

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και Υλοποίηση Συσκευής Μέτρησης Χαλάρωσης των Υλικών.



Μεταπτυχιακός Φοιτητής : Παρασκευάς Μόσχογλου, ΑΜ: IES-0013

Επιβλέπων : Δρ. Σάββας Βασιλειάδης, Καθηγητής.

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

---

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα*

Master of Science in  
*Internetworked Electronic Systems*

## MSc Thesis

Design and Implementation of Material Relaxation Measuring Device.



Student: Paraskevas Moschoglou, Reg. Nr.: IES-0013

MSc Thesis Supervisor: Prof. Dr. Savvas G. Vassiliadis

ATHENS-EGALEO, FEBRUARY 2020

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υλικά όταν υποστούν παραμόρφωση, αναπτύσσουν μηχανικές τάσεις. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις μπορεί να μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Η χρονική μεταβολή των τάσεων δίνει πολύ χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την συμπεριφορά των υλικών. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας συσκευής για την επιβολή παραμορφώσεων σε υλικά και την μέτρηση των χρονικών μεταβολών των τάσεων. Η συσκευή δέχεται παραμετροποίηση των δοκιμών και παρέχει σε ηλεκτρονική μορφή τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

**ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ:** επιβολή παραμορφώσεων , μηχανικές τάσεις, παραμόρφωση, υλικά, συμπεριφορά υλικών, χρονική μεταβολή, παραμετροποίηση, αποτελέσματα μετρήσεων, υλοποίηση.

## ABSTRACT

The materials, when subjected to deformation, develop mechanical stresses. Growing stress can change over time. Time-varying stresses give very useful information on the response of materials. The present thesis aims at designing and implementing a device for imposing material deformation and measuring the time trends of stresses. The device accepts the test configuration parameters and provides the results of the measurements electronically.

**KEYWORDS:** deformation, device, imposing, materials, mechanical stresses, parameters, results, stresses, test configuration.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ :**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον εξάίρετο πολυπράγμων μηχανικό και επιβλέποντα καθηγητή μου και επιστήθιο φίλο μου Δρ. Σάββα Βασιλειάδη για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της προσπάθειας μου για να φέρω επιτυχώς εις πέρας την παρούσα διπλωματική εργασία.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ:</b> Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας.	Σελ. 8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:</b> Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος – Ανασκόπηση του πεδίου.	Σελ. 10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:</b> 3D Υφάσματα.	Σελ. 11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:</b> Μεθοδολογία της έρευνας.	Σελ. 15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:</b> Η προτεινόμενη μέθοδος – Θεμελίωση, Σχεδίαση, Ανάπτυξη.	Σελ. 17
<b>ARDUINO ΚΑΙ ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ :</b> Περιγραφή.	Σελ. 21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:</b> Εφαρμογή και αποτελέσματα.	Σελ. 30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:</b> Ανάλυση αποτελεσμάτων – Συζήτηση.	Σελ. 40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:</b> Συμπεράσματα – Προτάσεις.	Σελ. 41
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ :</b>	Σελ. 42
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ :</b>	Σελ. 44
1) Κώδικας Arduino για ρύθμιση ακριβείας της μετρούμενης αντίστασης του 3d δοκιμίου.	
2) Κώδικας slave Arduino nano.	
3) Κώδικας master Arduino uno.	
4) Μπλοκ διάγραμμα οργάνου.	
5) Φωτογραφίες οργάνου.	

### Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας

---

Το περιεχόμενο αυτής της διπλωματικής αναφέρεται στη μέτρηση της χαλάρωσης των  $3d$  υφασμάτων (ουσιαστικά στον ποιοτικό έλεγχο των  $3d$  υφασμάτων).

Σκοπός μας είναι να μπορούμε να μετρούμε με ακρίβεια την χαλάρωση σε καθένα  $3d$  ύφασμα ξεχωριστά με σχετικά εύκολο, γρήγορο, πρακτικό και απλό τρόπο. Οι μετρήσεις που παίρνουμε μπορούν πολύ εύκολα να αποτυπώσουνε υπό την μορφή γραφικών παραστάσεων αυτή τη συγκεκριμένη ιδιότητα των  $3d$  υφασμάτων δηλαδή τη συμπεριφορά τους σε συγκεκριμένες παραμορφώσεις που επιβάλλονται. Αυτό γίνεται ταυτοχρόνως και με εμπλοκή της διάστασης του χρόνου. Δηλαδή τα  $3d$  υφάσματα μας φανερώνουν τη συμπεριφορά τους σε συγκεκριμένη παραμόρφωση και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το χρονικό διάστημα έχει την έννοια (και τη χρησιμότητα) να μας αναδεικνύει την χαλάρωση των  $3d$  υφασμάτων μετά την επιβολή της παραμόρφωσης.

Συνοπτικά δηλαδή θέλουμε να μετρήσουμε την μηχανική συμπεριφορά των  $3d$  υφασμάτων και για να το επιτύχουμε αυτό θα σχεδιάσουμε και θα κατασκευάσουμε το κατάλληλο όργανο.

Τα μέσα τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε προκειμένου να επιτευχθούν όλα τα παραπάνω και για να κατασκευαστεί το κατάλληλο εργαλείο/όργανο είναι συνοπτικά τα εξής :

- 1) Ένας διπολικός βηματικός κινητήρας ( bipolar stepper motor ) ικανοποιητικής ισχύος (ικανής θα λέγαμε) ώστε να έχει την απαιτούμενη δυνατότητα να παρέχει (αρκετή) πίεση στο υπό εξέταση δοκίμιο ( $3d$  ύφασμα) και να μπορεί να ανταποκρίνεται σε διάφορα φορτία τα οποία μπορούν να προκύψουν κάθε φορά με τη χρήση ποικίλων δοκιμίων.
- 2) Για τη στήριξη του stepper χρειάζεται να κατασκευάσουμε ένα μεταλλικό (και κατά το δυνατόν άκαμπτο) βραχίονα ο οποίος θα πρέπει να δίνει την δυνατότητα να γίνεται η βύθιση του άξονα από επάνω προς τα κάτω στο υπό εξέταση δοκίμιο.
- 3) Ο μεταλλικός βραχίονας ο οποίος αναφέρθηκε πιο επάνω θα πρέπει να είναι πακτωμένος σε μια βαριά κατά το δυνατόν και συμπαγή μεταλλική βάση έτσι ώστε η παραμόρφωση του stepper να επιβάλλεται κάθετα για κάθε μέτρηση (έχουμε έτσι σημαντική ακρίβεια των μετρήσεων των οποίων θα παίρνουμε). Για την μεταλλική αυτή βάση θα επιλέξουμε τον μη σιδηρούχο ορείχαλκο με επαρκές βάρος (1,3 kg) για τους λόγους τους οποίους αναφέραμε πιο επάνω.
- 4) Προκειμένου να μπορεί να μετρηθεί η αντοχή των  $3d$  υφασμάτων θα κατασκευαστεί ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας (+1gr) επάνω στην οποία θα βρίσκεται το δοκίμιο και



του οποίου η αντίδραση θα μετρείται. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ευαίσθητο αισθητήρα (load cell) με μέγιστη μετρήσιμη ένδειξη 5 Kgr στον οποίο θα προσαρμόσουμε την πλακέτα με την εμπορική ονομασία HX711 η οποία αποτελεί έναν ενισχυτή υψηλής απολαβής έτσι ώστε να μπορεί να γίνει αντιληπτή η απειροελάχιστη μεταβολή των μετρήσεων του αισθητήρα (load cell) από τον μικροϋπολογιστή.

5) Επάνω και κάτω από τον αισθητήρα πίεσης θα τοποθετήσουμε πλάκες από γρανίτη έτσι ώστε να μην υπάρχει η παραμικρή υποψία εισαγωγής σφάλματος στις μετρήσεις τις οποίες θα λάβουμε (λόγω της υψηλής ακαμψίας η οποία χαρακτηρίζει τον γρανίτη. Επίσης το βάρος του γρανίτη προστίθεται σε αυτό το βάρος του μη σιδηρούχου ορείχαλκου και έτσι η πάκτωση γίνεται ακόμα ισχυρότερη).

6) Για την οδήγηση του stepper θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε έναν driver καθώς το ρεύμα το οποίο παρέχει ο μικροϋπολογιστής δεν είναι αρκετό για να τον τροφοδοτήσει. Ο driver ο οποίος θα τοποθετηθεί βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα L298N.

7) Τέλος την καρδιά της όλης κατασκευής θα αποτελέσει ο μικροϋπολογιστής arduino υπο με την κατάλληλη συνδεσμολογία και μαζί με τον κατάλληλο κώδικα και τις βιβλιοθήκες (π.χ. για την πλακέτα HX711).

Πιο αναλυτικά δηλαδή όσον αφορά στο h/w θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα όργανο το οποίο θα επιβάλλει μηχανικά φορτία και θα μετράει δυνάμεις.

Όσον αφορά στο s/w θα δίνει ο κώδικας την δυνατότητα στο χρήστη να μπορεί να θέτει όλες τις παραμέτρους των μετρήσεων με τρόπο φιλικό και απλό. Επίσης το s/w θα εξαγάγει τα απαραίτητα δεδομένα τα οποία προκύπτουν από τα set των μετρήσεων κάθε φορά με ακρίβεια και σαφήνεια για τον χρήστη.

Η διπλωματική αυτή εργασία έρχεται για να καλύψει ένα μεγάλο κενό στο συγκεκριμένο τομέα. (Αυτή τη στιγμή ανάλογες μετρήσεις λαμβάνονται από μεγάλες μηχανές μέτρησης αντοχής υλικών οι οποίες είναι και πολύ ογκώδεις και εξαιρετικά δύσχρηστες καθώς επίσης και πάρα πολύ ακριβές).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ορισμοί :

---

### ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΟΙ :

**Τι είναι ο ερπυσμός :** Ερπυσμός λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε σώμα στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση. Το φαινόμενο εκδηλώνεται όταν ασκούνται μηχανικές καταπονήσεις για παρατεταμένο χρόνο. Στον ερπυσμό των 3d υφασμάτων η παραμόρφωση δίνεται σε συνάρτηση με τον χρόνο επιβολής της τάσης, το μέγεθος της τάσης και λιγότερο με τη θερμοκρασία,  $\epsilon = f(t, \sigma, T)$ . Στόχος μας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης ερπυσμού των δοκιμίων.

Τι είναι η ταχύτητα του ερπυσμού : Ταχύτητα ερπυσμού ονομάζεται ο χρονικός ρυθμός μεταβολής της παραμορφώσεως κατά τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου.

**Τι είναι η χαλάρωση :** Σε φορτία όπου η παραμόρφωση παραμένει σταθερή, λόγω στηρίξεων, τότε μειώνεται η τάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται χαλάρωση.

Θα πρέπει να επισημάνουμε το εξής :

Στις μηχανές μέτρησης αντοχής των υλικών υπάρχουν δύο παράγοντες (θεωρώντας την θερμοκρασία σταθερή) :

- 1) Το μέγεθος της δύναμης το οποίο ασκείται στο υπό εξέταση υλικό.
- 2) Και η προκύπτουσα παραμόρφωση για τον ερπυσμό και το αντίστροφο για τη χαλάρωση.

Συνεπώς οι προκύπτουσες γραφικές παραστάσεις έχουν δύο μεταβλητές (θεωρώντας την θερμοκρασία σταθερή). Την επιβαλλόμενη δύναμη και το αποτέλεσμα της για τον ερπυσμό και την επιβαλλόμενη παραμόρφωση και τα αποτελέσματα της για τη χαλάρωση.

Η εργασία αυτή έρχεται να καλύψει ένα μεγάλο κενό στον χώρο υλοποιώντας μια εύχρηστη συσκευή χαμηλού κόστους. Επομένως θα έχουμε π.χ. απεικόνιση της χαλάρωσης ως μηχανική αντίδραση συναρτήσει του χρόνου με δεδομένη (σταθερή) την παραμόρφωση η οποία ασκείται (όπως παρατηρούμε το όργανο το οποίο θα κατασκευαστεί μας δίνει με την κατάλληλη χρήση του μια πληθώρα ποικίλων γραφικών παραστάσεων χαρακτηριστικών ποιότητας των 3d υφασμάτων οι οποίες μέχρι σήμερα δεν ήταν εφικτές χωρίς τη χρήση εξειδικευμένου και ακριβού εξοπλισμού).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: 3D Υφάσματα.

---

Τα κλασικά υφάσματα σε μια ρεαλιστική προσέγγιση είναι ουσιαστικά δισδιάστατες δομές (παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα έχουν ένα μικρό πάχος). Σταδιακά αναπτύχθηκαν υφάσματα με σημαντικό πάχος, ώστε να χαρακτηρίζονται ως τρισδιάστατα.

Συνήθως τα τρισδιάστατα υφάσματα παράγονται ως δυο επιφάνειες υφασμάτων με ενδιάμεση πλοκή ινών και νημάτων που διατηρούν την απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών. Τα 3D υφάσματα μπορεί να είναι υφαντά ή πλεκτά. Στη συγκεκριμένη πειραματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν 3D πλεκτά υφάσματα.



