



Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Κρήτης



ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ομάδα Μικροηλεκτρονικής
Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ

**Ανάπτυξη 3D εκτυπωμένων χωρητικών αισθητήρων πίεσης για
εφαρμογές σε ανάλυση βαδίσματος**

Πτυχιακή Εργασία

Σπινθάκη Σοφία

Υπεύθυνος Ερευνητής
Δρ. Πανταζής Αλέξανδρος

Υπεύθυνος Καθηγητής
Καθ. Ηλιόπουλος Ελευθέριος

Ηράκλειο Κρήτης

2021

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής, τον δρ.Πανταζή Αλέξανδρο, επιβλέπων ερευνητή, τον καθ.Ηλιόπουλο Ελευθέριο, υπεύθυνο καθηγητή και τον δρ.Κωνσταντινίδη Γεώργιο, για την ευκαιρία που μου έδωσαν, να δουλέψω μαζί τους και τη συνεργασία που είχαμε.

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

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον δρ.Kruse Jann Eike και την αδερφή μου, δρ.Σπινθάκη Αργυρώ.

Η δουλειά αυτή έγινε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Smart Insole (Τ1ΕΔΚ – 01888).

Σύνοψη

Οι αισθητήρες πίεσης διαθέτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, ξεκινώντας από την αυτοκινητοβιομηχανία και τη μετεωρολογία, μέχρι τη χρήση τους σε έξυπνα σπίτια, όπου μπορούν να ανιχνεύσουν την πτώση ενός ανθρώπου. Συγκεκριμένα, η ανίχνευση της πτώσης ή ακόμα και η πρόβλεψή της, αποτελούν μια τεχνολογία η οποία αναπτύσσεται ραγδαία και μπορεί να προσφέρει πολλές λύσεις και βοήθεια σε ανθρώπους, ανεξάρτητα από το αν εμφανίζουν κινητικές δυσκολίες ή όχι. Ανάμεσα σε αυτές τις βιοϊατρικές τεχνολογίες βρίσκεται και η ανάπτυξη νέων διαγνωστικών εργαλείων, όπως είναι η έξυπνη σόλα, της οποίας η χρήση μπορεί να προσφέρει ανάλυση βαδίσματος. Ωστόσο, για να είναι εφικτό μία σόλα να μπορεί να κάνει ανάλυση, θα πρέπει να έχει μία συστοιχία αισθητήρων πίεσης, οι οποίοι παρέχουν συνεχώς μία τιμή ανάλογη του φορτίου που δέχονται. Μία κατηγορία αυτών των αισθητήρων είναι οι χωρητικοί (αισθητήρες που βασίζονται σε διάταξη πυκνωτή). Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας, γρήγορης απόκρισης και διακριτικής τους ικανότητας, πολλές φορές πλεονεκτούν έναντι άλλων συστημάτων μέτρησης. Είναι όμως ευάλωτοι σε παρεμβολές από πεδία περιβάλλοντος και συχνά έχουν μεγάλο κόστος, λόγω των αναγκαίων εξωτερικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων λήψης κι επεξεργασίας σήματος.

Η είσοδος της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing, 3D printing) στην έρευνα, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη υλικών με αγωγίμες, διηλεκτρικές κι ελαστικές ιδιότητες, έδωσε νέες επαναστατικές δυνατότητες σχεδιαστικής και κατασκευαστικής ελευθερίας στην πρωτοτυποποίηση, καθώς πλέον μπορούν να παραχθούν βασικά ηλεκτρικά στοιχεία και κυκλώματα. Βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία, είναι ο πλήρης έλεγχος καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής, αλλά και δυνατότητα για δοκιμές και βελτιστοποίηση σε κάθε βήμα, με το ελάχιστο οικονομικό και χρονικό κόστος. Μπορούμε πλέον να κατασκευάσουμε ολοκληρωμένα συστήματα μέτρησης πίεσης με βάση χωρητικούς αισθητήρες, που να είναι ανταγωνιστικά τόσο σε κόστος κατασκευής όσο και σε αποτελεσματικότητα.

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός ενός 3D εκτυπωμένου (3DP) πυκνωτικού αισθητήρα πίεσης, με σκοπό τη μετέπειτα ανάπτυξη έξυπνης σόλας, δεκαέξι αισθητήρων, η οποία θα βασίζεται εξολοκλήρου σε 3D εκτύπωση. Για τη βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας σε

εύχρηστα μεγέθη διάταξης, δοκιμάστηκαν διαφορετικά νήματα, γεωμετρίες, διαστάσεις και ρυθμίσεις εκτύπωσης.

Στο πρώτο μέρος (Εισαγωγή) επισημαίνεται η σημασία ανάλυσης βαδίσματος και η μέχρι τώρα πρόοδος στη δημιουργία διαγνωστικών πελμάτων.

Στο δεύτερο μέρος (Μεθοδολογία, υλικά και διατάξεις), παρατίθενται οι εκτυπωτές, τα νήματα και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν. Περιγράφεται η διαδικασία εκτύπωσης, οι διατάξεις σταθερής πίεσης και προσομοίωσης βηματισμού. Αναλύεται η βαθμονόμηση του συστήματος μέτρησης χωρητικότητας με Arduino IDE.

Στη συνέχεια (Μετρήσεις και αποτελέσματα) εξετάζεται η εξάρτηση της συμπεριφοράς των πυκνωτών από τις διαστάσεις και το σχήμα τους, τα filaments και τις ρυθμίσεις εκτύπωσης, το χρόνο και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέτρησης. Παρουσιάζεται το τελικό μοντέλο αισθητήρα με τον προτιμότερο συνδυασμό απόκρισης, μεγέθους και ευκολίας κατασκευής, αλλά και οι χαρακτηριστικές καμπύλες φόρτωσης εκφόρτωσης δεκαέξι τέτοιων πυκνωτών.

Στο τελευταίο κεφάλαιο (Ανάλυση και σχολιασμός), υπολογίζονται χαρακτηριστικά μεγέθη πυκνωτή, γίνεται σχολιασμός της συμπεριφοράς τους, και παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δεκαέξι τελικών αισθητήρων.

Τέλος, παρατίθεται η Βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε, το Παράρτημα Α, με κάποια σχόλια για τη διαδικασία των μετρήσεων και το Παράρτημα Β, όπου βρίσκονται δύο κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις.

Πίνακας Περιεχομένων

Λίστα Εικόνων.....	6
Λίστα Πινάκων.....	6
Λίστα Γραφημάτων.....	7
ΜΕΡΟΣ I: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
I.1. Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....	11
I.1.a. Ανάλυση βαδίσματος.....	11
I.1.b. Φορετά πέλματα κι αισθητήρες πίεσης.....	12
I.1.c. Πυκνωτικοί αισθητήρες.....	14
I.1.d. 3D Printing και αισθητήρες.....	15
I.2.Ερευνητικές προκλήσεις.....	18
ΜΕΡΟΣ II: ΥΛΙΚΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	20
II.1.Εκτύπωση.....	20
II.1.a.Μέθοδος εκτύπωσης.....	20
II.1.b.Σχεδιαστικό λογισμικό.....	21
II.1.c. Εκτυπωτές και λογισμικό εκτύπωσης.....	21
II.1.d. Υλικά εκτύπωσης.....	22
II.2.Συστήματα μέτρησης.....	23
II.2.a. Μέτρηση χωρητικότητας με Arduino Nano – βαθμονόμηση συστήματος.....	23
II.2.b. Διάταξη στατικών μετρήσεων.....	26
II.2.c. Διάταξη δυναμικών μετρήσεων - προσομοίωση βαδίσματος.....	27
ΜΕΡΟΣ III: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	29
III.1.Δείγματα οπλισμών, διηλεκτρικών, ολοκληρωμένων αισθητήρων.....	29
III.2. Μετρήσεις στατικής διάταξης.....	32
III.2.a. Γεωμετρία, διαστάσεις, infill.....	32
III.2.b. Νήματα και shore A.....	42
III.2.c. Ολίσθηση στο χρόνο.....	43
III.2.d. Εξάρτηση από θερμοκρασία.....	45
III.3. Μετρήσεις δυναμικής διάταξης.....	49
III.3.a. Επαλήθευση και σύγκριση.....	49
III.3.b. Γήρανση.....	56
III.4.Το τελικό μοντέλο.....	57
ΜΕΡΟΣ IV: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	62
IV.1.Χαρακτηριστικά μεγέθη.....	62
IV.1.a.Χωρητικότητα ως προς επιφάνεια, πάχος, infill.....	62
IV.1.b.Σταθερότητα σε χρόνο και θερμοκρασία.....	65
IV.2.Απόκριση σε συχνότητες βηματισμού.....	66
IV.3.Το τελικό μοντέλο - συγκεντρωτικό.....	67
IV.5.Χαρακτηρισμός πέλματος.....	70
IV.6.Συμπεράσματα.....	72
Βιβλιογραφία και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	74
Παράρτημα Α.....	77
Παράρτημα Β.....	81

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Το μοντέλο του επίπεδου πυκνωτή

Εικόνα 2: Cura top view – no top layer

Εικόνα 3: Εικόνα από το εγχειρίδιο του Lulzbot

Εικόνα 4: Οι εκτυπωτές που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική ανάπτυξη των αισθητήρων και της έξυπνης σόλας

Εικόνα 5: Σύνδεση πυκνωτών στο μικροελεγκτή

Εικόνα 6: Θεωρητικό κύκλωμα μέτρησης χαμηλών χωρητικοτήτων με Arduino

Εικόνα 7: Διάταξη στατικών μετρήσεων

Εικόνα 8: Σχεδιάγραμμα διάταξης ελέγχου αυτοκίνητου εμβόλου

Εικόνα 9: Διάταξη δυναμικών μετρήσεων

Εικόνα 10: Δείγματα οπλισμών ProtoPasta – διηλεκτρικών FilaFlex 70A και δείγματα ολοκληρωμένου αισθητήρα, μονής εκτύπωσης

Εικόνα 11: Το τελικό μοντέλο (FlashForge)

Εικόνα 12: Slicing του αισθητήρα - στρώσεις 3, 8, 10, 13

Εικόνα 13: Δοκιμαστική εκτύπωση πέλματος

Εικόνα 14: Θόρυβος από ακατάλληλη τροφοδοσία

Εικόνα 15: Απόκριση σε πραγματικό χρόνο – μέτρηση ανά 250 msec και ανά 50 msec

Εικόνα 16: Παρασιτικό σήμα από επαφή αγώγιμου μέσου

Εικόνα 17: Διατομές ατελών εκτυπώσεων

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Αισθητήρες πιεζοαντίστασης εμπορίου

Πίνακας 2: Εμπορικά διαθέσιμες σόλες

Πίνακας 3: Αγωγή νήματα

Πίνακας 4: Ελαστικά νήματα/διηλεκτρικά

Πίνακας 5: Παράμετροι αισθητήρων – 1^η γενιά δειγμάτων: ProtoPasta & FilaFlex 70A

Πίνακας 6: Παράμετροι αισθητήρων – 2^η γενιά δειγμάτων: διάμετρος 15mm, πάχος 1.2mm

Πίνακας 7: Υπολογισμός διηλεκτρικής σταθεράς (FilaFlex 70A)

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηρισμού των 16 αισθητήρων 1

Πίνακας 9: Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηρισμού των 16 αισθητήρων 2

Πίνακας 10: Χαρακτηρισμός 3DP Πρωτοτύπου

Πίνακας 11: Σύγκριση 3DP Πρωτοτύπου με δύο εμπορικά πέλματα

Λίστα Γραφημάτων

Γράφημα 1: Σύγκριση μέτρησης εμπορικών πυκνωτών με καπασιτόμετρο και Arduino

Γράφημα 2α: Χωρητικότητες [C(pF)] σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού [d(mm)], για διάφορες επιφάνειες [A(cm²)] και infill A. 15%, B. 20%, Γ. 25%, Δ. 30%

Γράφημα 2β: Χωρητικότητες [C(pF)] σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού [d(mm)], για διάφορες επιφάνειες [A(cm²)] και infill E. 50%, ΣΤ. 70%, Ζ. 100%

Γράφημα 3α: Μεταβολή χωρητικότητας [C(pF)] σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού [d(mm)], για διάφορες επιφάνειες [A(cm²)] και infill A. 15%, B. 20%, Γ. 25%, Δ. 30%

Γράφημα 3β: Μεταβολή χωρητικότητας [C(pF)] σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού [d(mm)], για διάφορες επιφάνειες [A(cm²)] και infill E. 50%, ΣΤ. 70%, Ζ. 100%

Γράφημα 4: Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας ως προς πίεση, για διηλεκτρικά με 15% infill, μίας (1 bottom) και δύο (1 bottom – 1 top) συμπαγών στρώσεων

Γράφημα 5: Μεταβολή χωρητικότητας ως προς πίεση, για πάχος d διηλεκτρικού 1, 2 και 3mm, επιφάνεια A 1, 2.25, 4cm² και infill διηλεκτρικού 15, 20, 25, 30%

Γράφημα 6: Μεταβολή χωρητικότητας ως προς πίεση, για πάχος d διηλεκτρικού 0.6mm, επιφάνεια A 1, 2.25, 4cm² και infill διηλεκτρικού 15, 20, 25, 30 50, 70, 100%

Γράφημα 7: Σύγκριση μεταβολής χωρητικότητας συναρτήσει μεταβολής πίεσης, σε κυκλικούς, ελλειπτικούς και τετραγωνικούς πυκνωτές, για διηλεκτρικά πάχους/infill: 2mm/30% [A], 0.6mm/70 [B], 0.6mm/20% [Γ], 0.6mm/15% [Δ], 1mm/15% [Ε], 2mm/30% [ΣΤ]. Διηλεκτρικό Filaflex 70A, σπλισμοί ProtoPasta

Γράφημα 8: Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας ως προς πίεση, για διαφορετικό υλικό σπλισμού, πάχους 0.3mm και διαμέτρου 1.5cm. Διηλεκτρικά σκληρότητας 82A και πάχους 0.5mm

Γράφημα 9: Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας ως προς πίεση, για διαφορετικό υλικό διηλεκτρικού, πάχους 0.5mm. Οπλισμοί υλικού ProtoPasta, διαμέτρου 1.5cm και πάχους 0.3mm

Γράφημα 10: Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για 40min, υπό σταθερό φορτίο 14kg, για διαφορετικό υλικό οπλισμού, πάχους 0.3mm και διαμέτρου 1.5cm. Διηλεκτρικά σκληρότητας 95A και πάχους 0.6mm

Γράφημα 11: Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για 40min, υπό σταθερό φορτίο 14kg, για διαφορετικό υλικό διηλεκτρικού, πάχους 0.6mm. Οπλισμοί νήματος Eel, διαμέτρου 1.5cm και πάχους 0.3mm

Γράφημα 12: Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για 40min, υπό σταθερό φορτίο 14kg, για διαφορετικό υλικό διηλεκτρικού, πάχους 0.6mm. Οπλισμοί νήματος ProtoPasta, διαμέτρου 1.5cm και πάχους 0.3mm

Γράφημα 13: Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για 40min, υπό σταθερό φορτίο 14kg, για διαφορετικό υλικό διηλεκτρικού, πάχους 0.6mm. Οπλισμοί νήματος Electrifi, διαμέτρου 1.5cm και πάχους 0.3mm

Γράφημα 14: Χωρητικότητα σε συνάρτηση με το εφαρμοζόμενο φορτίο, για διαφορετικές θερμοκρασίες μέτρησης. Δείγμα ολοκληρωμένου πυκνωτή N_o 3: ProtoPasta – Filaflex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm

Γράφημα 15: Χωρητικότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, υπό σταθερό φορτίο 14kg. Δείγμα ολοκληρωμένου πυκνωτή N_o 5: ProtoPasta – Filaflex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm

Γράφημα 16: Ολίσθηση της μεταβολής χωρητικότητας (υπό μέγιστο φορτίο 14kg) του πυκνωτή, για διαφορετικούς χρόνους παραμονής στους 40°C. Ολοκληρωμένος πυκνωτής: ProtoPasta – Filaflex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm

Γράφημα 17: Χωρητικότητα σε συνάρτηση με το φορτίο, για διαφορετικούς χρόνους παραμονής στους 40°C. Ολοκληρωμένος πυκνωτής: ProtoPasta – Filaflex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm

Γράφημα 18: Ολίσθηση της μέγιστης ένδειξης (υπό φορτίο 14kg) του πυκνωτή, για διαφορετικούς χρόνους παραμονής στους 40°C. Ολοκληρωμένος πυκνωτής: ProtoPasta – Filaflex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm

Γράφημα 19: Απόκριση ολοκληρωμένου πυκνωτή (ProtoPasta – Filaflex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm) σε προσομοίωση βηματισμού φορτίου 0 ως 14kg, σε πραγματικό χρόνο

Γράφημα 20: Χωρητικότητα συναρτήσει της πίεσης για τον αισθητήρα: Protopasta – FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm

Γράφημα 21: Απόκριση αισθητήρα Protopasta – FilaFlex 70A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm, σε προσομοίωση βηματισμού φορτίου 12kg, σε πραγματικό χρόνο

Γράφημα 22: Απόκριση σε τυχαία χρονοεξαρτώμενη εφαρμοζόμενη πίεση (φορτίο 14kg) βηματισμού, σε πραγματικό χρόνο, αισθητήρων 70A [A] και 82A [B], διαστάσεων: συνολικό πάχος 1.1mm, διάμετρο 15mm, παχος διηλεκτρικού 0.5mm

Γράφημα 23: Απόκριση πυκνωτή (Protopasta - FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.1mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.5mm) σε προσομοίωση βηματισμού φορτίου 14kg, για λειτουργία διάρκειας 60min: στιγμιότυπα του 1^{ου} και 60^{ου} λεπτού

Γράφημα 24: Αρχική χωρητικότητα C_0 , μέγιστη χωρητικότητα C_f και μεταβολή χωρητικότητας ΔC , τελικού πυκνωτή, προς συνολικό χρόνο χρήσης, σε περίοδο 10 εβδομάδων: 60-120' λειτουργίας ανά εβδομάδα

Γράφημα 25: Χωρητικότητα προς πίεση, για φόρτωση και εκφόρτωση, των 16 αισθητήρων, με διαστάσεις: ολικό πάχος 1.2mm, πάχος οπλισμών 2·0.3mm, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος (κάτω οπλισμού) 14.5mm, ενεργός διάμετρος (πάνω οπλισμού) 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm

Γράφημα 26: Χωρητικότητα ανά επιφάνεια σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού, για διαφορετικές επιφάνειες και infill 15% [A], 20% [B], 25% [Γ]. Δείγματα τετραγωνικών οπλισμών Protopasta πάχους 0.3mm και διηλεκτρικών Filaflex 70A

Γράφημα 27: Αρχική χωρητικότητα C_0 , μέγιστη χωρητικότητα C_f και μεταβολή χωρητικότητας ΔC , τελικού πυκνωτή (ολικό πάχος 1.2mm, πάχος οπλισμών 2·0.3mm, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος κάτω οπλισμού 14.5mm, ενεργός διάμετρος πάνω οπλισμού 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm), για διαφορετικές συχνότητες βηματισμού[αριθμός βημάτων ανά λεπτό και ανά πόδι]

Γράφημα 28: Χωρητικότητα C_0 (pF) προς πίεση P (kPa), με φορά μεταβολής φόρτωσης (loading), για τους 16 τελικούς αισθητήρες: ολικό πάχος 1.2mm, πάχος οπλισμών $2 \cdot 0.3$ mm, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος (κάτω οπλισμού) 14.5mm, ενεργός διάμετρος (πάνω οπλισμού) 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm

Γράφημα 29: Μεταβολή χωρητικότητας ΔC (pF) προς πίεση P (kPa), με φορά μεταβολής φόρτωσης (loading), για τους 16 τελικούς αισθητήρες: ολικό πάχος 1.2mm, πάχος οπλισμών $2 \cdot 0.3$ mm, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος (κάτω οπλισμού) 14.5mm, ενεργός διάμετρος (πάνω οπλισμού) 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm

Γράφημα 30: Απόκριση σε περιοδική πίεση, αισθητήρα ελαττωματικής εκτύπωσης

ΜΕΡΟΣ Ι: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

I.1. Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

I.1.a. Ανάλυση βαδίσματος

Ανάλυση βαδίσματος είναι το σύνολο των τεχνικών καταγραφής και αξιολόγησης του συντονισμού του μυοσκελετικού συστήματος κατά τη διάρκεια κίνησης ή/και στάσης. Οι τεχνικές αυτές είναι διαγνωστικού χαρακτήρα και χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ανωμαλιών στη βάδιση, καθώς μπορεί να υποδεικνύουν νευρολογικά ή σκελετικά προβλήματα που επηρεάζουν την ικανότητα του ατόμου να κινείται([1],[2]). Η βάδιση επομένως, μπορεί να αποτελέσει ένα βιοδείκτη, τόσο για διάγνωση όσο και για πρόγνωση. Για το λόγο αυτό, οτιδήποτε παρεκκλίνει από το κλασικό μοτίβο βάδισης που έχει ένα άτομο, θεωρείται ανωμαλία, της οποίας τα αίτια πρέπει να διερευνηθούν. Οι πιο γνωστές κλινικές εφαρμογές της ανάλυσης βαδίσματος αποσκοπούν στην πρόληψη και το σχεδιασμό αγωγής και επανένταξης ασθενών με νευρομυικές διαταραχές, Parkinson, διαβητικού έλκους, μερικής εγκεφαλικής παράλυσης και άλλων παθολογικών διαταραχών([1],[3],[7]). Χρησιμοποιείται επίσης στην αθλητική βιομηχανία ως προπονητικό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων του αθλητή αλλά και για τον εντοπισμό προβλημάτων σχετικών με κίνηση ή στάση, σε άτομα με τραυματισμούς([25]).

Κατά τη διάρκεια της διάγνωσης μελετώνται μικρές κινήσεις όπως κλίση ή περιστροφή του ποδιού και η παράλληλη ή μη τοποθέτηση των πελμάτων[2]. Ειδικότερα για το ίχνος του πέλματος, οι ζητούμενες πληροφορίες είναι κατανομή πίεσης και επιφάνεια επαφής, κέντρο βάρους και συμμετρία των δύο πλευρών, ομαλότητα μεταφοράς βάρους[4].

Συνήθης εξέταση σε κλινική ή ιατρείο θεωρείται πως συχνά δεν αποδίδει μετρήσεις φυσιολογικού βαδίσματος, από τη στιγμή που ο εξεταζόμενος έχει επίγνωση των κινήσεών του όταν αξιολογείται. Αυτή η επίγνωση μπορεί να προκαλέσει αλλοιωμένη κίνηση που θα οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα([1],[4]). Αυτός ο παράγοντας σφάλματος στην κλινική εξέταση, καθώς και η μη προσβασιμότητά στο ευρύ κοινό, οδηγούν στην ανάγκη για φορητό εξοπλισμό καταγραφής, χαμηλού κόστους([5],[6],[7],[8]).

I.1.b. Φορετά πέλματα κι αισθητήρες πίεσης

Στον εξοπλισμό για ανάλυση βαδίσματος καθημερινής χρήσης ανήκουν τα φορετά πέλματα. Πρόκειται για συσκευές με ενσωματωμένους αισθητήρες πίεσης, που τοποθετούνται μέσα στο υπόδημα του χρήστη και μας δίνουν πληροφορίες, μεταξύ άλλων, για το ρυθμό βηματισμού, συνολικό αριθμό βημάτων, μέση και μέγιστη συνολική πίεση ή ανά περιοχή πέλματος. Τυπικές πιέσεις κάτω από το πέλμα είναι 80-100kPa, κατά τη στάση και 200-500kPa, κατά το βάδισμα[4].

Η μεγάλη πρόκληση στην κατασκευή τέτοιου φορετού εξοπλισμού έγκειται στη μετατροπή ενός εργαστηριακού προϊόντος σε ένα φιλικό προς το χρήστη, πράγμα που, κατά το σχεδιασμό – επιλογή υλικών, είδος αισθητήρα κ.τ.λ. - απαιτεί σωστή εκτίμηση των συνθηκών χρήσης του προϊόντος. Πιο ανθεκτικό σε βαριά χρήση πέλμα ή πιο αξιόπιστοι αισθητήρες, αν και προτερήματα, κατά βάση, μπορεί να συνεπάγονται αυξημένο κόστος και μειωμένη άνεση χρήσης([7],[8],[25]).

Αισθητήρας θεωρείται οποιαδήποτε συσκευή ανιχνεύει μεταβολή σε κάποιο φυσικό μέγεθος και το μετατρέπει σε μετρήσιμο σήμα. Σημαντικά χαρακτηριστικά για την επιλογή κατάλληλου αισθητήρα είναι: ακρίβεια, εύρος λειτουργίας, διακριτική ικανότητα, επαναληψιμότητα υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, επαναφορά έπειτα από συνθήκες κορεσμού, διάρκεια ζωής, κόστος, μέγεθος, βάρος, ταχύτητα απόκρισης, γραμμικότητα, υστέρηση, σταθερότητα. Αναλυτικότερα για κάποιες από αυτές τις ιδιότητες, σε επόμενο κεφάλαιο. Οι πιο συχνοί αισθητήρες πίεσης είναι οι πυκνωτικοί, οι πιεζοηλεκτρικοί και πιεζοαντίστασης([7],[8],[9]). Είναι απλοί στην αρχή λειτουργίας τους και οικονομικοί, όταν γίνεται μαζική παραγωγή τους.

Κάποιοι αισθητήρες που έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία, σε φορετό πέλμα είναι οι εμπορικοί αισθητήρες A401/301/201 Flexiforce, της Tekscan (αισθητήρες πιεζοαντίστασης), καθώς και ο FSR400 της Interlink (πιεζοηλεκτρικός). Επίσης, έχουν δοκιμαστεί μη εμπορικοί πυκνωτές με σπλισμούς από φύλλα χαλκού και διηλεκτρικό EMFIT Electroactive Ferroelectric Film, ή αγωγήμο ύφασμα ανίχνευσης (carbon-black/Si)([5],[6],[9],[25]). Στις περισσότερες εφαρμογές, ο αριθμός των αισθητήρων φτάνει τους 16 ανά πέλμα, όμως ανάλογα το είδος και τη διάταξή τους, αυτός ο αριθμός μπορεί να ξεπεράσει τους 100.

Στους παρακάτω πίνακες βρίσκονται ορισμένα εμπορικά διαθέσιμα πέλματα και οι πιο κοινοί εμπορικοί αισθητήρες πιεζοαντίστασης.

Πίνακας 1:
Αισθητήρες πιεζοαντίστασης εμπορίου

	μέγιστο φορτίο (N)	διάμετρος (mm)	πάχος (mm)	κόστος
DF9-40 (Leanstar)	200	7.5	0.25	2.50€
FSR	100	12.5	0.5	9.00€
FlexiForce (Tekscan)	445	9.5	0.2	16.00€

Πίνακας 2:
Εμπορικά διαθέσιμες σόλες

πέλμα	καλωδίωση	αριθμός αισθητήρων	πάχος (mm)	είδος αισθητήρα	εύρος μέτρησης	διακριτική ικανότητα
ActiveGait (Simbex LLC, Lebanon)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	15	δδ	πιεζοαντίστασης	δδ	δδ
Biofoot (IBV, Spain)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	64	0.7	πιεζοηλεκτρικός	0-500kPa*	0.1kPa
CDG (Infotronic, Netherlands)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	8	δδ	χωρητικός	0-3000N	2.5N
Dynafoot2 (Technoconcept, France)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	δδ	2	πιεζοαντίστασης	0-490kPa	δδ
F-scan (Tekscan, USA)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	960	0.18	πιεζοαντίστασης	345-862kPa	δδ
FlexinFit (Sensormedica, Italy)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	216	1	πιεζοαντίστασης	0-1000kPa	1kPa
Footwork in-shoe (Amcube, UK)	ασυρματο	80	1.2	χωρητικός	0-1200kPa	δδ
LogR (ORPYX, Canada)	ασυρματο	37	δδ	πιεζοαντίστασης	0-517kPa	δδ
Parotec (Paromed, Germany)	ασυρματο	32	2.5	hydrocells	0-600kPa	δδ

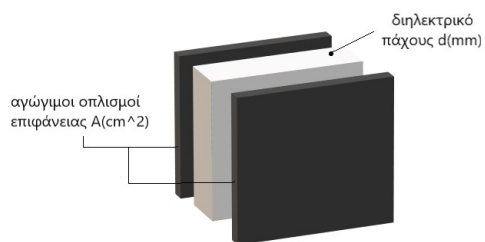
Pedar (Novel, Germany)	ασυρματο	85-99	1.9	χωρητικός	30- 1200kPa	5kPa
Runalyser (TNO , Netherlands)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	8	δδ	χωρητικός	δδ	δδ
Moticon (Moticon, Germany)	ασύρματο	16	2.8- 10.5	χωρητικός	0-500kPa*	2.5kPa
W-inshoe Easy (Medicapteurs, France)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	8	0.5	πιεζοαντίστασης	0-784kPa	δδ
Walkinsense (Kinematix, Portugal)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	85-99	δδ	πιεζοαντίστασης	δδ	δδ
Wlan insole (Medilogic, Germany)	εξωτερικά ηλεκτρονικά	240	δδ	πιεζοαντίστασης	0-640kPa	δδ

*Εύρος βαθμονόμησης

**δδ – Δεν είναι διαθέσιμη η πληροφορία

I.1.c. Πυκνωτικοί αισθητήρες

Οι πυκνωτικοί αισθητήρες έχουν το πλεονέκτημα ότι αποτελούν ένα παθητικό στοιχείο και δεν ολισθαίνει το σήμα, κατά τη διάρκεια καταγραφής δεδομένων. Το μοντέλο του επίπεδου πυκνωτή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1: Το μοντέλο του επίπεδου πυκνωτή

Η χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή:

$$C = \epsilon_r \cdot A \cdot d^{-1} \quad (1)$$

όπου A – η επιφάνεια επικάλυψης των οπλισμών που, d – το πάχος του διηλεκτρικού (απόσταση οπλισμών σε μηδενική συμπίεση). Η διηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού ϵ_r ισούται με το γινόμενο της διηλεκτρικής επιδεκτικότητας του κενού $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m επί την αδιάστατη διηλεκτρική σταθερά κ του υλικού. Γίνεται κατανοητό, με βάση τη σχέση (1) πως η χωρητικότητα εξαρτάται αποκλειστικά από την επιλογή υλικών και διαστάσεων.

Σε συνήθεις εφαρμογές με μεταβλητούς πυκνωτές μπορεί να αλλάζει μηχανικά η απόσταση των οπλισμών, η επιφάνεια επικάλυψης των οπλισμών (πχ. στοιχεία ηλεκτρονικών πλακετών για ρύθμιση συχνότητας - συντονισμό), ή το διηλεκτρικό υλικό (πχ. αισθητήρες στάθμης υγρού ή ανίχνευσης αερίων) και κατά συνέπεια η διηλεκτρική σταθερά κ . Η λειτουργία αισθητήρα πίεσης βασίζεται στην απλή σκέψη ότι μία δύναμη εφαρμόζεται κάθετα στο επίπεδο του αισθητήρα, μειώνοντας την απόσταση των οπλισμών, μεταβάλλοντας την πυκνότητα του διηλεκτρικού, άρα και τη σταθερά κ . Διαφορετικής σκληρότητας και αντοχής υλικά, θα έχουν ως αποτέλεσμα να μας δώσουν διαφορετικό εύρος λειτουργίας σε χωρητική διάταξη αισθητήρα. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξει πηγή εσφαλμένων μετρήσεων, το οποίο είναι είτε μεταβολές στη διηλεκτρική σταθερά από περιβαλλοντικές συνθήκες ή από μόνιμη παραμόρφωση του διηλεκτρικού.

