

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανάπτυξη και κατασκευή συστήματος  
μετρήσεων παραμορφώσεων με χρήση  
ηλεκτροεπιμηκυσιομέτρων (strain gages) και  
Arduino**

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΠΟΥΤΙΚΟΣ ΧΑΡΙΛΑΟΣ ( Α. Μ. : 6423 )**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΙΑΜΑΝΤΑΚΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2020**

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αφορά την κατασκευή και παρουσίαση συσκευής μετρήσεως παραμόρφωσης δοκιμίου με τη χρήση Arduino και με τη βοήθεια ηλεκτρεπιμηκυσιομέτρου.

Αρχικά παρουσιάζονται εισαγωγικά αντικείμενα της εργασίας, όπως η έννοια της παραμόρφωσης, η γέφυρα Wheatstone, το ηλεκτρεπιμηκυσιόμετρο και ο μικροελεγκτής Arduino. Στη συνέχεια, επεξηγείται η υλοποίηση και η λειτουργία του συστήματος με τελευταίο στάδιο τη λήψη μετρήσεων και επιβεβαίωση αυτών.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα κ. Διαμαντάκο Ιωάννη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Μπούτικος Χαρίλαος  
2020

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής  
(Ονοματεπώνυμο)

.....  
(Υπογραφή)

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία υλοποιείται ένα σύστημα, το οποίο βασίζεται στην πλατφόρμα Arduino και έχει τη δυνατότητα μέτρησης παραμορφώσεων σε υλικά με χρήση ηλεκτροεπιμηκυνσιομέτρου (strain gage). Το ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρο είναι ο κατ' εξοχήν αισθητήρας που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση παραμορφώσεων και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον μικροελεγκτή ATmega328, τον ενισχυτή - ADC μετατροπέα HX711 και την γέφυρα Wheatstone. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και υπολογισμών θα εμφανίζονται στην οθόνη LCD του συστήματος που αναπτύχθηκε .

Η ανάπτυξη της εργασίας γίνεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εισαγωγικές και γενικές έννοιες για την παραμόρφωση, τον μικροελεγκτή Arduino, το ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρο, τον ενισχυτή - ADC μετατροπέα HX711 και για τη λειτουργία της γέφυρας Wheatstone.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του παραπάνω συστήματος, η χρήση τους καθώς και ο ρόλος του καθενός στο εν λόγω σύστημα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδικασία σχεδίασης, κατασκευής και προγραμματισμού του συστήματος μέτρησης παραμορφώσεων. Αναλυτικά, περιγράφεται η συνδεσμολογία του συστήματος και δίνεται λεπτομερή περιγραφή της λειτουργίας του. Επίσης, αναλύεται ο κώδικας που εκτελεί ο μικροελεγκτής AT mega 328 της πλατφόρμας Arduino, ανά υπορουτίνα και η λειτουργία της καθεμίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι μετρήσεις παραμόρφωσης που πραγματοποιήθηκαν με το παραπάνω σύστημα και η σύγκριση τους με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με εμπειρική συσκευή παραμόρφωσης. Στο τέλος του τέταρτου κεφαλαίου, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα καθώς και αναφέρονται κάποιες προτάσεις για την μελλοντική επέκταση της συσκευής που υλοποιήθηκε.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>2</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>4</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>6</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>6</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	6
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ .....	7
1.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	8
1.3 Ο ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	9
1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.3.2 Ο ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	10
1.4 ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	10
1.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ .....	10
1.4.2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	11
1.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	15
1.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	16
1.5.3 ΚΑΠΟΙΑ ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	18
1.5.4 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ.....	21
1.6 ΓΕΦΥΡΑ WHEATSTONE.....	26
1.7 ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (EMBEDDED SYSTEMS ) .....	27
1.7.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	28
1.7.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.....	30
1.8 ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ.....	30
1.8.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ.....	30
1.8.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ .....	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>34</b>
<b>ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</b> .....	<b>34</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	34
2.2 Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ARDUINO UNO REV3.....	34
2.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	34
2.2.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ARDUINO.....	35
2.2.3 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ARDUINO UNO REV 3 .....	35
2.3 Ο ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ ΑΤΜΕGA328 .....	37
2.3.1 Η CPU ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ΑΤmega328 .....	37
2.3.2 ΟΙ ΜΝΗΜΕΣ ΤΟΥ ΑΤmega328.....	39
2.3.3 ΣΕΙΡΙΑΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ.....	40
2.4 Η ΟΘΟΝΗ LCD .....	40
2.5 Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ – ADC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΗΧ711.....	41
2.5.1 Η ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΗΧ711.....	41

2.5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΗΧ711 .....	42
2.5.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΗΧ711 .....	43
2.6 Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ .....	44
2.7 ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ 5VOLT DC 1AMP .....	47
2.8 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ARDUINO .....	47
2.8.1 ΟΙ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ARDUINO IDE .....	49
2.8.2 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ .....	49
2.8.3 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ .....	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>53</b>
<b>ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ.....</b>	<b>53</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	53
3.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	54
3.2.1 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ WHEATSTONE.....	54
3.2.2 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΗΧ711 ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ARDUINO.....	55
3.2.3 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ LCD ΟΘΟΝΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ARDUINO .....	56
3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	57
3.4 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΑΤΜΕGA328 .....	58
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>63</b>
<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....</b>	<b>63</b>
4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ .....	63
4.2 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	67
4.2.1 Η ΣΥΣΚΕΥΗ STRAIN INDICATOR AND RECORDER P3.....	67
4.2.2 Η ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΣΚΕΥΗ STRAIN INDICATOR AND RECORDER P3.....	69
4.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗΣ.....	73
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	79
4.3.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
4.3.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	80
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>82</b>
ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ .....	82
Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΟΥ ΦΟΡΤΩΘΗΚΕ ΣΤΟΝ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ .....	86
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>89</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η μέτρηση αποτελεί το θεμέλιο λίθο της επιστήμης και αναπόσπαστο εργαλείο για την ανάπτυξη νέων τεχνολογικών μεθόδων και μηχανημάτων. Η ανάγκη για την ακριβή μέτρηση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο διαφόρων μεγεθών έχει οδηγήσει στην σχεδίαση πληθώρας ειδών αισθητήρων και διατάξεων μέτρησης. Επιπλέον οι παραπάνω ανάγκες οδήγησαν στην ανάπτυξη ακριβέστερων και πληρέστερων θεωριών και μεθόδων μέτρησης, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην εξέλιξη της τεχνολογίας και στην ανάπτυξη της βιομηχανίας.

Αρχικά, οι άνθρωποι χρησιμοποίησαν διάφορα συστήματα μέτρησης, προκειμένου να μετρήσουν αποστάσεις, ποσότητες όπως η μάζα και ο όγκος, για σκοπούς εμπορικούς και για καθαρά πρακτικούς λόγους σχετικούς με την καθημερινότητά τους. Τότε, ο τρόπος μέτρησης ίδιων μεγεθών διέφερε σε πολλά μέρη του πλανήτη και συχνά δημιουργούνταν σύγχυση μεταξύ επιστημόνων, μηχανικών και γενικότερα. Έτσι, το 1960 συγκροτήθηκε η Γενική Διάσκεψη Μέτρων και Σταθμών, όπου υιοθετήθηκε με το όνομα System International Unites[SI] το διεθνές σύστημα μονάδων μέτρησης. Τα συστήματα των μονάδων μέτρησης αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στη θεωρία των μετρήσεων και για το λόγο αυτό αναλύονται περεταίρω στην παράγραφο 1.2.

