβράνης) ποια είναι η βέλτιστη θέση/θέσεις των σωμάτων. Παράλληλα, πραγματοποιείται και μία σύγκριση με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις της προηγούμενης ενότητας (βλ. υποενότητα 3.6.1) για την πιεζοηλεκτρική μεμβράνη. Για την καλύτερη ανάγνωση των διαγραμμάτων, σε κάθε μέτρηση παρουσιάζεται η προκύπτουσα ποσοστιαία διαφορά της αντίστασης (% ΔR).



Εικόνα 4-21 Συγκεντρωτικό διάγραμμα συνδυασμού δύο θέσεων σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.



Εικόνα 4-22 Συγκεντρωτικό διάγραμμα για μονή θέση σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.

Συνολικά, παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής της αντίστασης εμφανίζεται στην περίπτωση δύο σωμάτων σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της περίπτωσης εφαρμογής της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης (βλ.

υποενότητα 3.6.1., πίνακας 3-5). Αντίστοιχα, κάποιες από τις θέσεις για ένα σώμα, εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό ΔR από κάποιους συνδυασμούς δύο σωμάτων.

Αξίζει να επισημανθεί όμως ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση (χρήση πιεζοαντίστασης) η μέγιστη αναπτυσσόμενη διαφορά πίεσης φαίνεται πως παρουσιάζεται σε διαφορετικό συνδυασμό θέσεων από αυτόν που προέκυψε με χρήση πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης (βλ. εικόνα 3-41, υποενότ. 3.6.3). Συγκεκριμένα, η μέγιστη μεταβολή αντίστασης παρατηρείται για τον συνδυασμό θέσεων (P0& P8) και όχι για τις θέσεις (P0& P4). Όμως, πρέπει να επισημανθεί ότι στην περίπτωση όπου έχουμε ένα σώμα η μέγιστη μεταβολή στην πλειοψηφία των μετρήσεων / σταδιακών αυξήσεων της ροής (βλ βήματα από 0 έως και 15 m/s) εμφανίζεται στην θέση (P4) καθώς εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής της αντίστασης ($\% \Delta R$) ενώ ακολουθούν οι θέσεις (P6) και (P0). Θα πρέπει να τονισθεί ότι αντίστοιχο αποτέλεσμα προκύπτει και στην περίπτωση χρήσης πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης με χρήση ενός σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια, δηλαδή η μέγιστη μεταβολή εμφανίζεται στην θέση (P4) (βλ. εικόνα 3-43, υποενότητα 3.6.3). Στο παράρτημα Β' παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα διαγράμματα των δυναμικών μετρήσεων που διεξήχθησαν τόσο για μία θέση όσο και για συνδυασμό δύο θέσεων εμποδίων.

5 Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Όπως ήταν αναμενόμενο στο πλαίσιο μιας πειραματικής Διπλωματικής Εργασίας, κατά την περάτωση της προέκυψαν ποικίλα προβλήματα τόσο στον μετρητικό εξοπλισμό όσο και σε γενικότερα θέματα (π.χ. σχεδίαση/εκτύπωση διάταξης κτλ). Συγκεκριμένα, οι πρώτες μετρήσεις έγιναν με παλαιότερο εξοπλισμό (βλ. παλμογράφο), γεγονός που μας οδήγησε παροδικά σε αδιέξοδο, καθώς δεν ήταν εφικτή η σωστή εξαγωγή των μετρήσεων (έλλειψη προγράμματος οδήγησης για τον παλμογράφο λόγω μη υποστήριξης από την κατασκευάστρια εταιρία). Κατόπιν, με την χρήση σύγχρονου αλλά και αξιόπιστου μετρητικού εξοπλισμού, που εντάχθηκε στο Τμήμα πρόσφατα, ξεπεράστηκε η εν λόγω δυσκολία. Πέραν τούτου, όπως είναι σύνηθες σε αντίστοιχες εργασίες, υπήρξε μια συνεχής βελτίωση τόσο της μετρητικής δομής όσο και της μεθοδολογίας μέσω κατάλληλης ανατροφοδότησης / επίλυσης των προβλημάτων που προκύπταν κατά την περάτωση της εργασίας, μη εμφανή εξαρχής. Η αρχική ιδέα για τη δημιουργία μιας πλήρους εκτυπωμένης δομής αποτέλεσε εφιαλτήριο για τη δημιουργία της εκτυπωμένης μεμβράνης με ολοκληρωμένη πιεζοαντίσταση. Ωστόσο, έπρεπε να αναζητήσουμε με επιμονή και να ερευνήσουμε με υπομονή την αρχή λειτουργίας της καθώς και τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε, με κύριο υλικό κατασκευής το αγώγιμο νήμα τύπου Nylon.