Τέτοιοι αισθητήρες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές φορετών ή εμφυτευμένων συσκευών ([21]) και οι συνήθεις τιμές τους είναι 50pF - 100pF, με μεταβολή μερικά pF.

I.1.d. 3D Printing και αισθητήρες

Η κατά παραγγελία παραγωγή φορετού εξοπλισμού με συνήθεις κατασκευαστικές τεχνικές επισύρει αυξημένο κόστος τελικού προϊόντος. Αυτό έρχεται να αντιμετωπίσει ο ραγδαία αναπτυσσόμενος κλάδος του 3D printing, σε μικρού και μεγάλου όγκου παραγωγές. Τεχνολογίες 3DP χρησιμοποιούνται ήδη για τη δοκιμή καινοτόμων σχεδίων αισθητήρων (πιεζοηλεκτρικών/ χωρητικών/ πιεζοαντίστασης/ αυτεπαγωγής κ.α) αφής, μαγνητικού πεδίου, υπερήχων, τάσης, πίεσης, περιβάλλοντος, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον προς εφαρμογές βιοϊατρικής, συστημάτων διεπαφής χρήστη, ανίχνευσης υλικού([20],[21], [22]). Η μέχρι τώρα έρευνα και η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης, έχει αρχίσει να ανοίγει

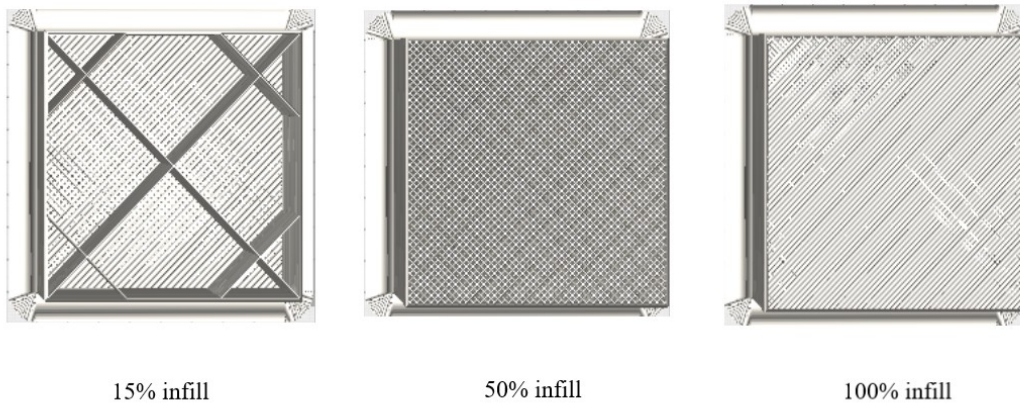
κατασκευαστικές δυνατότητες έξω από τα αυστηρά όρια των αισθητήρων χωρητικότητας με τεχνολογία Si.

Οι ρυθμίσεις εκτύπωσης επηρεάζουν τις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών([24]). Μία εκτύπωση με 100% γέμιση (ως γέμιση ή infill ορίζουμε το πόσο συμπαγές είναι ένα στερεό) θα προσεγγίζει αλλά δεν θα ταυτίζεται με το υλικό και τις ιδιότητές του προ εκτύπωσης, λόγω συρίκνωσης των στρώσεων του δείγματος κατά την ψύξη. Αναμένεται, μία εκτύπωση 100% infill, να παρουσιάσει ως και 15% αραίωση([14]). Σε μία εκτύπωση υψηλότερης ταχύτητας από την προτεινόμενη ενδέχεται να μη γίνει ομαλή εξώθηση του υλικού από την κεφαλή και να παγιδευτούν φυσαλίδες αέρα ανάμεσα στις στρώσεις, ελαττώνοντας τη συνοχή και κατά συνέπεια την αντοχή του αντικειμένου([12]). Βέλτιστη ταχύτητα εκτύπωσης θεωρείται 10mm/s για την πρώτη στρώση και 20mm/s για τις υπόλοιπες, ενώ το πάχος στρώσης να μην ξεπερνάει το 80% της διαμέτρου του ακροφύσιου της κεφαλής([14]). Η μηχανική αντοχή επηρεάζεται και από το ύψος κάθε στρώσης, τον αριθμό των συμπαγών πάνω και κάτω στρώσεων, την πυκνότητα του υλικού, τη γέμιση (infill%) του στερεού και μοτίβο infill, για μη συμπαγή δείγματα. Μείωση του ποσοστού infill έχει ακόμα μετρηθεί να προκαλεί αισθητή μείωση στη διηλεκτρική σταθερά του υλικού(κ_{solid}): πάνω από 0.5 μονάδες για μεταβολή από 40% σε 100% infill, για νήμα NinjaFlex([13]), 1.29 μονάδες αύξηση του κ για μεταβολή από 65% σε 95% infill, για νήμα Premix TP20280([11]) και πάνω από 5 μονάδες αύξηση του κ για μεταβολή από 20% σε 100% infill, για νήμα Premix TP20907([14]). Αυτό περιγράφεται από τη σχέση 2:

$$\kappa = \text{infill} \cdot \kappa_{\text{solid}} + (1 - \text{infill}) \cdot \kappa_{\text{air}} \quad (2)$$

([11]), και συμβαίνει λόγω του μεγάλου ποσοστού αέρα, στα δείγματα με χαμηλό infill, που έχει τη χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά ($\kappa_{\text{air}} \approx 1$). Το ύψος στρώσης επίσης επηρεάζει τη διηλεκτρική σταθερά του δείγματος, με το παχύτερο να οδηγεί σε τιμές που προσεγγίζουν καλύτερα αυτή του υλικού νήματος πριν την εκτύπωση. Έχει μετρηθεί για υλικό με διηλεκτρική σταθερά πριν την εκτύπωση $\kappa = 10$, σε δείγματα ύψους στρώσης 0.4mm $\rightarrow \kappa = 9.06$ ενώ σε δείγματα ύψους στρώσης 0.15mm $\rightarrow \kappa = 8.4$ ([14]).

Infill pattern: grid



Εικόνα 2: Cura top view – no top layer

Αυτές οι κατασκευαστικές δυνατότητες κάνουν ιδιαίτερα εύχρηστους τους αισθητήρες με συνδυασμό αγώγιμων και διηλεκτρικών υλικών, αφού τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους μπορούν να διαφοροποιηθούν με απλές ρυθμίσεις κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Πυκνωτικοί αισθητήρες πίεσης μπορούν να τυπωθούν με σπλισμούς από αγώγιμο νήμα και διηλεκτρικό από νήμα χαμηλής σκληρότητας και η ευαισθησία του αισθητήρα μπορεί να ρυθμιστεί αυξάνοντας ή μειώνοντας το ποσοστό infill. Έχει παρατηρηθεί σε μελέτη μη μεταβλητών 3DP πυκνωτών, η χωρητικότητα να παρουσιάζει γραμμική αύξηση με την αύξηση επιφάνειας των σπλισμών και του αριθμού πλακών σπλισμού (n), ελαφριά μείωση με την αύξηση στο πάχος σπλισμού, ενώ δε βρέθηκε συσχέτιση της επιφάνειας με τη διηλεκτρική σταθερά([16],[12]).

Ο κύριος όγκος της υπάρχουσας μελέτης πάνω σε 3DP πυκνωτικούς αισθητήρες δεν αφορά αμιγώς εκτυπωμένους, αλλά συνδυασμού τεχνικών παρασκευής([15],[20]). Η εκτύπωση δείγματος δύο υλικών παρουσιάζει δυσκολίες, όταν πρόκειται για νήματα που απαιτούν διαφορετικές ρυθμίσεις εκτύπωσης. Συγκεκριμένα για δομές αγώγιμου-διηλεκτρικού νήματος, κύρια πρόκληση είναι η αποφυγή μίξης των υλικών, που θα προκαλέσει είτε βραχυκύκλωμα είτε διακοπή της αγώγιμης διαδρομής([12],[16]). Μεταβλητοί πυκνωτές, είτε εξ ολοκλήρου εκτυπωμένοι είτε με συνδυασμό μεθόδων και υλικών, παρουσιάζουν χωρητικότητα μερικών δεκάδων pF και μεταβολή μερικές εκατοντάδες fF ως μερικές δεκάδες pF ([23]) σε εφαρμοζόμενη δύναμη ως 200N, για διαστάσεις ως

$6\text{cm}^2 \cdot 0.2\text{ mm}$. Το 2017 δημοσιεύτηκε η κατασκευή αμιγώς 3DP μεταβλητού πυκνωτή, με 160fF μεταβολή χωρητικότητας, σε εφαρμοζόμενη πίεση 280kPa([15]).

1.2.Ερευνητικές προκλήσεις

Πολλές έρευνες έχουν δείξει πως η ευαισθησία των φορετών πελμάτων πίεσης χειροτερεύει μετά από λίγες χρήσεις, επηρεάζοντας την αξιοπιστία των ενδείξεων, με το σχήμα και την ένταση των καμπυλών απόκρισης να αλλάζουν σημαντικά. Τίθεται έτσι υπό ανάγκη διερεύνησης η ανθεκτικότητα κι επαναληψιμότητα, που είναι ουσιώδη για τη συλλογή δεδομένων και τη μελέτη κίνησης του μυοσκελετικού συστήματος. Πιθανή λύση κάποιων απ' τα παραπάνω προβλήματα, μπορεί να είναι η συχνή βαθμονόμηση, η οποία όμως θα είναι πρακτική μόνο αν γίνεται με τρόπο τέτοιο που να μην περιπλέκει τη διεπαφή με το χρήστη. ([19])

Εδώ, θα προσπαθήσουμε ν' απαντήσουμε σ' αυτές τις προκλήσεις, ξεκινώντας από το πρωταρχικό δομικό στοιχείο: τον αισθητήρα. Μεγέθη που θα μας απασχολήσουν για την αξιολόγησή του, είναι τα παρακάτω.

- Εύρος λειτουργίας: Τα όρια τιμών του μετρούμενου μεγέθους και των περιβαλλοντικών συνθηκών, εντός των οποίων μπορεί η συσκευή να λειτουργεί αξιόπιστα.
- Ευαισθησία: Η μεταβολή σήματος εξόδου ανά μονάδα μεταβολής σήματος εισόδου.
- Υστέρηση: Η διαφορά στην καμπύλη απόκρισης, όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Ο πυκνωτής αναμένεται να επανέρχεται πιο αργά στην αρχική του θέση όταν αυξάνεται το εφαρμοζόμενο φορτίο, απ' ότι να συμπιέζεται, όταν το φορτίο μειώνεται. Αυτό αντιστοιχεί σε διαφορετικές καμπύλες απόκρισης, για τις δύο φάσεις του βηματισμού, και η χαρτογράφηση βάδισης θα ήταν ελλιπής χωρίς μία απ' τις δύο.
- Ακρίβεια: Το μέγιστο σφάλμα στην ένδειξη. Σφάλμα θα θεωρείται αυτό του μετρητικού συστήματος, όταν είναι μεγαλύτερο από την τυπική απόκλιση των μετρήσεων.
- Διακριτική ικανότητα: Η ελάχιστη μεταβολή στο εισερχόμενο σήμα που μπορεί να ανιχνευτεί στην έξοδο.
- Ολίσθηση: Η τάση του αισθητήρα να μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του, λόγω χρόνου ή των περιβαλλοντικών συνθηκών.

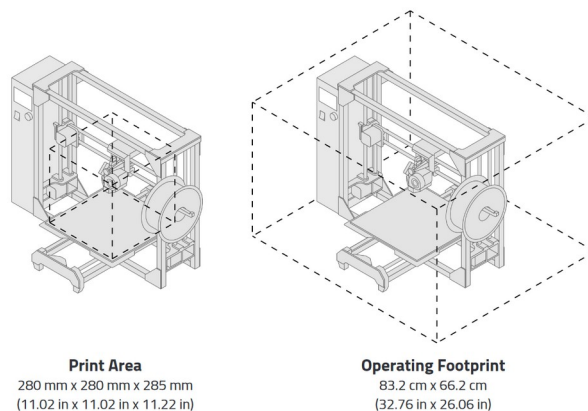
Στόχος μας είναι η ανάπτυξη του αισθητήρα που θα υποστηρίζει όσο καλύτερα τα παραπάνω χαρακτηριστικά και θα μπορεί να ενσωματωθεί σε πέλμα, ιδανικά σε μία κατασκευαστική προσέγγιση του ενός σταδίου, και με σχεδίαση ειδικευμένη στις ανάγκες του κάθε χρήστη/ασθενή.

ΜΕΡΟΣ ΙΙ: ΥΛΙΚΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

ΙΙ.1.Εκτύπωση

ΙΙ.1.α.Μέθοδος εκτύπωσης

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



Εικόνα 3: Εικόνα από το εγχειρίδιο του Lulzbot

II.1.b. Σχεδιαστικό λογισμικό

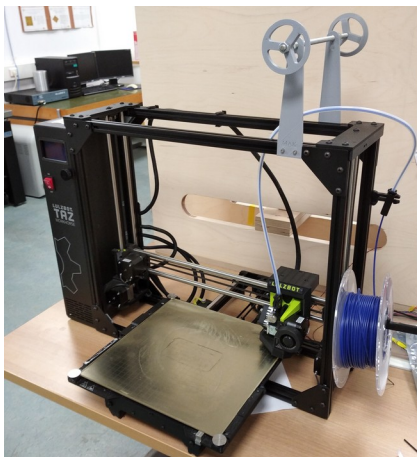
Τα δείγματα σχεδιάστηκαν στο OpenSCAD, μία εφαρμογή ανοιχτού λογισμικού για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων και στο Fusion (Autodesk, USA).

II.1.c. Εκτυπωτές και λογισμικό εκτύπωσης

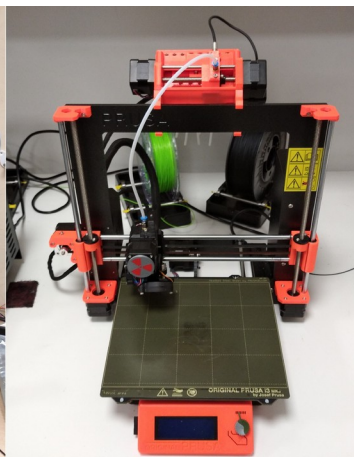
Για την εκτύπωση των δειγμάτων οπλισμών και διηλεκτρικών, χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Lulzbot Taz Workhorse (Aleph, USA) και ο εκτυπωτής Prusa i3 MK3S (Prusa Research, Czechia).

Για την εκτύπωση ενιαίων 3DP πυκνωτών χρησιμοποιήθηκε ο Flashforge Creator Pro (Flashforge, China).

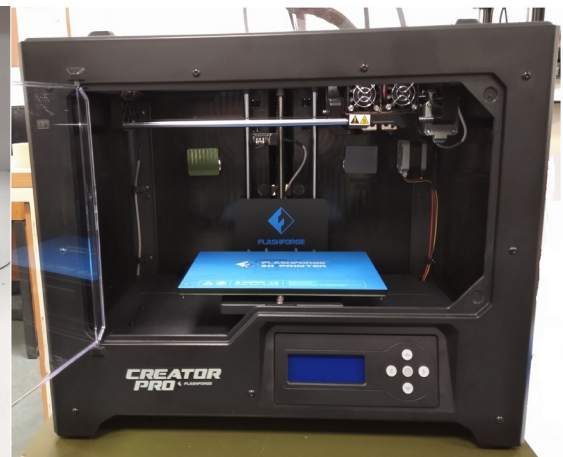
Αντίστοιχα, ο κάθε εκτυπωτής έχει το δικό του λογισμικό, το οποίο ονομάζεται slicer.



Lulzbot Taz Workhorse



Prusa i3



Flashforge Creator Pro

Εικόνα 4: Οι εκτυπωτές που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική ανάπτυξη των αισθητήρων και της έξυπνης σόλας

II.1.d. Υλικά εκτύπωσης

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών για το στήσιμο του συστήματος μέτρησης, και προς διερεύνηση του αναμενόμενου εύρους τιμών, χρησιμοποιήθηκαν απλές πυκνωτικές διατάξεις από πλακέτα χαλκού (οπλισμοί) και ελαστικό ύφασμα neoprene (διηλεκτρικό). Για τα 3D printed μοντέλα, δοκιμάστηκαν τα παρακάτω νήματα.

Πίνακας 3:
Αγώγιμα νήματα

	υλικά	ειδική αντίσταση $\Omega \cdot \text{cm}$	Θερμοκρασία εκτύπωσης ($^{\circ}\text{C}$)	θερμοκρασία τράπεζας ($^{\circ}\text{C}$)	σημείο τήξης
Electrifi (MULTY3D)	polyester/ copper	0.012	130-160	-	60 $^{\circ}\text{C}$
ProtoPasta (ProtoPlant)	PLA/ carbon black	6	215-230	50	195 $^{\circ}\text{C}$
Eel (NinjaTek)	TPU/ carbon black	-	220-230	40	-

Πίνακας 4:
Ελαστικά νήματα/διηλεκτρικά

	θερμοκρασία εκτύπωσης ($^{\circ}\text{C}$)	δείκτης σκληρότητας (A)	θερμοκρασία τράπεζας ($^{\circ}\text{C}$)	σημείο τήξης ($^{\circ}\text{C}$)	softening T($^{\circ}\text{C}$)
TPU 98 (real filament)	230-250	98A	100	215	90
Easy print Flex 95A	180-230	95A	-	-	-
Flexfill TPE 90 (fillamentum)	225-245	90A	-	-	-
Flexmark 9 TPU (Aldrich)	225-245	93A	45	-	-
Filaflex TPE 82 (recreus 3D)	215-250	82A	-	-	-

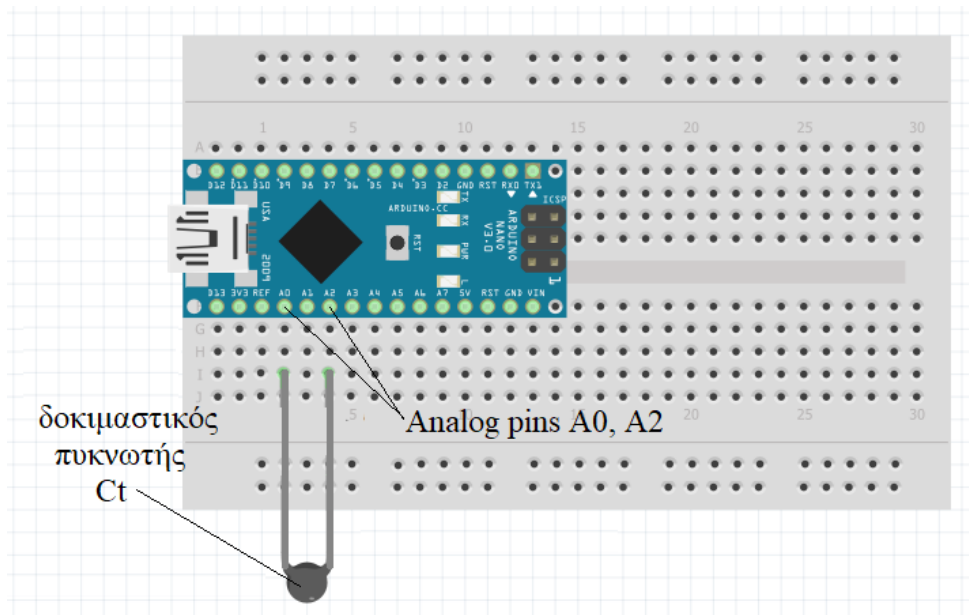
Flexmark 8 TPU (Aldrich)	225	81A	45	-	-
Flexability TPE-HP (Aldrich)	240	74A	95	134	-
Ultraflexx TPE-E (Aldrich)	225	74A	45-95	-	175
Flexmark 7 TPU (Aldrich)	225	70A	45	-	-
Filaflex TPE Ultrasoft 70A (recreus 3d)	215-235	70A	40	195	90

II.2.Συστήματα μέτρησης

II.2.a. Μέτρηση χωρητικότητας με Arduino Nano – βαθμονόμηση συστήματος

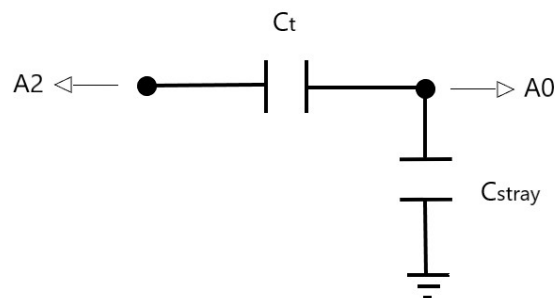
Ο κύριος όγκος των μετρήσεων έγινε με Arduino Nano, μικροελεγκτή Atmega328 και οι αποκρίσεις των τελικών αισθητήρων επαληθεύτηκαν με capacitance meter ακρίβειας $\pm 0.1\text{pF}$.

Για το σκίτσο που χρησιμοποιήθηκε (ανάπτυξη από τον Jonathan Nethercott, Software Engineer), δεν απαιτείται εξωτερικό κύκλωμα και ο μετρούμενος πυκνωτής C_t συνδέεται απευθείας σε δύο αναλογικές θύρες (πχ, A2 και A0).



Εικόνα 5: Σύνδεση πυκνωτών στο μικροελεγκτή

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας, η λογική του συγκεκριμένου κώδικα υποθέτει το παρακάτω εικονικό κύκλωμα:



Εικόνα 6: Θεωρητικό κύκλωμα μέτρησης χαμηλών χωρητικοτήτων με Arduino

Ο C_{stray} είναι οι εσωτερικές παρασιτικές χωρητικότητες της πλακέτας. Στην A2 δίνονται 5V και μετράται η τάση στην A0. Από ανάλυση κυκλώματος, φαίνεται ότι

$$V_{A0} = V_{A2} \cdot C_t / (C_t + C_{\text{stray}}) \quad (3)$$

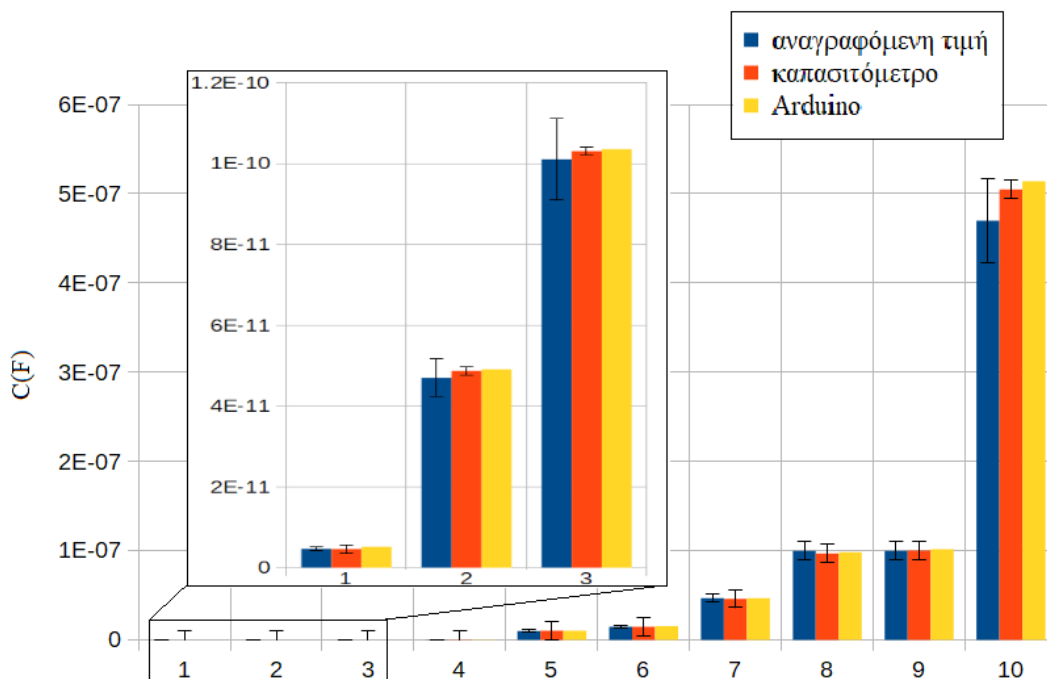
απ' όπου υπολογίζεται η C_t . Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι ότι μας επιτρέπει να μετράμε μικρότερες χωρητικότητες με ακρίβεια.

Πριν ξεκινήσουμε λοιπόν να μετράμε τους πειραματικούς πυκνωτές μας, πρέπει να βαθμονομήσουμε το σκίτσο χρησιμοποιώντας εμπορικούς πυκνωτές και καπασιτόμετρο: Εφαρμόζουμε τον παραπάνω τρόπο για να μετρήσουμε πυκνωτή με γνωστή τιμή. Από τη σχέση (2), χρησιμοποιούμε ως C_t , το σταθερό πυκνωτή, τη μέγιστη ADC τιμή (1023) που αντιστοιχεί στα 5V, ως V_{A2} , και την ADC που μετρήσαμε ως V_{A0} . Έτσι υπολογίζουμε τη C_{stray} και διορθώνουμε την υπάρχουσα τιμή της στο σκίτσο. Είναι προτιμότερο ως γνωστή τιμή εμπορικού πυκνωτή να μη χρησιμοποιήσουμε την αναγραφόμενη, αλλά τη μέτρηση από το καπασιτόμετρο, για να αποφύγουμε τις αποκλίσεις λόγω μεγάλης ανοχής.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι συγκρίσεις μέτρησης εμπορικών πυκνωτών με το καπασιτόμετρο και με το Arduino, μετά τη διόρθωση:

Γράφημα 1:

Σύγκριση μέτρησης εμπορικών πυκνωτών με καπασιτόμετρο και Arduino

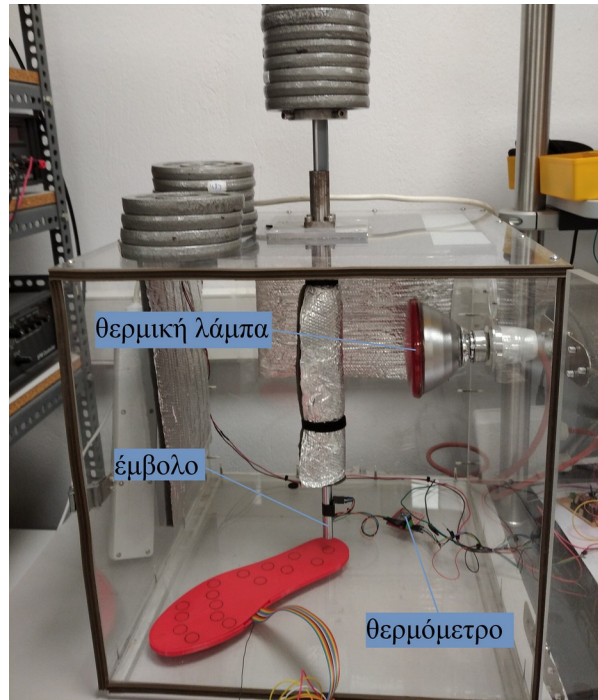


Οι μπάρες σφαλμάτων στο διάγραμμα είναι η ποσοστιαία ανοχή, για τις αναγραφόμενες τιμές και το σφάλμα οργάνου για τις μετρήσεις με καπασιτόμετρο. Οι μετρήσεις με Arduino είναι εντός του σφάλματος του καπασιτομέτρου, για όλους τους πυκνωτές.

Στο παράρτημα υπάρχει ο κώδικας μετά τις αλλαγές που έγιναν με σκοπό την αυτοματοποίηση της διαδικασίας, για λόγους μεγιστοποίησης του ρυθμού μετρήσεων και την ελαχιστοποίηση στατιστικού σφάλματος.

II.2.b. Διάταξη στατικών μετρήσεων

Μετά τον τρόπο να μετράμε μεταβολές σε μικρές χωρητικότητες, επόμενο βήμα είναι η χρήση μίας διάταξης που να αλλάζει με γνωστό τρόπο την εφαρμοζόμενη στο δείγμα πίεση. Το δείγμα θα τοποθετείται σε κουτί από plexiglass εσωτερικά επενδυμένο με ανακλαστική επιφάνεια, ανθεκτική στη θερμότητα. Σε άνοιγμα στο πλάι, προσαρμόζεται μία θερμική λάμπα, με το τόξο του φακού της στραμμένο μακριά απ' το δείγμα, ώστε η θερμότητα να φτάνει σ' αυτό, από τον περιβάλλοντα χώρο του κουτιού και όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα. Από άνοιγμα στο πάνω μέρος, διέρχεται έμβολο στο οποίο στο οποίο μπορούν να προσαρτηθούν μάζες – εδώ θα χρησιμοποιήσουμε 28 μάζες των 500 gr. Στο κάτω μέρος του εμβόλου προσαρμόζεται πλαστικό άκρο με εμβαδόν κατάλληλο ώστε να ισοκατανέμεται η πίεση σε όλη την επιφάνεια του εκάστοτε δείγματος. (Σχεδιασμός και κατασκευή διάταξης κ. Χριστοδουλάκη Γιώργου)

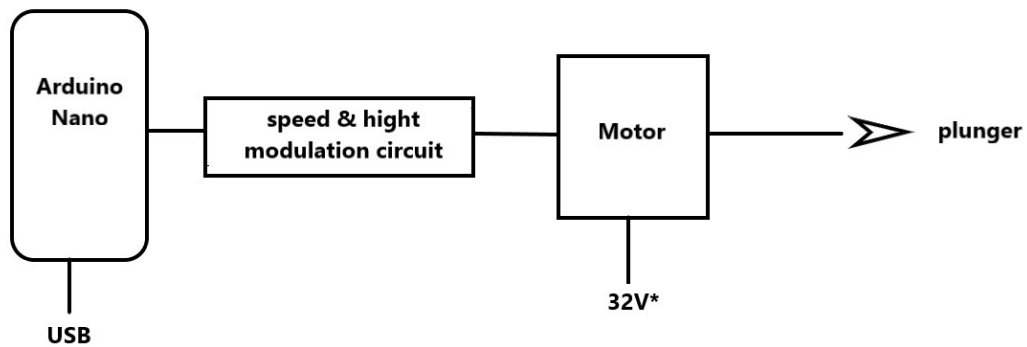


Εικόνα 7: Διάταξη στατικών μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια των θερμικών μετρήσεων, η θερμοκρασία κρατείται σταθερή στην εκάστοτε επιθυμητή τιμή από σύστημα λάμπας – θερμομέτρου.