Εικ. 1 Δείγμα 3D Υφάματος (Εμπρόσθια όψη).



Εικ. 2 Δείγμα 3D Υφάσματος (Πλαινή όψη).

Η τεχνολογία παραγωγής 3D υφασμάτων αποτελεί έναν πολυδιάστατο πεδίο υπό την έννοια ενός μεγάλου αριθμού διαφορετικών ειδών και μεθόδων παραγωγής τους.

Μία σκέψη η οποία περικλείει το αυξανόμενο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι οι μηχανικοί τελικά αισθάνονται ολοένα και περισσότερο φιλικό προς το ότι τα 3D υφάσματα έχουν μια δυναμική για ποιοτικές εφαρμογές.

Την ίδια στιγμή οι σχεδιαστές παραγωγής συνεχίζουν να γίνονται όλο και πιο προσαρμόσιμοι στην δημιουργία ινών ή ίσως περισσότερο ινωδών υλικών τα οποία εκδηλώνουν αυτές τις ειδικές μηχανικές, οπτικές και/ή άλλες ειδικές απαιτήσεις της αγοράς.

Η ευελιξία και τα χαρακτηριστικά ποιότητας συνεχίζουν να είναι η πρωταρχική κινητήριος δύναμη για το ενδιαφέρον στον τομέα αυτόν. Δεδομένου ότι σχεδόν όλες οι τεχνολογίες παραγωγής μπορούν να εξελιχθούν ή να τροποποιηθούν με συγκεκριμένους τρόπους ώστε να παράγονται 3D υφάσματα, καθιστά κατά αυτό το τρόπο το εύρος των εφαρμογών τους να είναι πραγματικά ατελείωτο.

## 3D ΥΦΑΝΣΗ & 3D ΠΛΕΞΙΜΟ

Η 3D ύφανση και το 3D πλέξιμο συνεχίζουν να κεντρίζουν το ενδιαφέρον και να βρίσκουν εφαρμογές σε σύνθετα πεδία όπου παραμένει ζωτικής σημασίας η αντικατάσταση του ατσαλιού προκειμένου να επιτευχθεί μείωση του βάρους. Σύμφωνα με τον Dr. Keith Sharp, υπεύθυνο παραγωγής της 3D ύφανσης στο Portland (Tex Tech Industries): " Η τρισδιάστατη ύφανση σε σύνθετα πεδία αποτελεί τη τέλεια λύση για την αντικατάσταση του ατσαλιού. Μπορούμε να υφάνουμε κομμάτια από σχεδόν ξεκάθαρα προσχηματισμένο καλούπι το οποίο μπορεί να χυθεί σε ακριβές σχήμα περίπλοκης σχεδίασης, το οποίο μας γλυτώνει όχι μόνο από το βάρος αλλά επίσης από εργατικό κόπο στην κατασκευή και παραγωγή του αλλά επίσης αυξάνει δραματικά και την αξιοπιστία σε βάθος χρόνου. Η δυνατότητα να ελέγχουμε την τοποθέτηση και το πέρασμα της ραφής του νήματος προκειμένου να επιτύχουμε συγκεκριμένες περιγραφές απόδοσης αντικατοπτρίζεται στα επιμέρους τμήματα κατασκευής μηχανών.

\* " Σε πολυσύνθετες κατασκευές κινητήρων (οι οποίοι αποτελούνται από εξαιρετικά λεπτομερή επί μέρους υλικά) έχει αποδειχθεί ότι αυτοί οι κινητήρες είναι έως και 250Kgr ελαφρύτεροι όταν χρησιμοποιούμε τις μεθόδους αυτών των 3D υλικών.

\* Επίσης μπορούν να κατασκευαστούν εξαρτήματα σύνθετης γεωμετρίας τα οποία είναι εξαιρετικά δύσκολο να παραχθούν από τιτάνιο.

\* Υψηλότερη αντοχή και χαμηλότερο βάρος από τα εναλλακτικά πλαστικοποιημένα εξαρτήματα ."

Επίσης το ενδιαφέρον για τα 3D υφάσματα οδηγεί σε νέες εφευρέσεις κατασκευαστικού εξοπλισμού όσο οι κατασκευαστές μηχανημάτων γίνονται περισσότερο δραστήριοι στον τομέα αυτόν.

Πρόσφατα άρθρα τα οποία έχουν βρεθεί στις ιστοσελίδες Gizmodo.com & ZDnet.com περιλαμβάνουν παραδείγματα για το πόσο πολύτιμη και απαραίτητη έχει γίνει πλέον η τεχνολογία της 3D ύφανσης. Το πρώτο άρθρο στο Gizmodo.com από τον Julian Goldman ισχυρίζεται ότι , " το μέλλον βρίσκεται στα πλεχτά υλικά : Γιατί η μέθοδος του παραδοσιακού πλεξίματος επανέρχεται ξανά ως υψηλή τεχνολογία".

Το δεύτερο άρθρο στην ZDnet από τον Greg Nichols αναφέρει : " Η υψηλή επιστημονική τεχνική μέθοδος της πλέξης πίσω από το 3D πλέξιμο ". Και τα δύο άρθρα αναφέρονται στην έλευση του 3D ή στην προσχεδιασμένη ύφανση πλεξίματος και τον έλεγχο της διαστασιμότητας (ο οποίος ευρίσκεται στις δομές ύφανσης αλλά όχι έμφυτος στην ύφανση) σε συνδυασμό με την προσαρμοσμένη βελτίωση των χρηστών οδηγούν ολοένα και περισσότερο σε αποτελεσματικότερα σχέδια πλεκτής ύφανσης.

Η 3D πλέξη μας παρέχει όχι μόνον απόψεις παραγωγικής σχεδίασης - προγραμματίζει την μηχανή, παρέχει το νήμα και παράγεται το ένδυμα - δημιουργεί επίσης το δυναμικό να συμπεριλάβουμε φορετά ηλεκτρονικά μέσα σε μία παραγωγή ενδυμάτων που ανήκουν στην μόδα, μερικά από τα οποία έχουν ήδη διατεθεί στην αγορά.

Η Advanced Functional Fabrics of America (AFFOA), ένα μη κερδοσκοπικό Ινστιτούτο το οποίο ευρίσκεται πολύ κοντά στο Massachusetts Institute of Technology (MIT) ιδρύθηκε μέσω ομοσπονδιακής χρηματοδότησης και προάγει την χρήση τεχνολογιών υφασμάτων μέσω ενσωματωμένων και διαδίκτυωμένων συσκευών και συστημάτων. Ως μέρος αυτής της προσπάθειας, η AFFOA εστιάζει στην αποτελεσματικότητα στην 3D πλέξη και στο να δημιουργεί πολυσύνθετα σχήματα. Ο κ. Yoel Fink, (CEO της AFFOA) και ως καθηγητής της επιστήμης υλικών και ηλεκτρικής μηχανικής στο MIT, έχει επισημάνει : Δεν θα χρειασθεί να πληρώνουμε τις μπλούζες. Θα πληρώνουμε για αυτά που θα μας παρέχει η κάθε μπλούζα. Θα πληρώνουμε για τις υπηρεσίες τις οποίες θα μας προσφέρει και θα παίρνουμε δωρεάν τις ίνες που χρειάστηκαν για την παραγωγή της. Αυτό σίγουρα είναι μια διαφορετική άποψη για το πως θα είναι και πως θα λειτουργούν τα υφάσματα στο μέλλον.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μεθοδολογία της έρευνας

---

Υπάρχουν κυρίως 3 κατηγορίες αισθητήρων με τους οποίους μπορούμε να είμαστε σε θέση να μετρήσουμε την δύναμη η οποία ασκείται επάνω τους ή αντίστοιχα το βάρος ενός σώματος. Παρακάτω θα αναφέρουμε τα χαρακτηριστικά τους καθώς και το ποιά κατηγορία θα επιλέξουμε για χρήση στο υπό ανάπτυξη project.

### 1) Αισθητήρες πίεσης (pressure sensors).

Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούνται συνήθως από μια μικρή στρογγυλή κάψα η οποία δέχεται την πίεση και η οποία είναι συνδεδεμένη με δύο μεγάλου μήκους ακροδέκτες προκειμένου να μπορεί μέσω αυτών να ανιχνευτεί από το ηλεκτρονικό κύκλωμα το μέγεθος της πίεσης το οποίο ασκείται κάθε φορά στην κάψα. Το κύριο μειονέκτημα τους στην δική μας περίπτωση είναι το ότι η κάψα είναι πολύ μικρή (της τάξεως του 0,5cm διαμέτρου ) και συνεπώς δεν μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια δυνάμεις οι οποίες ασκούνται σε μεγάλες επιφάνειες όπως χαρακτηριστικά συμβαίνει και στην δική μας περίπτωση ( επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού 10cm X 10cm). Επίσης λόγω του μικρού τους μεγέθους οι μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται έχουν απαγορευτική ακρίβεια και κατά συνέπεια δεν μπορούν ούτε κατά διάνοια αυτοί οι αισθητήρες να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση μας στην οποία έχουμε θέσει πολύ υψηλά τον πήχυ (επιθυμούμε κατά το όσον δυνατότερη ακρίβεια εάν είναι εφικτό ακόμα και της τάξεως του +- 1gr σε όλο το εύρος των εν δυνάμει μετρήσεων το οποίο είναι από 0 Kgr έως 5 Kgr). Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους η χρήση αυτής της κατηγορίας των αισθητήρων κρίνεται απαγορευτική για το εν λόγω project.

### 2) Αισθητήρες Δυνάμεων (force sensors).

Οι αισθητήρες αυτής της κατηγορίας οι οποίοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ίσως στην περίπτωση μας χωρίζονται σε υποκατηγορίες όπως extensometers, torque sensors, miniature force sensors και χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία και κατασκευάζονται συνήθως επί παραγγελία και το κόστος τους είναι απαγορευτικό για χρήση σε μεμονωμένες κατασκευές. Δεν θα ασχοληθούμε καθόλου με την κατηγορία αυτή η οποία καμία λειτουργική σχέση από όλες τις απόψεις δεν έχει με το δικό μας project.

### 3). Κυψέλες φορτίου (load cells).

Η συγκεκριμένη κατηγορία αισθητήρων είναι πολύ προσιτή οικονομικά, έχει μέλη τα οποία είναι εύχρηστα και με πάρα πολύ υψηλή ακρίβεια (της τάξεως του +- 1 gr σε όλο το εύρος των μετρήσεων). Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην γέφυρα

αντιστάσεων Wheatstone. Από την μεταβολή της ισορροπίας της γέφυρας μπορεί να μετρηθεί το βάρος με την χρήση κατάλληλης πλακέτας (hx711) η οποία είναι σε θέση να ανιχνεύει τις απειροελάχιστες μεταβολές στην πίεση που ασκείται επάνω στο load cell. Πριν τεθεί σε χρήση η συσκευή της ζύγισης χρειάζεται καλλιμπράρισμα η γέφυρα πιο πριν το οποίο γίνεται με κατάλληλη χρήση κώδικα. Στο συγκεκριμένο project έχουμε επιλέξει για χρήση load cell με μέγιστο μετρήσιμο βάρος τα 5Kg το οποίο και υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις μας.

Συνοπτικά η λειτουργία των load cells έχει ως εξής :

- Έχουν πολλές ιδιότητες συμπεριλαμβανομένου να μετρούν βάρος κάποιου αντικειμένου, ή την μεταβολή του βάρους συναρτήσει του χρόνου και την ικανότητα να μετρούν την πίεση ή το φορτίο το οποίο ασκείται σε μια επιφάνεια.
- Αποτελούνται από έναν μεταλλικό πυρήνα καθώς και από ένα set ηλεκτρικών αντιστατών των οποίων οι τιμές μεταβάλλονται όταν ασκηθεί κάποια δύναμη επάνω σε αυτό. Αλλά όταν πάψει η δύναμη αυτή να υφίσταται το load cell επανέρχεται στην αρχική κατάσταση. Η αντιστρεψιμότητα του υλικού καθορίζει την ποιότητα και την ακρίβεια του αισθητήρα.
- Το έργο αυτών είναι να μετατρέπουν μηχανικές δυνάμεις σε ψηφιακές τιμές και κατασκευάζονται σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη τα οποία διαφέρουν ως προς το βάρος για το οποίο προορίζονται να μετρήσουν. Ενδεικτικά κάποια από τα βάρη τα οποία μπορούν να μετρήσουν είναι 0-500gr, 0-5Kgr, 0-10Kgr, 0-50Kgr ή και ακόμα 0-800Kgr. Στην διπλωματική αυτή χρησιμοποιούμε αισθητήρα κλίμακας 0-5Kgr ο οποίος καλύπτει ένα πάρα πολύ μεγάλο εύρος μετρήσεων για τα υπό εξέταση 3D υφάσματα.
- Είναι ιδανικά για χρήση σε ηλεκτρονικές ζυγαριές μικρού και μεγάλου βάρους και γενικότερα όπου χρειάζεται να μετρηθεί βάρος με εξαιρετικό κλάσμα αξιοπιστίας/κόστους.
- Σε συνδυασμό με την πλακέτα του HX711 μπορούμε να μετρήσουμε με εξαιρετική ακρίβεια δεδομένα. (Και με την χρήση μικροελεγκτή ή μικροεπεξεργαστή. Στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιήσαμε τους Arduino uno και Arduino nano)
- Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν με mcu & cpu χρειάζονται πρώτα ρύθμιση ώστε να είμαστε σίγουροι ότι έχουμε τις σωστές ενδείξεις. Στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιήσαμε τον κατάλληλο κώδικα (βλ. Παράρτημα).