Στο πλαίσιο της εκπονηθείσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν συνοπτικά τα κάτωθι:

- Διερεύνηση της λειτουργίας της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης και τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ροής μέσω του φαινομένου *Vortex Shedding*.
- Σχεδιασμός της διάταξης του φορέα και των σωμάτων εμποδίων - εξακρίβωση του τρόπου συναρμογής.
- Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός της προκύπτουσας συνολικής μετρητικής δομής για ροή αέρα με ταχύτητα από 4 έως 24 m/s με βήμα 2 m/s.
- Σχεδιασμός της εύκαμπτης μεμβράνης με ενσωματωμένη πιεζοαντίσταση με σκοπό την ανάπτυξη μίας εξ' ολοκλήρου εκτυπωμένη δομή αισθητήρα.

- Αρχική διερεύνηση της λειτουργίας της μεμβράνης με ενσωματωμένη πιεζοαντίσταση.
- Στατικός και Δυναμικός χαρακτηρισμός της τελικής εκτυπωμένης μετρητικής διάταξης μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή και επιβεβαίωση της λειτουργίας της.

5.2 Προτάσεις

Οι προτάσεις που μπορούν να γίνουν αφορούν κυρίως στη βελτίωση της απόδοσης τόσο της συνολικής δομής (συμπεριλαμβανομένου του φορέα) όσο και της εκτυπωμένης μεμβράνης.

- Η δομή του φορέα κατασκευάστηκε τμηματικά με αποτέλεσμα να υπάρχουν μικρές απώλειες στη ροή μεταξύ των κενών των επιμέρους τμημάτων μετά την συναρμογή του. Για την αποφυγή του άνω προβλήματος απαιτείται ενιαία εκτύπωση προκειμένου να εξαλειφθούν τυχόν κενά και ανομοιομορφίες στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του φορέα.
- Με βάση τη βέλτιστη θέση για τα σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια που καταλήξαμε μπορούμε στο τελικό σχέδιο του φορέα να κρατήσουμε μόνο τη συγκεκριμένη θέση με σκοπό να μην υπάρχουν περαιτέρω ανοίγματα που προκαλούν απώλειες στη ροή.
- Μέσω της βελτιστοποίησης της εκτυπωμένης μεμβράνης με ενσωματωμένη πιεζοαντίσταση μπορούμε να παράγουμε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα συγκριτικά με την περίπτωση χρήσης της πιεζοηλεκτρικής. Η μειωμένη ευαισθησία τελικώς της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης προκύπτει πρωτίστως από τον αναπτυσσόμενο θόρυβο στις μετρήσεις -προερχόμενο κυρίως από τον εξοπλισμό παροχής αέρα (μονοφασικό ηλεκτρικό κινητήρα)- καθώς η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στην έξοδο της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης είναι της τάξεως των mV. Περαιτέρω βελτιστοποίηση στη γεωμετρία αλλά και δομή (π.χ. ποσοστό πλήρωσης με αγώγιμο υλικό) της πιεζοαντίστασης, μέσω κατάλληλης διερεύνησης, θα οδηγήσει ακόμα σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Μολονότι χρησιμοποιήσαμε επιτυχώς κατάλληλες βάνες για να αυξομειώνουμε την παρεχόμενη ροή, που εισέρχεται στη μετρητική διάταξη, κρίνεται απαραίτητη, η αντικατάσταση του υπάρχοντος συστήματος παροχής αέρα, με αντίστοιχο όπου θα υπάρχει η δυνατότητα αυξομείωσης των στροφών

του κινητήρα (μέσω ελεγκτή στροφών) και η αυτοματοποιημένη μέτρηση και καταγραφή της παρεχόμενης ροής.

6 Βιβλιογραφία

Nguyen, Hai-Dang, T., Pham, Huy-Tuan., Wang, Dung-An. (2013). *A miniature pneumatic energy generator using Karman vortex street*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 40-48.