Ένας κλασικός ορισμός της μέτρησης, ο οποίος είναι κοινός για όλες τις επιστήμες, είναι ο προσδιορισμός ή η εκτίμηση του λόγου δύο ποσοτήτων. Ποσότητα και μέτρηση ορίζονται αμοιβαία. Ποσοτικές ιδιότητες είναι εκείνες που μπορούν να μετρηθούν, τουλάχιστον κατ' αρχήν. Η κλασική έννοια της ποσότητας μπορεί να αναχθεί στους John Wallis και Isaac Newton. Ενώ στην αναπαραστατική θεωρία ως μέτρηση ορίζεται η συσχέτιση αριθμών με οντότητες που δεν είναι αριθμοί. Η πιο εξελιγμένη τεχνικά μορφή της αναπαραστατικής θεωρίας είναι επίσης γνωστή σαν προσθετική συνδυασμένη μέτρηση. Σε αυτή την μορφή, οι αριθμοί ανατίθενται με βάση τους συσχετισμούς ή τις ομοιότητες μεταξύ της δομής των αριθμητικών συστημάτων και της δομής των ποσοτικών συστημάτων. Μία ιδιότητα είναι ποσοτικοποιήσιμη, εφόσον τέτοιου είδους δομικές ομοιότητες μπορούν να εγκαθιδρυθούν. Σε ασθενέστερες μορφές της αναπαραστατικής θεωρίας, όπως αυτές που παρουσιάζονται στο έργο του Stanley Smith Stevens, οι αριθμοί μπορούν να ανατίθενται μόνο βάση ενός κανόνα. Η μέτρηση συχνά παρερμηνεύεται ως η απλή ανάθεση ενός αριθμού, όμως είναι δυνατό να ανατεθεί μία τιμή η οποία να μην καλύπτει τα κριτήρια της προσθετικής συνδυασμένης μέτρησης ώστε να θεωρηθεί μέτρηση. Είναι δυνατό να ανατεθεί μία τιμή για το ύψος ενός ανθρώπου, μέχρι όμως να αποδειχθεί ο συσχετισμός μεταξύ της μέτρησης του ύψους και των τιμών που προκύπτουν εμπειρικά δεν αποτελεί μέτρηση σύμφωνα με τη θεωρία αυτή.

Μια επιπλέον προσέγγιση είναι η θεωρία της πληροφορίας η οποία αναγνωρίζει όλα τα δεδομένα ως φύσει ανακριβή και στατιστικά. Επομένως, η μέτρηση ορίζεται ως μία σειρά από παρατηρήσεις που μειώνουν την αβεβαιότητα και όπου το αποτέλεσμα εκφράζεται ως ποσότητα. Αυτό βρίσκει εφαρμογή στην πράξη των επιστημόνων μετά από μία μέτρηση να αναφέρουν τόσο το μέσο όρο όσο και τα στατιστικά των μετρήσεων. Χαρακτηριστικό αυτής της θεωρίας είναι ότι υπάρχει

αβεβαιότητα σε κάθε μέτρηση, εκτίμηση και μέτρηση ταυτίζονται, για αυτό το λόγο σε κάθε μέτρηση ανατίθενται ένα σύνολο τιμών αντί μίας ξεχωριστής τιμής.

Οι μετρήσεις σχετίζονται με έλεγχο στην ποσότητα των συναλλαγών, στην ποιότητα των προϊόντων, στην αντοχή υλικών, στις διεργασίες παραγωγής, καθώς και με την ασφάλεια της υγείας, της εργασίας και του περιβάλλοντος. Ένα μεγάλο σχετικά ποσοστό ανθρώπινου δυναμικού απασχολείται για να πραγματοποιούνται διάφορες μετρήσεις και για την χρήση μετρητικών οργάνων και συσκευών. Οι ρυθμοί ανάπτυξης της τεχνολογίας και βιομηχανίας, και οι σημερινές ανάγκες της ανθρωπότητας έχουν δημιουργήσει την ανάπτυξη νέων μεθόδων και οργάνων μέτρησης. Έτσι και ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός οργάνου μέτρησης που θα είναι σε θέση να μετράει και να εμφανίζει σε πραγματικό χρόνο, την παραμόρφωση ενός δοκιμίου.

Συσκευές μέτρησης χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο (δηλαδή την καθοδήγηση) φυσικών, χημικών, μηχανικών και γενικότερα τεχνολογικών διαδικασιών, από το αυτόματο άναμμα ενός λαμπτήρα όταν νυχτώνει μέχρι και τον αυτόματο έλεγχο της σταθερότητας και ασφάλειας ενός ανυψωτικού μηχανήματος. Αυτό είναι και η ουσία της έννοιας του αυτοματισμού, η καθοδήγηση συστημάτων από ηλεκτρονικά συστήματα χωρίς την απαίτηση ανθρώπινης παρέμβασης που πολλές φορές δεν είναι επαρκής. Η πορεία μίας διαδικασίας μπορεί να γίνει γνωστή από κάποιο φυσικό μέγεθος που σχετίζεται με το αποτέλεσμα της. Για παράδειγμα, μπορούμε να παρακολουθήσουμε τη διαδικασία θέρμανσης ενός προϊόντος μετρώντας τη θερμοκρασία του. Οι μετρήσεις των φυσικών μεγεθών γίνονται με τη βοήθεια αισθητήρων ή αλλιώς αισθητηρίων (sensors). Αυτά είναι διατάξεις που διαθέτουν κάποια κατάλληλη ιδιότητα, η οποία μεταβάλλεται ως συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Έτσι η μέτρηση της ιδιότητας του αισθητήρα επιτρέπει τον άμεσο ποσοτικό υπολογισμό της τιμής του φυσικού μεγέθους.

Τέλος, η μελέτη και εφαρμογή στην πράξη των αισθητήρων αποτελεί αντικείμενο της Οργανολογίας (Instrumentation).

## 1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα συστήματα μέτρησης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πλέον όμως σε παγκόσμιο επίπεδο αναγνωρίζεται το Διεθνές Σύστημα Μονάδων. Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων SI υιοθετήθηκε το 1961 κατά την 11η Γενική Διάσκεψη Μέτρων και Σταθμών και αντικατέστησε τα παλαιότερα συστήματα μονάδων της φυσικής, όπως το Μετρικό Σύστημα Μονάδων MKS (Meter Kilogram Second) και το CGS (Centimeter Gram Second).

Το SI χρησιμοποιείται επίσης λόγω του δεκαδικού χαρακτήρα του και σε τεχνικές εφαρμογές σε μεγάλο ποσοστό του κόσμου έναντι παλαιότερων άλλων συστημάτων (όπως τα Αγγλοσαξωνικά συστήματα που βασίζονται σε ιδιαίτερες μονάδες όπως η ίντσα, η λίβρα κλπ)

Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων έχει ως θεμελιώδη μεγέθη τα ακόλουθα επτά με τις αντίστοιχες μονάδες μέτρησής τους. Μήκος (m, μέτρο), μάζα (χιλιόγραμμα, kg), χρόνος (δευτερόλεπτο, s), ηλεκτρικό ρεύμα (A, αμπέρ), θερμοδυναμική θερμοκρασία (K, κέλβιν), ποσό ουσίας ή ποσό ύλης (mol, γραμμομόριο), φωτεινή ένταση (cd, καντήλα). Οι ορισμοί των μονάδων του SI, με τα σύμβολά τους σε παρένθεση, είναι οι εξής:

1. Το μέτρο (m) είναι το μήκος που διανύει το φως στο κενό σε χρονικό διάστημα 1/299 792 458 του δευτερολέπτου.

2. Το χιλιόγραμμα (kg) ισούται με τη μάζα του διεθνούς προτύπου του χιλιόγραμμου. Το διεθνές πρότυπο του χιλιόγραμμου είναι ένα κομμάτι από κράμα ιριδίου-χρυσού που φυλάσσεται στις Σέβρες κοντά στο Παρίσι.

3. Το δευτερόλεπτο (s) είναι η διάρκεια 9 192 631 770 περιόδων της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τη μετάβαση των δυο υπέρλεπτων σταθμών της κατώτατης (θεμελιώδους) στάθμης του ατόμου του καισίου-133.

4. Το αμπέρ (A) είναι εκείνο το σταθερό (ηλεκτρικό) ρεύμα το οποίο, όταν διέρχεται από δυο ευθύγραμμους παράλληλους αγωγούς απείρου μήκους αμελητέας κυκλικής διατομής οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους 1 μέτρο στο κενό, ασκείται δύναμη μεταξύ τους ίση με  $2 \times 10^{-7}$  N/m, δηλαδή νιούτον ανά μέτρο μήκους τους.