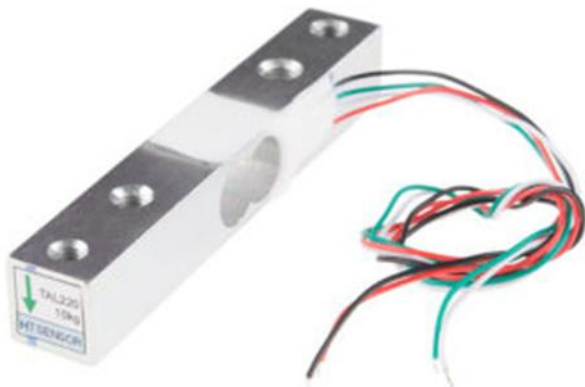
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η προτεινόμενη μέθοδος – Θεμελίωση, Σχεδίαση, Ανάπτυξη

---

Αρχή λειτουργίας και χρήση του module του αισθητήρα ζύγισης.

### 1. Δομή του αισθητήρα ζύγισης παραλλήλου κάμψεως:

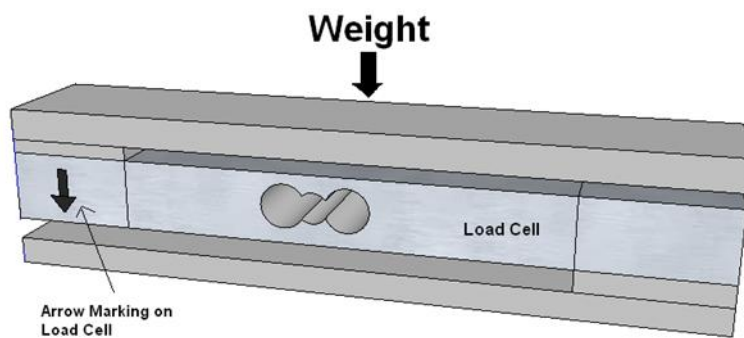
Πειραματικές ηλεκτρονικές ζυγαριές, ηλ/κές ζυγαριές ταχυδρομείου, ζυγαριές κουζίνας, κ.τ.λ., γενικά χρησιμοποιούν αισθητήρες κάμψης διπλών οπών, οι οποίοι είναι πακτωμένοι και οι οποίοι μας παρέχουν υψηλή ακρίβεια, εύκολη κατεργασία, απλή και συμπαγή δομή, ισχυρή και εξισορροπημένη χωρητικότητα φόρτισης και υψηλή ιδιοσυχνότητα του οποίου η τυπική δομή φαίνεται στο σχ.1



Σχ.1 Πακτωμένος αισθητήρας ζύγισης ( παραλλήλου κάμψεως ).

## 2.) Αρχές λειτουργίας του αισθητήρα ζύγισης:

Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα κάμψης εικονίζεται στο σχ.2

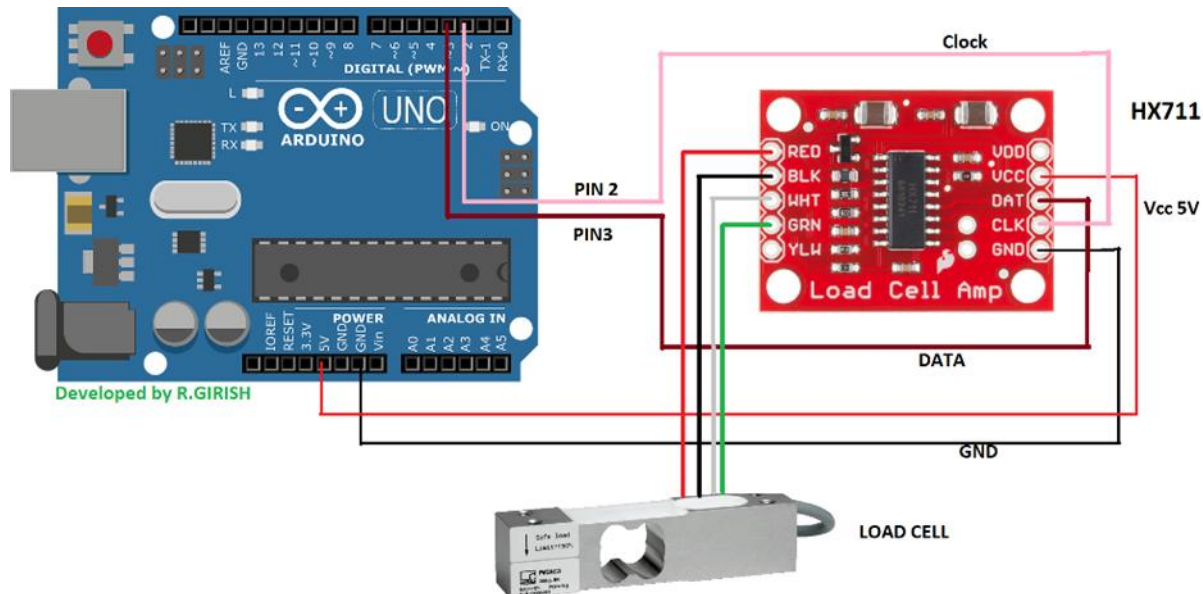


Σχ.2 Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα κάμψεως.

Προσαρμόζουμε τον αισθητήρα στο ευαίσθητο στοιχείο λύγισης και όταν το ελαστικό στοιχείο λύγισης σχηματοποιείται από την δύναμη δημιουργείται η αντίστοιχη κάμψη στον αισθητήρα ο οποίος την μετατρέπει σε μεταβολές των τιμών των αντιστατών.

Με την κατάλληλη συνδεσμολογία μετατρέπεται η μεταβολή των τιμών των αντιστάσεων σε μεταβολή των τιμών τάσεων και η δύναμη του βάρους μπορεί κατόπιν να μετρηθεί μετασχηματίζοντας (με τον κατάλληλο μετατροπέα) αυτές τις μεταβολές του δυναμικού.

Στο σχ.3 φαίνεται αυτό.

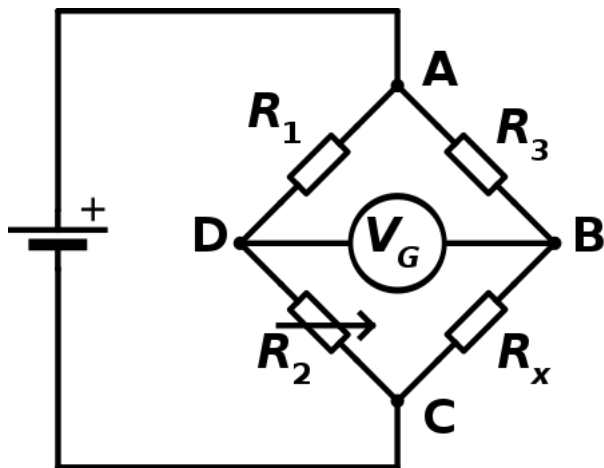


Σχ.3 Αρχή λειτουργίας του ηλ. κυκλώματος των αισθητήρων ζύγισης.

Τα τέσσερα μέλη της γέφυρας συνδέονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μετασχηματίζονται οι μηχανικές μεταβολές σε μεταβολές ηλ. δυναμικών. Επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι το ότι επειδή και τα 4 στοιχεία της γέφυρας βρίσκονται στον ίδιο χώρο δεν υπάρχει θερμική ολίσθηση στις μετρούμενες τιμές δυναμικού και αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη ακρίβεια. Στο συγκεκριμένο project και για αισθητήρα 0-5Kgt επιτύχαμε ακρίβεια της τάξεως του  $\pm 1\text{gr}$  η οποία και είναι αρκετά ικανοποιητική.

### 3.) Πως χρησιμοποιούμε τον αισθητήρα ζύγισης :

Η παραμόρφωση του αισθητήρα είναι ελάχιστη (και ανάλογη του φορτίου) και πρέπει να προσέχουμε έτσι ώστε αυτή να μην υπερβεί κάποια όρια επειδή ο αισθητήρας μπορεί να καταστραφεί. Εάν η κάμψη την οποία θα υποστεί ο αισθητήρας είναι μεγαλύτερη από αυτήν για την οποία είναι κατασκευασμένος τότε η παραμόρφωση είναι μόνιμη και θεωρείται αυτός κατεστραμμένος. Υπάρχουν 4 καλώδια επάνω στον αισθητήρα τα οποία τον συνδέουν με το εξωτερικό κύκλωμα του και αυτά είναι τα εξής (όπως φαίνονται και στο σχ.4) : Το κόκκινο καλώδιο είναι η θετική είσοδος της τροφοδοσίας, το μαύρο η αρνητική είσοδος, το άσπρο η έξοδος σήματος 1 και το μπλέ (ή πράσινο) η έξοδος σήματος 2.



Σχ.4 Γέφυρα Wheatstone (Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα ζύγισης).

4). Χρήση της πλακέτας ADC HX711 :

\* Ο hx711 είναι ένας 24-bit ADC μετατροπέας ο οποίος έχει σχεδιαστεί για συσκευές ζυγίσματος και εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου και έτσι ώστε να προσαρμόζεται ακριβώς με τους αισθητήρες load cells.

\* Είναι ειδικά σχεδιασμένος ώστε να μετράει ανεπαίσθητες μεταβολές της γέφυρας αντιστατών του load cell και να τις παρέχει στον μικροελεγκτή.

\* Περιλαμβάνει ένα IC (χαμηλού θορύβου) προγραμματιζόμενου ενισχυτή με ρυθμιζόμενο κέρδος 32, 64 ή 128.

\* Το IC αυτό περιλαμβάνει μια σταθεροποιημένη πηγή τροφοδοσίας, ένα clock oscillator και άλλα περιφερειακά κυκλώματα τα οποία έχουν τα πλεονεκτήματα της υψηλής ολοκλήρωσης, γρήγορης απόκρισης και υψηλής αντοχής σε θορύβους.

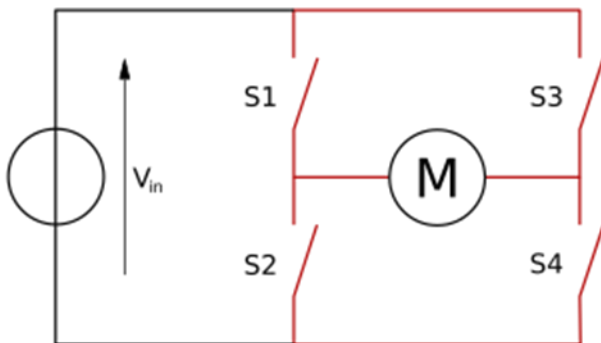
## ARDUINO ΚΑΙ ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.

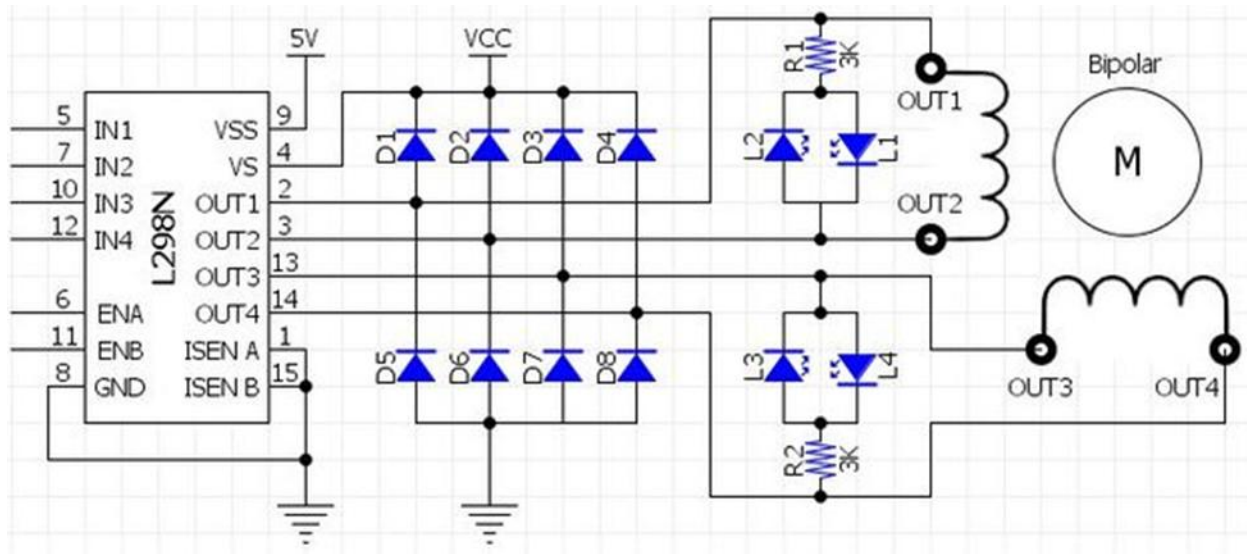
Οι διπολικοί βηματικοί κινητήρες ( bipolar stepper motors ) κατασκευάζονται πάντοτε με 4 καλώδια. Επίσης έχουν πάντα 2 τυλίγματα. Με την κατάλληλη οδήγηση του ρεύματος σε διαφορετικές κατευθύνσεις δια μέσω του κάθε τυλίγματος, μπορούμε να έχουμε 4 δυνατές διαφορετικές καταστάσεις:

- i) Το τυλίγμα A διαρρέεται με ρεύμα από αριστερά προς τα δεξιά.
- ii) Το τυλίγμα A διαρρέεται με ρεύμα από δεξιά προς τα αριστερά.
- iii) Το τυλίγμα B διαρρέεται με ρεύμα από αριστερά προς τα δεξιά.
- iv) Το τυλίγμα B διαρρέεται με ρεύμα από δεξιά προς τα αριστερά.