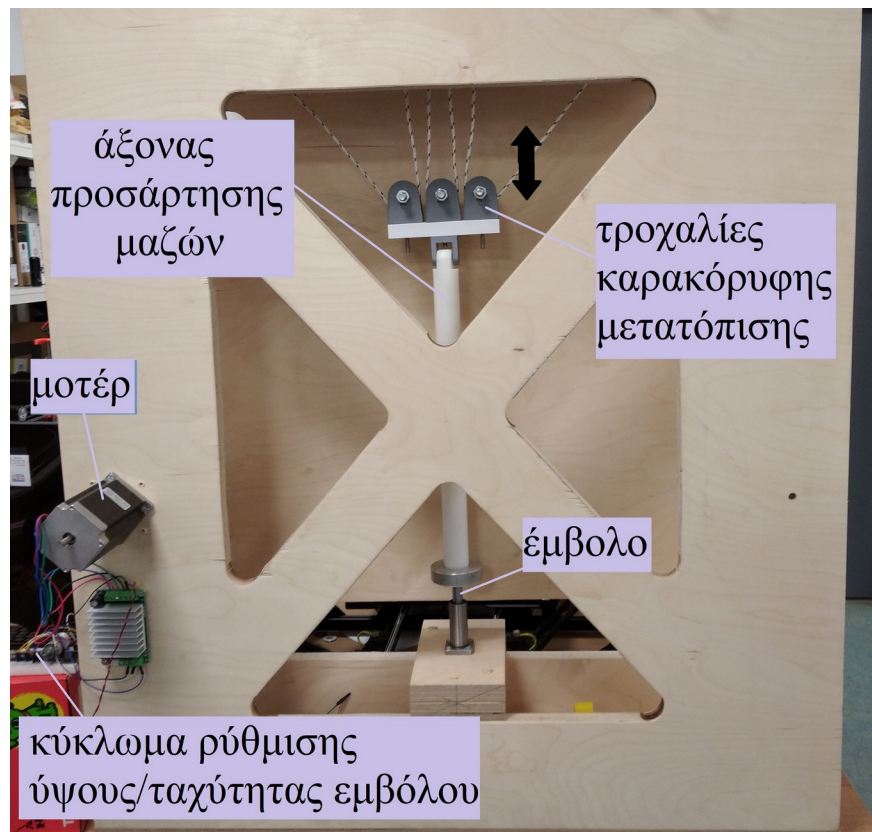
II.2.c. Διάταξη δυναμικών μετρήσεων - προσομοίωση βαδίσματος

Για τις μετρήσεις προσομοίωσης βαδίσματος, το έμβολο προσαρτάται μέσω συστήματος τροχαλιών, σε μοτέρ, ελεγχόμενο από Arduino. Μπορούμε να ρυθμίζουμε σε πραγματικό χρόνο την κίνηση του εμβόλου, ταχύτητα και γωνία περιστροφής του μοτέρ, από δύο ηλεκτρικούς ροοστάτες. Η συχνότητα βηματισμού εμφανίζεται σε LCD, ως βήματα ανά λεπτό ανά πόδι. (Σχεδιασμός και κατασκευή διάταξης κ. Μακρή Γιώργου)



*depending on the motor

Εικόνα 8: Σχεδιάγραμμα διάταξης ελέγχου εμβόλου



Εικόνα 9: Διάταξη δυναμικών μετρήσεων. Το κύκλωμα ρύθμισης καθορίζει την ταχύτητα του εμβόλου μέσω κινητήρα, με τη χρήση τροχαλιών, για κατακόρυφη μετατόπιση του φορτίου.

ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

ΙΙΙ.1. Δείγματα οπλισμών, διηλεκτρικών, ολοκληρωμένων αισθητήρων

Πρώτο μέλημα είναι η διερεύνηση της απόκρισης στις διάφορες διαστάσεις, με στόχο την ελαχιστοποίησή τους. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν (§ΙΙΙ.2.α) ήταν οπλισμών ProtoPasta και διηλεκτρικού FilaFlex 70A, τα οποία εκτυπώνονταν ξεχωριστά. Μετά την εκτύπωση, κολλάμε καλώδια στην εξωτερική πλευρά κάθε οπλισμού για την σύνδεση στο μικροελεγκτή. Οι οπλισμοί σε αυτό και στα επόμενα βήματα, τυπώθηκαν με infill 100%. Για τα διηλεκτρικά δοκιμάστηκαν: infill με 15, 20, 25, 30, 50, 70, 100%, και συνολικό πάχος (διηλεκτρικού) 0.6, 1, 2, 3, 4mm. Δοκιμάστηκε επίσης διαφορετικός αριθμός συμπαγών στρώσεων κορυφής και βάσης, στα διηλεκτρικά δείγματα με infill χαμηλότερο του 100%, αλλά και επιφάνειες διαφορετικών εμβαδών A – κυκλικοί και ελλειπτικοί - με έμφαση στους τετράγωνους (1x1), (1.5x1.5) και (2x2)cm².

Πίνακας 5:

Παράμετροι αισθητήρων – 1^η γενιά δειγμάτων: ProtoPasta & FilaFlex 70A

Ομάδα 1				
συμπαγείς στρώσεις διηλεκτρικού	infill% διηλεκτρικού	πάχος διηλεκτρικού d(mm)	τετραγωνική επιφάνεια A(cm ²)	πάχος οπλισμού (mm)
1	15	1	1	0.3
1&1		2	2.25	
		3	4	
Ομάδα 2				
συμπαγείς στρώσεις διηλεκτρικού	infill% διηλεκτρικού	πάχος διηλεκτρικού d(mm)	τετραγωνική επιφάνεια A(cm ²)	πάχος οπλισμού (mm)
1&1	15	0.6*	1	0.3
	20	1	2.25	
	25	2	4	
	30	3		
	50			
	70			
	100			

Ομάδα 3.α κυκλικοί				
συμπαγείς στρώσεις διηλεκτρικού	infill% διηλεκτρικού	ακτίνα (cm)	πάχος οπλισμού (mm)	πάχος διηλεκτρικού d(mm)
1&1	15	0.75	0.3	0.6
	20	1		1
	30			2
	70			
Ομάδα 3.β ελλειπτικοί				
		ημιάξονες (cm)		
1	15	1.5-2	0.3	0.6
	20			
	30			
	70			

*Τα διηλεκτρικά πάχους 0.6mm έχουν πάντα 1 συμπαγή στρώση

**Συμπαγείς στρώσεις είναι οι στρώσεις κατά τη διάρκεια της 3D εκτύπωσης, όπου το infill του υλικού είναι πάντα 100%, ακόμα και αν ο χρήστης έχει επιλέξει κάτι άλλο. Πρόκειται για περιφερειακές επιφάνειες που περιλαμβάνουν τη γεωμετρική δομή.

Στη συνέχεια (§III.2.b, §III.2.c), έγινε σύγκριση απόκρισης διαφορετικών νημάτων, για την επιλογή των υλικών με το συνδυασμό μεγαλύτερης μεταβολής χωρητικότητας και σταθερότητας στο χρόνο. Χρησιμοποιήθηκαν όλα τα νήματα, για την εκτύπωση κυκλικών οπλισμών πάχους 0.3mm και διηλεκτρικών 0.6mm, διαμέτρου 1.5mm. Όλα τα δείγματα εκτυπώθηκαν με 100% infill.

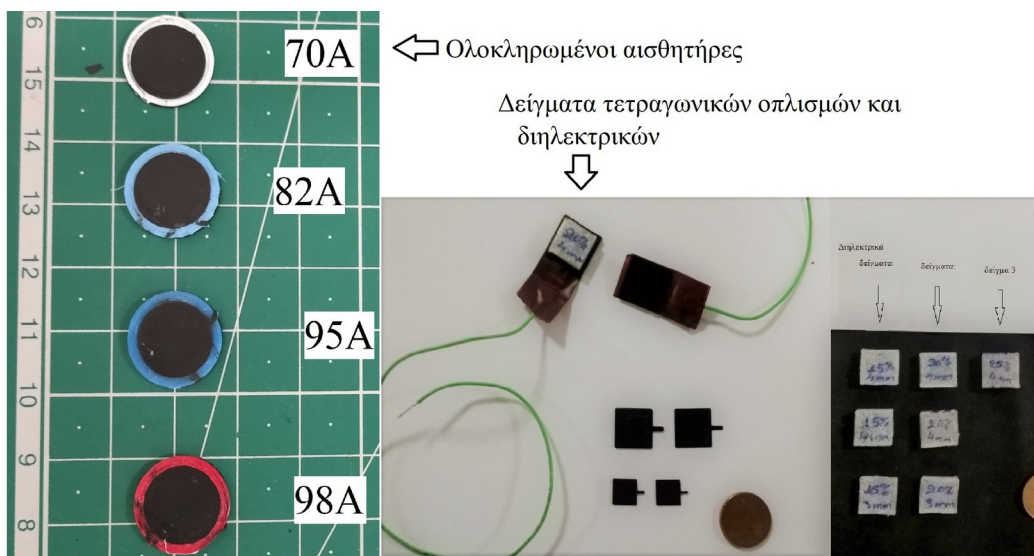
Πίνακας 6:

Παράμετροι αισθητήρων – 2^η γενιά δειγμάτων: διάμετρος 15mm, πάχος 1.2mm

σχήμα	Κυκλικό
διάμετρος	15mm
πάχος πλάκας οπλισμού	0.3mm
υλικό οπλισμού	Electrifi Eel ProtoPasta
πάχος διηλεκτρικού	0.6mm
Infill διηλεκτρικού	100%
υλικό διηλεκτρικού	TPU 98

	Flexfill TPE 90 Flexmark 9 Filaflex TPE82A Flexmark 8 Flexability TPE-HP Ultraflexx TPE-E Flexmark 7 Filaflex Ultrasoft 70A
--	--

Για τις μετρήσεις βαδίσματος και συναρτήσεως θερμοκρασίας (III.2.d, III.3), χρησιμοποιήθηκαν ολοκληρωμένοι αισθητήρες μονής εκτύπωσης, τύπου τελικού μοντέλου - 3^η γενιά αισθητήρων (βλέπε αναλυτική περιγραφή §III.4), με σπλισμούς ProtoPasta και διηλεκτρικό FilaFlex 82A, διαμέτρου 14.5mm και ολικού πάχους 1.2mm.



Εικόνα 10: Δείγματα τετραγωνικών σπλισμών ProtoPasta, διηλεκτρικών FilaFlex 70A και δείγματα ολοκληρωμένου αισθητήρα, μονής εκτύπωσης

III.2. Μετρήσεις στατικής διάταξης

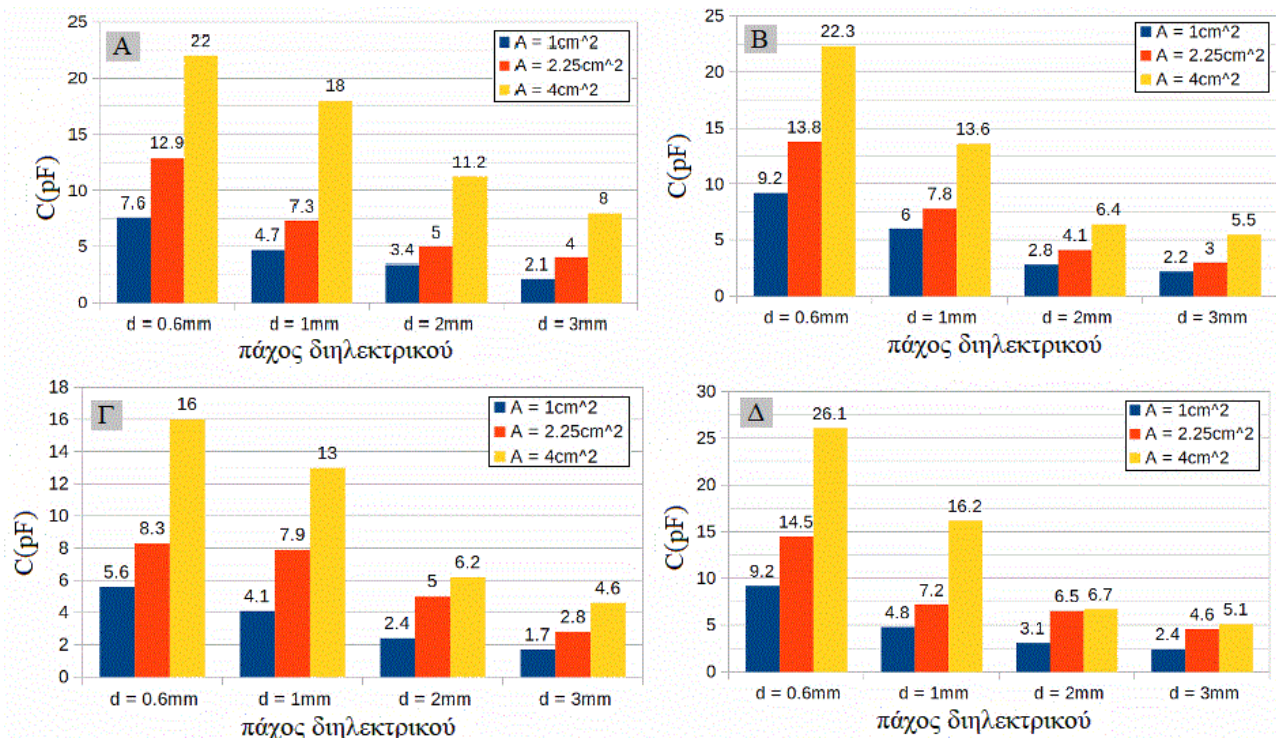
Για αυτό το μέρος, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη της εικόνας 7. Κάθε χωρητικότητα (Πίνακας 5) τοποθετήθηκε κάτω από το έμβολο, στο οποίο προσαρμόζονται μάζες των 0.5kg μέχρι τα 14kg και καταγράφεται ο μέσος όρος δέκα συνεχόμενων μετρήσεων χωρητικότητας. Για κάθε δείγμα παίρνουμε τρεις σειρές μετρήσεων.

III.2.a. Γεωμετρία, διαστάσεις, infill

Στα συγκεντρωτικά γραφήματα που ακολουθούν, περιέχονται οι τιμές αρχικής χωρητικότητας και μέγιστης μεταβολής χωρητικότητας των δειγμάτων πάχους 0.6, 1, 2, 3mm, τετραγωνικής επιφάνειας 1, 2.25, 4cm² και infill 15, 20, 25, 30, 50, 70, 100%.

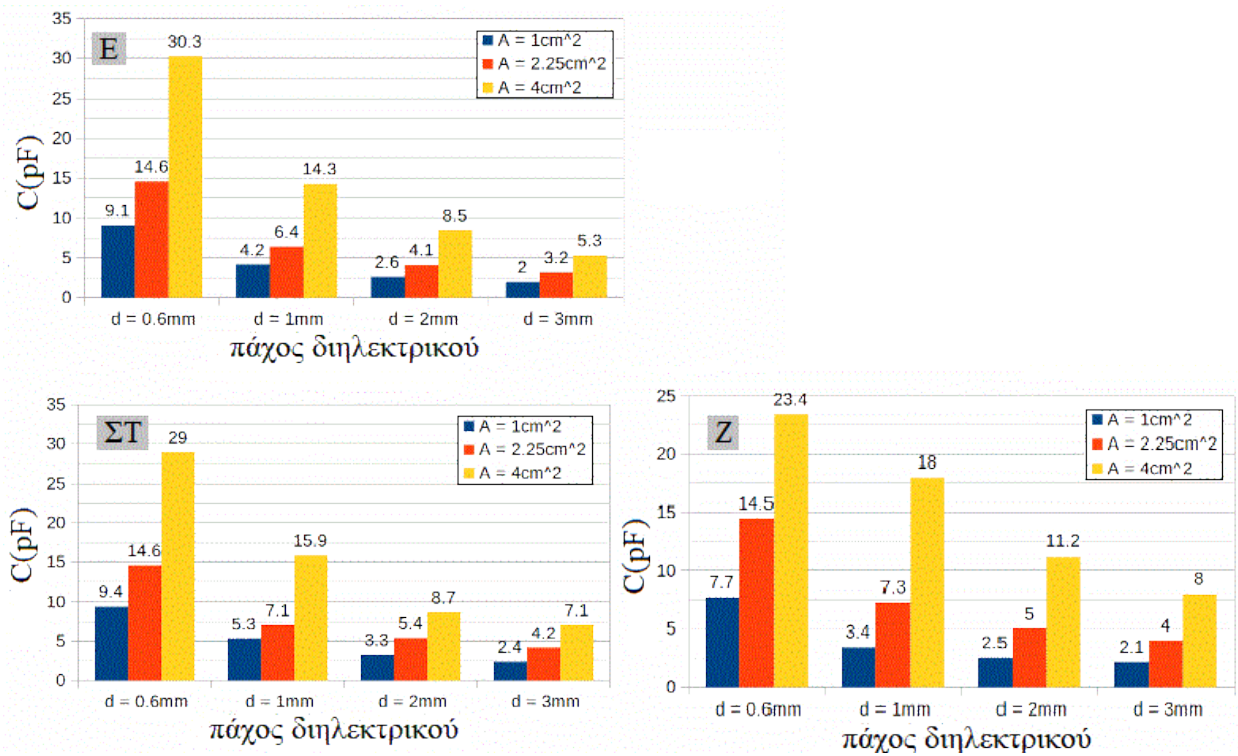
Γράφημα 2α:

Χωρητικότητες [C(pF)] σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού [d(mm)], για διάφορες επιφάνειες [A(cm²)] και infill: Α. 15%, Β. 20%, Γ. 25%, Δ. 30%



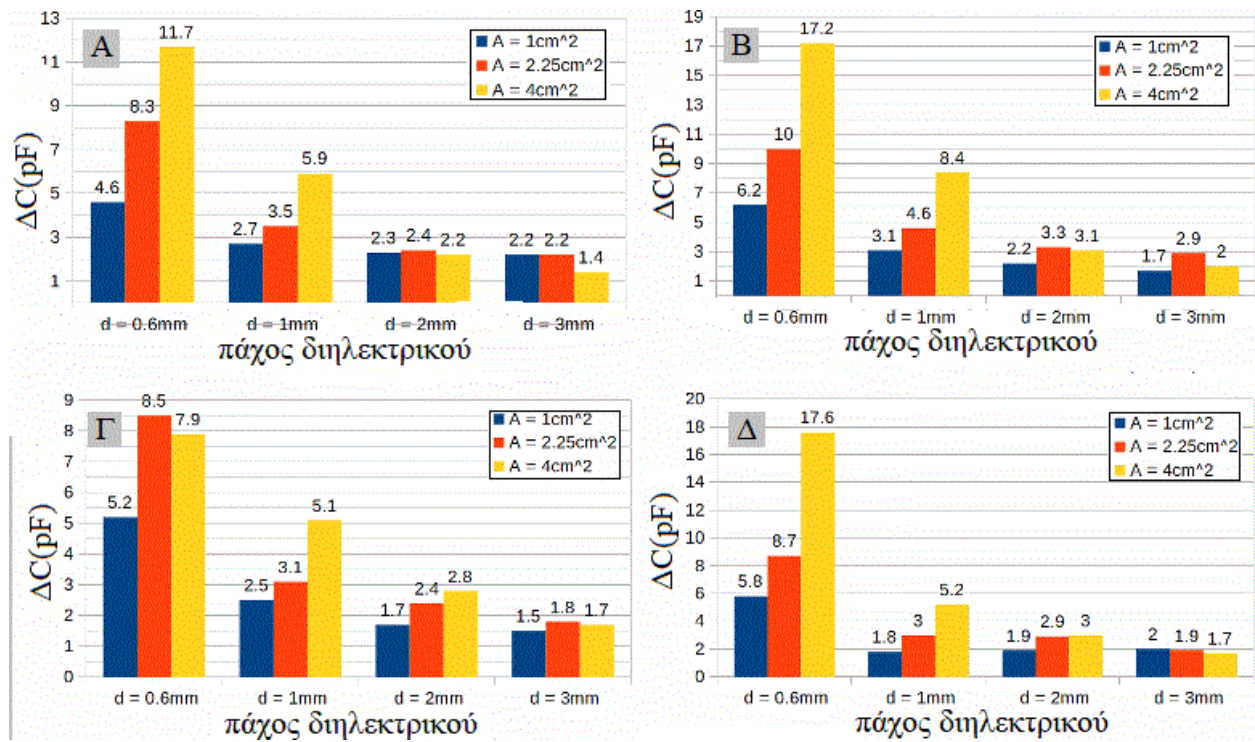
Γράφημα 2β:

Χωρητικότητες [C(pF)] σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού [d(mm)], για διάφορες επιφάνειες [A(cm²)] και infill: Ε. 50%, ΣΤ. 70%, Ζ. 100%



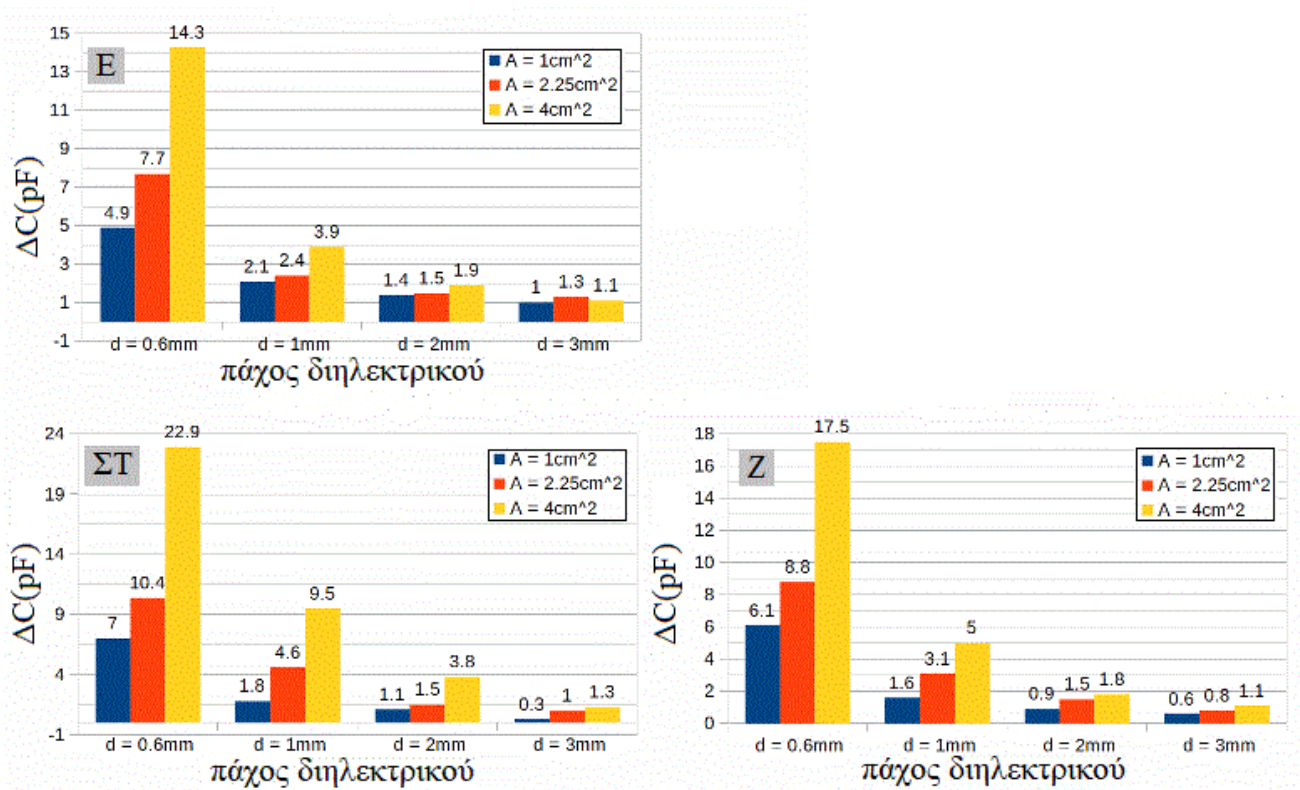
Γράφημα 3α:

Μεταβολή χωρητικότητας [$C(\text{pF})$] σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού [$d(\text{mm})$], για διάφορες επιφάνειες [$A(\text{cm}^2)$] και infill: Α. 15%, Β. 20%, Γ. 25%, Δ. 30%



Γράφημα 3β:

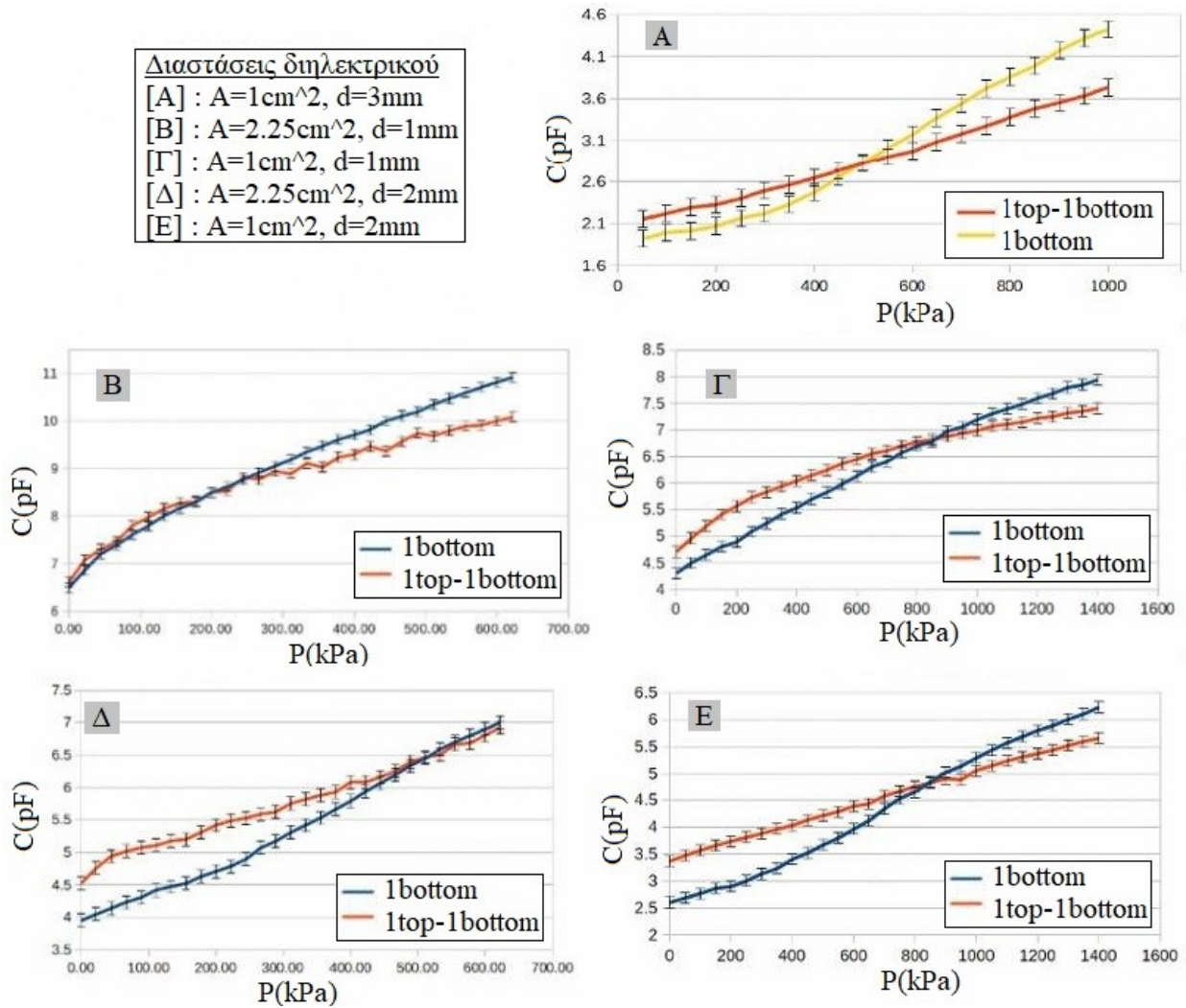
Μεταβολή χωρητικότητας [$C(\text{pF})$] σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού [$d(\text{mm})$], για διάφορες επιφάνειες [$A(\text{cm}^2)$] και infill: E. 50%, ΣΤ. 70%, Z. 100%



Ακολουθούν συγκριτικά διαγράμματα C προς μάζα, για δείγματα διηλεκτρικού, με μία συμπαγή στρώση πάνω και μία κάτω (1bottom – 1top) και μία κάτω (1bottom).

Γράφημα 4:

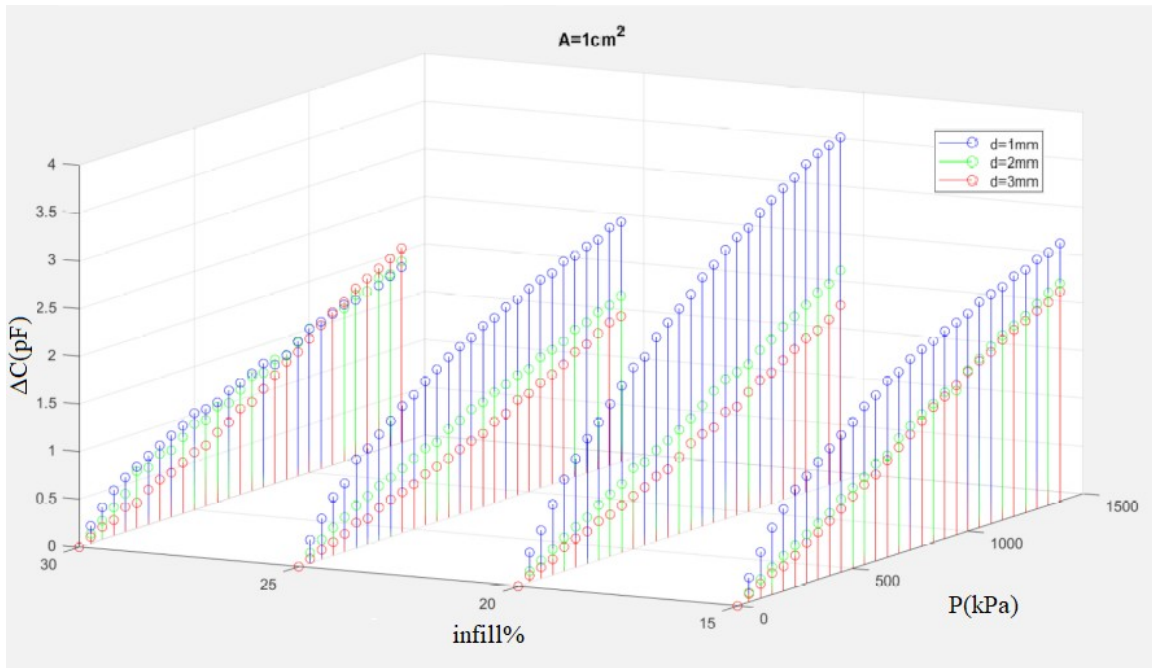
Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας, ως προς πίεση, για διηλεκτρικά, με 15% infill, μίας (1 bottom) και δύο (1 bottom – 1 top) συμπαγών στρώσεων



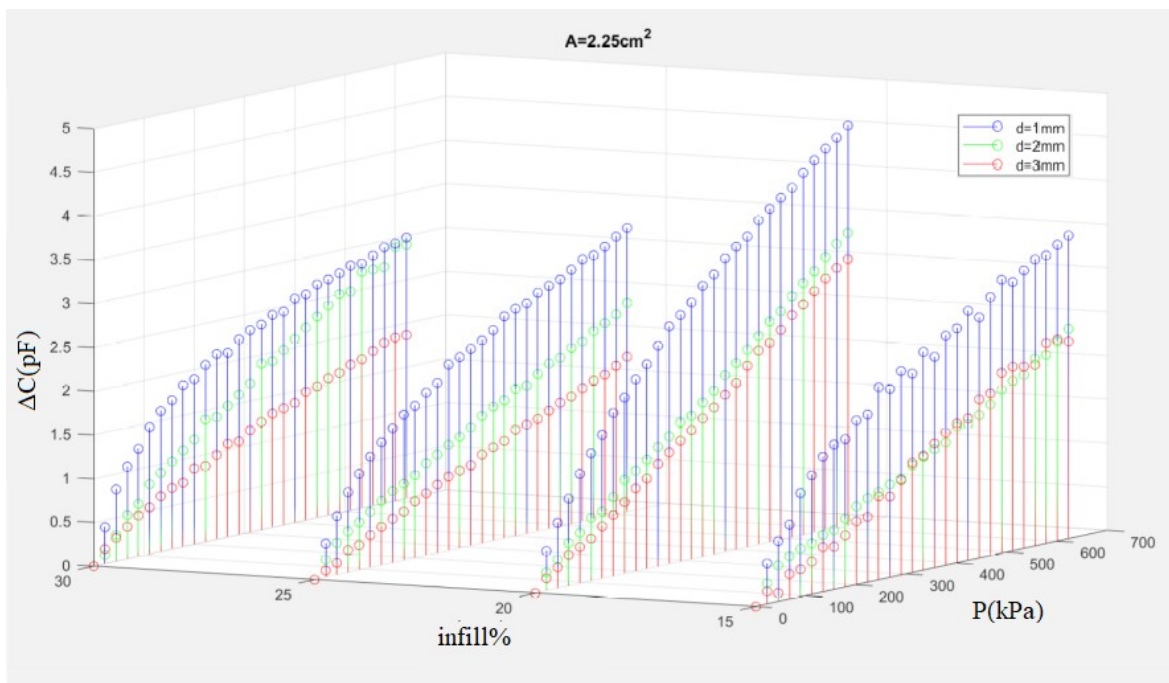
Πιο πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή της χωρητικότητας, γι' αυτό και στη συνέχεια της ανάλυσης τα γραφήματα απόκρισης στην πίεση, θα έχουν στον κατακόρυφο άξονα $\Delta C = C - C_0$ όπου C_0 η ένδειξη του αισθητήρα, όταν αυτός έχει τοποθετηθεί στη διάταξη και δέχεται πίεση μόνο από το βάρος του εμβόλου μάζας 0.7kg.