5. Το κέλβιν (K) είναι το κλάσμα 1/273,16 της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού.

6. Το μολ ή γραμμομόριο (mol) είναι το ποσό ουσίας (ή ύλης) συστήματος το οποίο περιέχει τόσες στοιχειώδεις οντότητες όσα άτομα υπάρχουν σε 0,012 χιλιόγραμμα άνθρακα-12.

7. Η καντήλα (cd) είναι η φωτεινή ένταση (φωτοβολία) σε δεδομένη κατεύθυνση, πηγής που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία, συχνότητας  $540 \times 10^{12}$  Hz και έχει ένταση ακτινοβολίας σε αυτή την κατεύθυνση ίση με 1/683 W/sr (βατ ανά στερακτίνιο).

Στον πίνακα 1 εμφανίζονται τα θεμελιώδη μεγέθη του συστήματος SI. Δίνεται το είδος του μεγέθους το οποίο εκφράζει η κάθε μονάδα, το αγγλικό και το ελληνικό όνομά της, το (διεθνές) σύμβολό της και το σύμβολο της διάστασής της:

Μέγεθος	Όνομα	Σύμβολο	Διάσταση
μήκος	meter μέτρο	m	L
μάζα	kilogram χιλιόγραμμα	kg	M
χρόνος	second δευτερόλεπτο	s	T
(ηλεκτρικό) ρεύμα	ampere αμπέρ	A	I
θερμοδυναμική θερμοκρασία	kelvin κέλβιν	K	Θ
ποσό ουσίας (ή ύλης)	mole μολ (γραμμομόριο)	mol	N
φωτεινή ένταση	candela καντήλα	cd	J

Πίνακας 1 : Θεμελιώδη μεγέθη Διεθνούς Συστήματος Μονάδων (SI)

Για την καλύτερη χρήση των διαφόρων μεγεθών γίνεται χρήση προθεμάτων ώστε να αποφεύγεται η άσκοπη χρήση υπερβολικά μεγάλων ή μικρών αριθμών.

### 1.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σύστημα μέτρησης καλείται η διάταξη σύμφωνα με την οποία μία ποσοτική έξοδος αντιστοιχεί στη μετρούμενη μεταβλητή, μέσω συλλογής των προς μέτρηση μεγεθών και κανόνων που διέπουν τη μεταξύ τους σχέση.

Ιδανικά η τιμή που δίδεται στη μεταβλητή είναι η πραγματική της τιμή, στην πράξη όμως εμφανίζονται αποκλίσεις ανάμεσα στις μετρούμενες και πραγματικές τιμές των μεγεθών. Οι αποκλίσεις αυτές ονομάζονται σφάλματα, επομένως σε κάθε



μέτρηση λαμβάνεται η Τιμή  $\pm$  Σφάλμα, όπου τα σφάλματα διαχωρίζονται σε απόλυτα και σχετικά.

Ένα επιπλέον βασικό χαρακτηριστικό που λαμβάνονται υπόψη στις μετρήσεις είναι η ακρίβεια (Accuracy) των μετρήσεων. Έτσι, ακρίβεια είναι η απόκλιση της τιμής που δίνει το όργανο μετρήσεων από την πραγματική τιμή του προς μέτρηση μεγέθους, η οποία δεν είναι γνωστή, μόνο κατ' εκτίμηση υπολογίζεται, και ορίζεται μέσω κάποιου προτύπου. Σχετίζεται με το μέγιστο εύρος σφαλμάτων στις ενδείξεις του οργάνου. Για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα είναι απαραίτητο η κλίμακα του οργάνου να είναι κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο εύρος του μεγέθους προς μέτρηση.

Η αβεβαιότητα (Uncertainty) επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη σε μια μέτρηση. Η αβεβαιότητα αποτελεί ένα μέτρο της αξιοπιστίας των μετρήσεων. Εκφράζει κατά κάποιο τρόπο την αμφιβολία του κατά πόσον το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι σωστό. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως σφάλμα, χωρίς να ταυτίζεται όμως με την κυριολεκτική έννοια του σφάλματος.

Τέλος, στις μετρήσεις υπάρχουν και τα σφάλματα μέτρησης, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε Τυχαία σφάλματα και Συστηματικά σφάλματα. Τα τυχαία σφάλματα οφείλονται σε τυχαία μεταβολή παραγόντων και σχετίζονται με την ακρίβεια της μέτρησης. Μπορεί να προκληθούν λόγω της ακρίβειας του οργάνου, λόγω λαθών που σχετίζονται με τον παρατηρητή ή λόγω εξωτερικών συνθηκών. Είναι αναπόφευκτα και υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους. Ενώ τα συστηματικά σφάλματα παραμένουν σταθερά κατά τη λήψη επαναλαμβανόμενων μετρήσεων και σχετίζονται με την αξιοπιστία των μετρήσεων. Τείνουν να μετατοπίζουν τη μέση τιμή των μετρήσεων προς μία συγκεκριμένη διεύθυνση με συστηματικό τρόπο. Ο μόνος τρόπος να διορθωθούν είναι η σύγκριση του χρησιμοποιούμενου οργάνου με το αντίστοιχο πρότυπο. Σε πειράματα μεγάλης έκτασης εξαλείφονται κατά το δυνατόν με τη λήψη επαναλαμβανόμενων μετρήσεων με χρήση διαφορετικών μεθόδων.

## **1.3 Ο ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

### **1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Όργανα μέτρησης όπως ο χάρακας, η ζυγαριά, το χρονόμετρο, εμφανίζονται στην καθημερινότητά μας για τη μέτρηση απλών φυσικών μεγεθών ενώ η χρήση τους είναι απαραίτητη μέσα σε εργαστήρια για εκπαιδευτικές και ερευνητικές δραστηριότητες. Η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας και η απαίτηση για ακριβείς μετρήσεις έχει οδηγήσει αναπόφευκτα στην δομική πολυπλοκότητα των οργάνων μέτρησης έτσι ώστε να γίνεται λόγος πλέον για συστήματα μέτρησης τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο οργάνων και συσκευών κατάλληλα διασυνδεδεμένων μεταξύ τους, ώστε να μπορούν να μετρήσουν ένα ή περισσότερα φυσικά μεγέθη.

Δε θα πρέπει ωστόσο να αντιμετωπίζουμε τα όργανα μέτρησης σαν ένα μαύρο κουτί που μας παρέχει μία πληροφορία για το μέγεθος που θέλουμε να μετρήσουμε. Προκειμένου οι μετρήσεις που πραγματοποιούμε να είναι σωστές ή να μπορούμε να κρίνουμε για την ορθότητά τους, θα πρέπει να έχουμε γνώση του τρόπου με τον οποίο τα όργανα είναι σχεδιασμένα και πως αυτά λειτουργούν για να παρέχουν ορθές ενδείξεις. Έτσι, οι παραπάνω λόγοι μας οδήγησαν στην σχεδίαση και υλοποίηση ενός οργάνου μέτρησης που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

### 1.3.2 Ο ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας ηλεκτρονικής μετρητικής διάταξης της παραμόρφωσης. Η μετρητική διάταξη θα βασίζεται στην αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino Uno και θα αξιοποιεί τις δυνατότητες του μετατροπέα HX711, της γέφυρας Wheatstone και των ηλεκτρόεπιμηκυνσιομέτρων (strain gages) με σκοπό την μέτρηση της παραμόρφωσης. Το σύστημα θα είναι σε θέση να μετατρέπει την μεταβολή της αντίστασης των strain gages σε μεταβολή τάσης κάνοντας χρήση της γέφυρας Wheatstone. Στην συνέχεια, ο μετατροπέας HX711 θα μετράει αυτή την μεταβολή της τάσης και τα δεδομένα και θα τα μεταφέρει στο Arduino. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά θα υπολογίζεται η παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια όπου είναι τοποθετημένο το strain gage. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών εμφανίζονται σε μια LCD (Liquid Crystal Display) οθόνη χαρακτήρων.