Οι διπολικοί βηματικοί κινητήρες χρειάζονται μία διπλή γέφυρα τύπου H προκειμένου να οδηγηθούν (σχ.5α) . Το βασικότερο πλεονέκτημα τους είναι ότι μπορούν να μας παρέχουν υψηλή ροπή συγκρινόμενοι με τους μονοπολικούς κινητήρες.



Σχ. 5α. Γέφυρα μορφής H.

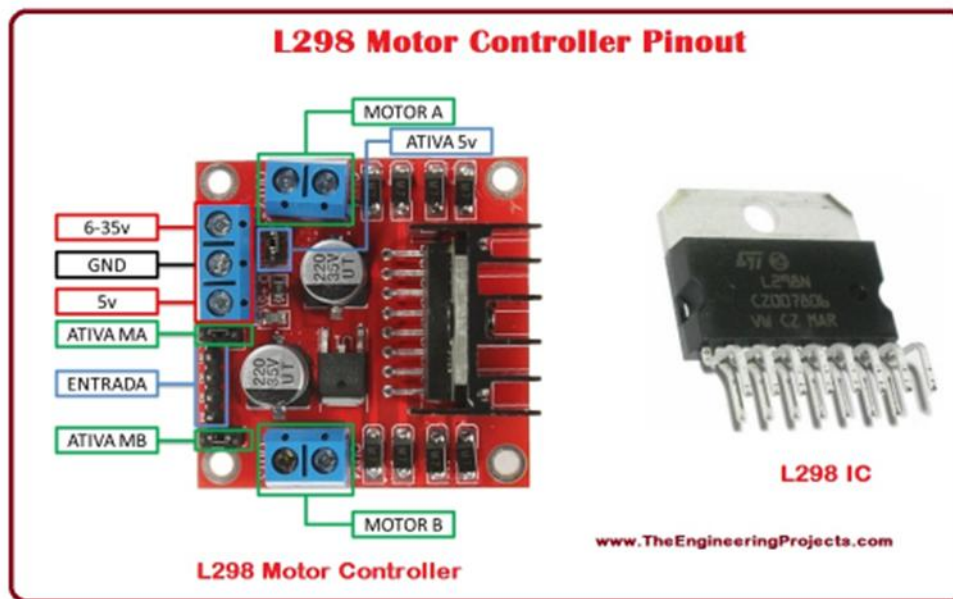


Σχ. 5β. Συνοπτικό κυκλωματικό διάγραμμα της πλακέτας του driver L298.

Το απαραίτητο hardware το οποίο απαιτείται για να συνδεθεί και να οδηγηθεί ένας διπολικός βηματικός κινητήρας με τον arduino υπο.

Απαιτούμενο hardware :

- i) Πλακέτα arduino.
- ii) Πλακέτα οδήγησης βηματικού κινητήρα με το ολοκληρωμένο κύκλωμα IC L298N, (σχ.5β). Στο σχ.6 φαίνεται η πλακέτα οδήγησης την οποία χρησιμοποιήσαμε στο συγκεκριμένο project.



Σχ. 6 Πλακέτα οδήγησης bipolar stepper driver με το ολοκληρωμένο κύκλωμα IC L298N.

#### ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ:

Οι βηματικοί κινητήρες χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους να μετατρέπουν μια παλμοσειρά εισόδου (τετραγωνικών παλμών) σε προκαθορισμένη και ακριβή μεταβλητή θέση. Κάθε ένας παλμός μετακινεί τον άξονα του βηματικού κατά μια προκαθορισμένη γωνιακή περιστροφή.

Οι βηματικοί κινητήρες έχουν πολλαπλούς ηλεκτρομαγνήτες τοποθετημένους αξονικά γύρω από ένα οδοντωτό μεταλλικό κυκλικό τροχό. Οι ηλεκτρομαγνήτες ενεργοποιούνται από ένα εξωτερικό κύκλωμα οδήγησης (στην περίπτωση μας το IC L298N) ή από έναν μικροελεγκτή (στην περίπτωση μας από τον arduino υπο ο οποίος όμως δεν είναι σε θέση να παρέχει το απαιτούμενο ρεύμα στο βηματικό μας κινητήρα-stepper). Προκειμένου να περιστραφεί ο stepper χρειάζεται πρώτα να ενεργοποιηθεί με την κατάλληλη ισχύ ένας ηλεκτρομαγνήτης ο οποίος έλκει μαγνητικά τον οδοντωτό τροχό. Όταν ο τροχός αυτός ευθυγραμμιστεί με τον πρώτο ηλεκτρομαγνήτη τότε θα

έχουμε μια μικρή ολίσθηση από τον (διπλανό) επόμενο ηλεκτρομαγνήτη. Έτσι όταν θα έρθει ο επόμενος παλμός τότε ο stepper μπαίνει ξανά σε λειτουργία και προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με την επόμενη θέση. Από εκεί και μετά η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται. Κάθε μια τέτοια μικρή περιστροφή ονομάζεται βήμα και υπάρχει πάντα ένας ακέραιος αριθμός μικρών τέτοιων βημάτων για μια πλήρη περιστροφή του stepper. Η κυκλική διευθέτηση (συνδεσμολογία) των μικρών αυτών ηλεκτρομαγνητών διαιρείται σε ομάδες (groups) και κάθε μια τέτοια ομάδα ονομάζεται φάση (phase) και πάντοτε υπάρχει ίσος αριθμός ηλεκτρομαγνητών για κάθε ομάδα. Ο αριθμός των ομάδων επιλέγεται από το σχεδιαστή του stepper. Οι ηλεκτρομαγνήτες της κάθε ομάδας τοποθετούνται ακτινικά και σαν χτένα τοποθετούνται ο ένας δίπλα στον άλλον. Για παράδειγμα εάν ο stepper έχει δύο ομάδες (διφασικός) και τα δύο groups τα ονομάσουμε A και B και υπάρχουν 12 ηλεκτρομαγνήτες συνολικά τότε η διάταξη τους θα είναι ABABABABABAB. Οι ηλεκτρομαγνήτες οι οποίοι βρίσκονται στην ίδια φάση ενεργοποιούνται ταυτοχρόνως και για αυτό τον λόγο όσο περισσότερες είναι οι φάσεις τόσο περισσότεροι ακροδέκτες χρειάζονται για να λειτουργήσει ο stepper.

## **STEPPER MOTORS.**

Υπάρχουν δύο βασικές συνδεσμολογίες τυλιγμάτων για τα ηλεκτρομαγνητικά πηνία σε έναν stepper motor και έτσι χωρίζονται σε μονοπολικούς και σε διπολικούς.

### **A) ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΟΙ STEPPER MOTORS**

Ένας μονοπολικός (unipolar) stepper έχει ένα τύλιγμα με έναν κεντρικό ακροδέκτη για κάθε φάση. Κάθε τμήμα των τυλιγμάτων ανοίγει για κάθε μια κατεύθυνση λόγω του μαγνητικού πεδίου. Επειδή σε αυτή τη συνδεσμολογία μπορεί ένας μαγνητικός πόλος να αναστραφεί χωρίς να αλλάξει η κατεύθυνση του ρεύματος το κύκλωμα προστασίας μπορεί να σχεδιασθεί πολύ εύκολα π.χ. με ένα απλό transistor για το κάθε τύλιγμα. Τυπικά για κάθε φάση το μεσαίο στέλεχος του κάθε τυλίγματος γίνεται κοινό (αυτό μας δίνει 3 ακροδέκτες για κάθε φάση δηλαδή 6 ακροδέκτες για διφασικό unipolar stepper). Συχνά αυτά τα δύο κεντρικά στελέχη ενώνονται εσωτερικά μέσα στον βηματικό και έτσι ο κινητήρας παρέχεται με 5 ακροδέκτες αντί των 6.

Ένας μικροελεγκτής ή ελεγκτής βηματικού κινητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενεργοποιήσει τα transistor οδήγησης με την σωστή αλληλουχία και αυτή η εύκολη χρήση και λειτουργία είναι τόσο σημαντική ώστε να είναι εξαιρετικά δημοφιλείς στους χομπίστες επειδή αποτελεί ίσως την πιο οικονομική λύση για έλεγχο ακριβούς γωνιακής μετακίνησης.

### **B) ΔΙΠΟΛΙΚΟΙ STEPPER MOTORS**

Οι διπολικοί (bipolar) steppers (διφασικοί) κατασκευάζονται με ένα τύλιγμα για κάθε φάση. Το ρεύμα μέσω του τυλίγματος χρειάζεται να αναστραφεί προκειμένου να αντιστραφεί ο μαγνητικός πόλος. Έτσι απαιτείται πολυπλοκότερο κύκλωμα οδήγησης τυπικά της μορφής Η συνδεσμολογίας γέφυρας (H-bridge arrangement). Παρόλα αυτά



υπάρχουν αρκετά ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs)-ένα από αυτά είναι και το L298N-τα οποία μας διευκολύνουν στη χρήση αυτών των stepper.

Οι stepper της κατηγορίας αυτής έχουν δύο ακροδέκτες για κάθε φάση χωρίς να είναι κανένας κοινός μεταξύ των.

Ένα τυπικό σχήμα οδήγησης για έναν διπολικό stepper με δύο πηνία είναι η εξής: A+ B+ A- B-. Δηλαδή πρώτα οδηγούμε το πηνίο A με θετικό ρεύμα, μετά αφαιρούμε το ρεύμα από το πηνίο A, μετά οδηγούμε το πηνίο B με θετικό ρεύμα, μετά αφαιρούμε το ρεύμα από το πηνίο B, κατόπιν οδηγούμε το πηνίο A με αρνητικό ρεύμα κ.ο.κ.

Επειδή τα τυλίγματα χρησιμοποιούνται καλύτερα έτσι και είναι πιο ισχυρά από ότι ενός μονοπολικού κινητήρα του ίδιου βάρους. Αυτό οφείλεται στο φυσικό χώρο τον οποίο καταλαμβάνουν τα τυλίγματα. Ένας μονοπολικός κινητήρας έχει διπλάσιο μέγεθος καλωδίων στον ίδιο χώρο, αλλά χρησιμοποιείται μόνο το 50% σε κάθε χρονική στιγμή έτσι είναι 50% αποτελεσματικός. Μολονότι οι διπολικοί κινητήρες απαιτούν πιο σύνθετες λύσεις για την οδήγηση τους η πληθώρα διαθέσιμων κυκλωμάτων οδήγησης καθιστά αυτό τους το μειονέκτημα ουσιαστικά αμελητέο.

### **ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ :**

Η απόδοση των βηματικών κινητήρων εξαρτάται κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό από το κύκλωμα οδήγησης τους. Οι καμπύλες της ροπής στρέψης μπορούν να επεκταθούν σε μεγαλύτερες ταχύτητες εάν οι πόλοι του στάτορα μπορούν να εναλλαχθούν γρηγορότερα με περιοριστικό παράγοντα αυτό της επαγωγής των τυλιγμάτων. Προκειμένου να υπερκεράσουμε την επαγωγή και να εναλλάσουμε τα τυλίγματα γρήγορα θα πρέπει να αυξήσουμε τη τάση οδήγησης. Αυτό έχει ως συνέπεια την αναγκαιότητα περιορισμού του ρεύματος το οποίο μπορούν αυτές οι τάσεις να επάγουν.

Ένας επιπλέον περιορισμός συχνά συγκρίσιμος με τα φαινόμενα της επαγωγής είναι η επιστροφή ανάστροφης (back-EMF) τάσεως του κινητήρα. Καθώς ο ρότορας του κινητήρα περιστρέφεται δημιουργείται μια ημιτονοειδής τάση αναλόγως της ταχύτητας του. Αυτή η AC τάση αφαιρείται από την υπάρχουσα κυματομορφή η οποία επάγεται από τις μεταβολές του ρεύματος.