Koubogiannis, D.G. (2016). *Parametric CFD study of micro-energy harvesting in a flow channel exploiting vortex shedding*.

Casini, M. (2016). *Advanced materials for architecture. Advanced Materials and Nanotechnology to improve Energy-Efficiency and Enviromental Performance*. Smart Buildings. (pp 55-104).

Κόκκινου, Β. (2015). *Ανάλυση και Μοντελοποίηση Μιας γέφυρας με Ενσωματωμένα Πιεζοηλεκτρικά Υλικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. Διπλ. εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σφυράκη, Λ. (2018). *Διερεύνηση πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης σε κατασκευές*. Διπλ. εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Safari, A., Akdoğan, E.A. (2008). *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*.

Rupitsch, S.J (2019). *Piezoelectric Sensors and Actuators*. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering.

Lukasz, M., Sienkiewicz, K. (2016). *CONCEPT, IMPLEMENTATION AND ANALYSIS OF THE PIEZOELECTRIC RESONANT SENSOR/ACTUATOR FOR MEASURING THE AGING PROCESS OF HUMAN SKIN*.

Gupta, M. N., Yadav, S., Yadav S.K. (2014). *Electricity Generation Due to Vibration of Moving Vehicles Using Piezoelectric Effect*.

Gómez, E.S. (2010). *Piezoelectric Ceramics*.

APEX MICROT TECHNOLOGY. (2012). *Driving Piezoelectric Actuators*.

Robinson, S. (2006). *Driving Piezoelectric Actuators*. Applications Engineer, Apex Microtechnology, Tucson, Ariz.

Δρακόπουλος, Μ. (2016). *ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ*. ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Βοροστούκ, Ι. (2016). *ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Waanders, J.W. (1991). *Piezoelectric Ceramics: Properties and Applications*. Philips Components, 91.

Priya, S., Inman, D.J. (2009). *Energy Harvesting Technologies*.

Elvin, N., Erturk, A. (2013). *Advances in Energy Harvesting Methods*.

- Toprak, A., Tigli, O. (2014). *Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges*. <https://doi.org/10.1063/1.4896166>
- Hedayetullah, A.M. (2010). *Analysis of Piezoelectric Energy Harvesting for Bridge Health Monitoring Systems*.
- Safaei, M., Sodano, H.A., Anton, S.R. (2019). *A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008-2018)*.
- Jeong, S.Y., Xu, L.L., Ryu, C.H., Kumar, A., Hong, S.D., Jeon, D.H., Cho, J.Y., Ahn, J.H., Joo, Y.H., Jeong, I.W., Hwang, W.S., Sung, T.H. (2021). *Wearable Shoe-Mounted Piezoelectric Energy Harvester for a Self-Powered Wireless Communication System*.
- Liu, H., Zhong, J., Lee, C., Lee, S.W., Lin, L. (2018). *A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications*.
- Sen Wai Kwok, Kok Hin Henry Goh, Zer Dong Tan, Siew Ting Melissa Tan, Weng Weei Tjiu, Je Yeong Soh, Zheng Jie Glenn Ng, Yan Zhi Chan, Hui Kim Hui, Kuan Eng Johnson Goh. (2017). *Electrically conductive filament for 3d-printed circuits and sensors*. APPLIED materialstoday. (pp 167-175). <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.07.001>
- Yang, K., Cioncolini, A., Mostafa R.A. Nabawy., Revell, A. (2021). *Mechanical Durability Assesment of an Energy-Harvesting Piezoelectric Inverted Flag*.
- Wang, J., Mostafa R.A Nabawy., Cioncolini, A., Revell, A., Weigert, S. (2021). *Planform Geometry and Excitation Effects of PVDF-Based Vibration Energy Harvesters*.
- Cioncolini, A., Mostafa R.A. Nabawy., Silva-Leon, J., O'Connor, J., Revell, A. (2019). *An Experimental and Computational Study on Inverted Flag Dynamics for Simultaneous Wind-Solar Energy Harvesting*.
- Valluru, S.H. (2007). *Energy Harvesting from Vibration of a Bridge*.
- Toprak, A., Tigli, O. (2014). *Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges*.
- Uchino, K. (2010). *Advanced piezoelectric materials. Science and technology*.
- Dahiya, R.S., Valle, M. (2013). *Robotic Tacticle Sensing. Technologies and System*
- Zhu, X. (2010). **PIEZOELECTRIC CERAMICS MATERIALS: PROCESSING, PROPERTIES, CHARACTERIZATION, AND APPLICATIONS.**
- Steinem, C., Janshoff, A. (2006). *Piezoelectric Sensors. (vol. 5). Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors*.
- Lang, S.B., Muensit, S. (2006). *Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers*.
- Φουρνιαράκης, Σ.Ι. (2015). *Μοντελοποίηση θαλάσσιου Ενεργειακού Συλλέκτη με χρήση Πιεζοηλεκτρικής Τεχνολογίας και ανάλυση με μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*. Διπλ. Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Feenstra, J., Granstrom, J., Sodano, H. (2008). *Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack*. Mechanical Systems and Signal Processing. (pp 721-734).