Γράφημα 5:

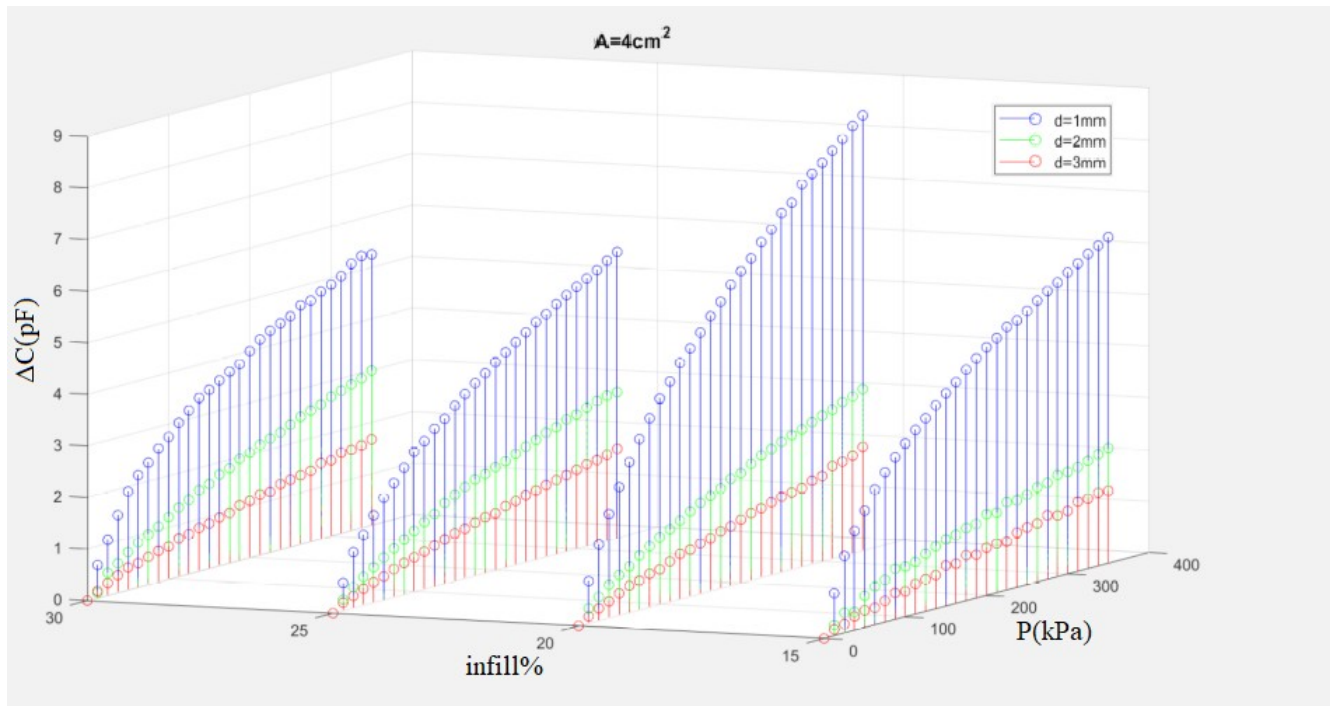
Μεταβολή χωρητικότητας ως προς πίεση, για πάχος διηλεκτρικού d 1, 2 και 3mm, επιφάνεια A 1, 2.25 και 4cm^2 και infill διηλεκτρικού 15, 20, 25, 30%



A=1cm²



A=2.25cm²



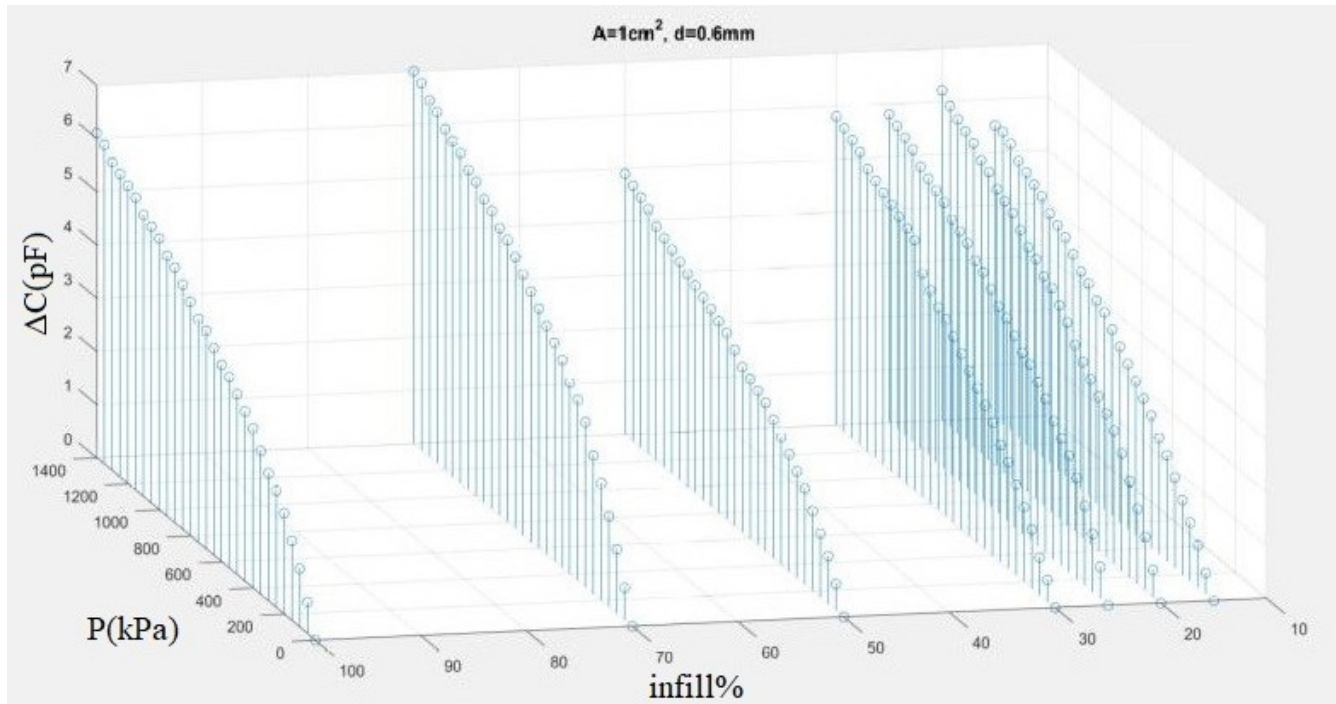
A=4cm²

Για τις καμπύλες στα γραφήματα 5 & 6, οι τυπικές αποκλίσεις: $\pm 0.2\text{pF}$

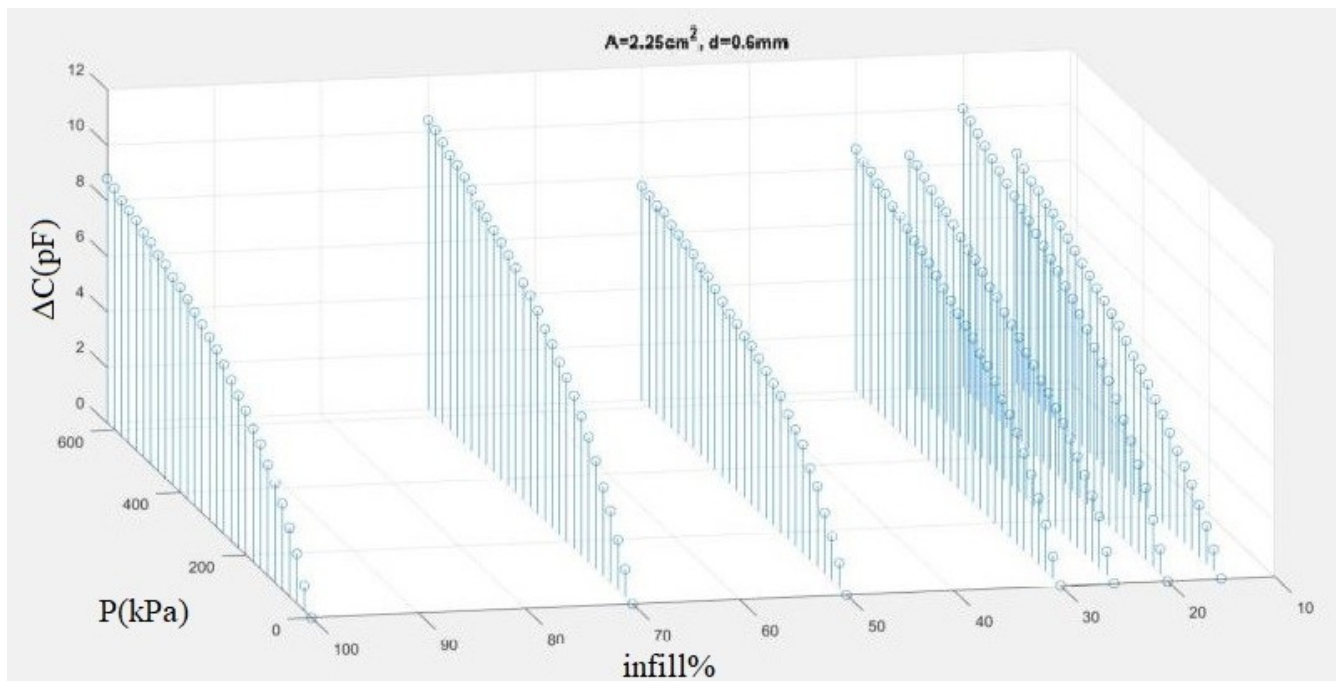
Οι καμπύλες για τα infill 50, 70 & 100% έδειξαν αρκετά μικρότερη μεταβολή, και δεν συμπεριελήφθησαν αφού δεν προσέφεραν καινούρια πληροφορία. Δεν ίσχυσε το ίδιο στους αισθητήρες με πάχος διηλεκτρικού 0.6mm (Γράφημα 6).

Γράφημα 6:

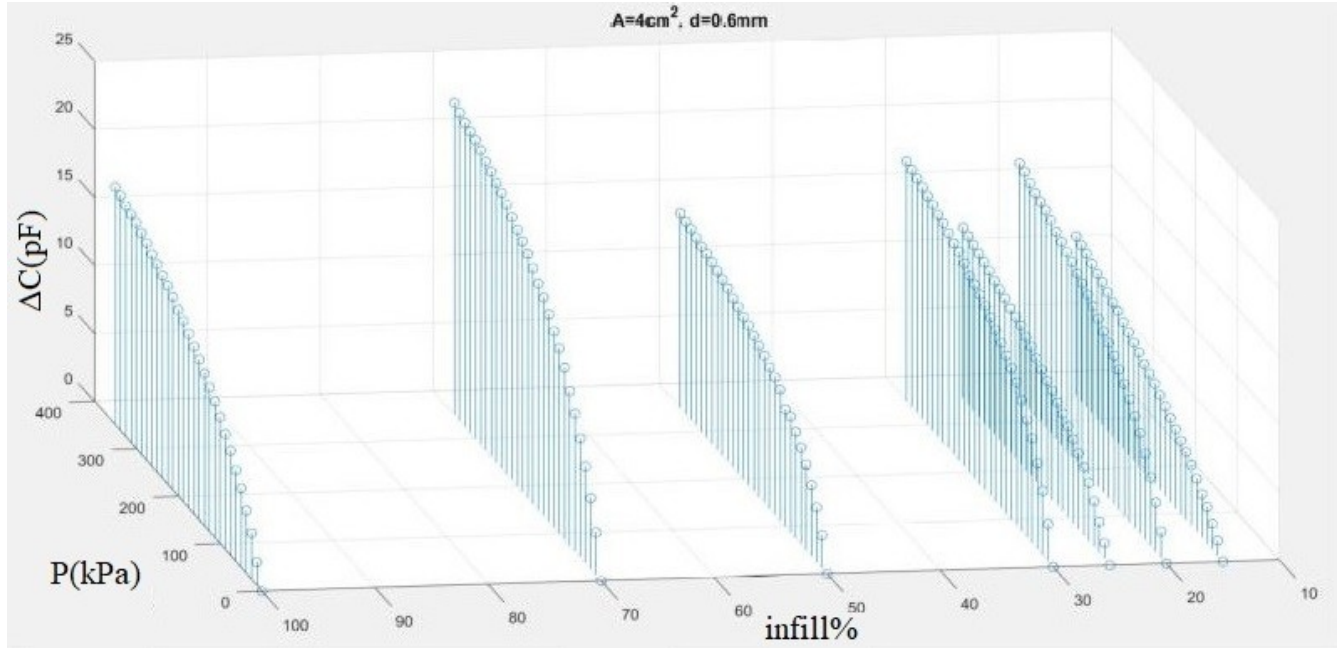
Μεταβολή χωρητικότητας ως προς πίεση, για πάχος διηλεκτρικού πάχους $d = 0.6\text{mm}$, επιφάνεια $A = 1, 2.25, 4\text{cm}^2$ και infill διηλεκτρικού 15, 20, 25, 30, 50, 70, 100%



$A=1\text{cm}^2$



$A=2.25\text{cm}^2$

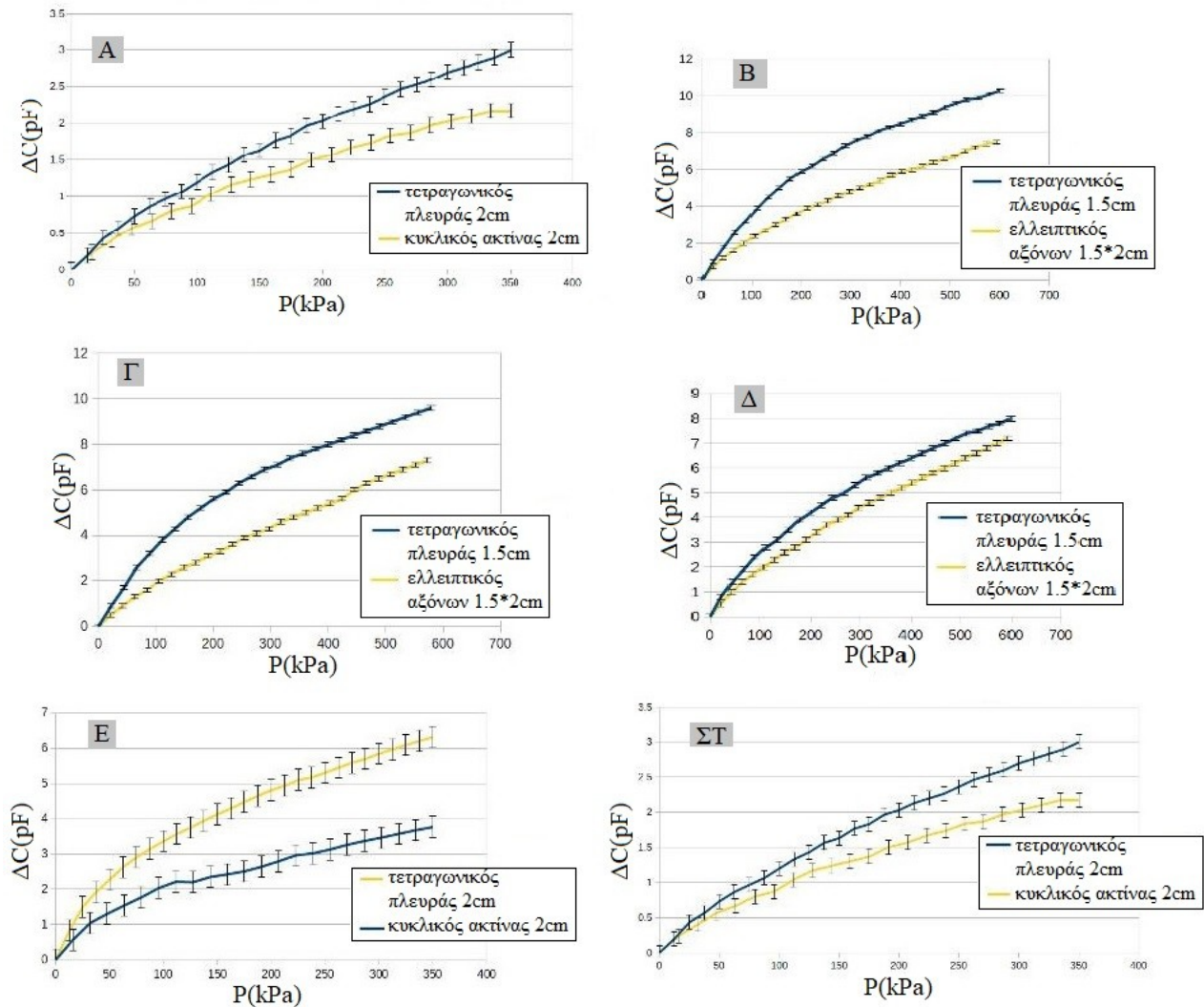


A=4cm²

Τελευταίο βήμα, είναι η μελέτη απόκρισης διαφορετικών σχημάτων αισθητήρα της ίδιας ακμής/ακτίνας, στη μία διεύθυνση: Οι τετραγωνικοί ακμής 1cm συγκρίθηκαν με κυκλικούς ακτίνας 1cm και με ελλείψεις μικρού άξονα 1cm. Και για τις τρεις επιφάνειες, οι αισθητήρες με το μικρότερο πάχος διηλεκτρικού δείχνουν μεγαλύτερη μεταβολή, ανεξαρτήτως infill.

Γράφημα 7:

Σύγκριση μεταβολής χωρητικότητας συναρτήσει της πίεσης, σε κυκλικούς, ελλειπτικούς και τετραγωνικούς πυκνωτές για διηλεκτρικά πάχους/infill: 2mm/30% [A], 0.6mm/70% [B], 0.6mm/20% [Γ], 0.6mm/15% [Δ], 1mm/15% [Ε], 2mm/30% [ΣΤ]. Διηλεκτρικό Filaflex 70A, σπλισμοί ProtoPasta.



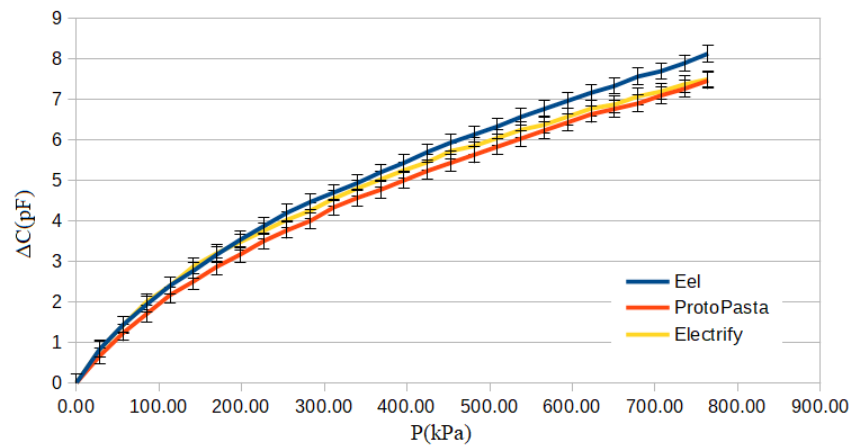
Οι μετρήσεις συνεχίστηκαν σε κυκλικά δείγματα, ακτίνας 15mm.

III.2.b. Νήματα και shore A

Μετρήθηκε η καμπύλη φόρτωσης ως 14kg, για όλα τα δείγματα διηλεκτρικών πάχους $0.6 \pm 0.1 \text{ mm}$ με σπλισμούς ProtoPasta και για όλα τα δείγματα σπλισμών πάχους $0.3 \pm 0.1 \text{ mm}$, με διηλεκτρικό 82A.

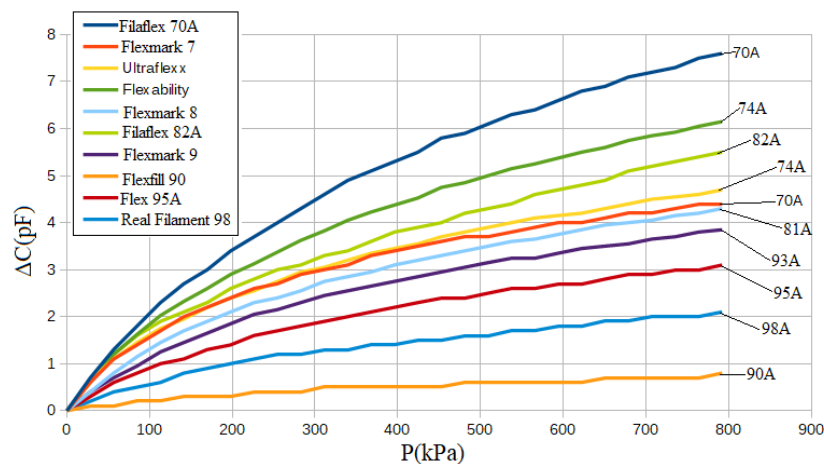
Γράφημα 8:

Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας ως προς πίεση για διαφορετικό υλικό σπλισμού, πάχους 0.3mm και διαμέτρου 1.5cm. Διηλεκτρικά σκληρότητας 82A και πάχους 0.5mm.



Γράφημα 9:

Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας ως προς πίεση για διαφορετικό υλικό διηλεκτρικού, πάχους 0.5mm. Σπλισμοί υλικού ProtoPasta, διαμέτρου 1.5cm και πάχους 0.3mm.



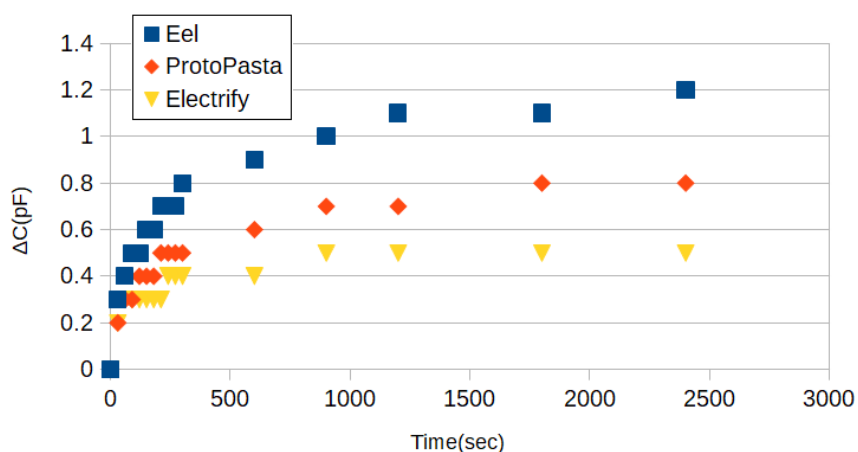
Για τις μεταβολές στο γράφημα 9, οι τυπική απόκλιση: $\pm 0.3\text{pF}$.

III.2.c. Ολίσθηση στο χρόνο

Μέχρι τώρα, τα σκληρότερα διηλεκτρικά εμφανίζουν την τάση να έχουν τη μικρότερη μεταβολή στο φορτίο, αλλά την αμεσότερη και σταθερότερη αντίδραση κατά τη φόρτωση. Επιλέγουμε δείγμα σκληρότητας 95A για να συγκρίνουμε τα αγωγίμα υλικά. Κάθε δείγμα τοποθετείται στη διάταξη σταθερού εμβόλου με φορτίο 14kg για 40 λεπτά και καταγράφεται η ένδειξή του, ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. (Από αυτή την παράγραφο και για τις επόμενες, τα διηλεκτρικά όταν ονομάζονται μόνο με τη σκληρότητά τους, αναφέρονται στα Filaflex και Flexfil, όχι στα Aldrich)

Γράφημα 10:

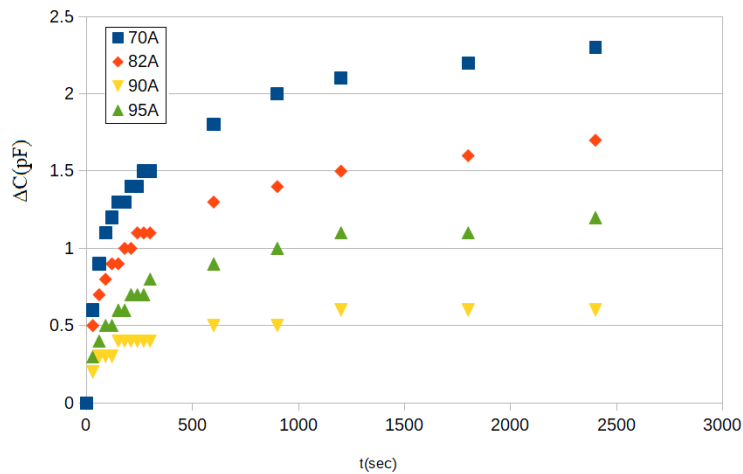
Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για 40min, υπό σταθερό φορτίο 14kg, για διαφορετικό υλικό οπλισμών, πάχους 0.3mm και διαμέτρου 15mm. Διηλεκτρικό σκληρότητας 95A, πάχους 0.6mm.



Στη συνέχεια, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία και για τα υπόλοιπα δείγματα, ώστε να συγκρίνουμε την ολίσθηση των διηλεκτρικών 70A, 82A, 90A, 95A, για κάθε ένα από τα τρία αγωγίμα νήματα, Eel, ProtoPasta και Electrifi.

Γράφημα 11:

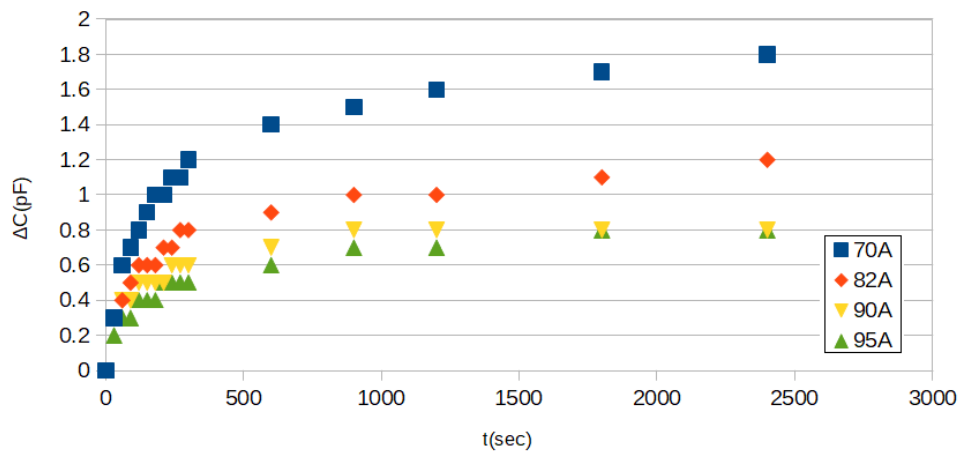
Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για 40min, υπό σταθερό φορτίο 14kg, για διαφορετικό υλικό διηλεκτρικού, πάχους 0.6mm. Οπλισμοί νήματος Eel, διαμέτρου 15mm και πάχους 0.3mm.



Στα δεδομένα των γραφημάτων 10, 11, 12 & 13, το σφάλμα μέτρησης: $\pm 0.1\text{pF}$

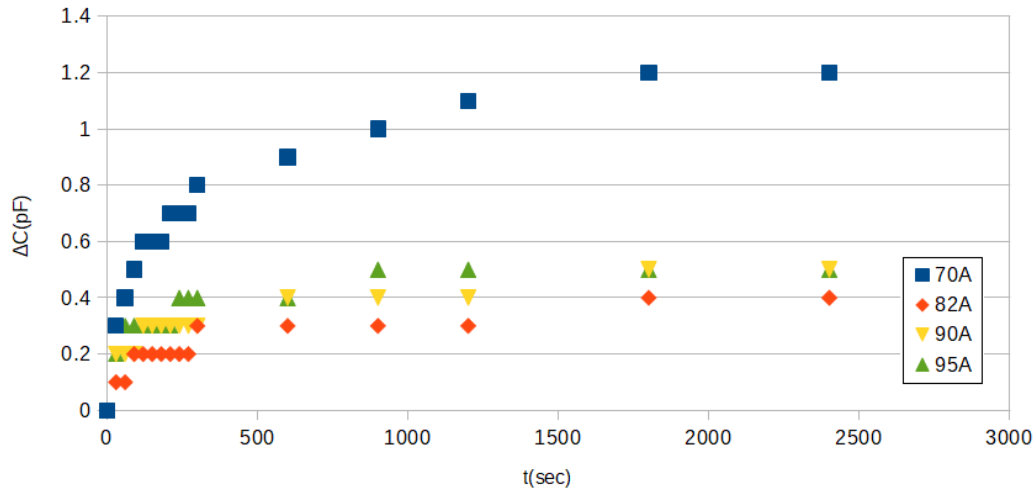
Γράφημα 12:

Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για 40min, υπό σταθερό φορτίο 14kg, για διαφορετικό υλικό διηλεκτρικού, πάχους 0.6mm. Οπλισμοί νήματος ProtoPasta, διαμέτρου 15mm και πάχους 0.3mm.



Γράφημα 13:

Σύγκριση μεταβολής της χωρητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για 40min, υπό σταθερό φορτίο 14kg, για διαφορετικό υλικό διηλεκτρικού, πάχους 0.6mm. Οπλισμοί νήματος Electrifi, διαμέτρου 15mm και πάχους 0.3mm.



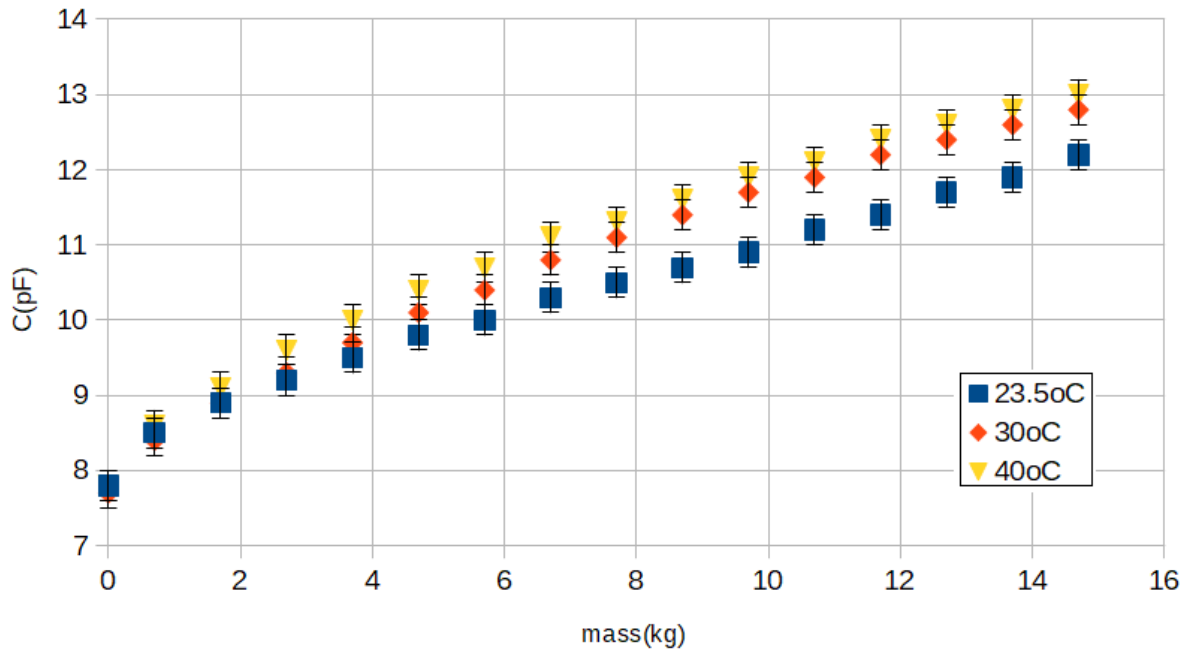
III.2.d. Εξάρτηση από θερμοκρασία

Για να ελεγχθεί πώς επηρεάζει η θερμοκρασία την ένδειξη των πυκνωτών, τυπώθηκαν τέσσερις ολοκληρωμένοι κυκλικοί πυκνωτές, Protopasta – FilaFlex 82A, πάχους 1.2mm και διαμέτρου 15mm και μετρήθηκαν οι χαρακτηριστικές τους καμπύλες έως φορτίο 14kg, για θερμοκρασίες δωματίου (23°C), 30, 40°C και διαπιστώθηκε μεταβολή στην απόκριση ως 0.9pF.