### **L/R κυκλώματα οδήγησης:**

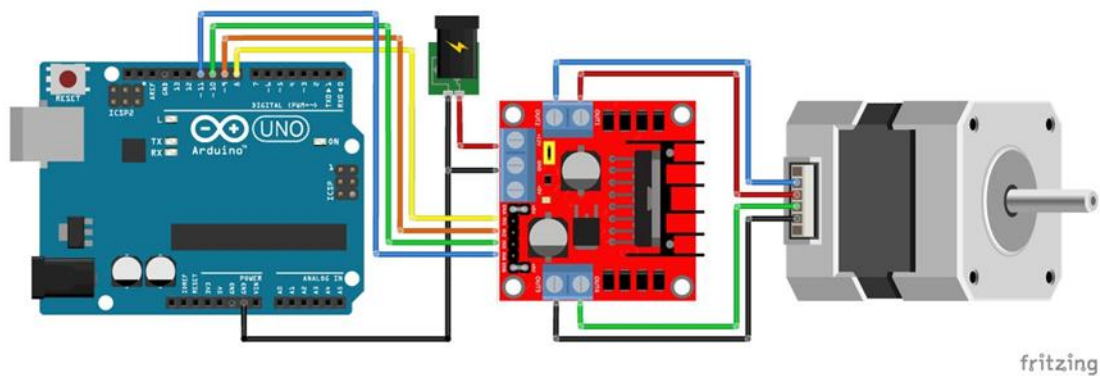
Τα κυκλώματα αυτά συχνά αναφέρονται ως οδηγοί σταθερούς τάσεως επειδή μια θετική ή αρνητική σταθερή τάση εφαρμόζεται σε κάθε τύλιγμα ώστε να θέσει τις βηματικές θέσεις. Εν τούτοις είναι το ρεύμα των τυλιγμάτων και όχι η τάση αυτή που εφαρμόζει τη ροπή στρέψης στο σώμα του κινητήρα. Το ρεύμα  $I$  σε κάθε τύλιγμα σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη τάση  $V$  από την επαγωγή των τυλιγμάτων  $L$  και την αντίσταση τους  $R$ . Η αντίσταση  $R$  καθορίζει το μέγιστο ρεύμα σύμφωνα με τον νόμο το Ohm  $I=V/R$ . Η αυτεπαγωγή  $L$  καθορίζει τον μέγιστο ρυθμό μεταβολής του ρεύματος στα τυλίγματα σύμφωνα με τη σχέση  $dI/dt=V/L$ . Έτσι όταν ο έλεγχος γίνεται από κύκλωμα L/R οδήγησης, η μέγιστη ταχύτητα του βηματικού κινητήρα περιορίζεται από

την αυτεπαγωγή του αφού σε κάποια ταχύτητα, η τάση  $U$  θα μεταβάλλεται γρηγορότερα από όσο το ρεύμα μπορεί να ακολουθήσει.

Με ένα κύκλωμα οδήγησης  $L/R$  είναι εφικτό να ελέγξουμε ένα χαμηλής τάσεως ωμικό κινητήρα με μεγαλύτερες τάσεις απλά προσθέτωντας έναν εξωτερικό αντιστάτη σε σειρά με κάθε τύλιγμα. Έτσι θα έχουμε απώλεια ισχύος στους αντιστάτες (δημιουργία θερμότητας). Θεωρείται μια εύκολη λύση αλλά χαμηλής απόδοσης και ποιότητας.

Τα σύγχρονα κυκλώματα οδήγησης έχουν ξεπεράσει μερικούς από αυτούς τους περιορισμούς παρέχοντας μια κυματομορφή ημιτονοειδούς μορφής στις φάσεις των κινητήρων. Το πλάτος της κυματομορφής τάσεως καθορίζεται να αυξάνει με το ρυθμό των θέσεων. Με την κατάλληλη ρύθμιση αντισταθμίζονται τα φαινόμενα επαγωγής και back-EMF, επιτρέποντας μια αξιοπρεπή απόδοση σχετικά με τους οδηγούς current-mode, αλλά με το κόστος της δυσκολίας σχεδίασης και των απαιτούμενων ρυθμίσεων (tuning procedures).

Τα κυκλώματα οδήγησης (κατάτμησης-chopper) αναφέρονται ως οδηγοί σταθερού ρεύματος επειδή δημιουργούν για κάθε τύλιγμα ένα σταθερό ρεύμα παρά ότι μια σταθερή τάση. Σε κάθε καινούργιο βήμα εφαρμόζεται αρχικά μια πολύ υψηλή τάση αρχικά. Αυτό έχει σαν συνέπεια το ρεύμα στο κύκλωμα να ανεβαίνει γρήγορα αφού ισχύει ότι  $dI/dt=V/L$  όπου το  $V$  είναι πολύ μεγάλο. Το ρεύμα στο κάθε τύλιγμα ελέγχεται από τον ελεγκτή συνήθως μετρώντας την τάση κατά μήκος ενός αντιστάτη “αισθητήρα” σε σειρά με το κάθε τύλιγμα. Όταν το ρεύμα υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο η τάση φεύγει ή κατατμείται συνήθως με τη χρήση transistor ισχύος. Όταν η τιμή του ρεύματος του τυλίγματος πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, η τάση δημιουργείται ξανά. Με αυτό το τρόπο το ρεύμα διατηρείται σχετικά σταθερό για συγκεκριμένη βηματική θέση. Αυτό απαιτεί πιο σύνθετα ηλεκτρονικά τα οποία αντιλαμβάνονται τα ρεύματα των τυλιγμάτων και έτσι μπορεί να ελέγχεται η διακοπτικότητα (switching) αλλά επιτρέποντας στο stepper να οδηγείται με υψηλότερη ροπή στρέψης και σε υψηλότερες ταχύτητες από ότι με τους οδηγούς  $L/R$ . Χρησιμοποιούνται λύσεις ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής (integrated electronics) για αυτό το σκοπό και είναι αυτές οι οποίες είναι οι πλέον διαδεδομένες.



Σχ.7 Ηλεκτρική διασύνδεση του driver L298.

#### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ :

Οι βηματικοί κινητήρες συνήθως ελέγχονται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (Συστήματα ελέγχου θέσεως ακριβείας). Αποτελούν συνήθως έναν ψηφιακό ελεγκτή ως μέρος ενός ανοιχτού συστήματος βρόγχου και βρίσκουν χρήση σε εφαρμογές ακριβείας και μεγάλων μηχανικών φορτίων.

Στο πεδίο των lasers και της οπτικής συνήθως χρησιμοποιούνται σε εξοπλισμούς ακριβείας θέσεως όπως για παράδειγμα σε γραμμικούς ενεργοποιητές, γραμμικά στάδια, στάδια περιστροφών, γωνιόμετρα. Άλλες χρήσεις είναι σε μηχανισμούς πακετοποίησης και τοποθέτησης θέσεως βαλβίδων για χρήση σε συστήματα ελέγχου υγρών.

Τώρα για εμπορική χρήση βρίσκουν εφαρμογές σε floppy disks, flatbed scanners, computer printers, plotters, image scanners, camera lenses, CNC machines, slot machines, και πιο πρόσφατα σε 3d printers.

#### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ :

Ένα σύστημα βηματικού κινητήρα αποτελείται από 3 βασικά στοιχεία, συνήθως συνδυαζόμενα με κάποιο χαρακτηριστικό διαδραστικότητας με το χρήστη. Αυτά είναι :

- i) Ο ελεγκτής ο οποίος είναι μικροεπεξεργαστής ικανός να δημιουργεί βηματικούς παλμούς και σήματα διεύθυνσης για τον οδηγό. Επιπρόσθετα ο ελεγκτής είναι επίσης επιφορτισμένος να μας παρέχει με πάρα πολλά άλλα χρήσιμα σήματα και διεργασίες.
- ii) Ο οδηγός (ή ενισχυτής) μετατρέπει τα σήματα ελέγχου του ελεγκτή και τους δίνει τέτοια ισχύ όσο είναι απαραίτητη προκειμένου να ενεργοποιηθούν τα τυλίγματα του κινητήρα.
- iii) Ο βηματικός κινητήρας ο οποίος είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό εξάρτημα το οποίο μετατρέπει τους ψηφιακούς παλμούς σε κυκλική μηχανική κίνηση. Τα πλεονεκτήματα των βηματικών κινητήρων είναι πολλά όπως : χαμηλό κόστος, υψηλή αξιοπιστία, υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες και μία απλή και συμπαγή κατασκευή η

οποία λειτουργεί σχεδόν σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Τα βασικά μειονεκτήματα του να χρησιμοποιούμε βηματικούς κινητήρες είναι το φαινόμενο αντίδρασης συχνά παρατηρούμενο σε χαμηλές ταχύτητες και η ελάττωση της ροπής σε αύξηση της ταχύτητας.

Πλεονεκτήματα :

- i) Χαμηλό κόστος
- ii) Υψηλή ροπή κατά το ξεκίνημα και σε χαμηλές ταχύτητες
- iii) Στιβαρότητα (ανθεκτικότητα)
- iv) Ευκολία κατασκευής
- v) Χρήση σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοιχτού βρόχου
- vi) Ελάχιστη απαιτούμενη συντήρηση
- vii) Εργασία σε οποιοδήποτε περιβάλλον
- viii) Ελάχιστη πιθανότητα για “στολάρισμα”
- ix) Ικανότητα ευρείας χρήσης σε ρομποτικά συστήματα
- x) Υψηλή αξιοπιστία
- xi) Η γωνία περιστροφής είναι ανάλογη των παλμών εισόδου
- xii) Ο κινητήρας έχει πλήρη ροπή σε κατάσταση ‘στάσεως’ (εάν τα τυλίγματα διατηρούνται ενεργοποιημένα
- xiii) Ακριβή θέση και επαναληψιμότητα της κίνησης αφού ένας καλός βηματικός κινητήρας παρουσιάζει ακρίβεια της τάξεως των 3-5% για κάθε βήμα και αυτό το σφάλμα δεν είναι σωρευτικό από κάθε βήμα και για το επόμενο του.
- xiv) Εξαιρετική απόκριση σε ξεκίνημα/σταμάτημα/αναστροφή
- xv) Υψηλή διάρκεια ζωής
- xvi) Η απόκριση του κινητήρα σε ψηφιακούς παλμούς εισόδου παρέχει δυνατότητα ελέγχου ανοιχτού βρόχου και άρα χαμηλότερο κόστος στο συνολικό σύστημα
- xvii) Εκτεταμένη κλίμακα περιστροφικών ταχυτήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί καθώς η ταχύτητα είναι ανάλογη της συχνότητας των παλμών εισόδου.

### **Χρήση της πλακέτας Arduino nano ως I2C slave.**

Παρακάτω θα περιγράψουμε την χρήση της πλακέτας Arduino nano ως I2C slave για την μεταφορά δεδομένων από τον Arduino uno προς το host P.C. και συγκεκριμένα προς το λογισμικό Parallax Data Acquisition (Excell).

Η χρήση του Arduino nano κρίθηκε απαραίτητη επειδή με την μία διασύνδεση usb την οποία είχαμε με τον Arduino uno δεν μπορούσε να εξυπηρετηθεί η μεταφορά δεδομένων από την συσκευή προς το host P.C. επειδή η διασύνδεση αυτή χρησιμοποιείται ήδη για την επικοινωνία και την φόρτωση του προγράμματος του Arduino uno (είχαμε conflict).

Για αυτόν τον λόγο έγινε χρήση και της δεύτερης usb θύρας του host P.C. χρησιμοποιώντας τον Arduino nano ως slave.

Για να το επιτύχουμε αυτό αρχικά χρησιμοποιούμε την βιβλιοθήκη wire με την χρήση της εντολής #include <Wire.h>.

( Ο κώδικας βρίσκεται στο Παράρτημα στη θέση 2).

### **Χρήση της πλακέτας του Arduino uno ως Master.**

Ο Arduino Uno είναι υπεύθυνος για την αποστολή παλμών στον βηματικό κινητήρα, για την μέτρηση της χαλάρωσης του 3d δοκιμίου καθώς και για την απόστολη των μετρήσεων αυτών μέσω του Arduino Nano στο λογισμικό Parallax Data Acquisition (Excell).