- Tichy, J., Erhart, J., Kittinger, E., Privratska, J. (2010). *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics. Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials*.
- Sezer, N., Koc, M. (2021). *A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting*. Nano Energy. (volume 80).
- Murata Manufacturing Co., Ltd. *Piezoelectric Ceramic Sensors (PIEZOTITE)*. P19E7.pdf 02.6.26.
- Measurement Specialties. (1999). *Piezo Film Sensors Technical Manual*. Measurement Specialties, Inc.
- Wang, X.D., Huang, G.L. (2002). *Modelling and analysis of piezoelectric actuators in anisotropic structures* (pp. 155, 45-63). Acta Mechanica
- Zhou, H., Henson, B., Bell, A. (2001). *LINEAR PIEZO-ACTUATOR AND ITS APPLICATIONS*.
- Muc, A., Kedziora, P. (2010). *Optimal Design of Eigenfrequencies for Composite Structures Having Piezoelectric Sensors or Actuators*.
- Barut, S. (2006). *Use of Piezoelectric Films for NDT Applications*.
- Vijaya, M.S. (2013). *Piezoelectric Materials and Devices. Applications in Engineering and Medical Sciences*.
- Miau, J.J., Liu, T.W., (1990). *Vortex flowmeter designed with wall pressure measurement, Review of Scientific Instruments*. 61, 2676-2681
- Akaydin, H.D., Elvin, N., Andreopoulos, Y. (2010). *Wake of a cylinder: a paradigm for energy harvesting with piezoelectric materials*. Experiments in fluids, 49(1), 291-304.
- Jurcevic, P. (2010). *Piezoelectricity: Basics and applications*. Technical Talk.
- Piefort, V., Preumont, A., (2001). *FINITE ELEMENT MODELING OF PIEZOELECTRIC STRUCTURES*.
- Vives, A.A. (2008). *Piezoelectric Transducers and Applications*.
- Allen, J.J., Smits, A.J. ((2001). *Energy harvesting eel*. Journal of fluids and structures, pp. 1-12.
- Fu, X., Yang, H. (2001). *Study of hydrodynamic vibrations in dual bluff body vortex flowmeter*. Chinese Journal of chemical Engineering, 9(2), 123-128
- Venugopal, A., Agrawal, A., Prabhu, S.V. (2011). *Influence of blockage and upstream disturbances on the performance of vortex flowmeter with wall pressure measurement*. Measurement.
- Peng, J., Fu, X., Chen, Y. (2004). *Flow measurement by a new type vortex flowmeter of dual triangular bluff body*. International Journal of Energy Research, 24, 1180-1190.
- Nguyen, H-D.T., Pham, H-T., Wang D-A. (2013). *A miniature pneumatic energy generator using Karman vortex street*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 40-48
- Matumoto, M. (1999). *VORTEX SHEDDING OF BLUFF: A REVIEW*. Journal of Fluids and Structures, Volume13, Issues7-8,791-811. <https://doi.org/10.1006/jfls.1999.0249>