Γράφημα 14:

Χωρητικότητα σε συνάρτηση με το εφαρμοζόμενο φορτίο, για διαφορετικές θερμοκρασίες μέτρησης .

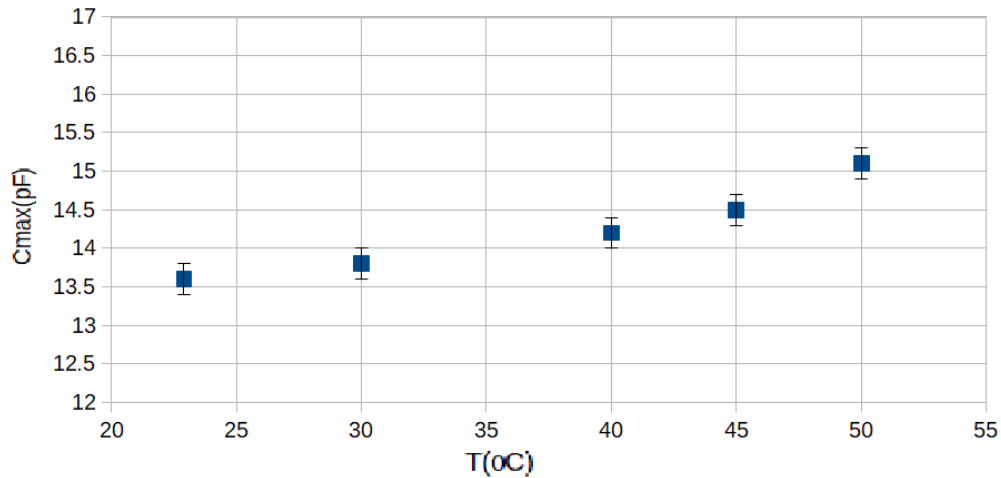
Δείγμα ολοκληρωμένου πυκνωτή Νο 3: Protopasta – FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm



Σε καινούριο δείγμα, μετρήθηκαν οι καμπύλες απόκρισης για επιπλέον θερμοκρασίες 45, 50°C και για διαφορετικούς χρόνους παραμονής στους 40°C, ως 20 λεπτά.

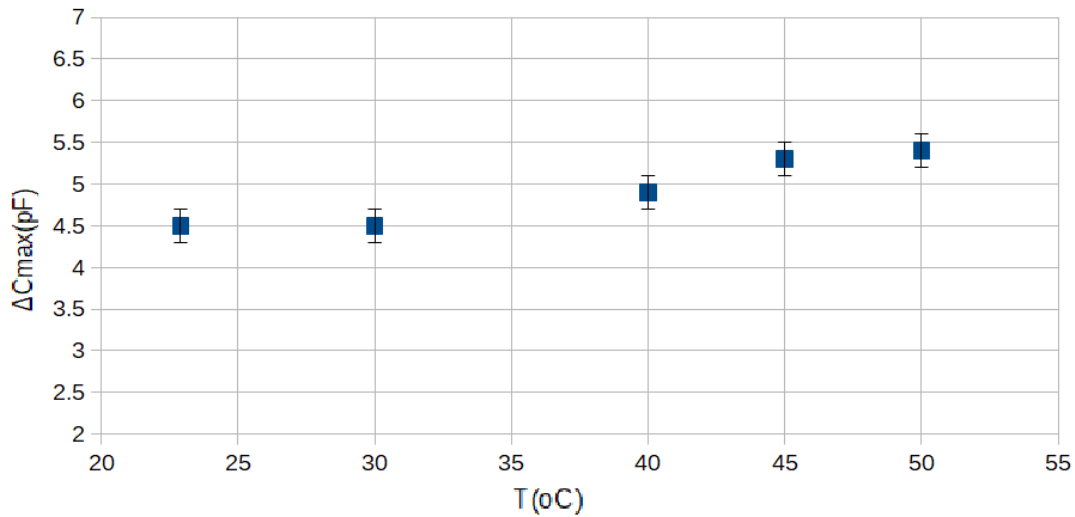
Γράφημα 15:

Χωρητικότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, υπό σταθερό φορτίο 14kg. Δείγμα ολοκληρωμένου πυκνωτή N_o5: Protopasta – FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm



Γράφημα 16:

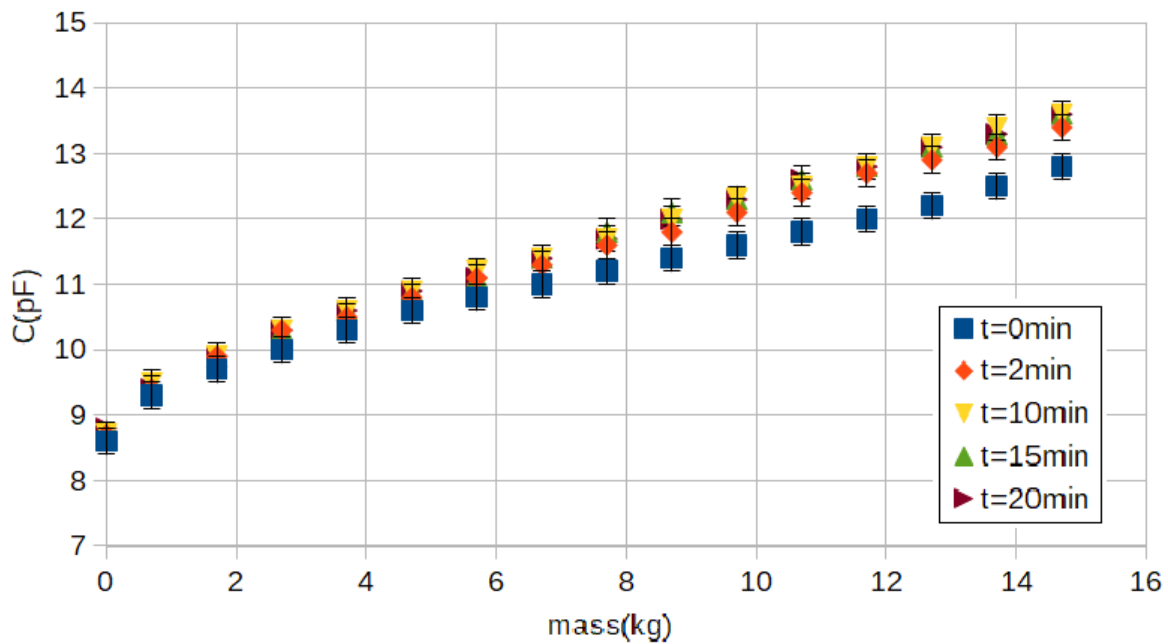
Ολίσηση της μεταβολής χωρητικότητας (υπό μέγιστο φορτίο 14kg) του πυκνωτή, για διαφορετικούς χρόνους παραμονής στους 40°C. Ολοκληρωμένος πυκνωτής: ProtoPasta – Filaflex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm



Παρατηρούμε αύξηση 1.5pF στη μέγιστη τιμή χωρητικότητας (C_{max} , υπό φορτίο 14kg), για αύξηση θερμοκρασίας από 23.5°C στους 50°C και 0.4pF αύξηση, στην ολική μεταβολή ΔC .

Γράφημα 17:

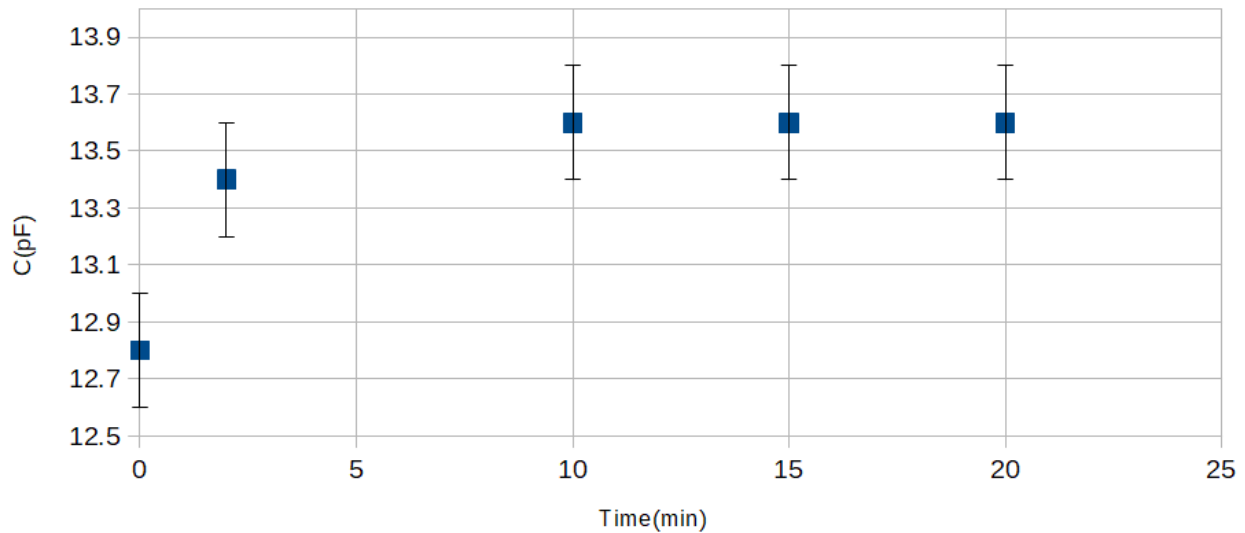
Χωρητικότητα σε συνάρτηση με το φορτίο, για διαφορετικούς χρόνους παραμονής στους 40°C.
Ολοκληρωμένος πυκνωτής: Protopasta – FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm



Η C_{max} αυξάνεται από τα 12.8pF στα 13.6pF, εντός 10 λεπτών και στη συνέχεια παραμένει σταθερή.

Γράφημα 18:

Ολίσθηση της μέγιστης ένδειξης (υπό φορτίο 14kg) του πυκνωτή, για διαφορετικούς χρόνους παραμονής στους 40°C. Ολοκληρωμένος πυκνωτής: Protopasta – FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm



III.3. Μετρήσεις δυναμικής διάταξης

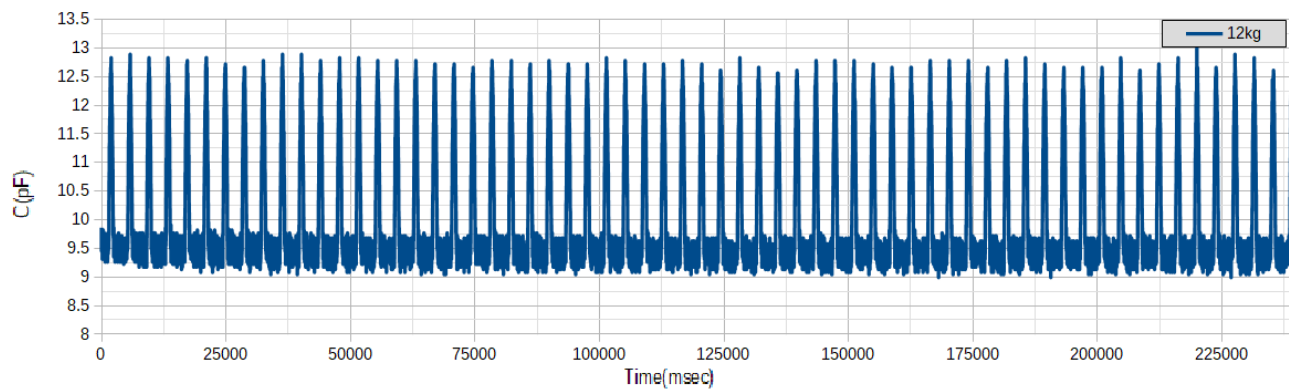
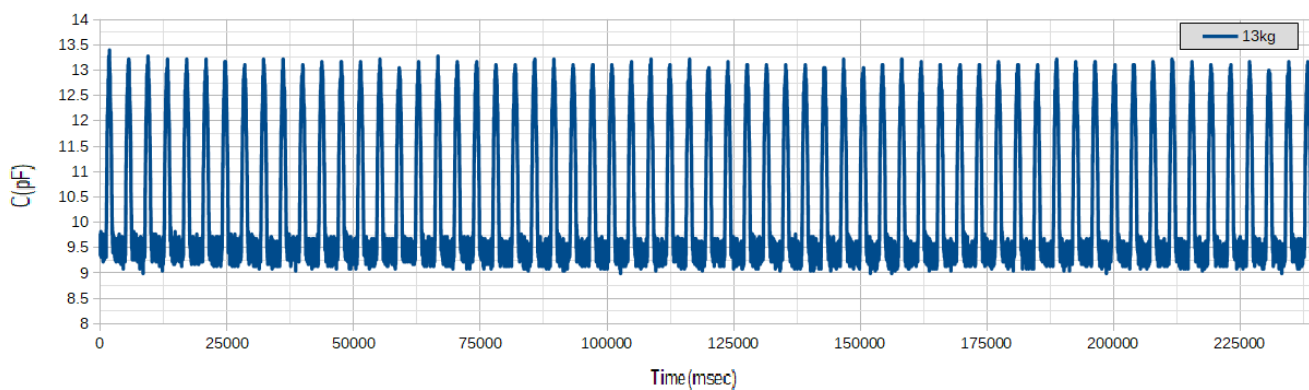
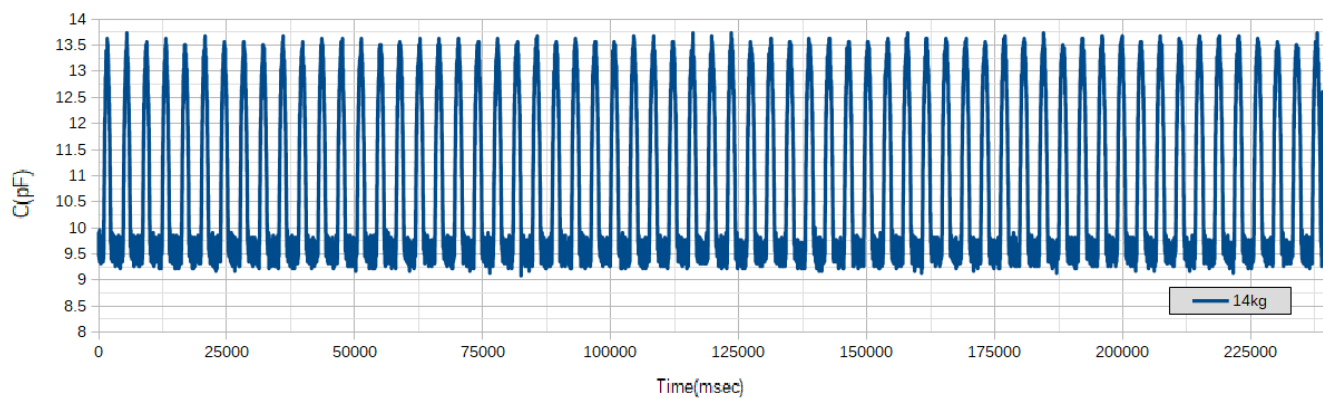
Θέλουμε τώρα να εκτιμήσουμε την απόκριση των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας τη διάταξη προσομοίωσης βαδίσματος. Τυπώνονται ολοκληρωμένοι κυκλικοί αισθητήρες, πάχους 1.2mm και διαμέτρου 15mm, από τους δύο προτιμητέους συνδυασμούς υλικών, Protopasta – FilaFlex 70 και 82A.

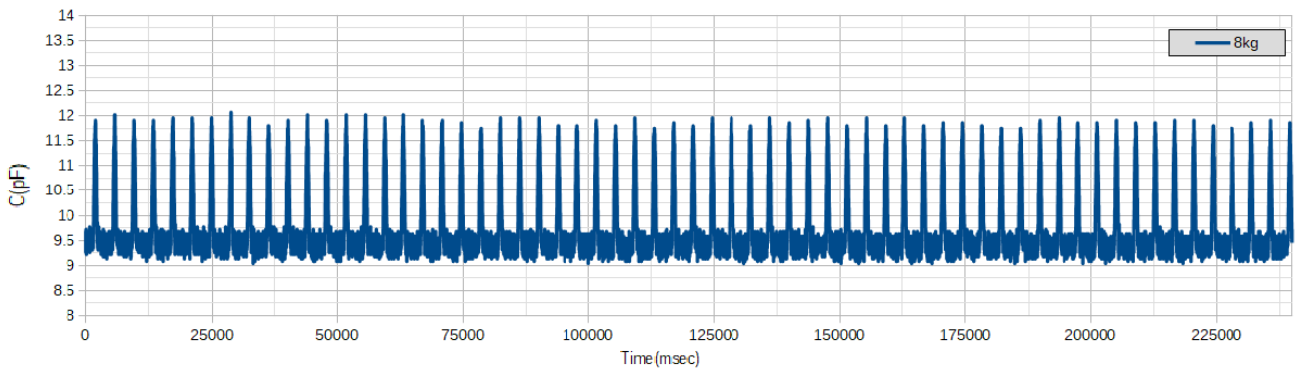
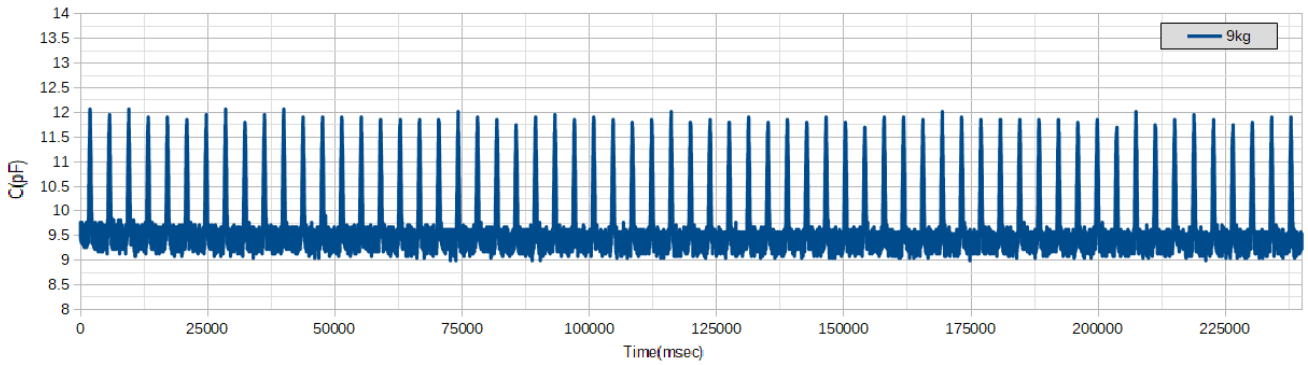
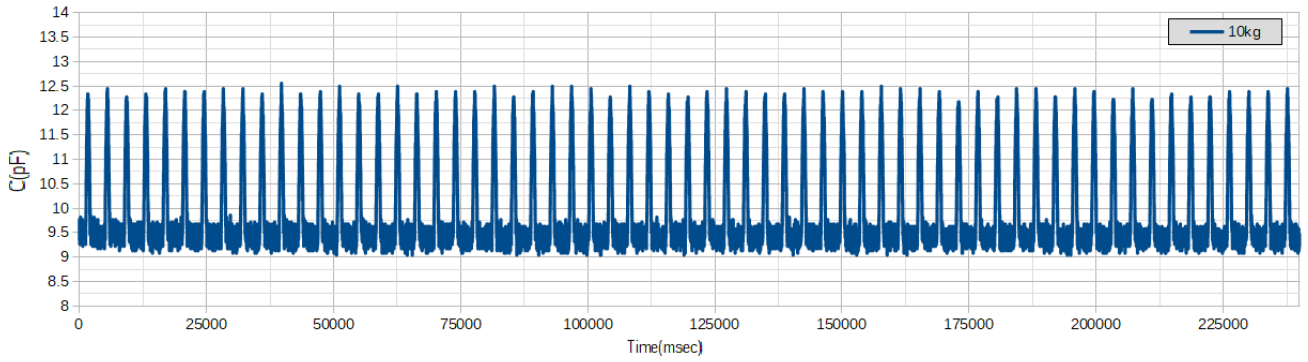
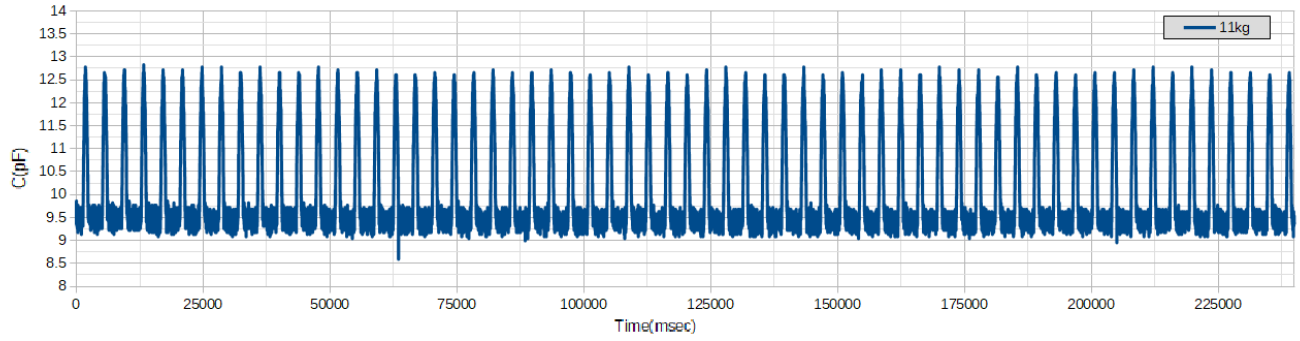
III.3.a. Επαλήθευση και σύγκριση

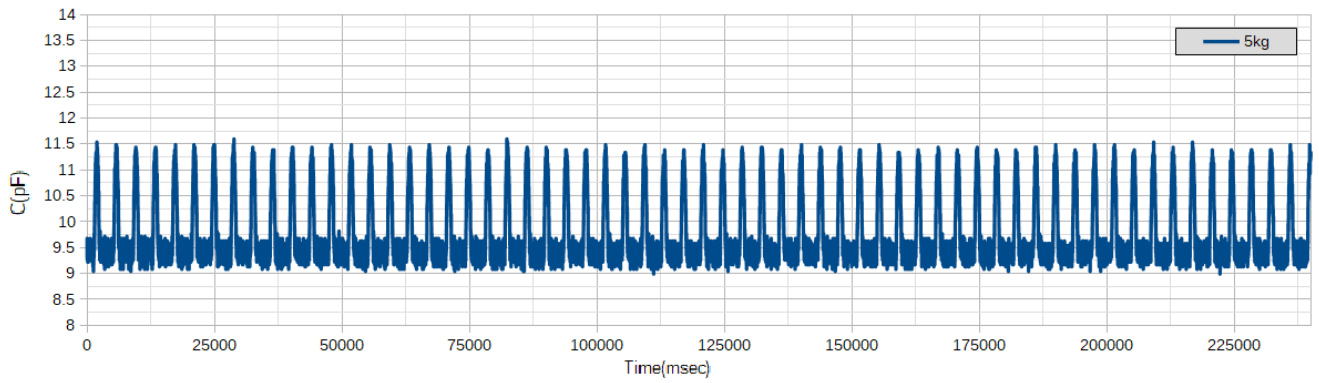
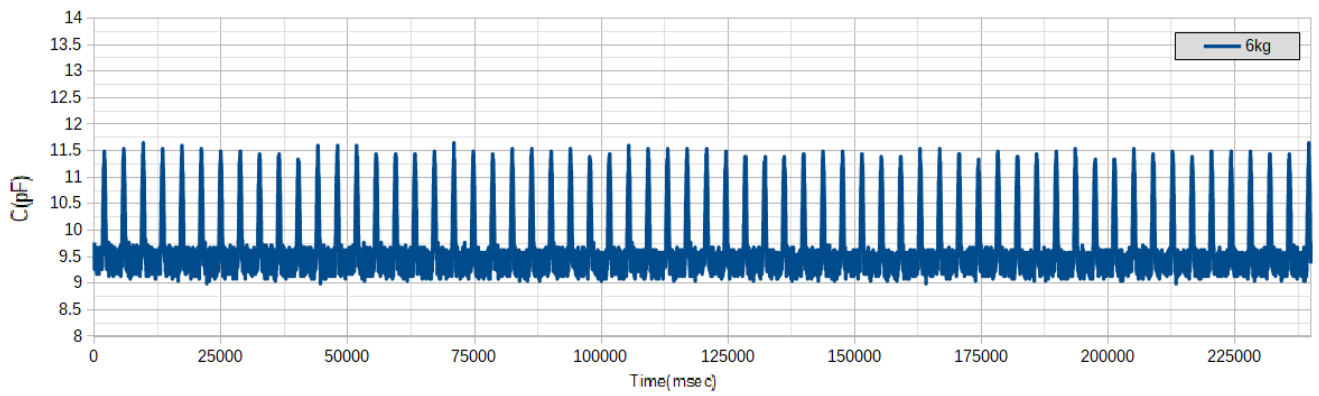
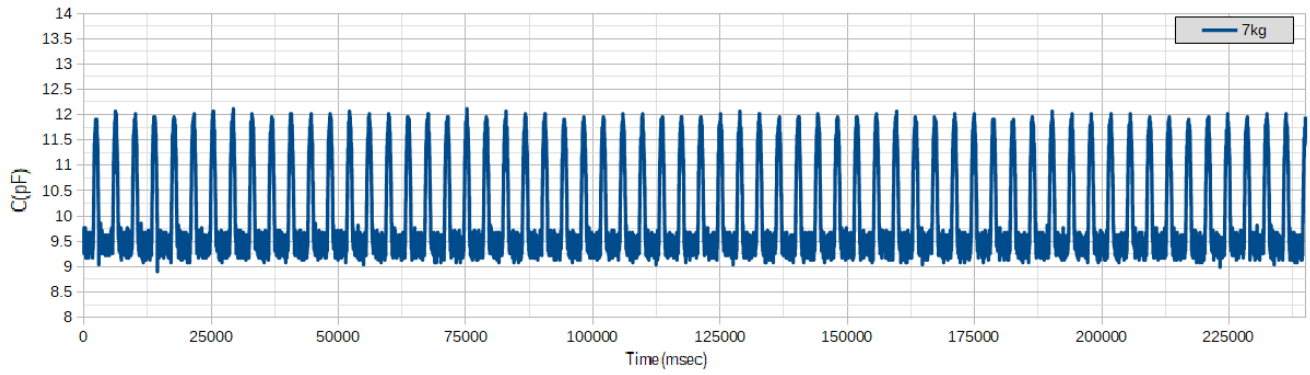
Παίρνουμε μετρήσεις τεσσάρων λεπτών, για τιμές φορτίου ως 14 κιλά ανά 1kg. Η συχνότητα βηματισμού είναι σε αυτό το σημείο τυχαία.