( Ο κώδικας βρίσκεται στο Παράρτημα στη θέση 3).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Εφαρμογή και Αποτελέσματα

---

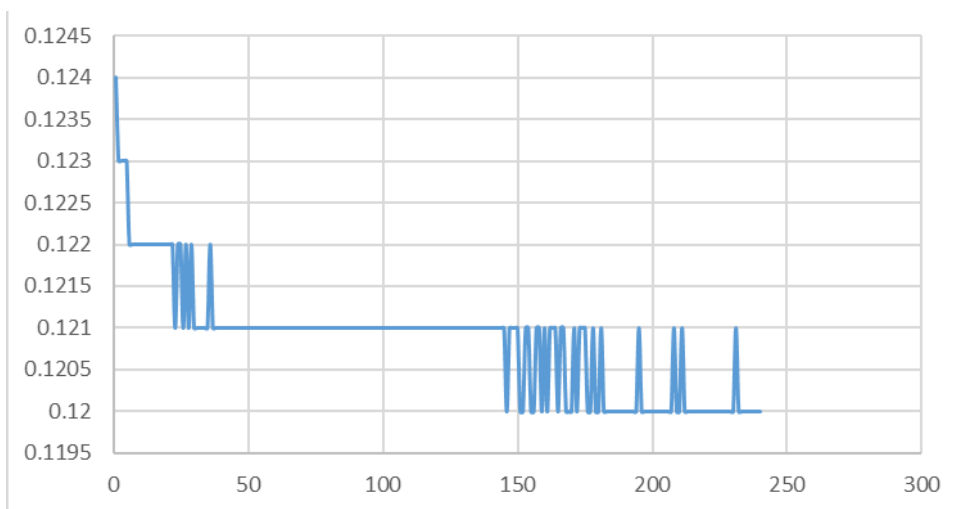
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες χαλάρωσης δύο διαφορετικών δοκιμίων (3d υφασμάτων). Δοκίμιο 1 & Δοκίμιο 2.

Οι χαρακτηριστικές έχουν ληφθεί με την βοήθεια του οργάνου το οποίο κατασκευάσαμε. Αυτές έχουν ληφθεί σε διάφορα στάδια στα οποία κάθε φορά εφαρμόζεται μια συγκεκριμένη δύναμη και αναμένεται χρονικά η χαλάρωση του υπό εξέταση 3d υφάσματος.

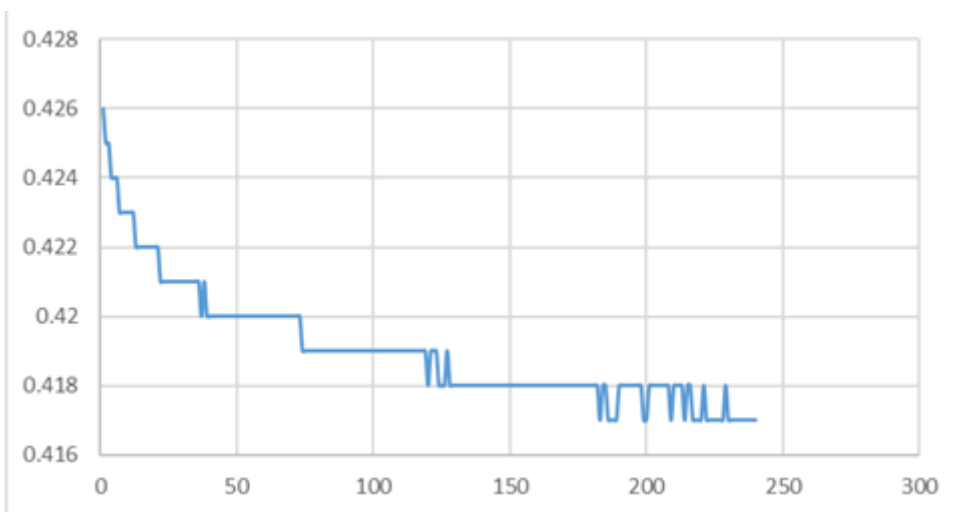
Το μέγεθος της δύναμης απεικονίζεται στον κατακόρυφο άξονα και εκφράζεται σε Kgr. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται ο χρόνος σε sec και ποιο συγκεκριμένα έχουν ληφθεί μετρήσεις κάθε φορά ανά ένα sec ( 0-240 sec & 0-300 sec) δηλαδή 240 μετρήσεις για το δοκίμιο 1 & 300 μετρήσεις για το δοκίμιο 2 (τυχαία).



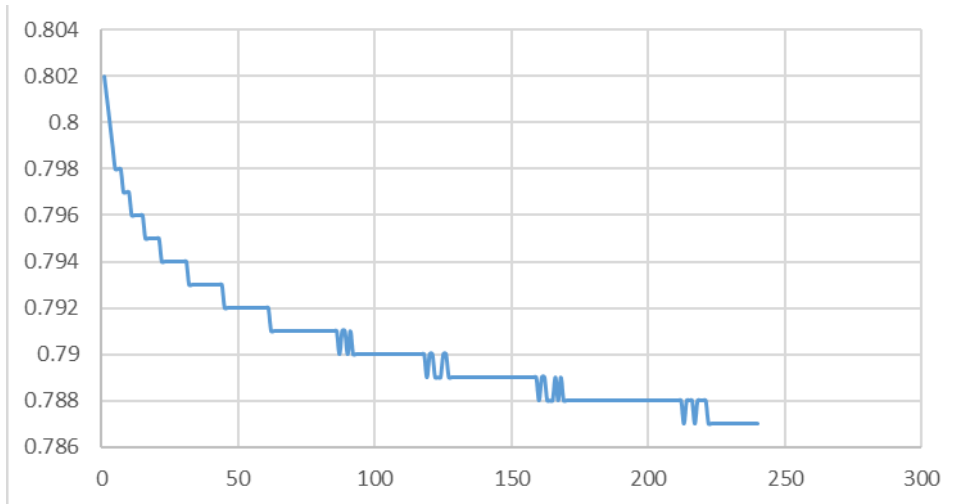
Εικ. 3 3D Υφασμα Δοκίμιο 1 (Πλαινή όψη).



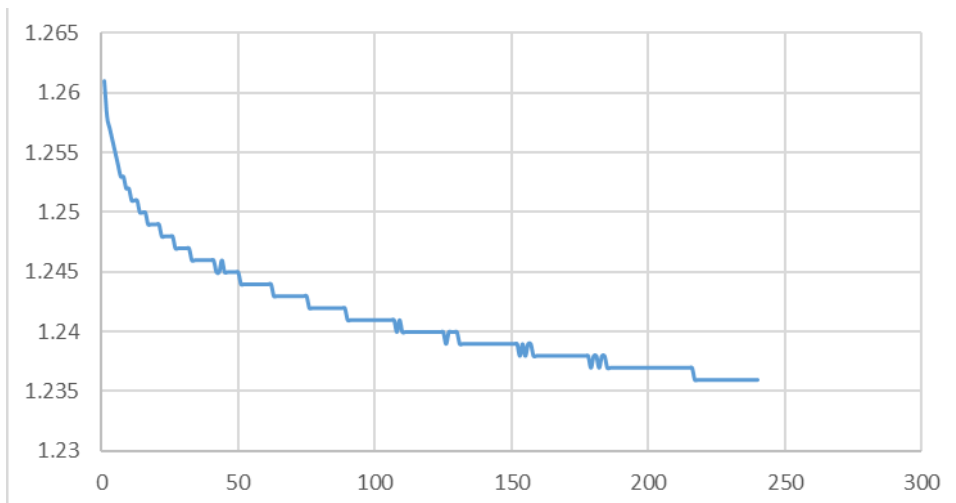
Σχ.8 Πρώτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 1 με βύθιση 1mm.



Σχ.9 Δεύτερο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 1 με βύθιση 2mm

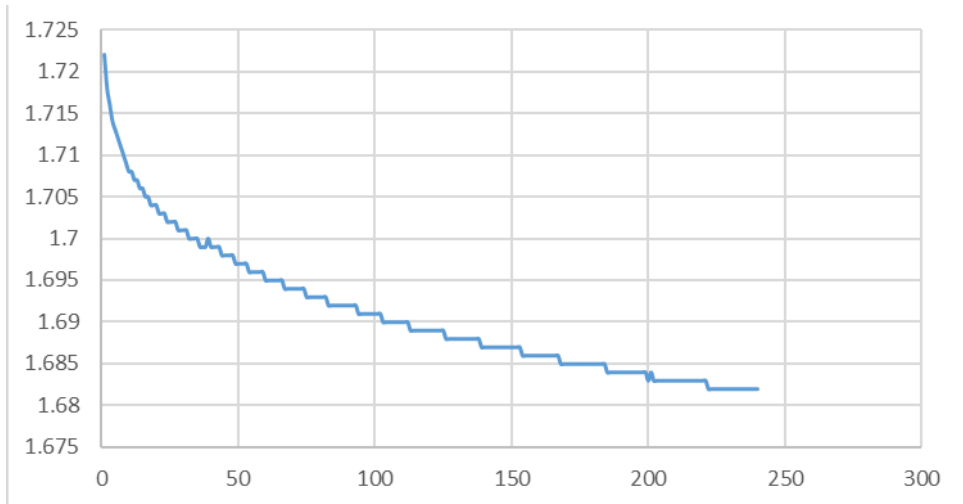


Σχ.10 Τρίτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 1 με βύθιση 3mm.

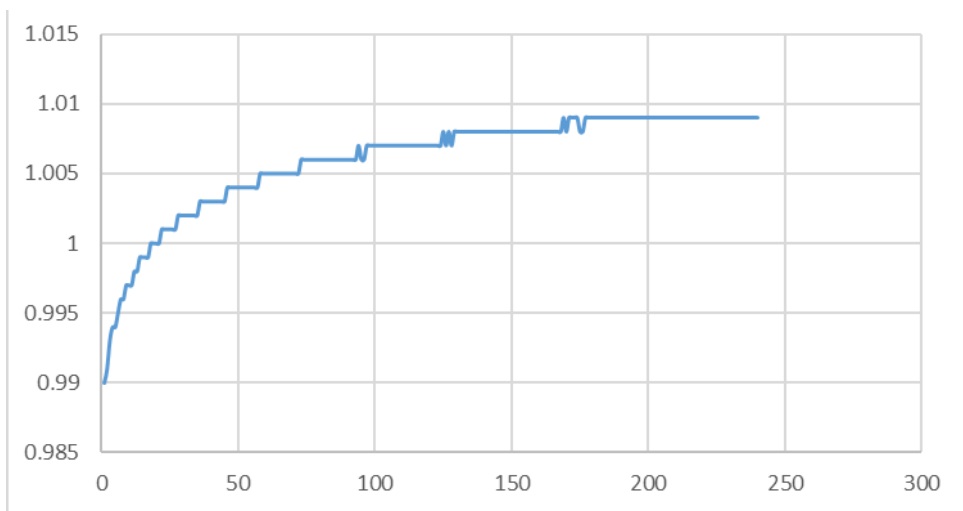


Σχ.11 Τέταρτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 1 με βύθιση 4mm.

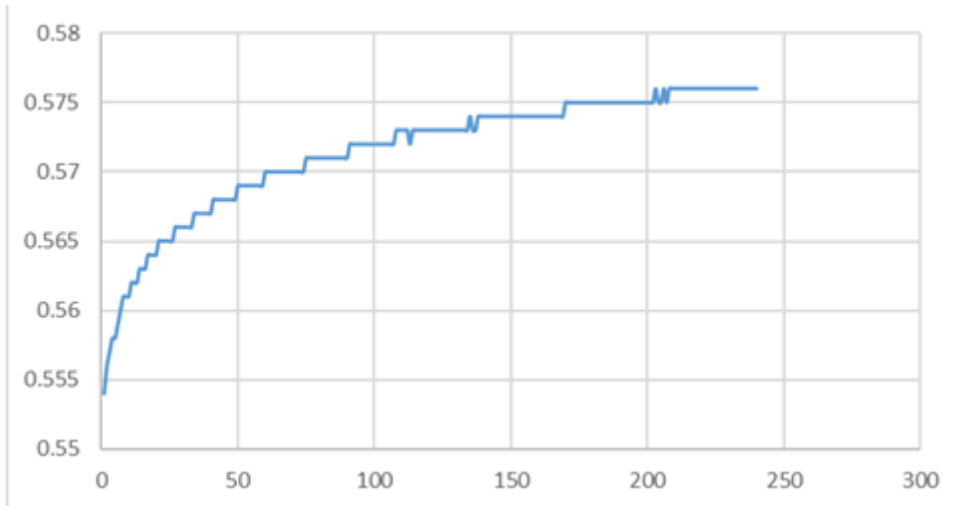




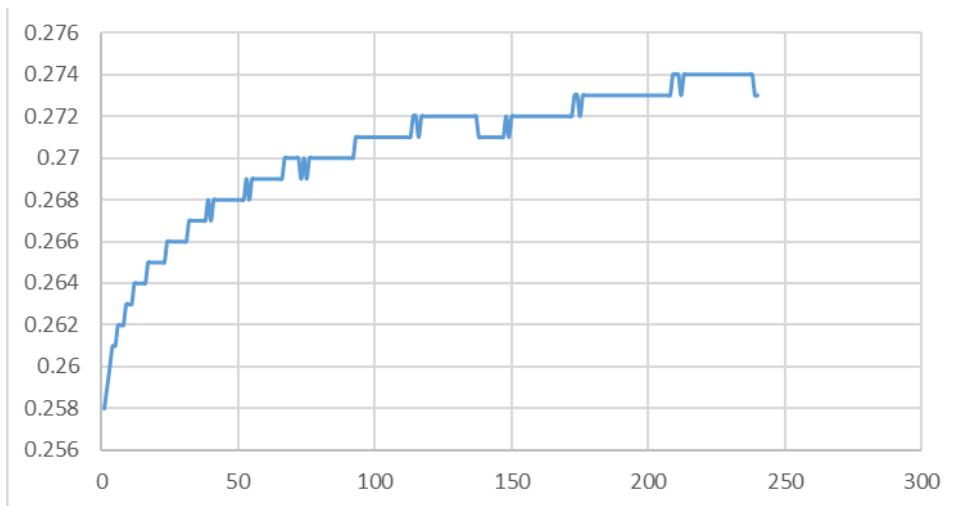
Σχ.12 Πέμπτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 1 με βύθιση 5mm.