- Redwood, B., Schoffer, F., Garret, Brian. (2017). *The 3D Printing Handbook. Technologies, design and applications.*
- Ammar Alzarrad, M., Souhail Elhouar, PE. (2019). *3D Printing Applications in Construction from The Past and into The Future.*
- Zaharia, C., Gabor, A.G., Gavrilovici, A., Stan, A.T., Idorasi, L., Sinescu, C., Negrutiu, M.L. (2017). *Digital Dentistry-3D Printing Applications.*
- Gokhare, Vinod.G., Raut, D.N., Shinde, D.K. (2017). *A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing.*
- Gokhare, Vinod.G., Raut, D.N., Shinde, D.K. (2017). *A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing.*
- Lipson, H., Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing.*
- Bose, S., Vahabzadeh, S., Bandyopadhyay, A. (2013). *Bone tissue engineering using 3D printing.* Materialstoday, Volume16, issue 12, 496-504.
- Kazinunas, A. (2013). *Make: 3D Printing-The essential guide to 3D Printers,* Maker Media, Inc.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies-3D Printing, Rapid Prototyping, and direct Digital Manufacturing* (2rd ed). (Original work published 2010)
- Dodziuk.H. (2016). *Applications of 3D printing in healthcare.* Kardiochir Torakochirurgia Pol-Polish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery, 13(3), 283–293.
- Sun, C., Shang, G., Wang, H. (2019). *On Piezoelectric Energy Harvesting from Human Motion.* Journal of Power and Energy Engineering, 155-164.
- Pagonis, D.N., Matsoukas, I., Pilatis, A., Kaltsas, G. (2022). *Design and Fabrication of a novel monolithic 3D printed air flow sensor.*
- piceramic.com. Ανακτήθηκε στις (8/11./2021) από:<https://www.piezo.ws/pdf/Piezo.pdf>
- Docplayer.gr. Ανακτήθηκε στις (8/11./2021) από:<https://docplayer.gr/23917391-Kefalaio-6-eyfyi-syntheta-ylika-mihaniki-ton-piezoilektrikon-ylikon.html>.
- www.ingaero.uniroma1.it. Piezoelectric materials. Ανακτήθηκε στις (5.6/2022) από:http://www.ingaero.uniroma1.it/attachments/2176_Cap_9%20Piezoelectric%20materials%20-%20Thermal-electrical%20analogy.pdf
- en.wikipedia.org . Πιεζοηλεκτρισμός. Ανακτήθηκε 6/7/2022 από <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
- americanpiezo.com . Pieztheory-piezoelectricity. Ανακτήθηκε 6/7/2022 από <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>
- linearmotiontips.com. What are piezo actuators. Ανακτήθηκε 3/6/2022 από <https://www.linearmotiontips.com/what-are-piezo-actuators/>
- toshiba.semicon-storage.com. ultrasonic-motor Ανακτήθηκε 3/6/2022 από <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/e-learning/village/ultrasonic-motor.html>

noliac.com. Flow meter. Ανακτήθηκε 3/6/2022 από <http://www.noliac.com/card/show/flow-meters/>

hubs.com. What is 3D printing. Ανακτήθηκε 15/4/2022 από <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>

en.wikipedia.org. 3D Printing Ανακτήθηκε 15/4/2022 από https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing

3dprinting.com. How 3D printing is changing Auto manufacturing. Ανακτήθηκε 12/6/2022 από <https://3dprinting.com/automotive/how-3d-printing-is-changing-auto-manufacturing/>

3dprintingindustry.com. 3D printing basics. Ανακτήθηκε 4/3/2022 από <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/#07-benefits-value>

3dprintingindustry.com 3D printing basics. Ανακτήθηκε 4/3/2022 από <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/#07-benefits-value>

all3dp.com. What is fusion 360. Ανακτήθηκε 13/6/2022 από <https://all3dp.com/2/what-is-fusion-360-simply-explained/>

all3dp.com. slicer-software. Ανακτήθηκε 13/6/2022 από <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/#cura>

en.wikipedia.org. Computer-aided design. Ανακτήθηκε 13/6/2022 από https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design

en.wikipedia.org . STL (Standard Triangle Language). Ανακτήθηκε 13/6/2022 από [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))

3dprinting.com. 3D Printing in education. ανακτήθηκε 12/6/2022 από <https://3dprinting.com/3d-printing-use-cases/3d-printing-in-education/>

architizer.com. 3D printing buildings. Ανακτήθηκε 12/6/2022 από <https://architizer.com/blog/practice/details/3d-printed-buildings-future-or-gimmick/>

en.wikipedia.org. Ανόπτηση. Ανακτήθηκε 6/7/2022 από [https://en.wikipedia.org/wiki/Annealing_\(materials_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Annealing_(materials_science))

Παγώνης, Δ. Ν. (2011α). “Αυτοματισμοί Πλοίου”, σημειώσεις μαθήματος. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας.