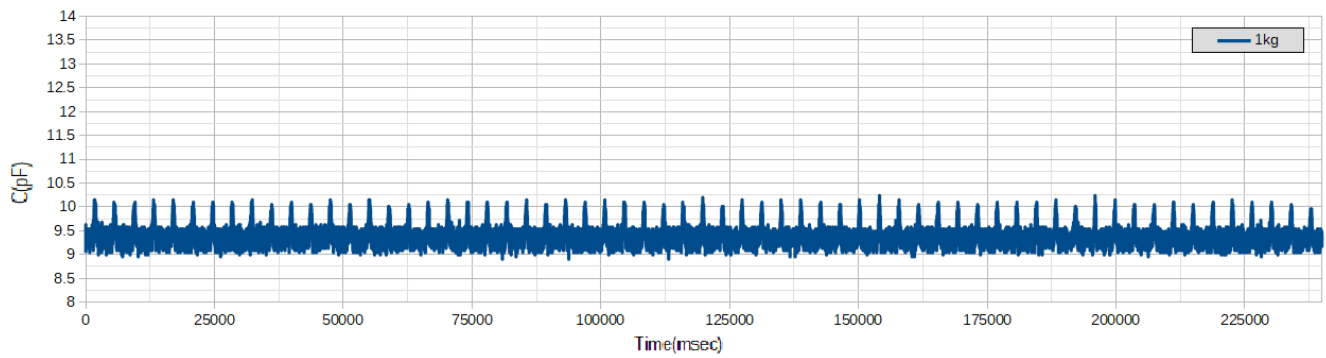
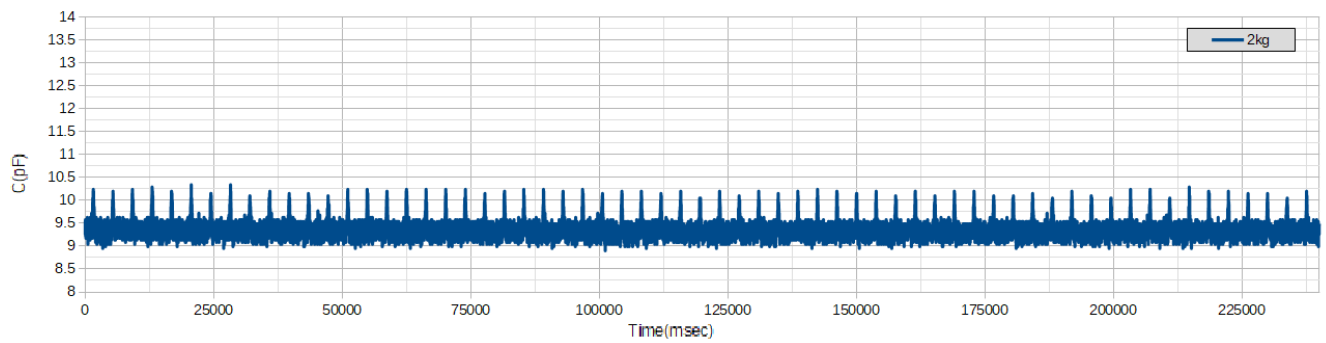
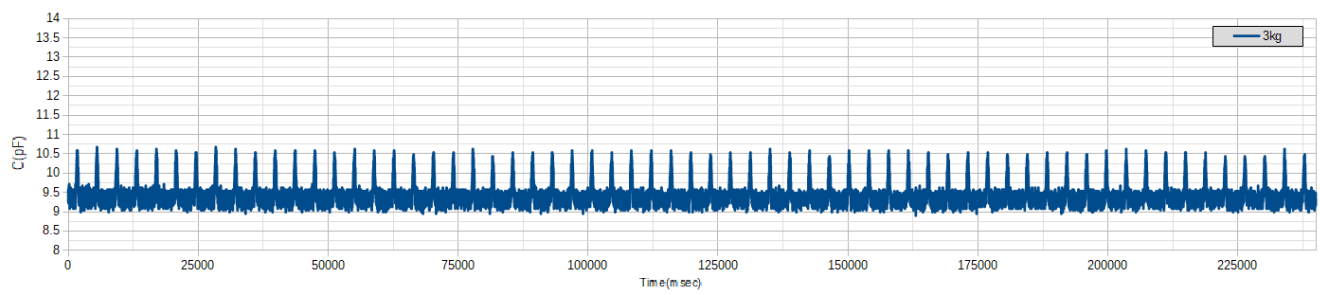
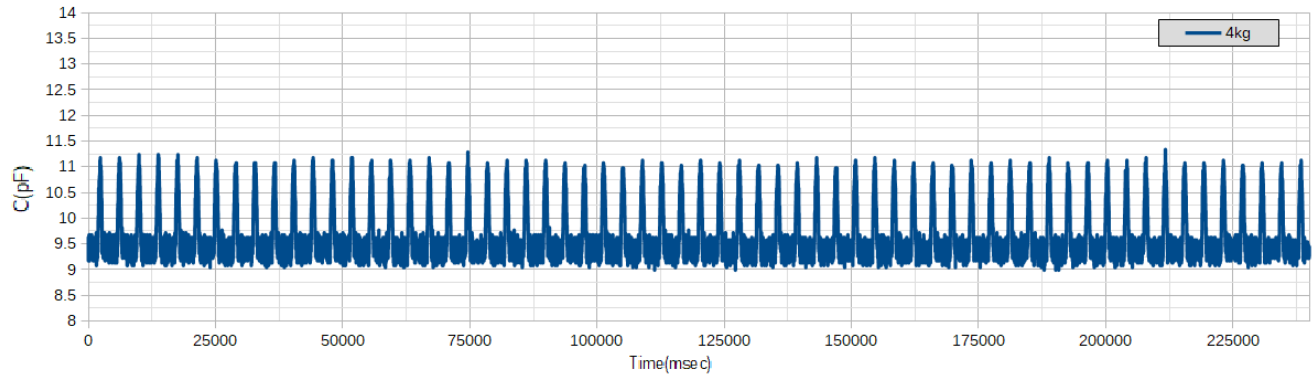
Γράφημα 19:

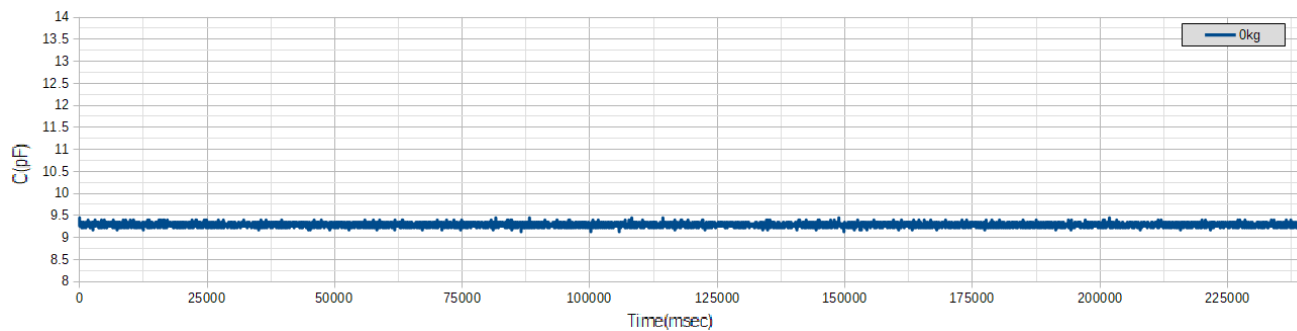
Απόκριση ολοκληρωμένου πυκνωτή (Protopasta – FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm) σε προσομοίωση βηματισμού φορτίου 0 ως 14kg, σε πραγματικό χρόνο







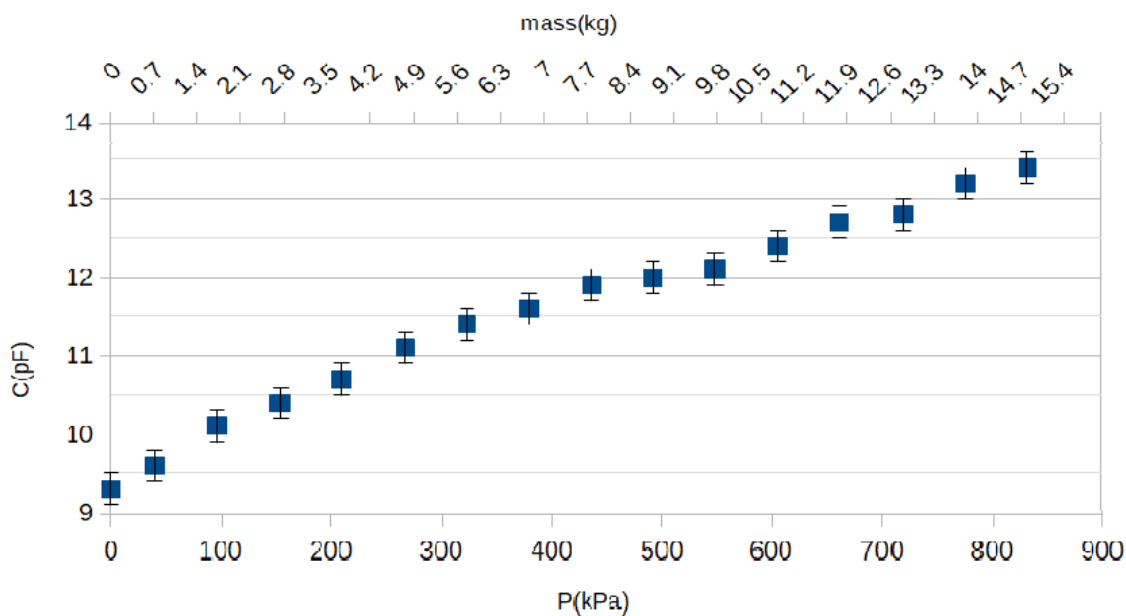




Από τους μέσους όρους κορυφών, των παραπάνω γραφημάτων εξάχθηκε διάγραμμα απόκρισης $C(\text{pF}) \rightarrow P(\text{kPa})$.

Γράφημα 20:

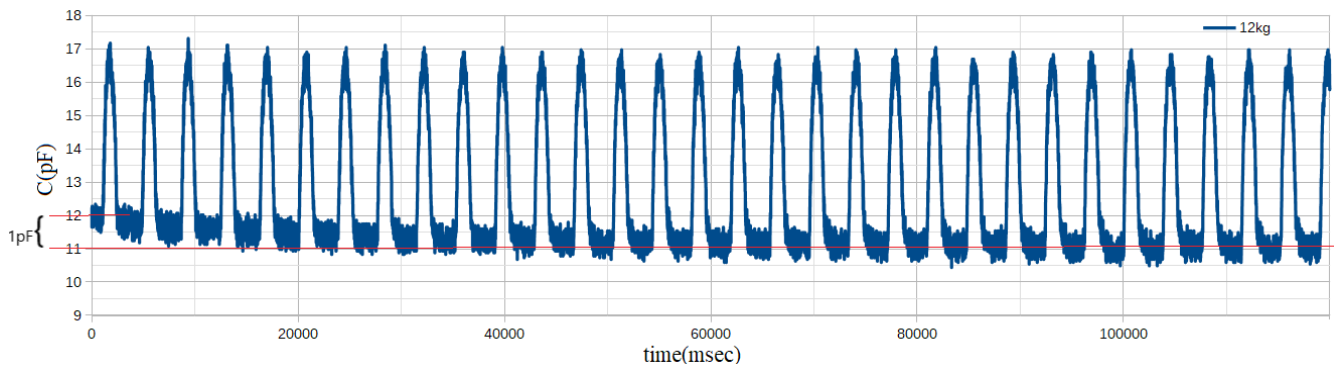
Χωρητικότητα συναρτήσει της πίεσης για τον αισθητήρα: Protopasta – FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm



Οι ολιγόλεπτες μετρήσεις βηματισμού επαναλήφθηκαν και για ολοκληρωμένο αισθητήρα με 70A διηλεκτρικό. Ακολουθεί το μονόλεπτο γράφημα φορτίου 12kg, και δύο συγκριτικές εικόνες απόκρισης: FilaFlex 82A και FilaFlex 70A, σε τυχαίο βηματισμό φορτίου 14kg.

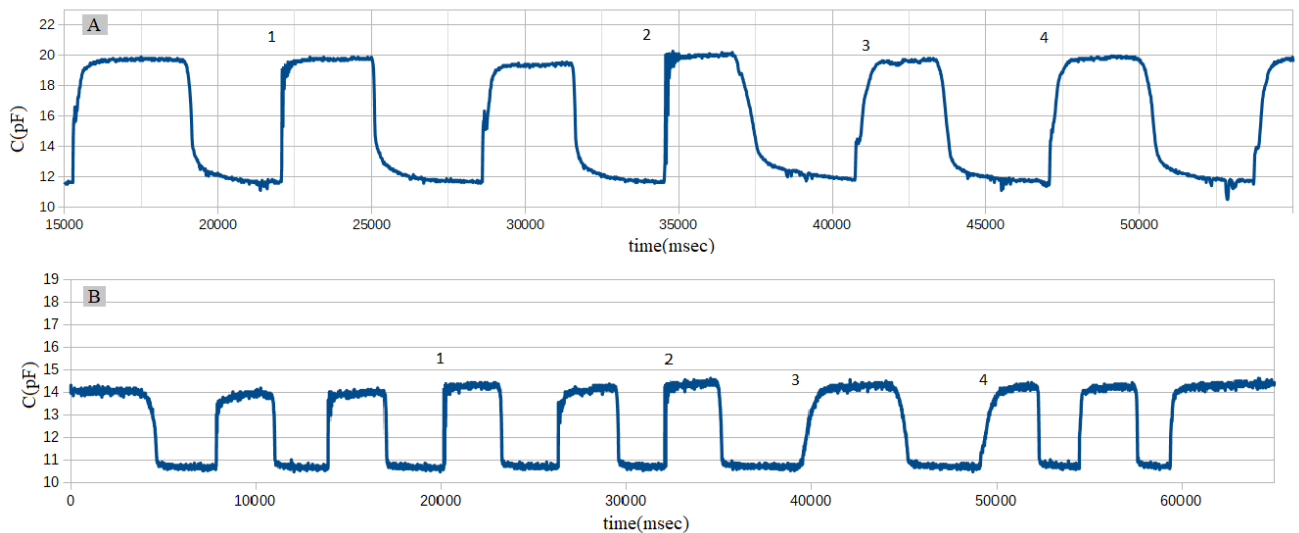
Γράφημα 21:

Απόκριση αισθητήρα Protopasta – FilaFlex 70A, συνολικού πάχους 1.2mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.6mm, σε προσομοίωση βηματισμού φορτίου 12kg, σε πραγματικό χρόνο



Γράφημα 22:

Απόκριση σε τυχαία χρονοεξαρτώμενη εφαρμοζόμενη πίεση (φορτίο 14kg) βηματισμού, σε πραγματικό χρόνο, αισθητήρων 70A [A] και 82A [B], διαστάσεων: συνολικό πάχος 1.1mm, διάμετρο 15mm, παχος διηλεκτρικού 0.5mm

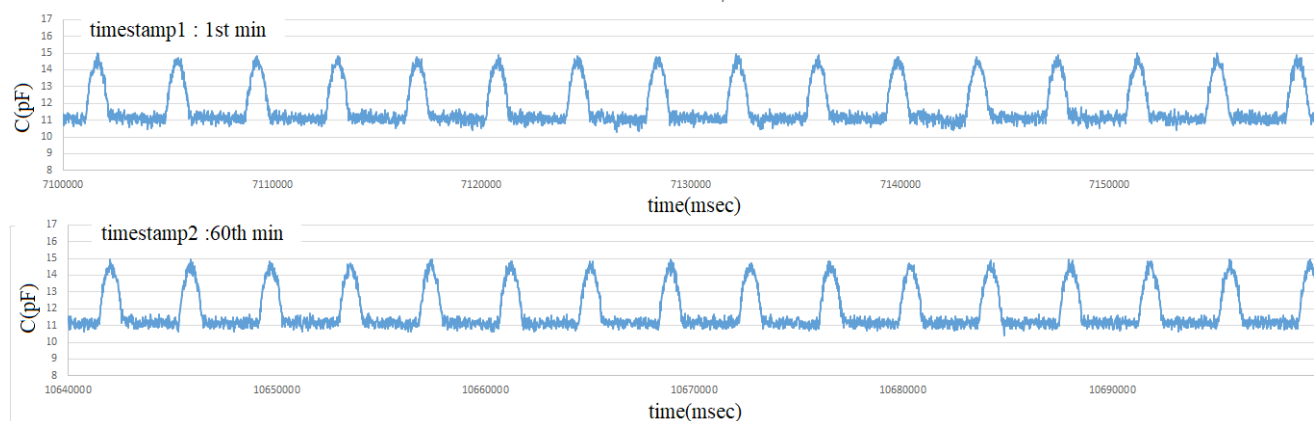


Στα δύο παραπάνω διαγράμματα, το έμβολο αφήνεται να πιέσει τον αισθητήρα απότομα, στα σημεία (1) και (2) και ομαλά, στα σημεία (3) και (4).

Τέλος, καταγράφουμε την απόκριση ο αισθητήρα 82A, για συνεχόμενη χρήση μίας ώρας, στη διάταξη βαδίσματος. Τα γραφήματα του πρώτου και εξηκοστού λεπτού:

Γράφημα 23:

Απόκριση πυκνωτή (Protopasta – FilaFlex 82A, συνολικού πάχους 1.1mm, διαμέτρου 15mm και πάχους διηλεκτρικού 0.5mm) σε προσομοίωση βηματισμού φορτίου 14kg, για λειτουργία διάρκειας 60min: στιγμιότυπα του 1^{ου} και 60^{ου} λεπτού



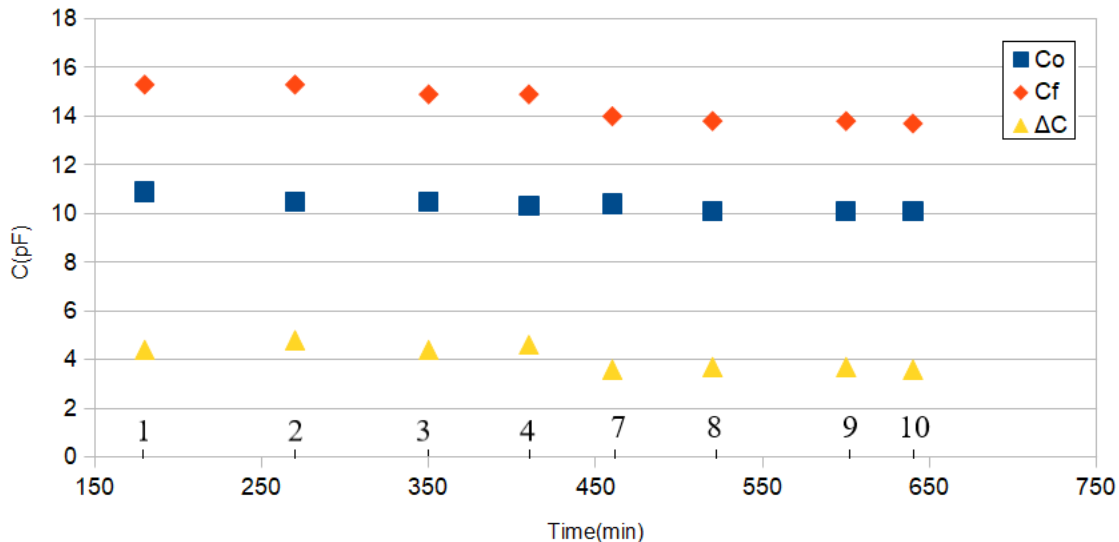
Οι αποκρίσεις είναι όμοιες, ο αισθητήρας δεν παρουσιάζει ολίσθηση.

III.3.b. Γήρανση

Επί τη διάρκεια δέκα εβδομάδων, δείγμα αισθητήρα Τελικού Μοντέλου (βλέπε επόμενο υποκεφάλαιο) διηλεκτρικού FilaFlex 82A, δοκιμάζεται στη διάταξη βαδίσματος για περίπου 1 – 2 ώρες τη βδομάδα. Συχνότητα βαδίσματος 35 – 45 βήματα το λεπτό το πόδι, φορτίο 14kg. Από τις τιμές των κορυφών, βυθισμάτων και τη διαφορά αυτών βρίσκουμε τις C_f , C_o και ΔC , αντίστοιχα.

Γράφημα 24:

Αρχική χωρητικότητα C_0 , μέγιστη χωρητικότητα C_f και μεταβολή χωρητικότητας ΔC , τελικού πυκνωτή, προς συνολικό χρόνο χρήσης, σε περίοδο 10 εβδομάδων: 60-120' λειτουργίας ανά εβδομάδα

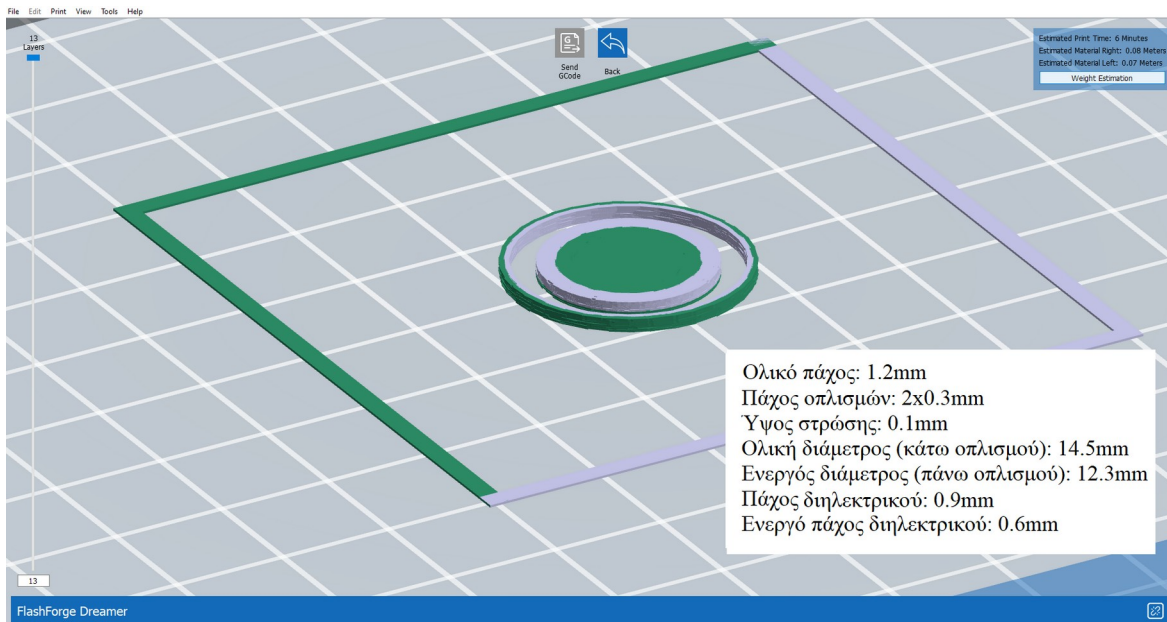


Το σφάλμα του συστήματος μέτρησης: $\pm 0.5 \text{ pF}$

Ο οριζόντιος άξονας του διαγράμματος αντιστοιχεί στο χρόνο χρήσης του αισθητήρα σε λεπτά κι έχει σημειωθεί ο αριθμός εβδομάδας μετρήσεων.

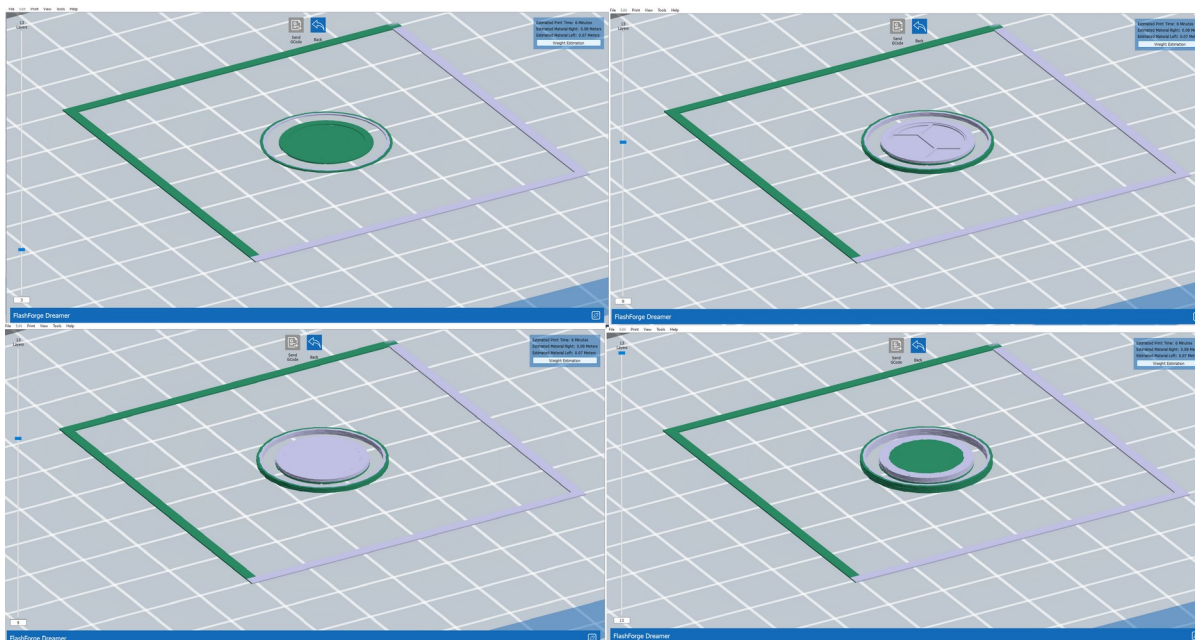
III.4. Το τελικό μοντέλο

Το τελικό μοντέλο του αισθητήρα που επιλέχθηκε, έχει τις διαστάσεις: ολικό πάχος 1.2mm, πάχος σπλισμών 2·0.3mm, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος (κάτω σπλισμού) 14.5mm, ενεργός διάμετρος (πάνω σπλισμού) 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm.



Εικόνα 11: Το τελικό μοντέλο (FlashForge)

Παρακάτω, εικόνες από το Flashprint: Η 3^η, 8^η, 10^η και 13^η στρώση του μοντέλου. Η μία στρώση του διηλεκτρικού έχει infill 10%, ενώ οι υπόλοιπες 100%.

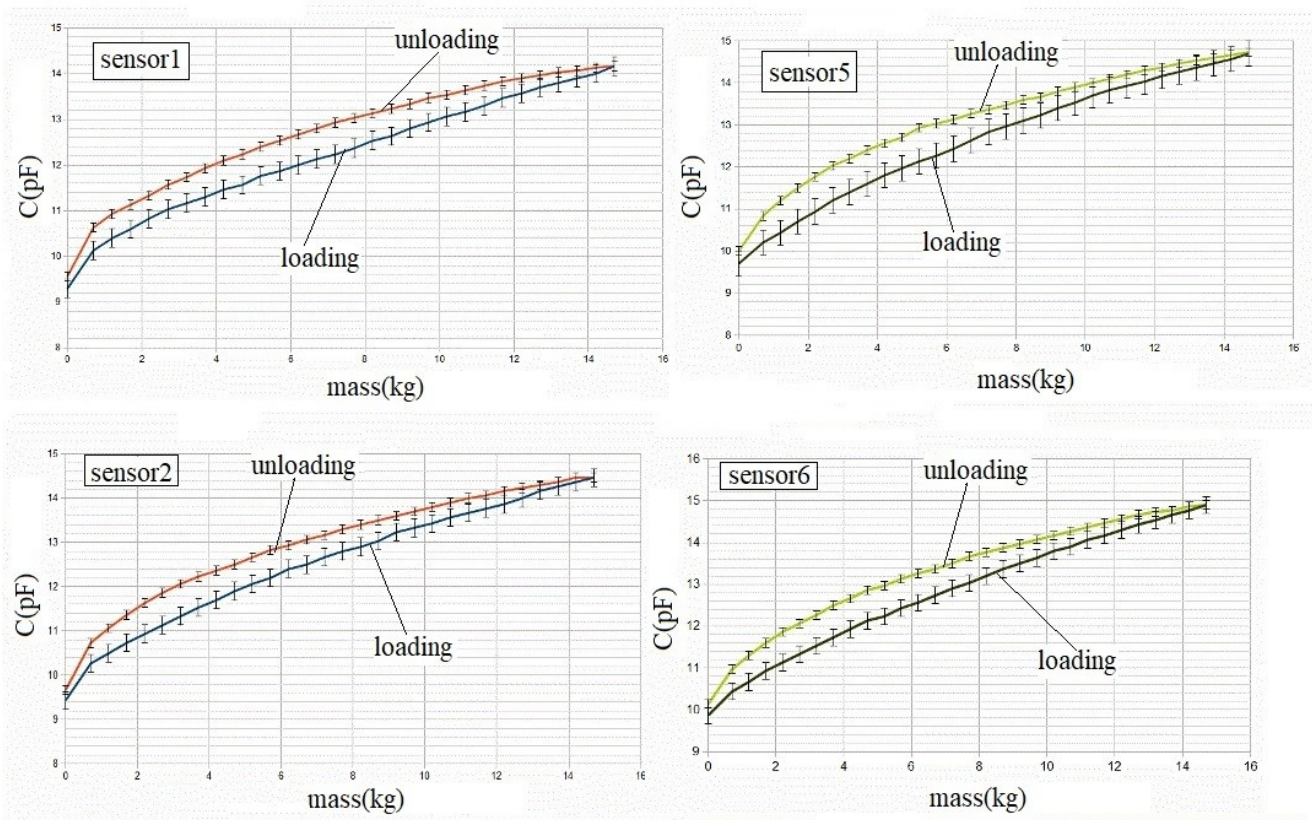


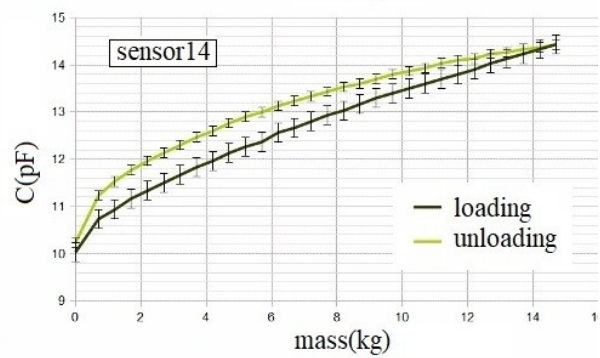
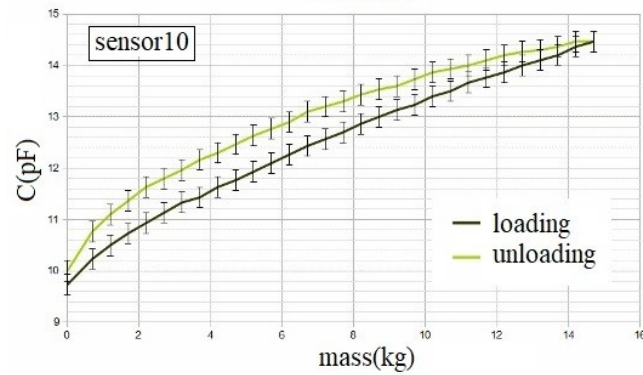
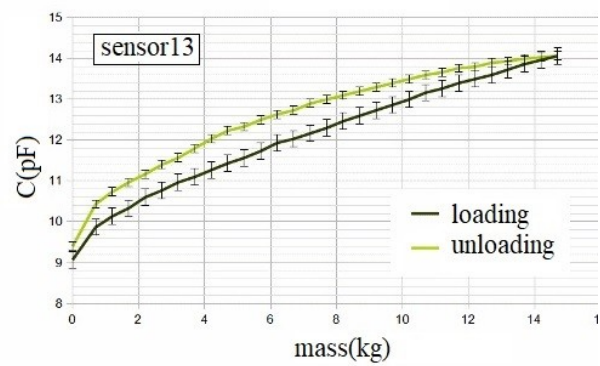
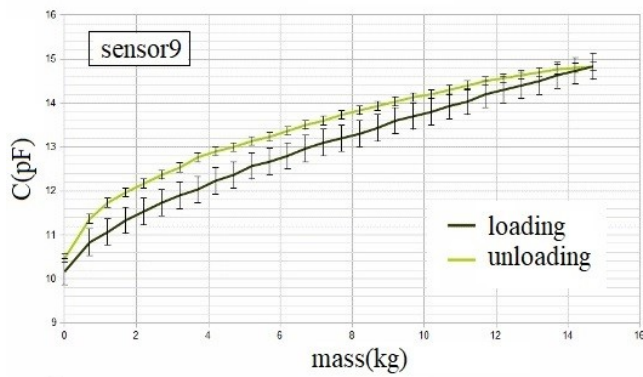
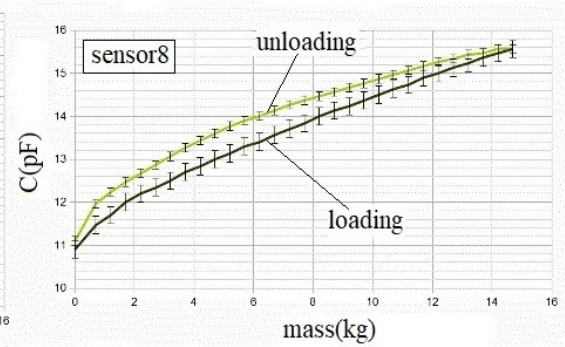
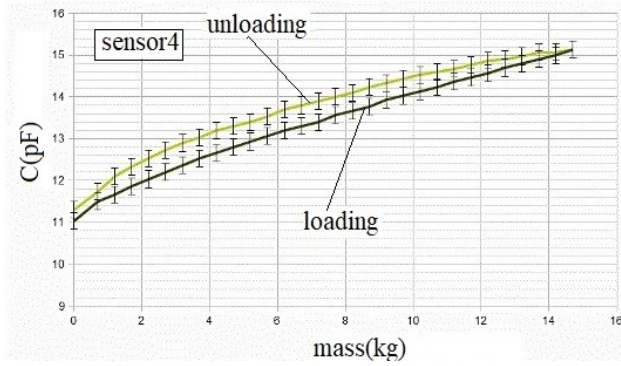
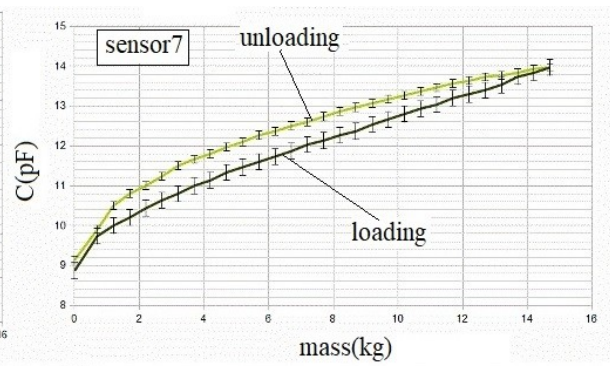
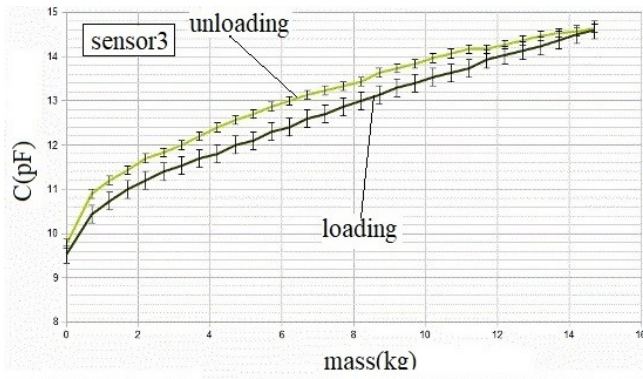
Εικόνα 12: Slicing του αισθητήρα - στρώσεις 3, 8, 10, 13

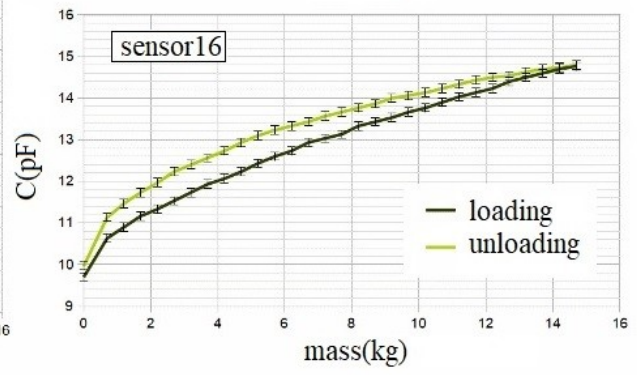
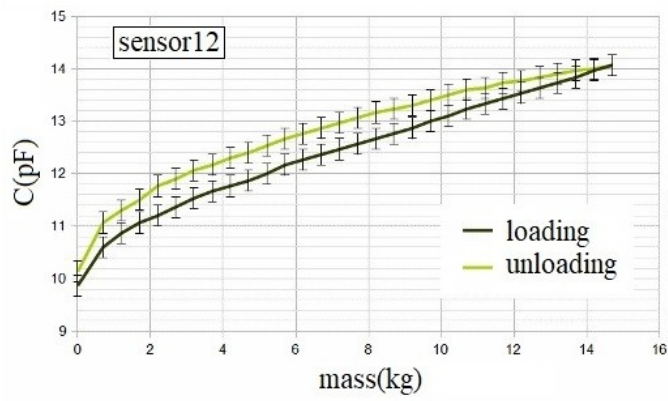
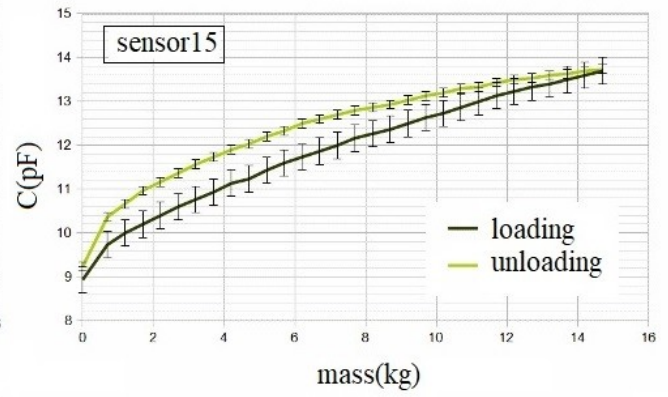
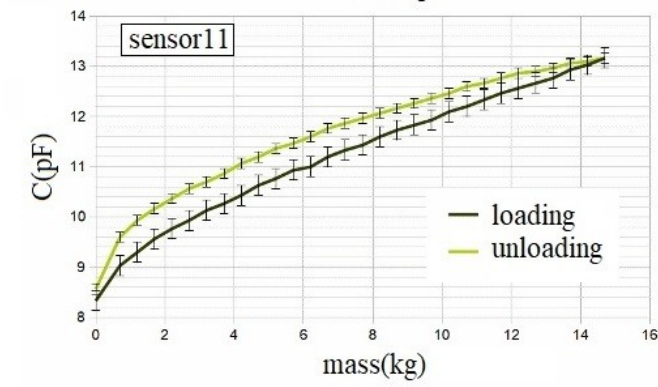
Δεκαέξι αισθητήρες αυτού του σχεδιασμού εκτυπώθηκαν και μετρήθηκαν οι αποκρίσεις φόρτωσης και εκφόρτωσης τους, σε εύρος 0-14kg, με σκοπό να τοποθετηθούν σε ολοκληρωμένη σόλα.