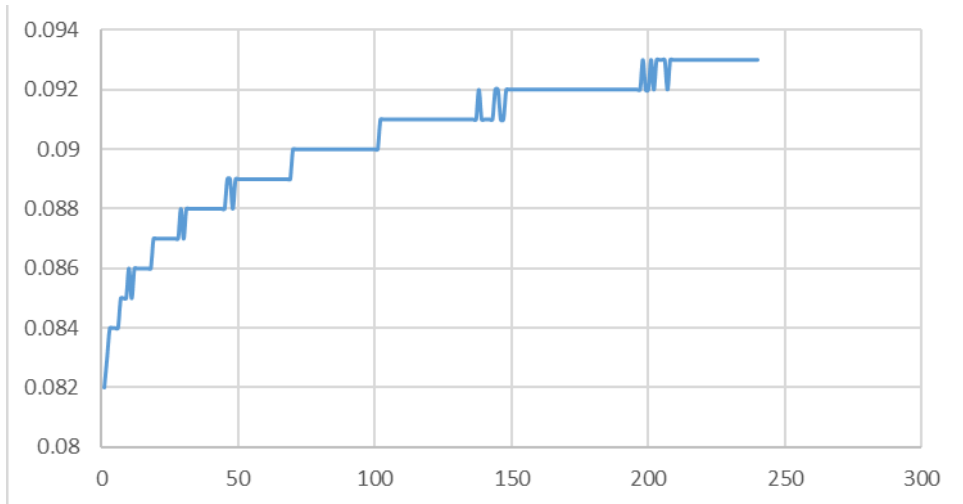
Σχ.13 Πρώτο σετ μετρήσεων του Δοκιμίου 1 με ανύψωση 1mm.



Σχ.14 Δεύτερο σετ μετρήσεων του Δοκιμίου 1 με ανύψωση 2mm.



Σχ.15 Τρίτο σετ μετρήσεων του Δοκιμίου 1 με ανύψωση 3mm.



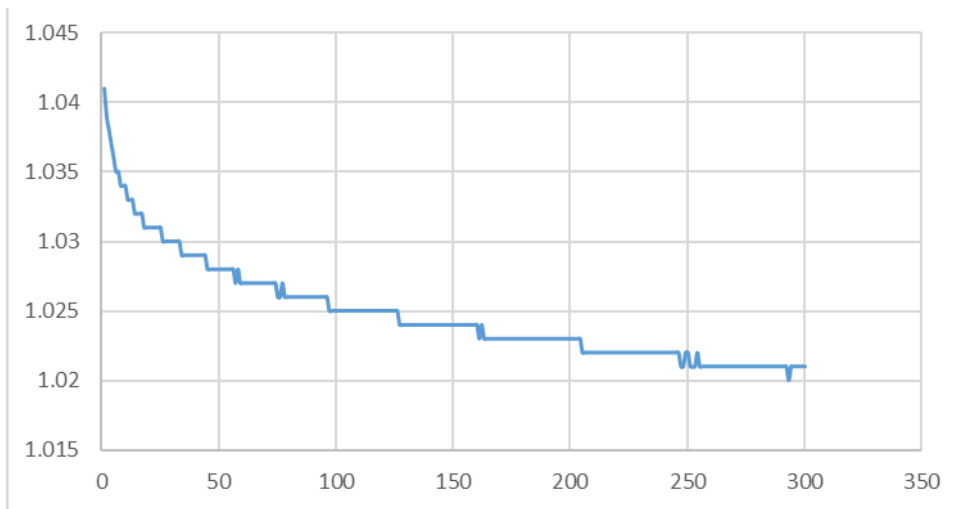
Σχ.16 Τέταρτο σετ μετρήσεων του Δοκιμίου 1 με ανύψωση 4mm.



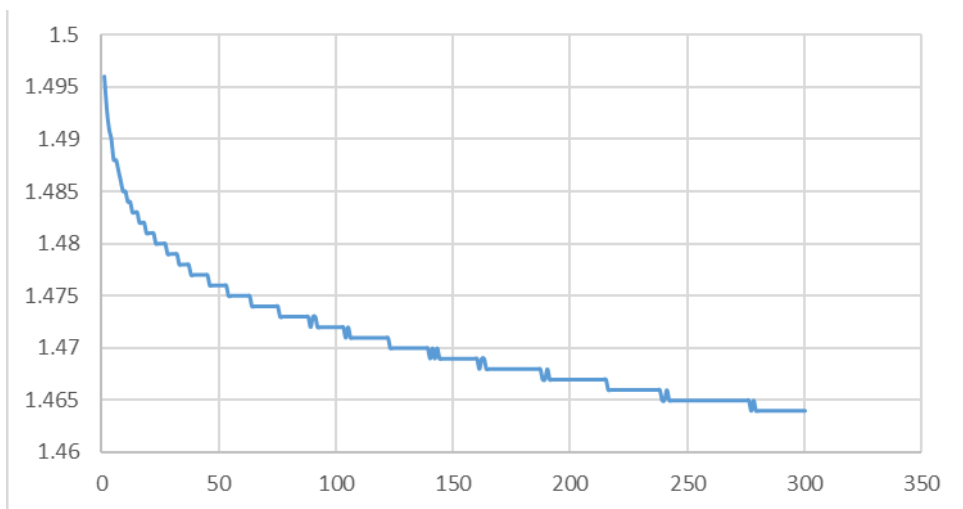
Εικ.4 3D Ύφασμα Δοκίμιο 2 (Πλαινή όψη).



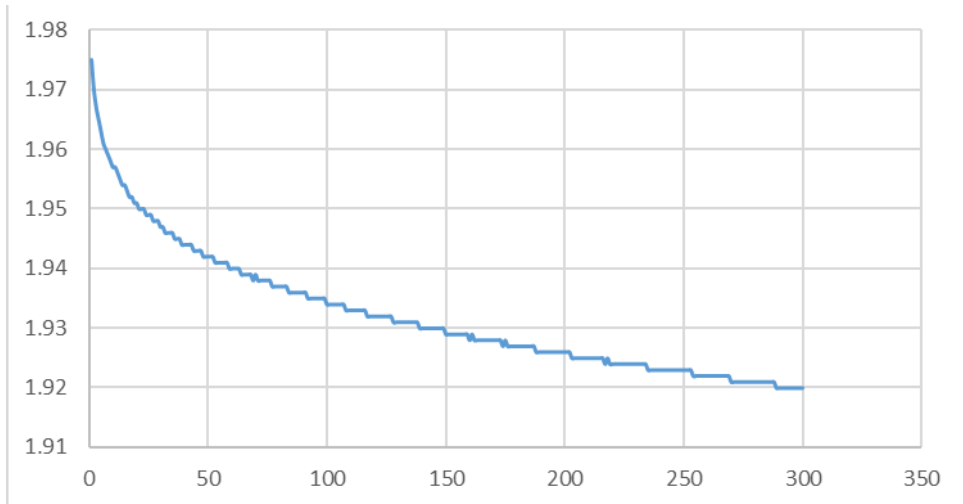
Σχ.17 Πρώτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 2 με βύθιση 1mm.



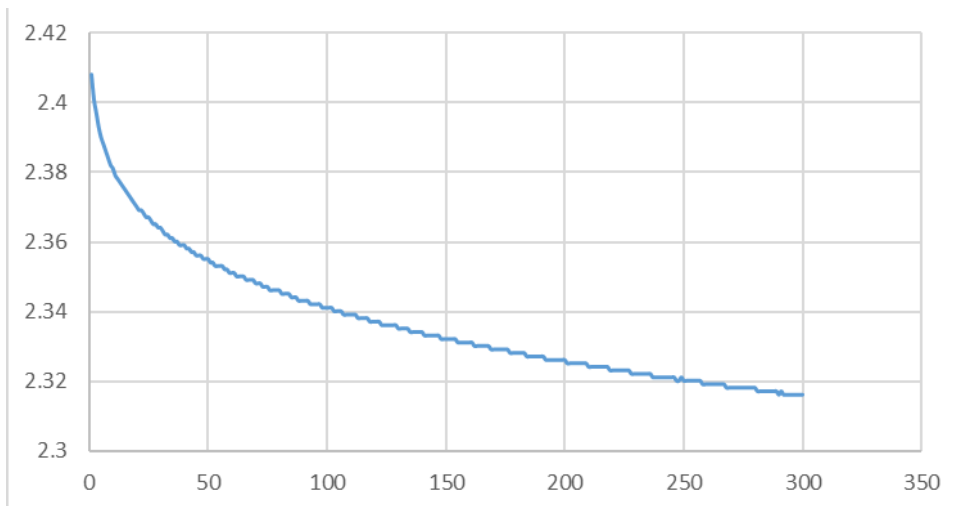
Σχ.18 Δεύτερο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 2 με βύθιση 2mm.



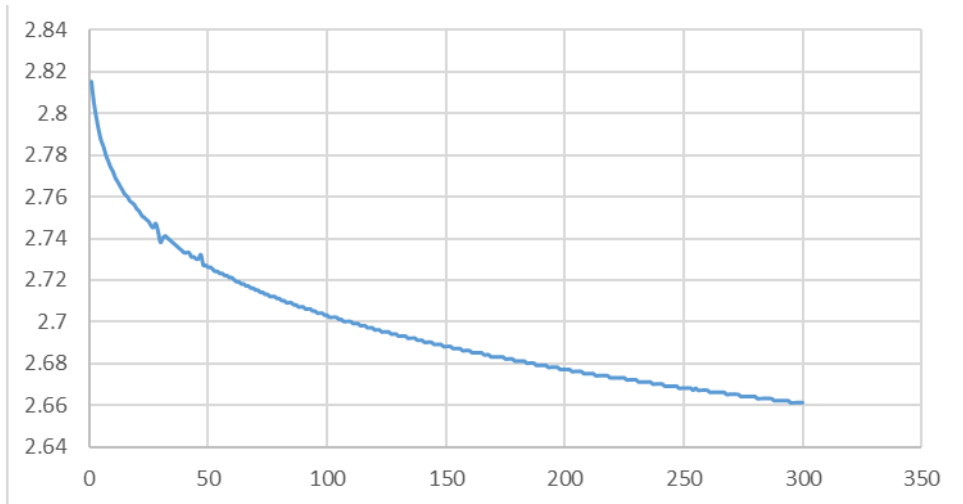
Σχ.19 Τρίτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 2 με βύθιση 3mm.



Σχ.20 Τέταρτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 2 με βύθιση 4mm.



Σχ.21 Πέμπτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 2 με βύθιση 5mm.



Σχ.22 Έκτο σετ μετρήσεων της χαλάρωσης του Δοκιμίου 2 με βύθιση 6mm.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση

---

Προκύπτει από τις εργαστηριακές μετρήσεις ότι αυτές επαληθεύουν τα θεωρητικά μοντέλα με απόλυτη ακρίβεια (παρατηρούμε ότι πρόκειται για εκθετική μείωση της αντίδρασης στην χαλάρωση).

Όπως φαίνεται στην αρχή και για μικρές δυνάμεις πίεσης η διασπορά των τιμών είναι πολύ μικρή (μεγαλύτερο σφάλμα) και αυτή αυξάνει και όπως παρατηρούμε η καμπύλη χαράζεται περισσότερο ομαλά για μεγαλύτερες δυνάμεις λόγω του ότι υπεισέρχεται μικρότερο σφάλμα μετρήσεων σε αυτές.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα – Προτάσεις

---

Από τα προαναφερθέντα προκύπτει ότι υπάρχουν πολλοί και σοβαροί λόγοι για την κατασκευή του συγκεκριμένου οργάνου καθόσον αυτό καθίσταται πολύ χρήσιμο για την τεχνολογία των υφασμάτων, επίσης είναι καινοτόμο για τον χώρο αυτόν και κυρίως αποτελεί λύση χαμηλού κόστους και εύκολου στην μεταφορά του (είναι φορητό) εν αντιθέσει με τον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό ο οποίος είναι μη μεταφερόμενος, ακριβός και ανεπαρκής.

Στο μέλλον πιθανόν θα βοηθούσε (εξαιρετικά) να παρέχει ως συσκευή μεγαλύτερα φορτία το οποίο θα ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ισχυρότερων stepper και του αντιστοίχου driver και τροφοδοτικού του συγκεκριμένου stepper. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί επίσης και μεγαλύτερο load cell μεγέθους π.χ. 10Kgr ή 40Kgr καθόσον η αντίσταση των δοκιμών θα αυξηθεί με τη χρήση ισχυρότερου stepper.