Παπαγιάννης, Ε., & Παπαποστόλου, Σ. (2011). “Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου”, σημειώσεις εργαστηρίου. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας.

Παγώνης, Δ. Ν. (2011β). “Ηλεκτροτεχνία-Ηλ. Μηχανές και Εγκαταστάσεις Πλοίου”, σημειώσεις μαθήματος. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας.

Κολλιόπουλος, Ν. (2010). *Βασική Ηλεκτρολογία*. Εκδόσεις Ίων.

Καλλιγερόπουλος, Δ., Βασιλειάδου, Σ. (2005). *Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου Ι*. Σύγχρονη Εκδοτική.

H. K. Versteeg, w. m. (2016). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

7 Πηγές εικόνων

Κεφάλαιο 1

Vives, A.A. (2008). *Piezoelectric Transducers and Applications*.

comsol, (2014). Αναπαράσταση πόλωσης του υλικού. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://www.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-poling-direction/>

americanpiezo.com. Κινήσεις πιεζοηλεκτρικού υλικού. Ανακτήθηκε 28/1/2023 από <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>

sensortechcanada.com. Αναπαράσταση διευθύνσεων τριών αξόνων πόλωσης του υλικού. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://sensortechcanada.com/2021/07/03/12248/>

indiastudychannel.org, (2012). Συσκευή μη καταστροφικού ελέγχου με χρήση υπερήχων. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://www.indiastudychannel.com/attachments/19923-non-destructive-testing-ndt-ultrasonic-testing>

en.wikipedia.org, (2008). Κινητήρας με ράβδο ολίσθησης. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από https://en.wikipedia.org/wiki/Inchworm_motor

en.wikipedia.org, (2008). Κινητήρας τύπου *Inchworm*. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_motor

en.wikipedia.org, (2008). Κινητήρας τύπου *Piezo walk*. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_motor

en.wikipedia.org, (2008). Κινητήρας υπερήχων. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_motor

linearmotiontips.com, (2015). Ενεργοποιητής κάμψης. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://www.linearmotiontips.com/what-are-piezo-actuators/>

motioncontroltips.com, (2015). Ενεργοποιητής στοιβάς. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-stacked-piezo-actuators-and-what-do-they-do/>

linearmotiontips.com, (2015). Ενεργοποιητής σωλήνα. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://www.linearmotiontips.com/what-are-piezo-actuators/>

en.wikipedia.org, (2007). Πιεζοηλεκτρικό ηχείο. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>

Li, X., Liu, X., Dong, L., Sum, X., Tang, H., Liu, G. (2022). *A High-Performance Synthetic Jet Piezoelectric Air Pump with Petal-Shaped Channel*.

tech-hounds.com, (2020). Αισθητήρας επιτάχυνσης. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://www.tech-hounds.com/what-are-the-components-of-an-accelerometer/>

fierceelectronics.com, (2017). Μηχανισμός αισθητήρα για την μέτρηση της στάθμης ρευστών. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από

<https://www.fierceelectronics.com/components/ultrasonic-piezo-transducers-for-smart-sensors-motion-and-sound>

fierceelectronics.com, (2017). Σκαριφηματική αναπαράσταση μέτρησης στάθμης ρευστών. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από

<https://www.fierceelectronics.com/components/ultrasonic-piezo-transducers-for-smart-sensors-motion-and-sound>

Instrumentationtools.com. Αισθητήρας ροής με χρήση φαινομένου *Doppler*. Ανακτήθηκε 10/10/2022 από <https://instrumentationtools.com/difference-between-transit-time-and-doppler-ultrasonic-flow-meter/>

CeramTec. Αισθητήρας ροής με χρήση καθυστέρησης υπερήχων. Ανακτήθηκε 25/8/2022 από <https://www.ceramtec-industrial.com/en/products-applications/sensors-transducers/flow-sensors/ultrasonic-flow-sensors-for-utilities-management>

Κεφάλαιο 2

fabbalo.com, (2017). Αναπαράσταση μεθόδου αφαίρεσης δομών στήριξης. Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://www.fabbaloo.com/2017/08/a-great-guide-to-3d-print-post-processing>

3D PRINT.com, (2020). Αναπαράσταση λειτουργίας μεθόδου εκτύπωσης με εξώθηση υλικού. Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://3dprint.com/263279/fdm-3d-printing-peek-small-medical-implants/>

ALL3DP.com, (2018). Αναπαράσταση λειτουργίας της μεθόδου εκτύπωσης *DLP (Digital Light Processing)*. Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://all3dp.com/2/what-is-a-dlp-3d-printer-3d-printing-simply-explained/>

Redwood, B., Schoffer, F., Garret, Brian. (2017). Αναπαράσταση λειτουργίας της μεθόδου εκτύπωσης *Stereolithography (SLA)*. *The 3D Printing Handbook. Technologies, design and applications*.

Crites, S. (2020). *Design of Experiments Analysis Of Powder Removal Methods for EBM Manufactured Ti-6al-4v Parts*

ALL3DP.com, (2022). Δημιουργία ενός στρώματος μοντέλου με τήξη σκόνης. Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/>

3erp.com, (2018). Κατασκευή αυτοκινήτου μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή. Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://www.3erp.com/blog/3d-print-changing-automotive-industry/>

XJET.com, (2022). Κατασκευή πιστονιού αυτοκινήτου μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή. Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://www.xjet3d.com/news/greek-ultracar-with-worlds-first-3d-printed-engine-pistons/>

garage.hp.com, (2019). Κατασκευή πρόσθετου ποδιού μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή. Ανακτήθηκε 20/10/2022 από <https://garage.hp.com/us/en/innovation/hp-3d-printing-prosthetics.html?sf100326002=1>

Owandy.com, (2020). Κατασκευή εμφυτεύματος δοντιού μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή. Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://www.owandy.com/3d-printing-in-dentistry/>

3D PRINTING.COM, (2020). Χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην εκπαίδευση Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://3dprinting.com/3d-printing-use-cases/3d-printing-in-education/>

Architizer. Αναπαράσταση τρισδιάστατου εκτυπωτή για κατασκευή σπιτιού. Ανακτήθηκε 20/8/2022 από <https://architizer.com/blog/practice/details/3d-printed-buildings-future-or-gimmick/>

Κεφάλαιο 3

PI Ceramic GmbH. Σκαριφηματική αναπαράσταση της πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης. Ανακτήθηκε 25/1/2022 από <https://www.piceramic.com/en/products/piezoceramic-actuators/patch-transducers/p-876-duraact-patch-transducer-101790>

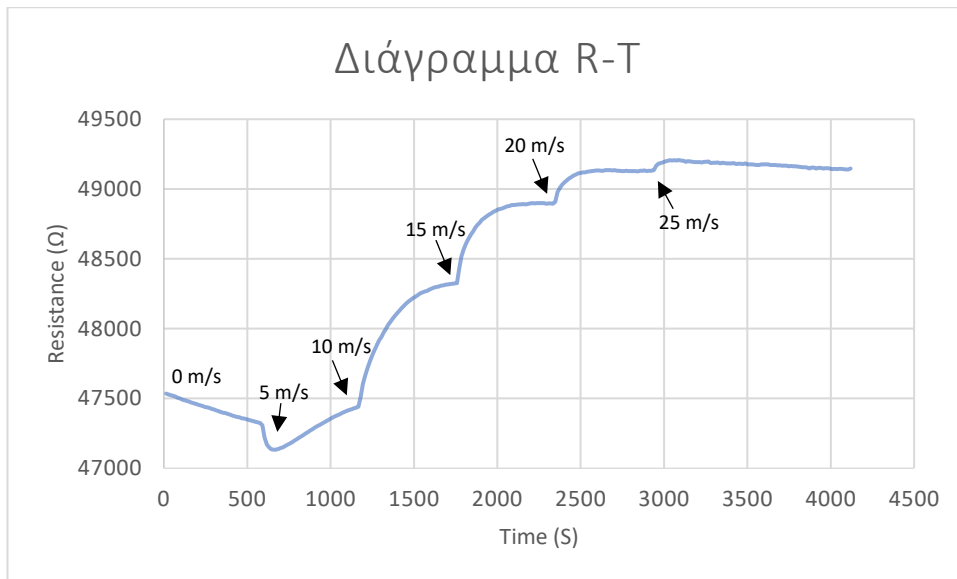
3-12 kouboziannhs. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για διάφορες γεωμετρικές σώματα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια

3-36 kouboziannhs. Θέσεις σωμάτων με μεγάλη μετωπική επιφάνεια.