Γράφημα 25:

Χωρητικότητα προς πίεση, για φόρτωση και εκφόρτωση, των 16 αισθητήρων, με διαστάσεις: ολικό πάχος 1.2mm, πάχος οπλισμών $2 \cdot 0.3\text{mm}$, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος (κάτω οπλισμού) 14.5mm, ενεργός διάμετρος (πάνω οπλισμού) 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm







ΜΕΡΟΣ IV: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

IV.1.Χαρακτηριστικά μεγέθη

IV.1.a.Χωρητικότητα ως προς επιφάνεια, πάχος, infill

Από τις μετρήσεις της παραγράφου III.2.A, καταλήγουμε σε κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της χωρητικότητας στις αλλαγές γεωμετρίας του αισθητήρα.

Παρουσιάστηκε μία τάση για μεγαλύτερη απόκριση στα 20% infill, όχι όμως σε όλους τους αισθητήρες, για τις διαφορετικές διαστάσεις.

Οι τετραγωνικοί αισθητήρες παρουσίασαν τη μεγαλύτερη μεταβολή χωρητικότητας, αλλά τη χειρότερη γραμμικότητα.

Σε όλες τις περιπτώσεις, τα δείγματα με λιγότερες συμπαγείς στρώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη και ομαλότερη μεταβολή χωρητικότητας στην ίδια μεταβολή πίεσης, όμως τα δείγματα χωρίς καθόλου συμπαγείς περιφερειακές στρώσεις βραχυκυκλώνουν υπό ψηλές πιέσεις.

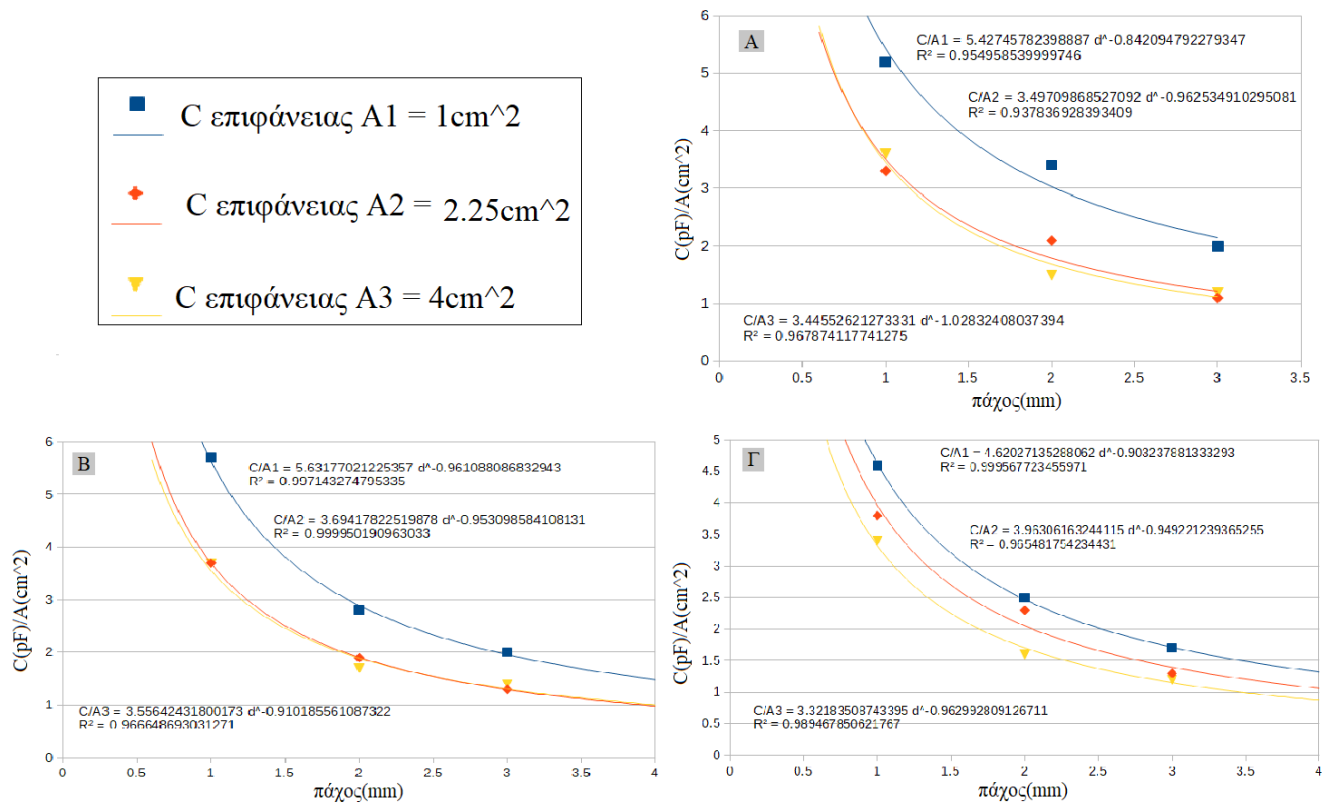
Η C_0/A προς d έχει την εξάρτηση

$$C_0/A = \kappa \cdot d^{-1} \quad (4).$$

Προσαρμόζουμε κατάλληλη καμπύλη για να εξάγουμε συναρτησιακές σχέσεις, όπου ο συντελεστής α αντιστοιχεί στη σταθερά κ και ο εκθέτης β πρέπει να προσεγγίζει την τιμή 1. Ακολουθούν ενδεικτικά διαγράμματα και συγκεντρωτικός πίνακας, από αποτελέσματα δειγμάτων Protopasta – FilaFlex 70A (δεδομένα §III.2.a).

Γράφημα 26:

Χωρητικότητα ανά επιφάνεια σε συνάρτηση με το πάχος διηλεκτρικού, για διαφορετικές επιφάνειες και infill 15% [A], 20% [B], 25% [Γ]. Δείγματα τετραγωνικών οπλισμών Protorasta πάχους 0.3mm και διηλεκτρικών Filaflex 70A



Πίνακας 7:
Υπολογισμός διηλεκτρικής σταθεράς (FilaFlex 70A)

C/A = $\alpha \cdot d^\beta$				
infill%	A(cm ²)	α	β	R ²
15	1	5.43	-0.84	0.955
"	2.25	3.5	-0.96	0.9378
"	4	3.45	-1.03	0.9679
20	1	5.63	-0.96	0.9971
"	2.25	3.69	-0.95	0.9999
"	4	3.56	-0.91	0.9666
25	1	4.62	-0.9	0.9996
"	2.25	3.96	-0.95	0.9655
"	4	3.32	-0.96	0.9895
30	1	5.28	-0.73	0.993
"	2.25	3.71	-0.43	0.9133
"	4	4.12	-1.11	0.9752
50	1	4.38	-0.68	0.9989
"	2.25	3.11	-0.72	0.9997
"	4	3.88	-0.9	0.9909
100	1	3.74	-0.51	0.9928
"	2.25	3.69	-0.61	0.9996
"	4	4.95	-0.76	0.9965

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι:

- Η σταθερά κ , δεν παρουσιάζει υπολογίσιμη απόκριση από το infill και την επιφάνεια A.
- Το μέγεθος Co/A προς infill δεν παρουσιάζει υπολογίσιμη εξάρτηση.
- Η μείωση του πάχους d του διηλεκτρικού συνεπάγεται αύξηση χωρητικότητας.
- Η αύξηση της επιφάνειας A συνεπάγεται αύξηση της χωρητικότητας.
- Η αύξηση του ποσοστού infill συνεπάγεται αύξηση της χωρητικότητας.
- Η μείωση του ποσοστού infill συνεπάγεται αύξηση της απόκρισης και του εύρους λειτουργίας, για τα δείγματα πάχους $d \geq 1\text{mm}$, αλλά όχι και για τα δείγματα πάχους $d = 0.6\text{mm}$, πράγμα θετικό, αφού μια συμπαγής εκτύπωση έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή.

Οι περισσότερες από τις παραπάνω παρατηρήσεις ήταν αναμενόμενες, αφού επαληθεύουν είτε τη φυσική θεωρία μεταβλητού πυκνωτή, είτε την προϋπάρχουσα έρευνα. Μία αρχική υπόθεση η οποία καταρρίφθηκε ήταν πως η μείωση του πάχους d θα συνεπάγεται μείωση της απόκρισης και του εύρους

λειτουργίας. Οι μετρήσεις υπέδειξαν την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά, πράγμα θετικό, αφού κατευθυνόμαστε προς λεπτότερες αισθητήρες για καλύτερη απόκριση.

Στην εργασία, η εξάρτηση της απόκρισης ως προς το πάχος των οπλισμών δεν μελετήθηκε διεξοδικά, λόγω της φύσης της εφαρμογής που απαιτεί ελαχιστοποίηση του πάχους. Παρ' όλα αυτά, κατά τις πρώτες δοκιμαστικές μετρήσεις παρατηρήθηκε – σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία([12]) - ελαφρώς υψηλότερη απόκριση, με μεγαλύτερης γραμμικότητας καμπύλη, στα δείγματα με λεπτότερους οπλισμούς.

IV.1.b. Σταθερότητα σε χρόνο και θερμοκρασία

Για τη συμπεριφορά των πυκνωτών υπό σταθερή πίεση σε θερμοκρασία δωματίου, δείχθηκε πως τη μεγαλύτερη ολίσθηση στη χωρητικότητα έχει ο συνδυασμός Eel οπλισμών – FilaFlex 70A διηλεκτρικό (2.3pF at 40min) ενώ τη μικρότερη, ο συνδυασμός Electrifi με οποιοδήποτε διηλεκτρικό (0.5pF at 40min), πλην του 70A (Γραφήματα: 10-13). Το δείγμα Protopasta – FilaFlex 82A, είχε 1.2pF ολίσθηση στα 40min, υπό σταθερή πίεση, αλλά μηδενική ολίσθηση στη 1 ώρα δυναμικών μετρήσεων (Γράφημα: 23).

Όπως υποδείχθηκε στην παράγραφο III.1.d. - Εξάρτηση από τη θερμοκρασία, η απόκριση του αισθητήρα επηρεάζεται από την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όχι όμως και από το χρόνο παραμονής του σε αυτή τη θερμοκρασία. Η αύξηση της C και ΔC οφείλεται πιθανώς σε μεταβολή της σταθεράς κ του διηλεκτρικού και της αντίστασης των οπλισμών, και όχι σε παραμόρφωση του υλικού, αφού το νήμα που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτές τις μετρήσεις (FilaFlex 82A) έχει softening temperature 105°C , διπλάσια από αυτή των δοκιμών. Η ολίσθηση είναι εκτός των ορίων του σφάλματος και θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ως μια πρόκληση στο σχεδιασμό και τη χρήση των χωρητικών αισθητήρων. Η θερμική ολίσθηση συμβαίνει λόγω της πιεζοαντίστασης που έχουν οι οπλισμοί, μιας και η θερμοκρασία επηρεάζει την αντίστασή τους. Μία πιθανή λύση είναι να γνωρίζει το σύστημα τη θερμοκρασία που έχει, σε κάθε μέτρηση, ώστε να την κανονικοποιεί αντίστοιχα.

Είδαμε στα αποτελέσματα πως η αξιοπιστία του αισθητήρα ελαττώνεται ελαφρώς με το χρόνο. Υποθέτω πως η αιτία είναι η διάρκεια ζωής των υλικών κι όχι οι ώρες λειτουργίας, διότι υπήρχε κενό διάστημα 2 εβδομάδων όπου οι αισθητήρες δε χρησιμοποιήθηκαν και συνέχιζε να μειώνεται ελαφρώς. Η απόκλιση ήταν εντός του ορίου της τυπικής απόκλισης, για το διάστημα των 10 εβδομάδων που

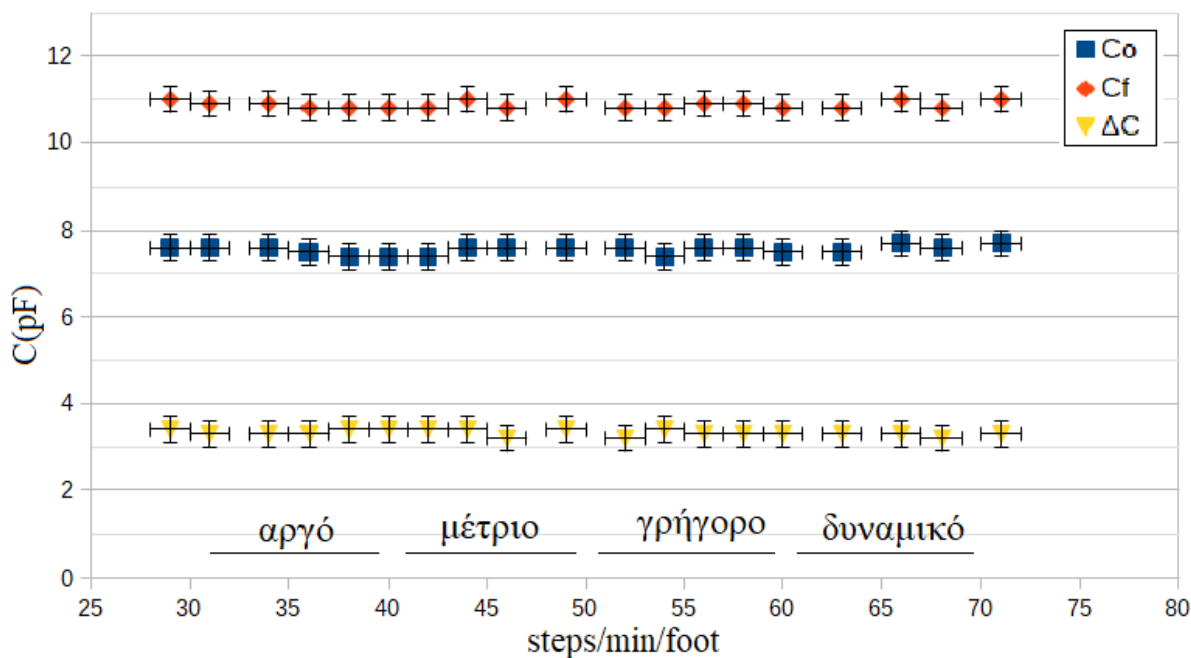
πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, όμως εκκρεμεί να διερευνηθεί εκτενέστερα η γήρανση του συστήματος. Παρ' όλ' αυτά, η ιδέα είναι πως μία εξολοκλήρου 3D εκτυπωμένη έξυπνη σόλα θα έχει τόσο χαμηλό κόστος που ο χρήστης θα μπορεί να την αλλάξει αρκετά συχνά, εφόσον η απόκριση φθάσει σε τιμές που δημιουργούν συστηματικά λάθη στην καταγραφή των δεδομένων.

IV.2.Απόκριση σε συχνότητες βηματισμού

Η τελευταία δοκιμασία για την ολοκλήρωση του χαρακτηρισμού του αισθητήρα είναι η μελέτη της απόκρισής του υπό διαφορετικές συχνότητες βηματισμού. Χρησιμοποιήσαμε τη διάταξη προσομοίωσης βαδίσματος και πήραμε μετρήσεις του ενός λεπτού για κάθε συχνότητα. Παίρνουμε μέσους όρους κορυφών. Όπως φαίνεται παρακάτω, δεν υπάρχει εξάρτηση για το εύρος που αφορά τη λειτουργία του αισθητήρα. Αυτό σημαίνει ότι ο αισθητήρας μας δίνει την ίδια τιμή είτε πρόκειται για αργό ή δυναμικό περπάτημα.

Γράφημα 27:

Αρχική χωρητικότητα C_0 , μέγιστη χωρητικότητα C_f και μεταβολή χωρητικότητας ΔC , τελικού πυκνωτή (ολικό πάχος 1.2mm, πάχος οπλισμών 2·0.3mm, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος κάτω οπλισμού 14.5mm, ενεργός διάμετρος πάνω οπλισμού 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm), για διαφορετικές συχνότητες βηματισμού[αριθμός βημάτων ανά λεπτό και ανά πόδι]



Στο διάγραμμα 27 σημειώνονται οι περιοχές συχνότητων για τις διάφορες κατηγορίες βαδίσματος ως εξής: αργό 30 – 40 βήματα, μέτριο 40 – 50 βήματα, γρήγορο 50 – 60 βήματα, δυναμικό 60 – 70 βήματα. Τα βήματα μετριοούνται με ακρίβεια ± 1 και αναφέρονται μόνο στο ένα πόδι. Ως C_0 αναφέρεται στη λεζάντα η αρχική τιμή της χωρητικότητας, C_f η τελική τιμή και ΔC η διαφορά τους.

IV.3. Το τελικό μοντέλο - συγκεντρωτικό

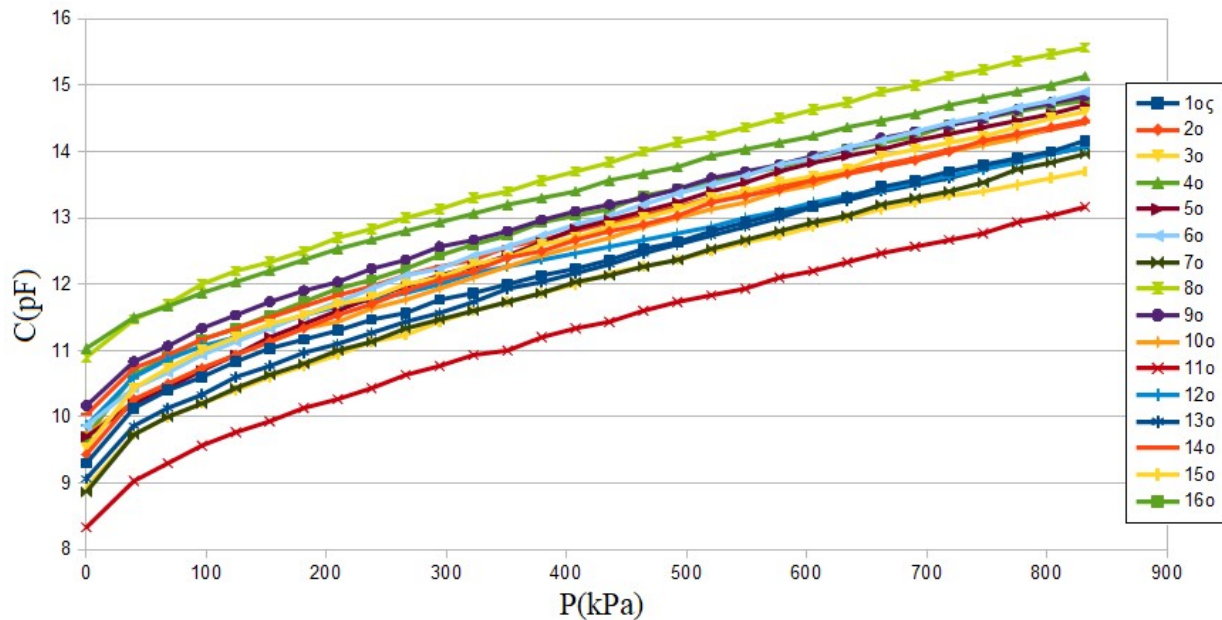
Από τους πυκνωτές διαφορετικών διηλεκτρικών, το βέλτιστο συνδυασμό σταθερότερης συμπεριφοράς, μεγαλύτερης απόκρισης και ευκολίας εκτύπωσης έδειξε ο 82A.

Στην προσπάθεια να επιτύχουμε 16 λειτουργικούς αισθητήρες τελικού μοντέλου, χρειάστηκε να εκτυπωθούν 19: δύο εκτυπώσεις ήταν εμφανώς ελαττωματικές κι ένας πυκνωτής είχε σημαντικά χαμηλότερη απόκριση από τους υπόλοιπους

Οι τελικές τιμές χωρητικότητας και μεταβολής χωρητικότητας, των 16 επιτυχών εκτυπώσεων, σε γράφημα 28 & 29 και συγκεντρωτικό πίνακα 8.

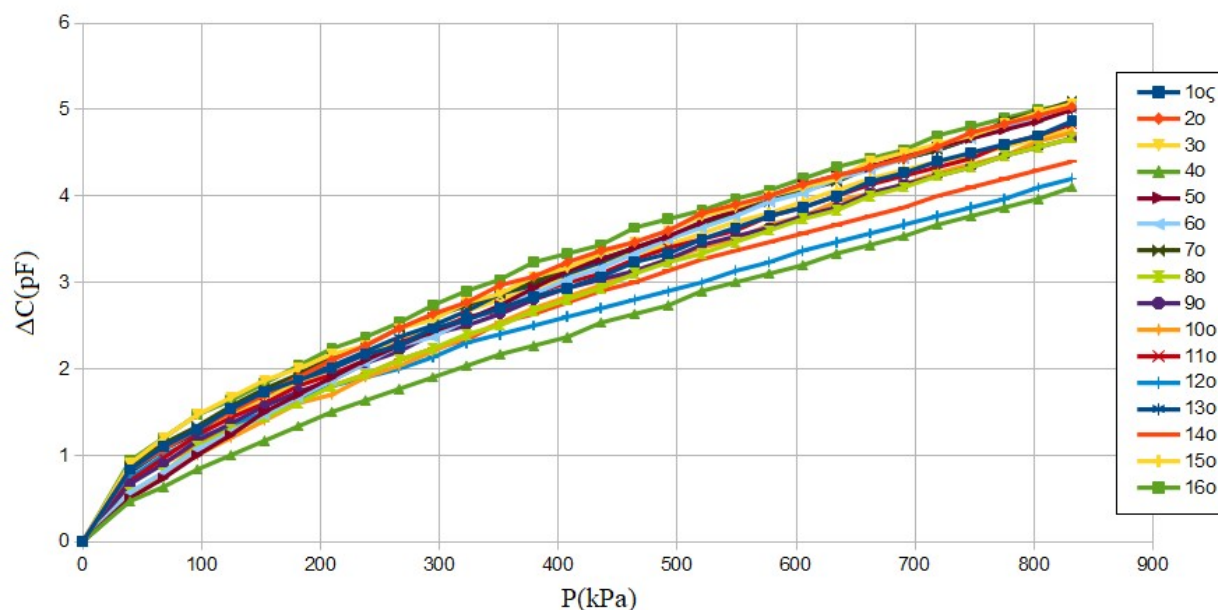
Γράφημα 28:

Χωρητικότητα C_0 (pF) προς πίεση P (kPa), με φορά μεταβολής φόρτωσης (loading), για τους 16 τελικούς αισθητήρες: ολικό πάχος 1.2mm, πάχος οπλισμών $2 \cdot 0.3$ mm, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος (κάτω οπλισμού) 14.5mm, ενεργός διάμετρος (πάνω οπλισμού) 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm



Γράφημα 29:

Μεταβολή χωρητικότητας ΔC (pF) προς πίεση P (kPa), με φορά μεταβολής φόρτωσης (loading), για τους 16 τελικούς αισθητήρες: ολικό πάχος 1.2mm, πάχος οπλισμών $2 \cdot 0.3$ mm, ύψος στρώσης 0.1mm, ολική διάμετρος (κάτω οπλισμού) 14.5mm, ενεργός διάμετρος (πάνω οπλισμού) 12.3mm, πάχος διηλεκτρικού 0.9mm, ενεργό πάχος διηλεκτρικού: 0.6mm



Πίνακας 8:

Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηρισμού των 16 αισθητήρων (1)

sensor	Co load (± 0.1 pF)	Co unload (± 0.1 pF)	Cf load (± 0.1 pF)	Cf unload (± 0.1 pF)	ΔC load (± 0.1 pF)	ΔC unload (± 0.1 pF)	standard div load (\pm pF)	standard div unload (\pm pF)	dCo (± 0.1 pF)	dCf (± 0.1 pF)	d ΔC load (pF)
1	9.3	9.6	14.2	14.2	4.9	4.6	0.2	0.1	0.3	0	0.3
2	9.4	9.7	14.5	14.5	5	4.7	0.2	0.1	0.3	0	0.3
3	9.5	9.8	14.6	14.6	5.1	4.8	0.2	0.1	0.3	0	0.3
4	11	11.3	15.1	15.1	4.1	3.8	0.2	0.2	0.3	0	0.3
5	9.7	10	14.7	14.7	5	4.7	0.3	0.1	0.3	0	0.3
6	9.9	10.1	14.9	14.9	5	4.8	0.2	0.1	0.2	0	0.2
7	8.9	9.1	14	14	5.1	4.8	0.2	0.1	0.2	0	0.3
8	10.9	11.1	15.6	15.6	4.7	4.5	0.2	0.1	0.2	0	0.2
9	10.2	10.5	14.8	14.8	4.7	4.4	0.3	0.1	0.3	0	0.3
10	9.7	10	14.5	14.5	4.7	4.4	0.2	0.2	0.3	0	0.3
11	8.3	8.6	13.2	13.2	4.8	4.5	0.2	0.1	0.3	0	0.3
12	9.9	10.1	14.1	14.1	4.2	4	0.2	0.2	0.2	0	0.2
13	9.1	9.4	14.1	14.1	5	4.7	0.2	0.1	0.3	0	0.3
14	10	10.2	14.4	14.4	4.4	4.2	0.2	0.1	0.2	0	0.2
15	8.9	9.2	13.7	13.7	4.8	4.5	0.3	0.1	0.3	0	0.3
16	9.7	10	14.8	14.8	5.1	4.8	0.1	0.1	0.3	0	0.3

Επεξήγηση συγκεντρωτικού πίνακα 8:

Co load – αρχική τιμή χωρητικότητας υπό μηδενικό φορτίο, Co unload – τιμή χωρητικότητας υπό μηδενικό φορτίο κατά την εκφόρτωση, Cf load/unload – τελική τιμή χωρητικότητας υπό μέγιστο φορτίο 14kg, ΔC load – η μέγιστη απόκριση του πυκνωτή κατά τη φόρτωση, ΔC unload – η μέγιστη απόκριση του πυκνωτή κατά την εκφόρτωση, $|dCo| = Co\ unload - Co\ load$, $|dCf| = Cf\ unload - Cf\ load$, $|d\Delta C\ load| = |dCo| - |dCf|$.

Βρίσκουμε τη χωρητικότητα όλων των αισθητήρων μεταξύ 8.3pF και 11pF ενώ την απόκριση στο μέγιστο φορτίο μεταξύ 4.1pF και 5.1pF. Για κάθε έναν, η διαφορά μεταξύ φόρτωσης εκφόρτωσης, σε χωρητικότητα και απόκριση, ήταν 0.2 – 0.3pF. Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων υπολογίστηκε από $< 0.1pF$ ως 0.3pF.