Επίσης με κατάλληλη ανάπτυξη κυρίως σε επίπεδο λογισμικού, η συσκευή θα μπορούσε να μετρά και τον ερπυσμό των υλικών.

Η εν λόγω συσκευή θα μπορεί να υποστηρίξει την εργαστηριακή υποδομή του πανεπιστημίου καθώς και να βοηθήσει στην εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων και προαγωγή της γνώσεως στο συγκεκριμένο και τόσο πολλά υποσχόμενο πεδίο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

---

Βιβλιογραφία – Πηγές στην ελληνική γλώσσα :

Βιβλιογραφία – Πηγές σε ξένες γλώσσες :

[https://www.seeedstudio.com/blog/2019/11/26/10-things-you-can-do-with-your-hx711-and-load-cell/?utm\\_source=mailchimp&utm\\_medium=edm&utm\\_campaign=bazaar\\_1127&ct=t\(\)&mc\\_cid=82d5274e5a&mc\\_eid=333a319936](https://www.seeedstudio.com/blog/2019/11/26/10-things-you-can-do-with-your-hx711-and-load-cell/?utm_source=mailchimp&utm_medium=edm&utm_campaign=bazaar_1127&ct=t()&mc_cid=82d5274e5a&mc_eid=333a319936)

<https://arduino.en.softonic.com/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino\\_IDE](https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino_IDE)

<https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-weight-measurement-using-load-cell>

<https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/controlling-nema-17-stepper-motor-with-arduino-and-a4988-stepper-driver-module>

<https://lastminuteengineers.com/stepper-motor-l298n-arduino-tutorial/>

<https://coeleveld.com/arduino-stepper-l298n/>

<https://www.14core.com/wiring-driving-the-l298n-h-bridge-with-stepper-motors/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

---

### 1.) Κώδικας Arduino για ρύθμιση ακριβείας της μετρούμενης αντίστασης του 3d δοκιμίου :

/\*

\* Load Cell HX711 Module Interface with Arduino to measure weight in Kgs

Arduino

pin

2 -> HX711 CLK

3 -> DOUT

5V -> VCC

GND -> GND

Most any pin on the Arduino Uno will be compatible with DOUT/CLK.

The HX711 board can be powered from 2.7V to 5V so the Arduino 5V power should be fine.

\*/

```
#include "HX711.h" //We must have this library in our arduino library folder.
```

```
#define DOUT 7
```

```
#define CLK 6
```

```
HX711 scale(DOUT, CLK);
```

```
//Change this calibration factor as per our load cell once it is found we may need to vary it in thousands.
```

```
Calibration factor = -426950.
```

```
//=====
```

```
=====
```

```
//          SETUP
```

```
//=====
```

```
=====
```

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 Calibration");
  Serial.println("Remove all weight from scale");
  Serial.println("After readings begin, place known weight on scale");
  Serial.println("Press a,s,d,f to increase calibration factor by 10,100,1000,10000
respectively");
  Serial.println("Press z,x,c,v to decrease calibration factor by 10,100,1000,10000
respectively");
  Serial.println("Press t for tare");
  scale.set_scale();
  scale.tare(); //Reset the scale to 0

  long zero_factor = scale.read_average(); //Get a baseline reading
  Serial.print("Zero factor: "); //This can be used to remove the need to tare the
scale. Useful in permanent scale projects.
  Serial.println(zero_factor);
}

//=====
//                               LOOP
//=====
void loop() {

  scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor

  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale.get_units(), 3);
  Serial.print(" kg"); //Change this to kg and re-adjust the calibration factor if we
follow SI units.
  Serial.print(" calibration_factor: ");
  Serial.print(calibration_factor);
  Serial.println();
}

```

```

if(Serial.available())
{
  char temp = Serial.read();
  if(temp == '+' || temp == 'a')
    calibration_factor += 10;
  else if(temp == '-' || temp == 'z')
    calibration_factor -= 10;
  else if(temp == 's')
    calibration_factor += 100;
  else if(temp == 'x')
    calibration_factor -= 100;
  else if(temp == 'd')
    calibration_factor += 1000;
  else if(temp == 'c')
    calibration_factor -= 1000;
  else if(temp == 'f')
    calibration_factor += 10000;
  else if(temp == 'v')
    calibration_factor -= 10000;
  else if(temp == 't')
    scale.tare(); //Reset the scale to zero
}
}
//=====
=====

```

Στην περίπτωση μας η τιμή που πήραμε προκειμένου να έχουμε ακρίβεια της τάξεως του +-1gr σε όλη την κλίμακα 0-5Kgr είναι ο αριθμός ( - 426950 ).

## **2). Κώδικας *slave Arduino nano*.**

```

#include <Wire.h>
int LED = 13;
int x = 0;
float xI[100];
int i=0;

```

```

int j=0;
int bin[16];
int dec2=0;
unsigned int value=0;
float valueI=0;
void setup() {
  // Define the LED pin as Output
  pinMode (LED, OUTPUT);
  // Start the I2C Bus as Slave on address 9
  Wire.begin(9);
  // Attach a function to trigger when something is received.
  Wire.onReceive(receiveEvent);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("LABEL,Date,Time,valueI");
}
void receiveEvent(int bytes) {
  x = Wire.read(); // read one character from the I2C
  xI[i]=x;
  if((i%2)==1)
  {
    dec2=0;
    for(j=0;j<8;j++)

    {
      bin[j]=bitRead(x,j);
    }
    for(j=0;j<8;j++)
    {
      dec2=dec2+ceil(pow(2*bin[j],j+8));
    }
    value=xI[i-1]+dec2;
    valueI=float(value)/13107;
    //Serial.println(valueI,3);
    Serial.print( (String) "DATA,DATE,TIME," );
    Serial.println(valueI,3);
  }
}

```

```

    }
    i++;

}

void loop() {
    //If value received is 0 blink LED for 200 ms

}

```

### **3). Κώδικας master Arduino uno.**

```

#include <AccelStepper.h>
#include<Wire.h>
#include "HX711.h"
#define calibration_factor -426950.0 //This value is obtained using the
SparkFun_HX711_Calibration sketch
#define DOUT 7
#define CLK 6
HX711 scale(DOUT, CLK);

int l;
int it=0;
int k;
int i=0;
int j=0;
int u=0;
int n=0;
int dir=0;
int negative=0;
int positive=0;
int gar=0;
float value=0;
int valueI=0;

```

```

int bin[16];
int dec1=0;
int dec2=0;
int tr=0;

AccelStepper stepper(4, 2, 3, 4, 5);

void setup() {
  // we put our setup code here, to run once:

  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  scale.set_scale(calibration_factor); //This value is obtained by using the
  SparkFun_HX711_Calibration sketch
  scale.tare(); //Assuming there is no weight on the scale at start up, reset the scale to 0
}

void loop() {

  // we put our main code here, to run repeatedly:

  Serial.println("please enter the timespace delay between two measurements in the raw
of each step");
  while(Serial.available()>0) {}
  l=Serial.parseFloat();
  if (l>4)
  {
    l=4;
  }
  while(Serial.available()>0) {}
  gar=Serial.parseFloat();

  Serial.println("please enter the number of equal time points for each step");
  while(Serial.available()>0) {}
  k=Serial.parseInt();

```



```

while(Serial.available()==0) {}
gar=Serial.parseFloat();

Serial.println("please enter the direction and distance(mm)");
while(Serial.available()==0) {}
dir=Serial.parseInt();
while(Serial.available()==0) {}
gar=Serial.parseFloat();

Serial.println("please enter the number of iterations");
while(Serial.available()==0) {}
it=Serial.parseInt();
while(Serial.available()==0) {}
gar=Serial.parseFloat();

Serial.println("Tare now (1 for yes)");
while(Serial.available()==0) {}
tr=Serial.parseInt();
while(Serial.available()==0) {}
gar=Serial.parseFloat();

if(tr==1)
{
    scale.tare();
}

for(n=1;n<=it;n++)
{
    stepper.setMaxSpeed(100.0);
    stepper.setAcceleration(100.0);

    stepper.move(dir*50);
    stepper.runToPosition();
    stepper.disableOutputs();
    delay(2000);
}

```

```

Serial.print("Iterations number ");
Serial.print(n);
Serial.println();

for(u=0;u<k;u++)
{

value=scale.get_units();
value=abs(value);
Serial.print(value, 3); //scale.get_units() returns a float
Serial.print(" Kgr"); //need to refactor the calibration_factor
Serial.println();
delay(1*1000);

valueI=value*13107;

for(i=0;i<16;i++)
{
bin[i]=bitRead(valueI,i);
}

dec1=bin[0];
for(j=1;j<8;j++)
{
dec1=dec1+ceil(pow(2*bin[j],j));
}
dec2=bin[8];
for(j=9;j<16;j++)
{
dec2=dec2+ceil(pow(2*bin[j],j-8));
}

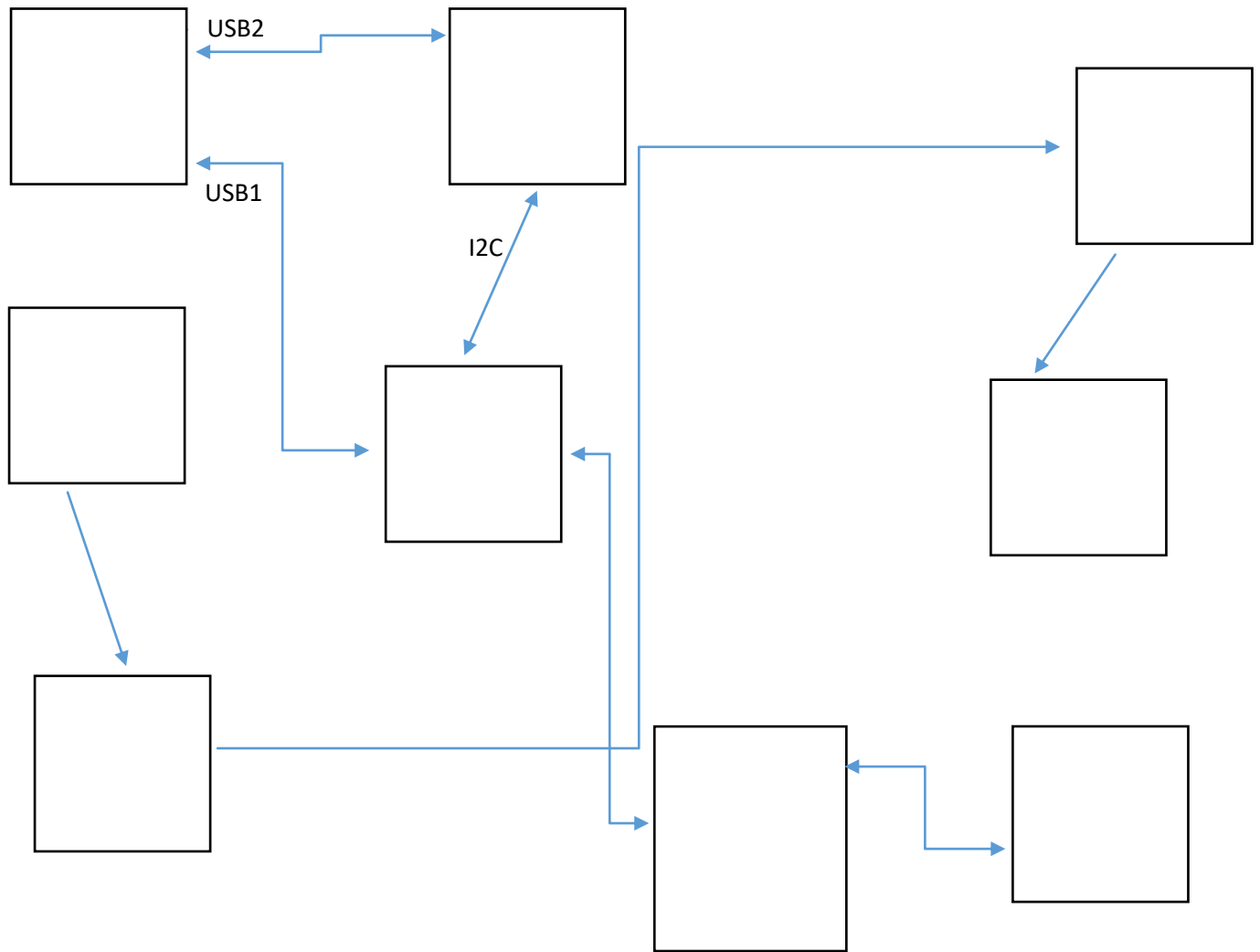
Wire.beginTransmission(9);//9 here is the address of the slave board
Wire.write(dec1);//Transfers the value to the slave board
Wire.endTransmission();

```

```
Wire.beginTransmission(9);//9 here is the address of the slave board
Wire.write(dec2);//Transfers the value to the slave board
Wire.endTransmission();
}
}

}
```

4) ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΓΑΝΟΥ



*5) ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΡΓΑΝΟΥ.*