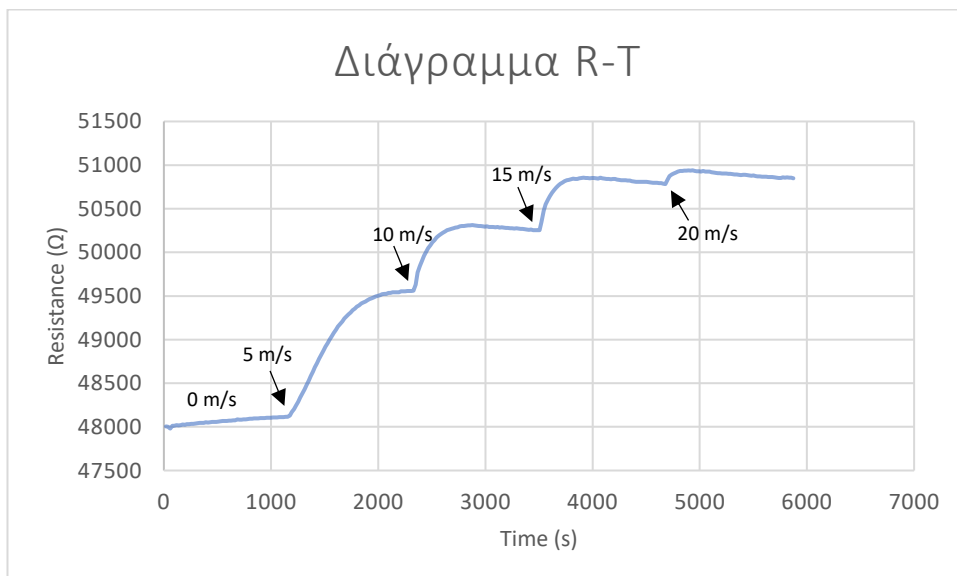
8 Παράρτημα

Μετρήσεις με χρήση εκτυπωμένης μεμβράνης με ενσωματωμένη πιεζοαντίσταση

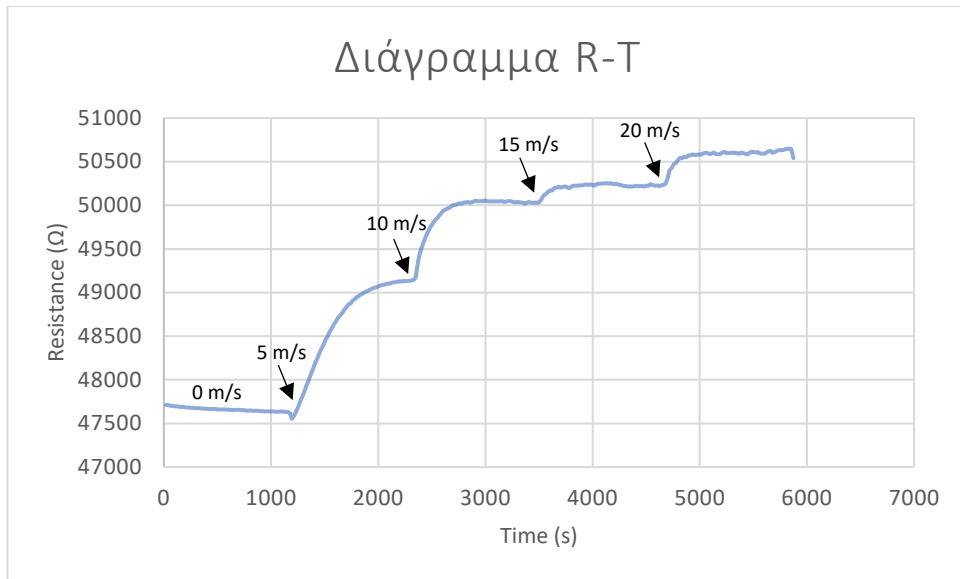
- **Μέτρηση Α: 0.025 mA ρεύμα διέγερσης – 10' χρόνος μέτρησης για κάθε αλλαγή στην τιμή της εισερχόμενης ροής**



- **Μέτρηση Β: Δύο εμπόδια στις θέσεις P0 & P5**



Μέτρηση Γ: Δύο εμπόδια στις θέσεις P0 & P7



Μέτρηση Δ: Δύο εμπόδια στις θέσεις P0 & P8