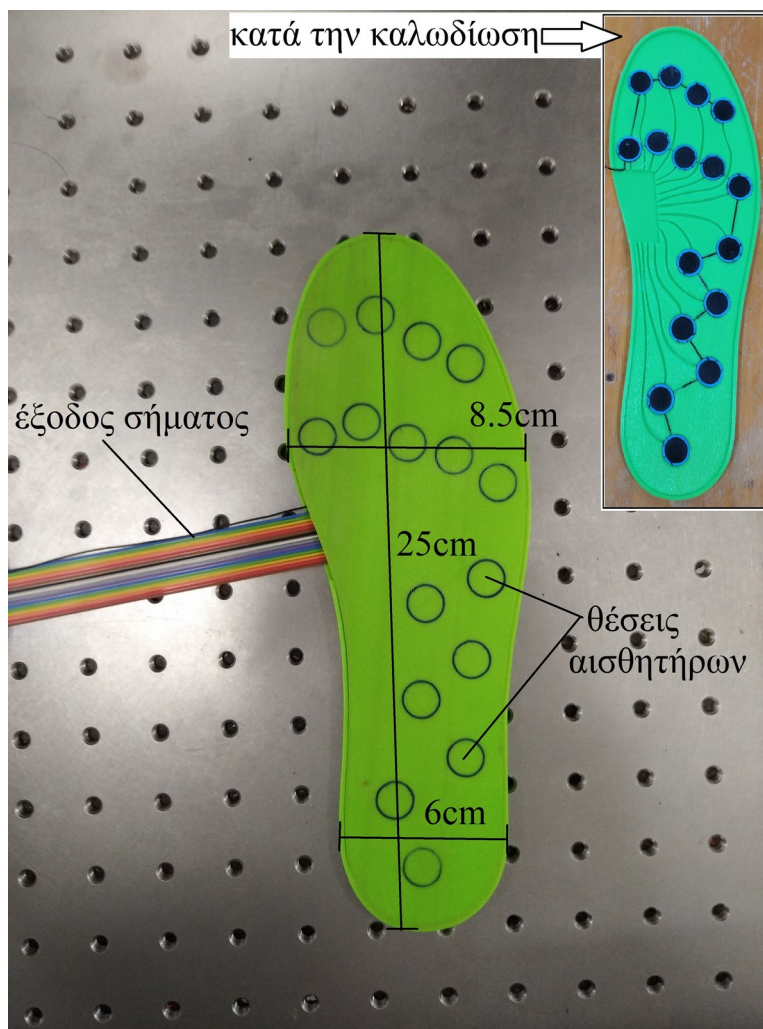
Πίνακας 9:

Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηρισμού των 16 αισθητήρων (2)

sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ευαισθησία (fF/kPa)	5	5	5	4	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5
R ²	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

IV.5.Χαρακτηρισμός πέλματος

Οι δεκαέξι αισθητήρες τύπου τελικού μοντέλου, που κατασκευάστηκαν και βαθμονομήθηκαν, ενσωματώθηκαν σε δοκιμαστική εκτύπωση σόλας, συνολικού πάχους 3.8mm, μήκους ως 25cm και φάρδους ως 8.5cm (η επιφάνεια αναφέρεται σε N_o 39 πέλματος).



Εικόνα 13: Δοκιμαστική εκτύπωση πέλματος

Πίνακας 10:

Χαρακτηρισμός 3DP Πρωτοτύπου

ηλεκτρονικά	αριθμός αισθητήρων	είδος αισθητήρων	ολικό πάχος	φορτίο δοκιμών	ευαισθησία	γραμμικότητα (R^2)
εξωτερικά	16	χωρητικοί, 3DP	3.9mm	830kPa per sensor	0.005pF/kPa 0.3pF/kg	0.991

Πίνακας 11:
Σύγκριση 3DP Πρωτοτύπου με δύο εμπορικά πέλματα

	ηλεκτρονικά	αριθμός αισθητήρων	είδος αισθητήρων	πάχος (mm)	εύρος μέτρησης (kPa)	κόστος ζεύγους (€)	χρόνος κατασκευής	Εξατομικευμένος σχεδιασμός
3DP Πρωτότυπο	εξωτερικά ή εσωτερικά	16	χωρητικοί	3.9	0-830	≤40	μερικές ώρες	ναι
Moticon (Moticon, Germany)	ασύρματο	16	χωρητικοί	2.8-10.5	0-1200	1500	1 εβδομάδα	όχι
W-In shoe Easy (Medicapture, France)	εξωτερικά	8	πιεζοαντίσταση	0.5	0-784	δ.δ	1 εβδομάδα	όχι

IV.6.Συμπεράσματα

Σε αυτή τη δουλειά παρουσιάστηκε η δυνατότητα κατασκευής μιας έξυπνης σόλας, εξολοκλήρου 3DP, η οποία να βασίζεται σε χωρητικούς αισθητήρες και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ανάλυσης βαδίσματος. Η μελέτη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των χωρητικών αισθητήρων, καθώς και τα διάφορα υλικά, έδειξαν πως υπάρχει δυνατότητα να κατασκευάσουμε μία μεγάλη σειρά από αυτούς. Υπάρχουν αρκετά περιθώρια βελτίωσης της διακριτικής ικανότητας και του εύρους λειτουργίας του συστήματος. Σε αυτό, σίγουρα η εξέλιξη της επιστήμης υλικών θα μπορέσει να βοηθήσει, αφού η εισαγωγή νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες (αγωγιμότητα, ελαστικότητα κ.τ.λ.), καθώς επίσης και η πρόοδος της τεχνολογίας, πίσω από την 3D εκτύπωση θα προσφέρει πιο ακριβείς, επαναλήψιμους και μικρότερων διαστάσεων 3DP χωρητικούς αισθητήρες.

Τα τελευταία χρόνια, ακούγεται πολύ ο τομέας της εξατομικευμένης ιατρικής. Προφανώς, με την προσέγγιση που παρουσιάστηκε σε αυτή τη δουλειά, μπορεί να πάρει σάρκα και οστά, αφού η κάθε σόλα θα μπορεί να σχεδιάζεται κατά παραγγελία στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του πέλματος του κάθε χρήστη, χωρίς την αύξηση του κόστους του προϊόντος, που αυτό συνήθων συνεπάγεται. Αυτό θα

βελτιώσει την ακρίβεια των δεδομένων που θα καταγράφονται, δίνοντας ένα δυνατό εργαλείο στην πρόγνωση.

Από την άλλη, η 3D εκτύπωση είναι από μόνη της επαναστατική μέθοδος, προσφέροντας τη δυνατότητα να κατασκευάσεις το οτιδήποτε, χρησιμοποιώντας κατάλληλα τα διάφορα υλικά, χωρίς την ανάγκη πολύ ακριβούς εξοπλισμού, αυξάνοντας την προσβασιμότητα και βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής, μεγάλου μέρους του πληθυσμού.

Βιβλιογραφία και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

- [1] Seffinger, M., & Hruba, R., (2007), Manual diagnostic procedures overview. In *Evidence-based manual medicine: A problem-oriented approach*, (p.35-58).
<https://doi.org/10.1016/B978-1-4160-2384-5.50007-9>
- [2] Webster, J., & Darter, B., (2019), Principles of normal and pathologic gait. In *Atlas of orthoses and assistive devices*, (p.49-62).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-48323-0.00004-4>
- [3] Wittle, M., (2007). Applications of gait analysis. In *Gait analysis: An introduction*, (p.177-193).
<https://doi.org/10.1016/B978-075068883-3.50010-6>
- [4] Wittle, M., (2007). Methods of gait analysis. In *Gait analysis: An introduction*, (p.137-175).
<https://doi.org/10.1016/B978-075068883-3.50009-X>
- [5] Howell, A., Kobayashi, T., Hayes, H., Foreman, K., & Bamberg, S., (2013). Kinetic gait analysis using a low-cost insole. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60,(12), 3289-3290.
DOI: [10.1109/TBME.2013.2250972](https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2250972)
- [6] Lin, F., Wang, A., Zhuang, Y., Tomita, M., & Xu, W., (2016). Smart insole: A wearable sensor device for unobtrusive gait monitoring in daily life. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 12 (6), 2281-2290.
DOI [10.1109/TII.2016.2585643](https://doi.org/10.1109/TII.2016.2585643)
- [7] Hernandez, S., Stephenson, J., & Labrador, M., (2020). Use of wearable sensor technology in gait, balance, and range of motion analysis. *Applied Sciences*, 10,(1), 234
DOI [10.3390/app10010234](https://doi.org/10.3390/app10010234)
- [8] Postolache, O., Girao, P., Pereira, J., & Postolache, G., (2015). Wearable system for gait assessment during physical rehabilitation process. Presented at the 9th *International (ATEE) Conference*, Bucharest, Romania.
DOI [10.1109/ATEE.2015.7133823](https://doi.org/10.1109/ATEE.2015.7133823)
- [9] Aqueveque, P., Osorio, R., Pastene, F., Saavedra, F., & Pino, E., (2018). Capacitive sensors array for plantar pressure measurement insole fabricated with flexible PCB. Presented at the 40th *International EMB-IEEE Conference*, Honolulu, HI, USA.
DOI [10.1109/EMBC.2018.8513383](https://doi.org/10.1109/EMBC.2018.8513383)

- [10]Kwok, W. S., Goh, K. H. H., Tan, Z. D., Tan, Z. D. Tjiu, W. W., Soh, J. Y., Ng, Z. J. G., Chan, Y. Z., Hui, H. K., & Goh, K. E. J., (2017). Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. *Applied Materials Today*, 9, 167-175.
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.07.001>
- [11]Monkevich, J., & Le Sage, G. P., (2019). Design and Fabrication of a Custom-Dielectric Fresnel Multi-Zone Plate Lens Antenna Using Additive Manufacturing Techniques. *IEEE Access*, 7, 61452-61460.
DOI 10.1109/ACCESS.2019.2916077
- [12]Jaksic, N. I., & Desai, P. D., (2019). Characterization of 3D-printed capacitors created by fused filament fabrication using electrically-conductive filament. *Procedia Manufacturing*, 38, 33–41.
DOI:10.1016/j.promfg.2020.01.005
- [13]Le, T., Song, B., Liu, Q., Bahr, R. A., Moscato, S., Wong, C.-P., & Tentzeris, M. M. (2015). A novel strain sensor based on 3D printing technology and 3D antenna design. *IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, San Diego, CA, USA.
DOI: 10.1109/ECTC.2015.7159714
- [14]Goulas, A., Zhang, S., Cadman, D. A., Järveläinen, J., Mylläri, V., Whittow, W. G., & Engström, D. S. (2019). The impact of 3D printing process parameters on the dielectric properties of high permittivity composites. *Designs*, 3(4), 50.
DOI:10.3390/designs3040050
- [15]Schouten, M., Sanders, R., & Krijnen, G., (2017). 3D printed flexible capacitive force sensor with a simple micro-controller based readout. *IEEE Sensors*, Glasgow, UK.
DOI:10.1109/icsens.2017.8233949
- [16]Desai, P., D., (2016), *Characterization and Applications of Electrically-Conductive Filament in 3D Printing*[master's thesis]. Colorado State University.
- [17]Wu, Y., Isakov, D., & Grant, P., (2017). Fabrication of composite filaments with high dielectric permittivity for fused deposition 3D printing. *Materials*, 10(10), 1218.
DOI:10.3390/ma10101218
- [18]He, X., Zhou, J., Jin, L., Long, X., Wu, H., Xu, L., Zhou, W., (2020). Improved dielectric properties of thermoplastic polyurethane elastomer filled with core-shell structured PDA@TiC particles. *Materials*, 13(15), 3341.

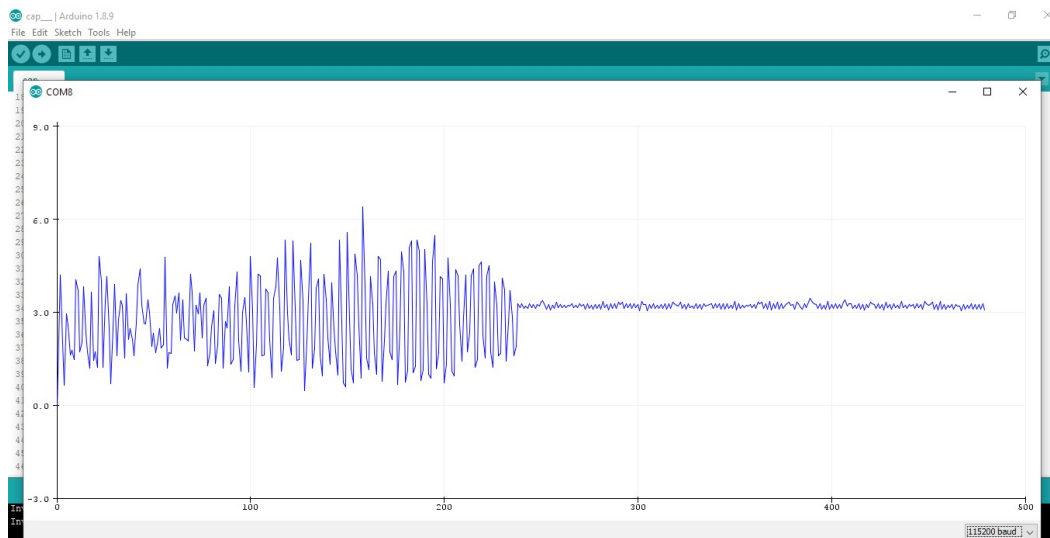
DOI:10.3390/ma13153341

- [19]El Kati, R., Forrester, S., & Fleming, P., (2010). Evaluation of pressure insoles during running. *Procedia Engineering*, 2(2), 3053–3058.
DOI:10.1016/j.proeng.2010.04.110
- [20]Liu, C., Huang, N., Xu, F., Tong, J., Chen, Z., Gui, X., Lao, C., (2018). 3D Printing Technologies for Flexible Tactile Sensors toward Wearable Electronics and Electronic Skin. *Polymers*, 10(6), 629.
DOI:10.3390/polym10060629
- [21]Xu, Y., Wu, X., Guo, X., Kong, B., Zhang, M., Qian, X., Sun, W., (2017). The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors*, 17(5), 1166.
DOI:10.3390/s17051166
- [22]Shemelya, C., Cedillos, F., Aguilera, E., Espalin, D., Muse, D., Wicker, R., & MacDonald, E., (2015). Encapsulated Copper Wire and Copper Mesh Capacitive Sensing for 3-D Printing Applications. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), 1280–1286.
DOI:10.1109/jsen.2014.2356973
- [23]Ntagios, M., Navaraj, W. T., & Dahiya, R., (2018). 3D Printed Phalanx Packaged with Embedded Pressure Sensor. *IEEE Sensors*, New Delhi, India.
DOI:10.1109/icsens.2018.8589720
- [24]Sixian, L., (2019). *3D-printed Conformal Antennas for Wearable Hyperthermia Device*[master's thesis]. North Carolina State University
- [25]Lin Shu, Tao Hua, Yangyong Wang, Qiao Li, Feng, D. D., & Xiaoming Tao., (2010). In-Shoe Plantar Pressure Measurement and Analysis System Based on Fabric Pressure Sensing Array. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(3), 767–775.
DOI:10.1109/titb.2009.2038904
- [26]Rivadeneira, A., & López-Villanueva, J. A., (2020). Recent Advances in Printed Capacitive Sensors. *Micromachines*, 11(4), 367.
DOI:10.3390/mi11040367

Παράρτημα Α

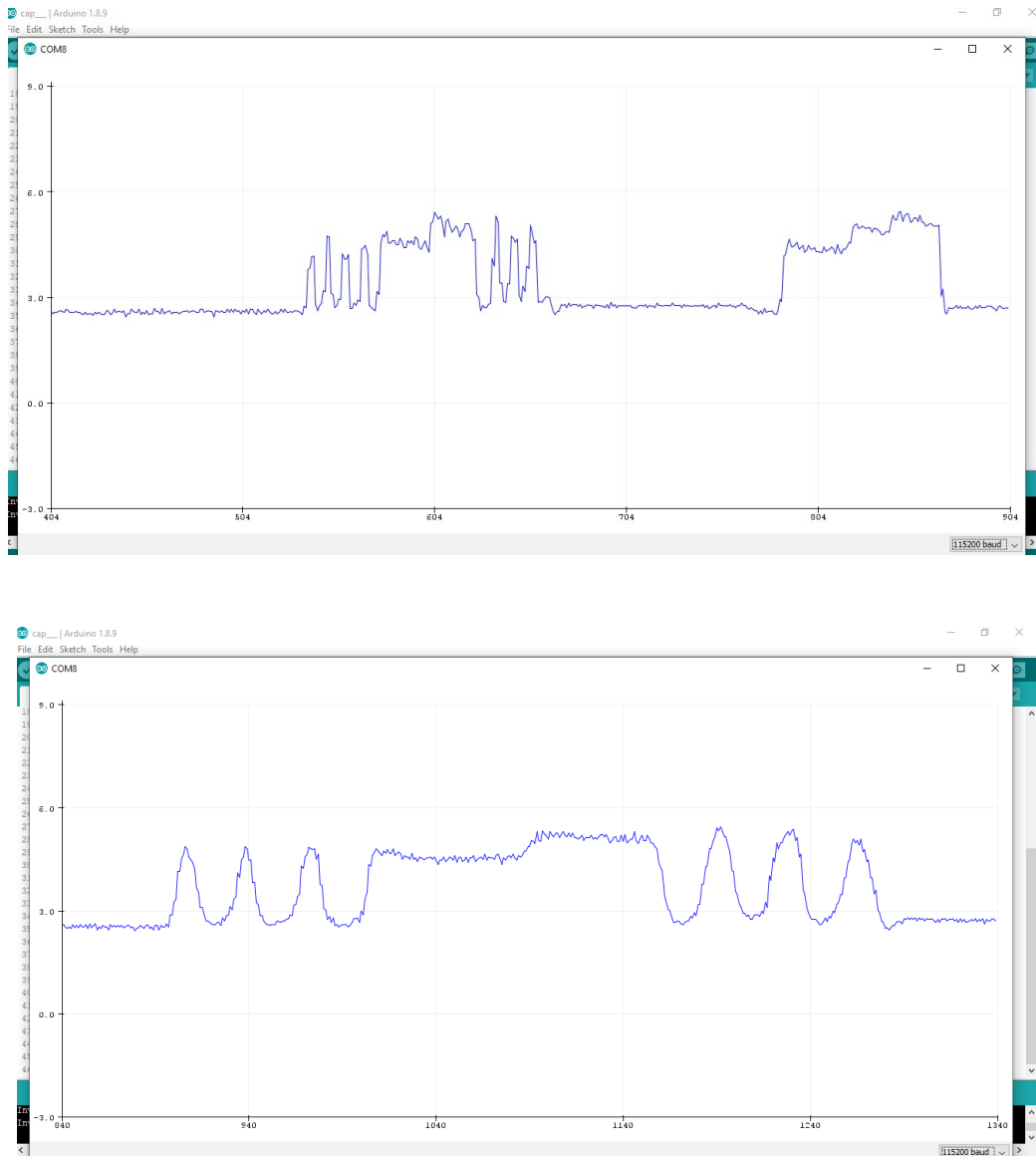
Παρατηρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία

Η ελαχιστοποίηση του θορύβου στο σήμα είναι το πρώτο ζήτημα που πρέπει να επιμελείται, πριν αρχίσει η διαδικασία των μετρήσεων. Προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Ακολουθεί εικόνα που πάρθηκε από την έξοδο αισθητήρα κατά τη διόρθωση της διάταξης και δείχνει θόρυβο που μπορεί να προκαλέσει αναξιόπιστη πηγή τροφοδοσίας. Οι μονάδες του κάθετου άξονα είναι picoFarad. Από χρόνο ~ 240 counts και μετά, φαίνεται το καθαρό σήμα με διακύμανση ± 0.1 pF.



Εικόνα 14: Θόρυβος από ακατάλληλη τροφοδοσία

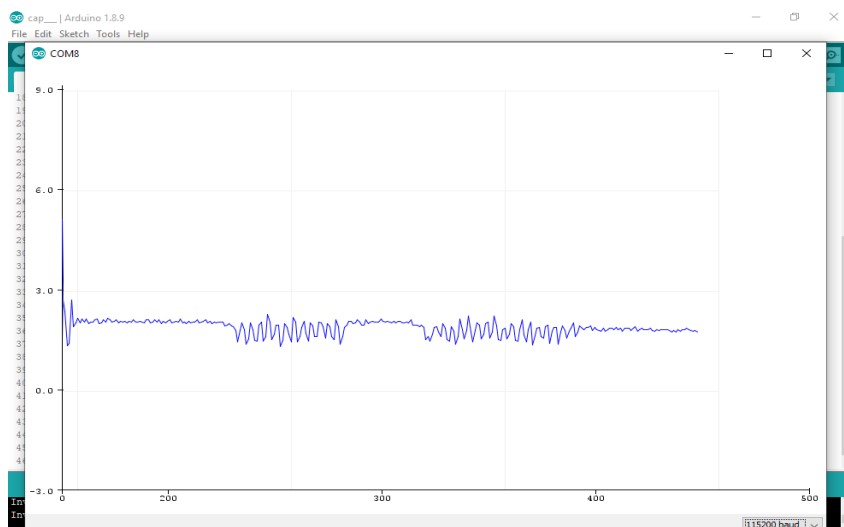
Μειώνοντας το χρόνο μεταξύ των μετρήσεων στο σκίτσο, αυξάνεται η διακριτικότητα στις στιγμιαίες μεταβολές. Βλέπουμε τη διαφορά σε πίεση δείγματος με το χέρι, στιγμιαία και παρατεταμένα, για μέτρηση ανά 50 και ανά 250 msec. Οι κορυφές αντιστοιχούν σε στιγμιαία πίεση και τα πλατώ σε παρατεταμένη.



Εικόνα 15: Απόκριση σε πραγματικό χρόνο – μέτρηση ανά 250millisec (πάνω) και ανά 50millisec (κάτω)

Είναι σημαντικό, τα μεταλλικά εξαρτήματα να πλησιάζουν το δείγμα όσο το δυνατόν λιγότερο, κατά τη διάρκεια της μέτρησης, καθώς οι πυκνωτές είναι ευαίσθητοι σε εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Αυτό φαίνεται και απ' την ευρέως διαδεδομένη χρήση τους ως αισθητήρες επαφής κι εγγύτητας. Τέτοια σήματα εδώ είναι παρεμβολές και πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Ακολουθεί εικόνα με το σήμα δείγματος όταν έρχεται σε επαφή με αγωγίμο μέσο (ανθρώπινο δάχτυλο), χωρίς να συμπίεζεται απ'

αυτό, ακόμα και μέσω μονωτικής ταινίας. Είναι ξεκάθαρος ο θόρυβος που προκαλεί το επαναληπτικό άγγιγμα.



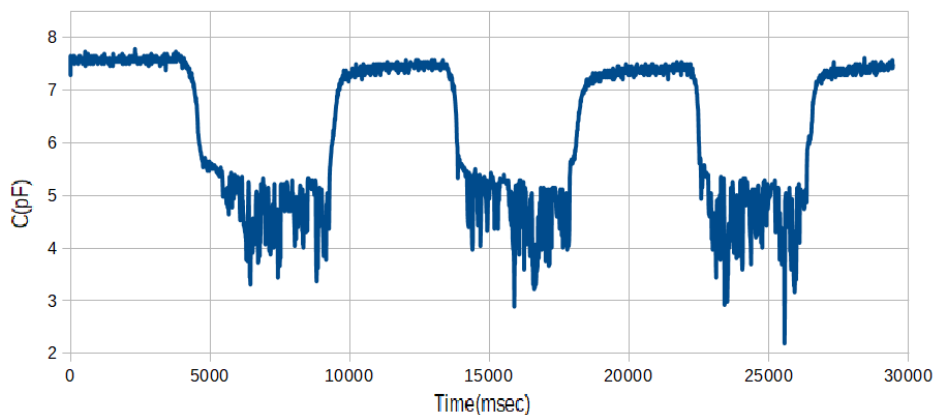
Εικόνα 16: Παρασιτικό σήμα από επαφή αγώγιμου μέσου

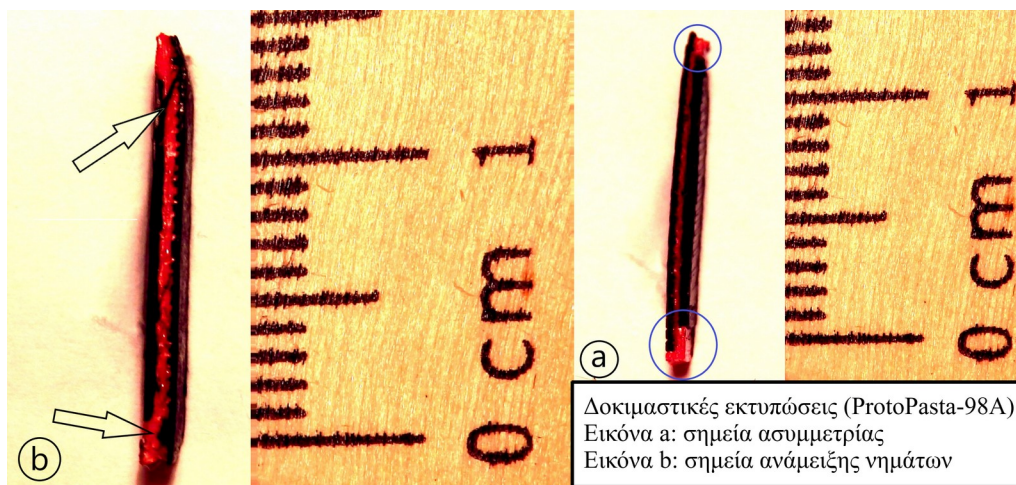
Επιλέγουμε λοιπόν, κατάλληλου μήκους πλαστική κατάληξη του εμβόλου αφού η απλή μόνωση δεν αρκεί.

Ακόμα, κάθε εκτύπωση πρέπει να ελέγχεται ξεχωριστά. Παρακάτω φαίνονται διατομές ατελών εκτυπώσεων και σήμα από πυκνωτή ελαττωματικής εκτύπωσης, στον οποίο ασκείται περιοδική πίεση.

Γράφημα 30:

Απόκριση σε περιοδική πίεση, αισθητήρα ελαττωματικής εκτύπωσης





Εικόνα 17: Διατομές ατελών εκτυλώσεων

Μετά τη βαθμονόμηση του Arduino, η ακρίβεια των μετρήσεων είναι 5%, για πυκνωτές μικρότερους από 3.5pF και 1% για τους μεγαλύτερους. Η διαδικασία πρέπει να επαληθευτεί, αν αλλάξουμε πλακέτα. Ακόμα, το σκίτσο ακολουθεί διαφορετική διαδικασία μέτρησης και υπολογισμού χωρητικότητας από αυτή που αναλύθηκε στο Μέρος II, αν ο πυκνωτής που θα μετρήσουμε είναι μεγαλύτερος από 1nF (~990 ADC), στην οποία περίπτωση πρέπει να κάνουμε αντίστοιχη διαδικασία για να βαθμονομίσουμε την εσωτερική pullup αντίσταση, αλλά δεν θα το δείξουμε εδώ, αφού οι πυκνωτές μας δεν ξεπερνούν τα 100pF.

Παράρτημα Β

Το σκίτσο που χρησιμοποιήθηκε για τις στατικές μετρήσεις:

```

const int OUT_PIN = A2;
const int IN_PIN = A0;
const int buttonPin = 6; // the number of the pushbutton pin
const int ledPin = 13; // the number of the LED pin
int buttonState; // the current reading from the input pin
int lastButtonState = LOW; // the previous reading from the input pin
unsigned long lastDebounceTime = 0; // the last time the output pin was toggled
unsigned long debounceDelay = 50; // the debounce time; increase if the output flickers
const float IN_STRAY_CAP_TO_GND = 24.459;
const float IN_CAP_TO_GND = IN_STRAY_CAP_TO_GND;
const float R_PULLUP = 37.26; //in k ohms
const int MAX_ADC_VALUE = 1023;
int i = 0;
float metrisis = -0.5;
float average;
float av[10] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
float capacitance;
void setup()
{
  pinMode(buttonPin, INPUT);
  pinMode(OUT_PIN, OUTPUT);
  //digitalWrite(OUT_PIN, LOW); //This is the default state for outputs
  pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  //digitalWrite(IN_PIN, LOW);
  for (int j = 0; j < 9; j++) average = average + av[j];
  average = average / 10;
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  //Capacitor under test between OUT_PIN and IN_PIN
  //Rising high edge on OUT_PIN
  pinMode(IN_PIN, INPUT);
  digitalWrite(OUT_PIN, HIGH);
  int val = analogRead(IN_PIN);
  digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
  if (val < 1000)
  {
    pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
    float capacitance = (float)val * IN_CAP_TO_GND / (float)(MAX_ADC_VALUE - val);
    av[i] = capacitance;
    i++;
  }
  int reading = digitalRead(buttonPin);
  if (reading != lastButtonState) {
    lastDebounceTime = millis();
  }
}

```

```

}
if ((millis() - lastDebounceTime) > debounceDelay) {
  if (reading != buttonState) {
    buttonState = reading;
    if (buttonState == HIGH) {
      for (int j = 0; j < 9; j++) average = average + av[j];
      average = average / 10;
      Serial.print(metrasis);
      Serial.print("\t");
      Serial.println(average);
      metrasis = metrasis + 0.5;
    }
  }
}
if (i > 9) i = 0;
lastButtonState = reading;
}

```

Το σκίτσο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις προσομοίωσης βηματισμού:

```

long timer1 = 0;
long totalTime = 100; //Time in minutes
int theEnd = 0;
const int OUT_PIN = A2;
const int IN_PIN = A0;
const float IN_STRAY_CAP_TO_GND = 24.459;
const float IN_CAP_TO_GND = IN_STRAY_CAP_TO_GND;
const float R_PULLUP = 37.26;
const int MAX_ADC_VALUE = 1023;
int i=0;
float average;
float av[10];
float capacitance;
void setup()
{
  pinMode(OUT_PIN, OUTPUT);
  pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  timer1 = millis();
  totalTime = totalTime * 60000; //Convert minutes to mseconds
}
void loop()
{
  pinMode(IN_PIN, INPUT);
  digitalWrite(OUT_PIN, HIGH);
  int val = analogRead(IN_PIN);
  digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
  long dif = millis() - timer1;
  if (dif <= totalTime)
  {
    if (val < 1000)
    {
      pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
      float capacitance = (float)val * IN_CAP_TO_GND / (float)(MAX_ADC_VALUE - val);
      // Serial.print(dif);
      Serial.print("\t");
    }
  }
}

```

```

    Serial.println(capacitance);
  }
}
else if (dif > totalTime && theEnd == 0)
{
  Serial.println("The End");
  digitalWrite(9, HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(9, LOW);
  delay(100);
  digitalWrite(9, HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(9, LOW);
  delay(100);
  digitalWrite(9, HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(9, LOW);
  theEnd = 1;
}
if (val < 1000)
{
  pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
  float capacitance = (float)val * IN_CAP_TO_GND / (float)(MAX_ADC_VALUE - val);
  Serial.print(val);
  // Serial.println(F(" "));
  av[i]=capacitance;
}
else
{
  pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
  delay(1);
  pinMode(OUT_PIN, INPUT_PULLUP);
  unsigned long u1 = micros();
  unsigned long t;
  int digVal;
  do
  {
    digVal = digitalRead(OUT_PIN);
    unsigned long u2 = micros();
    t = u2 > u1 ? u2 - u1 : u1 - u2;
  } while ((digVal < 1) && (t < 400000L));
  pinMode(OUT_PIN, INPUT);
  val = analogRead(OUT_PIN);
  digitalWrite(IN_PIN, HIGH);
  int dischargeTime = (int)(t / 1000L) * 5;
  delay(dischargeTime);
  pinMode(OUT_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
  digitalWrite(IN_PIN, LOW);
  float capacitance = -(float)t / R_PULLUP
    / log(1.0 - (float)val / (float)MAX_ADC_VALUE);
  av[i]=capacitance;
  if (capacitance > 1000.0)
  {
    Serial.print(capacitance / 1000.0, 2);
    av[i]=capacitance / 1000.0;
  }
  else
  {
    Serial.print(capacitance, 2);
    Serial.print(F(" nF"));
  }
}

```

```
    av[i]=capacitance;
  }
  Serial.print(F(" "));
  Serial.print(digVal == 1 ? F("Normal") : F("HighVal"));
  Serial.print(t);
  Serial.print(val);
  // Serial.println(F(""));
}
// Serial.println(av[i]);
//Serial.println(i);
if (i>=9)
{
for (int j=0;j<9;j++)
{
  //Serial.println(av[j]);
  average=average+av[j];
  //Serial.println(average);
}
// Serial.println(average);
average=average/10;
// Serial.println(average);
}
i++;
if(i>9) i=0;
}
```