Το όργανο μέτρησης σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε κατά την ενεργοποίησή του να πραγματοποιεί αυτόματη αρχικοποίηση και να κάνει αυτόματη διαγραφή σφάλματος μόνιμης κατάστασης. Εάν μετά από κάποιες μετρήσεις προκύψει νέο σφάλμα μόνιμης κατάστασης, ο χρήστης είναι σε θέση να το μηδενίσει πατώντας το διακόπτη που είναι τοποθετημένος επάνω στο όργανο μέτρησης.

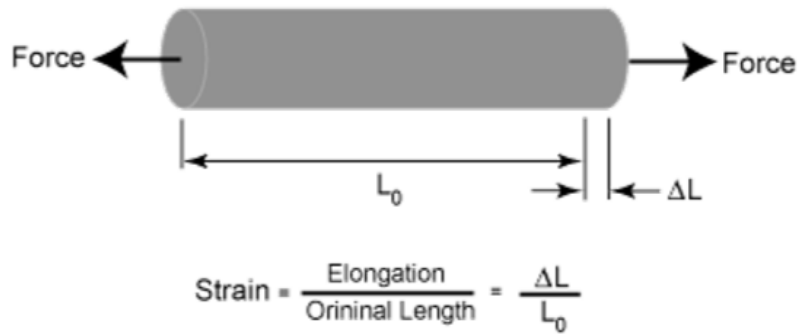
Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η μέτρηση της παραμόρφωσης σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να παρατηρεί την τιμή της παραμόρφωσης του δοκιμίου σε πραγματικό χρόνο. Κάποια επιπλέον ζητήματα τα οποία οδήγησαν στην μελέτη και κατασκευή μιας τέτοιας μετρητικής διάταξης είναι το σχετικά χαμηλό κόστος με αντίστοιχα όργανα, το μικρό μέγεθος, η ευκολία στη χρήση και η δυνατότητα μεταφοράς του στο σημείο που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε την μέτρηση.

Τέλος, τα βασικά μέρη του συγκεκριμένου επιμηκυνσιόμετρου, τα οποία θα αναλυθούν και στα επόμενα κεφάλαια είναι ο μικροελεγκτής AT mega328 ο οποίος βρίσκεται στην πλατφόρμα Arduino Uno, η LCD οθόνη QC2004A τεχνολογίας υγρών κρυστάλλων, ο ADC (Analog To Digital Converter) μετατροπέας HX711, μια γέφυρα Wheatstone καθώς και το τροφοδοτικό του συστήματος

## 1.4 ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 1.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η παραμόρφωση ορίζεται ως η μεταβολή των διαστάσεων ενός σώματος εξαιτίας της εφαρμογής φορτίων. Η παραμόρφωση ποσοτικοποιείται μέσω της ανοιγμένης μήκυνσης ( $\epsilon$ ) η οποία ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του μήκους ( $\Delta L$ ) προς το αρχικό μήκος ( $L_0$ ).



Εικόνα 1.1 : Εφαρμογή ίδιας δύναμης με αντίθετη φορά σε ένα δοκίμιο

Η διάσταση  $L$  είναι αυτή κατά τη διεύθυνση της οποίας εφαρμόζεται η δύναμη. Η παραμόρφωση μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Είναι αδιάστατο μέγεθος, και δίνεται έχοντας ως μονάδες τον λόγο δύο μηκών (πχ.  $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ). Στην πράξη, η μετρούμενη παραμόρφωση είναι πολύ μικρή, για το λόγο αυτό εκφράζεται συνήθως ως μικρό παραμόρφωση.

Υπάρχουν δυο ειδών παραμορφώσεων, το πρώτο ονομάζεται «Ελαστική παραμόρφωση» και αντιπροσωπεύει την παραμόρφωση στην κατηγορία υλικών τα οποία όταν βρεθούν υπό φόρτιση παρουσιάζουν ελαστικές παραμορφώσεις και κατά την αποφόρτισή τους επιστρέφουν στο αρχικό σχήμα και μέγεθος.

Η δεύτερη ονομάζεται «Πλαστική Παραμόρφωση» και παρατηρείται στην κατηγορία υλικών, τα οποία όταν βρεθούν υπό φόρτιση παρουσιάζουν παραμορφώσεις και κατά την αποφόρτιση τους δεν επιστρέφουν στο αρχικό σχήμα και μέγεθος.

#### 1.4.2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Το πείραμα του εφελκυσμού αποτελεί ίσως την σπουδαιότερη πειραματική διαδικασία μέτρησης της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών σε αξονικά φορτία. Η αρχή λειτουργίας των πειραμάτων εφελκυσμού στηρίζεται στην επιβολή δύο δυνάμεων, ίδιου μέτρου, ίδιας διεύθυνσης και αντίθετης φοράς, κατά τον κεντροβαρικό διαμήκη άξονα ενός υλικού, με σημεία εφαρμογής τα άκρα του.

Οι επιβαλλόμενες αξονικές δυνάμεις, τείνουν να επιμηκύνουν το δοκίμιο με αποτέλεσμα, εάν οι επιβαλλόμενες δυνάμεις ξεπεράσουν μια κρίσιμη τιμή, η παραμόρφωση του δοκιμίου θα είναι μόνιμη (πλαστική παραμόρφωση).

Ο Hooke, μελέτησε το πείραμα με το πακτωμένο δοκίμιο αλουμινίου, υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^{\circ}\text{C}$ , που του επιβάλλεται αξονικό φορτίο  $P$ , στο ελεύθερο άκρο του, με το αρχικό μήκος του δοκιμίου να είναι  $L_0$  και η διατομή του τετραγωνική  $A \text{ m}^2$ . Υπό την επίδραση της ανωτέρω δύναμης, παρατήρησε παραμόρφωση του δοκιμίου κατά  $\Delta L$ . Στην συνέχεια διαπίστωσε ότι ο παράγοντας  $P$  παραμένει σταθερός, όταν μεταβληθεί το επιβαλλόμενο φορτίο. Βάσει της ανωτέρω παρατήρησης, ο Hooke διατύπωσε τον γενικευμένο νόμο της ελαστικότητας βάσει του οποίου:

$$\frac{E \times A \times \Delta L}{L_0} = P$$

Όπου:

E: Μέτρο Ελαστικότητας ή μέτρο Young N/m<sup>2</sup>

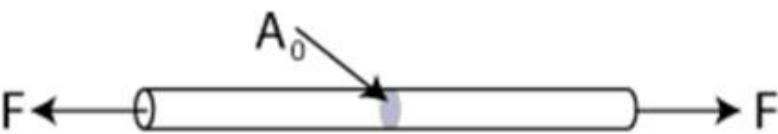
A: Διατομή υλικού m<sup>2</sup>

ΔL: Διαμήκης παραμόρφωση δοκιμίου m

L<sub>0</sub>: Αρχικό μήκος δοκιμίου m

P: Επιβαλλόμενη, κάθετη στη διατομή, δύναμη N

Στην επιστήμη της Αντοχής των Υλικών, η έννοια της δύναμης και της επιμήκυνσης που προκαλεί σε ένα στερεό υλικό δεν είναι μονοσήμαντες. Προκειμένου να ορισθούν τα πραγματικά μεγέθη της καταπόνησης, ορίζεται το μέγεθος της μηχανικής τάσης ως το πηλίκο της επιβαλλόμενης δύναμης σε ένα δοκίμιο προς την διατομή αυτού. Εφόσον, η επιβαλλόμενη δύναμη F σε ένα δοκίμιο εφαρμόζεται κάθετα στην διατομή του δοκιμίου (A<sub>0</sub>), τότε η εν λόγω μηχανική τάση ονομάζεται ορθή και συμβολίζεται με το σύμβολο «σ» (stress).


$$\text{Stress, } \sigma = \frac{\text{Force}}{\text{Cross-Sectional Area}} = \frac{F}{A_0}$$

Εικόνα 1.2 : Εφαρμογή ίδιας δύναμης με αντίθετη φορά σε ένα δοκίμιο με διατομή A<sub>0</sub>

Σε ένα δοκίμιο αρχικού μήκους L<sub>0</sub>, το οποίο υπό την επίδραση δύναμης F εμφανίζει επιμήκυνση ΔL, ορίζεται το μέγεθος ε (Εικόνα 1.2) το οποίο καλείται ανοιγμένη παραμόρφωση (strain), ή αλλιώς παραμόρφωση.

Βάσει των δύο ορισμών των μεγεθών ορθής τάσεως και ανοιγμένης παραμορφώσεως, ο γενικευμένος νόμος του Hooke, εμφανίζεται με τη μορφή της παρακάτω σχέσεως, η οποία και αποτελεί το Νόμο του Hooke για τις ορθές μηχανικές τάσεις.

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Όπου:

σ: ορθή μηχανική τάση N/m<sup>2</sup>

E: Μέτρο Ελαστικότητας ή μέτρο Young N/m<sup>2</sup>

ε: Ανοιγμένη παραμόρφωση

Η επιμήκυνση του δοκιμίου, μετριέται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου, το οποίο καλείται και ωφέλιμο μήκος (gauge length) και είναι πάντοτε μικρότερο από το συνολικό τμήμα του δοκιμίου, δεδομένου ότι τα άκρα του δοκιμίου βρίσκονται συγκρατημένα εντός των σιαγόνων – αρπαγών του οργάνου (Εικόνα 1.3).

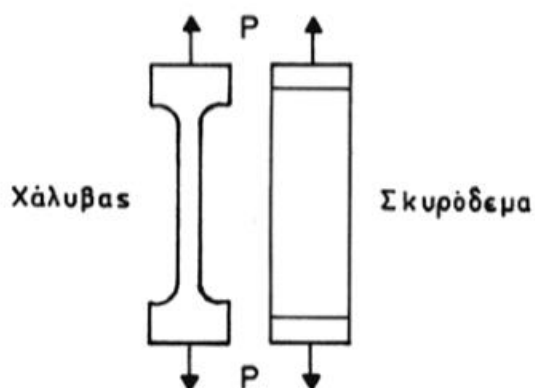


Εικόνα 1.3 : Μηχανές εφελκυσμού

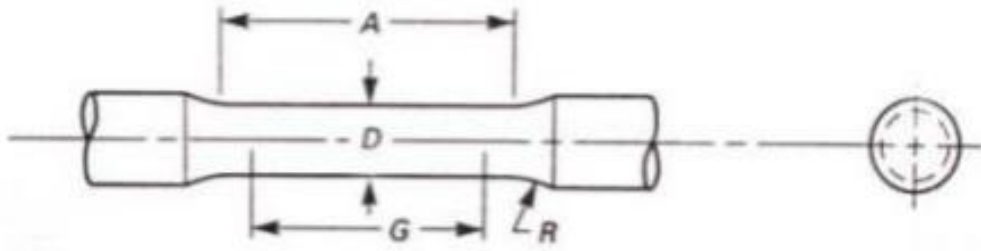
Οι μηχανές εφελκυσμού συνήθως πραγματοποιούν τις δοκιμές σε κατακόρυφη θέση, κατά την οποία το δοκίμιο τοποθετείται εντός των αρπαγών, όπου η κάτω αρπάγη παραμένει ακίνητη, ενώ η άνω αρπάγη κινείται κατακόρυφα προς τα πάνω, ανάλογα με την επιλεγμένο ρυθμό κίνησης. Ο ρυθμός ανόδου της άνω αρπάγης και η ταυτόχρονη επιβολή δύναμης συγκράτησης του δοκιμίου εντός αυτής μπορεί να είναι:

- A) ρυθμός παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}$  (strain rate) sec<sup>-1</sup>
- b) Ρυθμός δύναμης N/sec
- c) Ταχύτητα παραμόρφωσης mm/sec

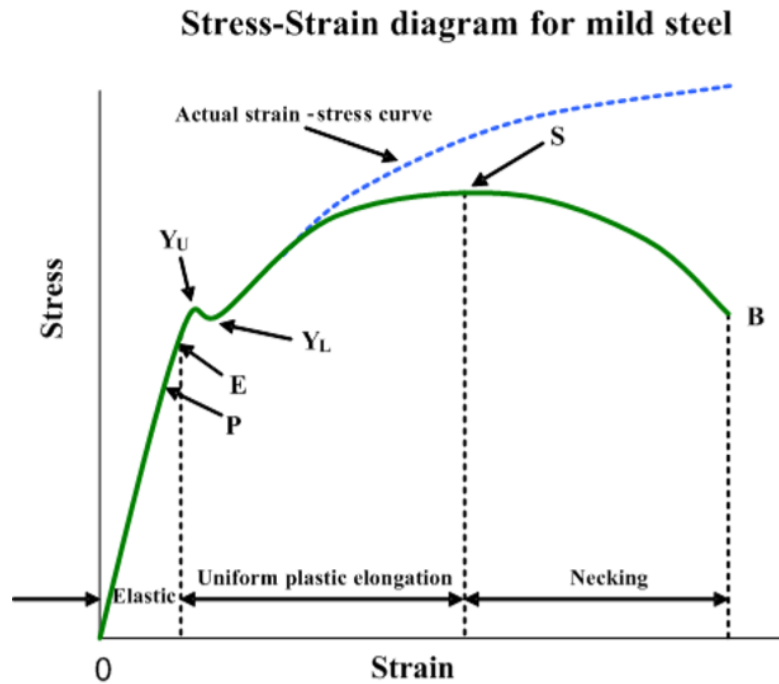
Τα δοκίμια στα οποία εφαρμόζεται κάποια δύναμη και μετρείται η παραμόρφωση τους μπορεί να αποτελούνται από διάφορα υλικά και σχήματα. Δυο τέτοιες διαφορετικές περιπτώσεις παρουσιάζονται στις εικόνες 1.4 και 1.5.



Εικόνα 1.4 : Δοκίμια μονοαξονικού εφελκυσμού χάλυβα και σκυροδέματος παραλληλεπίπεδης διατομής.



Εικόνα 1.5 : Δοκίμια μονοαξονικού εφελκυσμού κυκλικής διατομής



Εικόνα 1.6 : Διάγραμμα μονοαξονικού εφελκυσμού ελαφρά κραματωμένου χάλυβα.

Στο διάγραμμα του σχήματος 6 απεικονίζεται το διάγραμμα τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης ενός ελαφρά κραματωμένου χάλυβα, υπό συνθήκες περιβάλλοντος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα, το γραμμικό μέρος της καμπύλης αποτελεί την ελαστική περιοχή του υλικού. Σε όλο το εύρος της περιοχής αυτής, η άρση της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης επιτρέπει στο δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό του μήκος. Η ενέργεια παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή μπορεί να υπολογιστεί από το περικλειόμενο εμβαδόν του νοητού ορθογωνίου τριγώνου και αποτελεί την προσφερόμενη ενέργεια, μέσω του παραγόμενου έργου της δύναμης, η οποία ονομάζεται και ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης. Το παραβολικό τμήμα του διαγράμματος αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή του υλικού, όπου οι παραμορφώσεις είναι μόνιμες (μη αντιστρεπτές).

## 1.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

### 1.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μετρήσεις των φυσικών μεγεθών γίνονται με τη βοήθεια αισθητήρων ή αλλιώς αισθητηρίων (sensors). Αυτά είναι διατάξεις που διαθέτουν κάποια κατάλληλη ιδιότητα, η οποία μεταβάλλεται ως συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Έτσι, η μέτρηση της ιδιότητας του αισθητήρα επιτρέπει τον άμεσο ποσοτικό υπολογισμό της τιμής του φυσικού μεγέθους. Η μελέτη και εφαρμογή στην πράξη των αισθητήρων αποτελεί αντικείμενο της Οργανολογίας (Instrumentation).

Οι αισθητήρες συνήθως χαρακτηρίζονται από μια διάταξη που μετρά ένα φυσικό μέγεθος και το μετατρέπει άμεσα ή έμμεσα σε ηλεκτρικό σήμα, τάση ή ρεύμα, με ή χωρίς τη χρήση κατάλληλου μετατροπέα, που συνήθως δύναται για περαιτέρω επεξεργασία. Κλασικά παραδείγματα φυσικών μεγεθών που μετρούνται με χρήση αισθητήρων είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η παραμόρφωση, η υγρασία, η στάθμη υγρών, η θέση και η μετατόπιση ενός αντικειμένου, η ταχύτητα και η επιτάχυνση ενός κινούμενου αντικειμένου, η τάση, το ρεύμα ή η ακτινοβολία. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι αισθητήρες που έχουν χρήση σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου και είναι δυνατό να συνδεθούν σε κάποιου είδους ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης.

Συχνά οι αισθητήρες δεν δίνουν στην έξοδό τους κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα. Τότε απαιτείται η χρήση ενός επιπρόσθετου ηλεκτρονικού κυκλώματος, το οποίο να λαμβάνει την έξοδο του αισθητήρα και να τη μετατρέπει σε κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των επόμενων βαθμίδων. Πιο συγκεκριμένα, για την ανάπτυξη της μετρητικής διάταξης στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται το κύκλωμα ΗΧ711. Το κύκλωμα αυτό ονομάζεται κύκλωμα ρύθμισης σήματος (signal conditioning circuit), κύκλωμα ελέγχου (control circuit) ή εξωτερική μονάδα (outer ή external module). Η λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος ρύθμισης σήματος είναι να προσαρμόσει την πολύ μικρή τάση που προκύπτει από τις μεταβολές της αντίστασης του αισθητήρα μέτρησης, με σκοπό να μπορεί να μετρηθεί από τον μικροελεγκτή.

Οι αισθητήρες που απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία για να λειτουργήσουν ονομάζονται ενεργοί. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας γραμμικής μετατόπισης πρέπει να τροφοδοτείται από κατάλληλη εναλλασσόμενη τάση. Οι αισθητήρες που δημιουργούν μόνοι τους μια τάση και δε χρειάζονται εξωτερική τροφοδοσία ονομάζονται παθητικοί. Τέτοιοι είναι για παράδειγμα οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι, που όταν πιεστούν αναπτύσσουν στα άκρα τους ηλεκτρική τάση. Έτσι, και το ηλεκτροεπιμηκυνσιοόμετρο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της παραμόρφωσης ανήκει στην κατηγορία των ενεργών αισθητήρων, αφού το μέγεθος που μεταβάλλει είναι η αντίστασή της.

Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων συγκροτούν τις προδιαγραφές τους (specifications) και είναι πολλά. Παρότι οι ποικίλοι αισθητήρες που υπάρχουν διαθέσιμοι στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας, έχουν κοινά τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Για αυτό το λόγο, στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούν μερικά από τα βασικά τους χαρακτηριστικά και θα πραγματοποιηθεί μια συνοπτική περιγραφή τους.

## 1.5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

### ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ:

Ο κάθε αισθητήρας διαθέτει ένα χαρακτηριστικό ή ιδιότητα, του οποίου η τιμή μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η φυσική ποσότητα που μετρά ο αισθητήρας. Είναι επιθυμητό οι μεταβολές της φυσικής ποσότητας να προκαλούν αυστηρά ανάλογες μεταβολές της ιδιότητας του αισθητήρα. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται γραμμικότητα (linearity) και είναι ιδιαίτερης σημασίας. Εάν ο αισθητήρας δεν είναι γραμμικός, τότε η αντιστοίχιση των τιμών του μετρούμενου μεγέθους με τις τιμές εξόδου του αισθητήρα γίνεται με βάση την καμπύλη «βαθμονόμησης». Η μη- γραμμικότητα είναι συχνά εγγενής ιδιότητα του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αισθητήρας και εν γένει είναι αδύνατο να μηδενιστεί. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πολλές φορές η γραμμικότητα κάποιου αισθητήρα μπορεί να διαφοροποιηθεί λόγω εξωτερικών συνθηκών. Για παράδειγμα, ο αισθητήρας επιμήκυνσης που θα χρησιμοποιηθεί στην συγκεκριμένη εργασία είναι αρκετά ευαίσθητος στις αλλαγές θερμοκρασίας, οπότε θα πρέπει να φροντίσουμε οι μετρήσεις που θα γίνουν να πραγματοποιηθούν σε ίδια θερμοκρασία, διαφορετικά η γραμμικότητα του αισθητήρα θα διαφοροποιηθεί και οι μετρήσεις θα έχουν μεγάλο σφάλμα.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στους αισθητήρες είναι γενικότερα γνωστή και συχνά υπάρχει τρόπος αντιστάθμισής της (compensation) με κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα ρύθμισης σήματος. Για την περιγραφή της επίδρασης αυτής ορίζονται διάφορα μεγέθη, όπως η ολίσθηση του σημείου μηδενός λόγω θερμοκρασίας (temperature zero shift), η ευαισθησία στη θερμοκρασία (temperature sensitivity) και η μεταβολή της ευαισθησίας λόγω θερμοκρασίας (thermal sensitivity shift).

### ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ:

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

### ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ:

Η διακριτική ικανότητα (resolution) εκφράζει τη μικρότερη μεταβολή του φυσικού μεγέθους που μπορεί να ανιχνεύσει ο αισθητήρας και να μεταβάλλει την έξοδό του ανάλογα. Δηλαδή, είναι η μικρότερη ποσότητα που γίνεται αντιληπτή και συνήθως εξαρτάται από τον αισθητήρα και αφορά το όργανο μέτρησης.

### ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΟΧΗ:

Η ακρίβεια (accuracy) ισούται με το σφάλμα που εγγενώς περιέχει η τιμή που αποδίδει ο αισθητήρας στην έξοδο, δηλώνει δηλαδή την αβεβαιότητα που υπάρχει στην τιμή της εξόδου. Μπορεί να εκφράζεται σε απόλυτες τιμές (για παράδειγμα  $\pm 0.005 \text{ mV}$ ) ή επί τοις εκατό (για παράδειγμα  $\pm 1\%$ ). Στην πρώτη περίπτωση η ανακρίβεια είναι σταθερή και ανεξάρτητη της τιμής του μετρούμενου φυσικού μεγέθους, ενώ στην άλλη περίπτωση η ανακρίβεια είναι ανάλογη της παραπάνω τιμής.



Η ανοχή ενός αισθητήρα συνδέεται στενά με την ακρίβεια και ορίζει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα μιας τιμής κάποιας μέτρησης. Η ανοχή δεν είναι στατικό χαρακτηριστικό ενός αισθητήρα αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη διότι πολλές φορές η ακρίβεια και η πιστότητα δίνονται και ως ανοχή.

#### ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ:

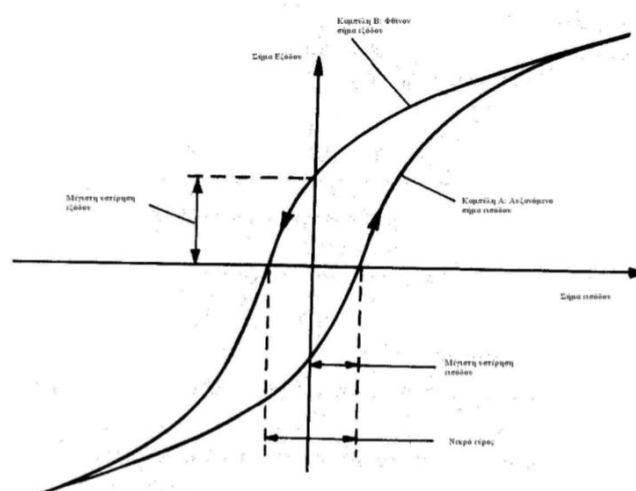
Το εύρος τιμών εισόδου (full-scale input, FSI) ορίζει σε ποια πλαίσια του μετρούμενου φυσικού μεγέθους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλοί αισθητήρες θερμοκρασίας (θερμοζεύγη, θερμίστορ, θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις) αλλά δεν ενδείκνυνται όλοι για τη μέτρηση θερμοκρασιών της τάξης των 1000 °C. Η γνώση του εύρους τιμών εισόδου επιτρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή αισθητήρα που ταιριάζει στις ανάγκες της εφαρμογής.

#### ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΕΞΟΔΟΥ:

Το εύρος τιμών εξόδου (full-scale output, FSO) ορίζει τις τιμές που μπορεί να λαμβάνει η τάση ή το ρεύμα εξόδου ενός αισθητήρα. Οι αισθητήρες διατίθενται εν γένει σε παραλλαγές με διάφορα εύρη τιμών εξόδου, ώστε να μπορεί ο χρήστης να επιλέξει τη μορφή που ταιριάζει περισσότερο στα κυκλώματα που θα παραλάβουν το σήμα εξόδου (για παράδειγμα σε ένα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό - A/D). Το εύρος τιμών εξόδου καθορίζεται συχνά από ένα κύκλωμα ρύθμισης σήματος, το οποίο συνδέεται μόνιμα με τον αισθητήρα.

#### ΥΣΤΕΡΗΣΗ:

Τα χαρακτηριστικά του σήματος εξόδου ενός αισθητήρα που παρουσιάζει υστέρηση παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Αν η τιμή του σήματος εισόδου μεταβάλλεται σταθερά, ξεκινώντας από αρνητικές τιμές το σήμα εξόδου περιγράφεται από την καμπύλη Α. Αν κατόπιν το σήμα εξόδου μειώνεται σταδιακά, τότε το σήμα εξόδου περιγράφεται από την καμπύλη Β. Η μη ταύτιση των καμπυλών Α και Β είναι γνωστό ως υστέρηση (εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7 : Χαρακτηριστικά αισθητήρα με βρόχο υστέρησης

### 1.5.3 ΚΑΠΟΙΑ ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται μερικά συνηθισμένα είδη αισθητήρων, ανάλογα με το φυσικό μέγεθος που μετρούν. Περιγράφονται αισθητήρες θερμοκρασίας, φωτεινής στάθμης, πίεσης και βάρους, στάθμης, όγκου, μετατόπισης και κίνησης.

#### ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Τα διάφορα θερμόμετρα στηρίζουν την λειτουργία τους στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των επιλεγμένων υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα. Οι ιδιότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη μέτρηση της θερμοκρασίας είναι εν γένει οι ακόλουθες:

1. Η γραμμική διαστολή ενός υγρού
2. Η γραμμική διαστολή ενός μετάλλου
3. Η ηλεκτρική αντίσταση ενός μετάλλου
4. Το φαινόμενο του θερμοηλεκτρισμού
5. Η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα θερμό σώμα



Εικόνα 1.8 : Αισθητήρες θερμοκρασίας

Την ιδιότητα της γραμμικής διαστολής αξιοποιούν τα γνωστά θερμόμετρα υδραργύρου, τα μεταλλικά θερμόμετρα κ.ά. Είναι όμως δύσκολο αυτή να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο να μπορεί να ψηφιοποιηθεί κατάλληλα. Η ιδιότητα της ηλεκτρικής αντίστασης είναι πιο εύχρηστη, καθώς είναι εύκολο να δημιουργηθεί μία ηλεκτρική τάση, η οποία να μεταβάλλεται ανάλογα με την ηλεκτρική αντίσταση. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο οδηγεί επίσης στην εμφάνιση μίας ηλεκτρικής τάσης.

Τα πιο δημοφιλή είδη αισθητήρων θερμοκρασίας είναι:

1. Το θερμοζεύγος (thermocouples)
2. Τα θερμίστορ
3. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα LM35
4. Οι θερμo - ηλεκτρικές αντιστάσεις

## ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

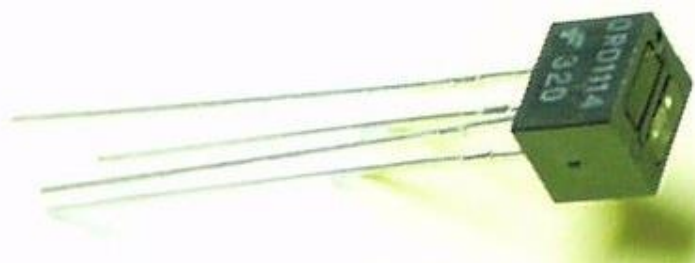
### 1. Φωτοαντιστάσεις (LDRs) :



Εικόνα 1.9 : Φωτοαντίσταση

Η αρχή λειτουργίας των Φωτοαντιστάσεων βασίζεται στα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας (conduction electrons). Όταν προσπίπτει φως σε ένα φωτοαγώγιμο υλικό, αυξάνεται ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων του. Αυτό γίνεται επειδή τα προσπίπτοντα φωτόνια διεγείρουν ηλεκτρόνια αυτά που είναι δεσμευμένα και τα καθιστούν ελεύθερα. Έτσι η αντίσταση του φωτοαγώγιμου υλικού μειώνεται. Η σχέση μεταξύ της προσπίπτουσας φωτεινής ισχύος  $P$  και της αντίστασης  $R$  δεν είναι γραμμική αλλά λογαριθμική.

### 2. Φωτοдиодοι και φωτοτρανζίστορ:



Εικόνα 1.10 : φωτοτρανζίστορ

Οι φωτοдиодοι και τα φωτοτρανζίστορ αποτελούν τα βασικά είδη φωτοβολταϊκών ανιχνευτών. Αυτά δημιουργούν ρεύμα, που ονομάζεται φωτόρευμα (photocurrent), ανάλογο της προσπίπτουσας φωτεινής έντασης. Τα φωτοτρανζίστορ είναι στην ουσία φωτοдиодοι που επιπρόσθετα εκτελούν ενίσχυση του δημιουργούμενου ρεύματος και έτσι η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια με αυτήν των φωτοдиодων.

## ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η πίεση αποτελεί μέτρο της δύναμης ή μηχανικής τάσης που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια κάποιου σώματος από ένα εξωτερικό αίτιο. Το βάρος αποτελεί τη -σταθερή- δύναμη προς τα κάτω που ασκεί η Γη σε ένα σώμα και αποτελεί μία ειδική περίπτωση δύναμης. Έτσι, εάν τοποθετηθεί ένα σώμα σε επαφή με έναν αισθητήρα πίεσης, ο αισθητήρας μπορεί να μετρά τη δύναμη που δέχεται το σώμα

από ένα εξωτερικό αίτιο ή από τη Γη, ανάλογα με τη σχετική θέση σώματος και αισθητήρα (κατακόρυφη, οριζόντια κ.ά.). Με άλλα λόγια, η μέτρηση του βάρους ανάγεται στη μέτρηση πίεσης και γι' αυτό οι μετρητές πίεσης χρησιμοποιούνται και για τη μέτρηση βάρους.



Εικόνα 1.11: Αισθητήρες πίεσης

Τα κυριότερα είδη αισθητήρων πίεσης είναι τα ακόλουθα:

- α. Μανόμετρα υγρού και αερίου
- β. Χωρητικοί αισθητήρες
- γ. Επαγωγικοί αισθητήρες
- δ. Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και αισθητήρες πιεζοαντίστασης
- ε. Μετρητές μηχανικής τάσης και κυψελίδες φορτίου

#### ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΚΑΙ ΟΓΚΟΥ

Οι αισθητήρες στάθμης και όγκου χρησιμοποιούνται στην περίπτωση υγρών, τα οποία καταλαμβάνουν το κάτω τμήμα του δοχείου ή της δεξαμενής στην οποία τίθενται και σχηματίζουν μία οριζόντια ελεύθερη επιφάνεια στο άνω μέρος. Το πόσο μεγάλο είναι το τμήμα της δεξαμενής που καταλαμβάνεται εξαρτάται από τον όγκο του υγρού. Η απόσταση της ελεύθερης επιφάνειας από τον πυθμένα της δεξαμενής αποτελεί τη στάθμη (level) του υγρού. Πέρα από τα δοχεία παρατήρησης, τους ογκομετρικούς κυλίνδρους και τις ράβδους βυθομέτρησης, που είναι βαθμολογημένα σκεύη και αναφέρονται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας (δηλαδή σε μικρές ποσότητες υγρών), σήμερα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της στάθμης υγρών χωρητικοί αισθητήρες και αισθητήρες πίεσης.

#### ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η ανίχνευση της φυσικής θέσης και της κίνησης των αντικειμένων έχει ζωτική σημασία, αφού οι περισσότερες κατασκευές και διατάξεις διαθέτουν κινητά μηχανικά μέρη. Είναι συχνά απαραίτητο να γνωρίζουμε τη θέση ενός αντικειμένου. Ενδέχεται να θέλουμε να προσδιορίσουμε εάν ή πότε ένα κινητό μέρος ευρίσκεται σε κάποια προκαθορισμένη θέση του χώρου. Άλλοτε είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε εάν και σε ποιο βαθμό ένα κινητό μέρος κινείται ή περιστρέφεται προς κάποια κατεύθυνση ή την αντίθετή της. Κάποιες φορές μας ενδιαφέρει πόσο γρήγορα κινείται ένα κινητό μέρος. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η γνώση της θέσης, της προσέγγισης, της μετατόπισης και της ταχύτητας ή επιτάχυνσης ενός αντικειμένου αφορούν στο γενικότερο ζήτημα της ανίχνευσης κάποιας παραμέτρου της κίνησής του. Ανάλογα επομένως με τη φύση της εφαρμογής μας πρέπει να χρησιμοποιήσουμε αισθητήρες που να ανιχνεύουν κάποιο από τα ακόλουθα μεγέθη:

- Θέση
- Προσέγγιση
- Μετατόπιση (ευθύγραμμη ή περιστροφική)
- Ταχύτητα ή επιτάχυνση

Η μετατόπιση (displacement) προκύπτει από τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στη νέα και την παλαιά θέση του εξεταζόμενου αντικειμένου, και άρα η ανίχνευση της θέσης ανάγεται στην ανίχνευση της μετατόπισης και αντίστροφα.

Η προσέγγιση (proximity) αποτελεί μία ειδική περίπτωση ανίχνευσης θέσης, καθώς τότε μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε εάν θα ευρεθεί το εξεταζόμενο αντικείμενο σε μία συγκεκριμένη, προκαθορισμένη θέση. Έτσι, η ανίχνευση της προσέγγισης δίνει δύο δυνατά αποτελέσματα (ΝΑΙ ή ΟΧΙ) και είναι απλούστερη από την ανίχνευση θέσης, η οποία πρέπει να δίνει ως αποτελέσματα συνεχείς αριθμητικές τιμές (σε χιλιοστάμετρα ή μοίρες). Η μέτρηση της προσέγγισης μπορεί να γίνει με μηχανικό τρόπο με τη βοήθεια ενός διακόπτη επαφής.

Η μετατόπιση μπορεί να μετρηθεί στις απλούστερες περιπτώσεις με μηχανικά συστήματα (γραμμικά μικρόμετρα ή γωνιόμετρα) και για να γίνει αυτό πρέπει να υπάρξει ανθρώπινη παρέμβαση, όσον αφορά στην ανάγνωση της μέτρησης και συχνά στην εκτέλεσή της. Ένας καλύτερος τρόπος είναι με τη βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου (γραμμικού ή περιστροφικού), καθώς η έξοδος ενός ποτενσιόμετρου είναι ανάλογη κάποιου μήκους ή γωνίας.

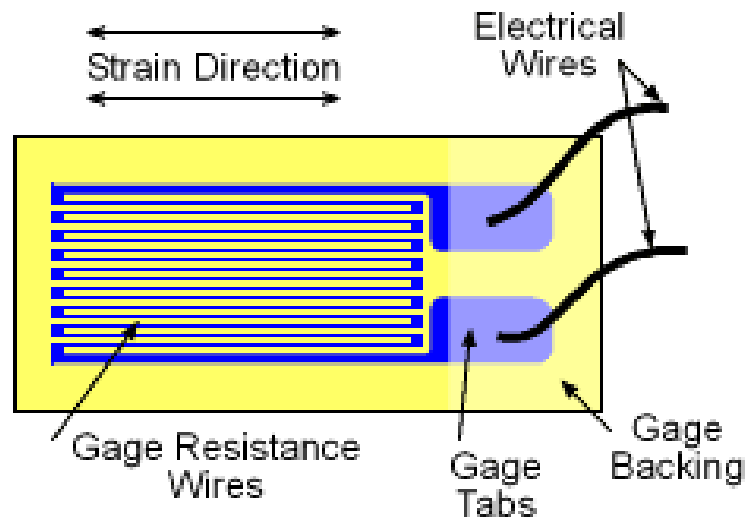
Για τη μέτρηση της ταχύτητας ενός αντικειμένου χρησιμοποιούνται τεχνικές υπερήχων ή ραδιοκυμάτων (radar). Σύμφωνα με αυτές εκπέμπεται προς το αντικείμενο ένα κύμα (υπέρηχος ή ραδιοκύμα), το οποίο ανακλάται από το αντικείμενο και ένα τμήμα του επιστρέφει προς τη συσκευή εκπομπής. Τέλος, οι μετρήσεις ταχύτητας που απαιτούνται σε ειδικές εφαρμογές και η περιγραφή τους ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Η μέτρηση της επιτάχυνσης σχετίζεται με τη μέτρηση της δύναμης, καθώς τα μεγέθη αυτά είναι ανάλογα. Εντούτοις, οι αισθητήρες δύναμης που έχουμε περιγράψει στην προηγούμενη παράγραφο στηρίζονται στη μέτρηση του μεγέθους της πίεσης, η οποία προϋποθέτει τη φυσική επαφή του εξεταζόμενου αντικειμένου με το αντικείμενο που το πιέζει. Είναι όμως δυνατό να επιταχυνθεί ένα αντικείμενο χωρίς να υποστεί πίεση, εάν για παράδειγμα μετατοπιστεί βίαια το στήριγμά του λόγω κάποιας δύναμης (βαρυτικής, φυγόκεντρης, ηλεκτρικής κ.ά.) που ενεργεί επάνω σε αυτό από απόσταση. Έτσι υπάρχουν αισθητήρες ειδικά κατασκευασμένοι για να μετρούν αποκλειστικά το μέγεθος της επιτάχυνσης και ονομάζονται επιταχυνσιόμετρα (accelerometers).

#### 1.5.4 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ

Η παραμόρφωση ενός υλικού είναι ένα φυσικό μέγεθος το οποίο δεν μπορεί να μετρηθεί με άμεσο τρόπο. Συνήθως, υπολογίζεται με μεθόδους που βασίζονται σε διάφορα μηχανικά, οπτικά, ακουστικά, πνευματικά, ηλεκτρικά και άλλα Φυσικά φαινόμενα. Οι αισθητήρες που αξιοποιούν ηλεκτρικές ιδιότητες υλικών και χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της παραμόρφωσης ονομάζονται «ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα». Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες ηλεκτρικών επιμηκυνσιόμετρων, ανάλογα με το ηλεκτρικό χαρακτηριστικό στην οποία βασίζεται η λειτουργία τους. Δηλαδή, υπάρχουν αισθητήρες που η λειτουργία τους βασίζεται σε χωρητικές, επαγωγικές, πιεζοηλεκτρικές και ωμικές ιδιότητες. Η πιο διαδεδομένη είναι η

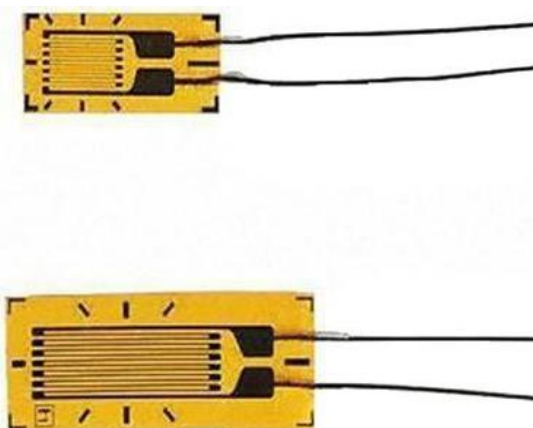
κατηγορία στην οποία ανήκουν οι αισθητήρες των οποίων η λειτουργία τους βασίζεται στην μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την παραμόρφωση. Ένα τέτοιου τύπου επιμηκυνσιόμετρο παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.12 : Αισθητήρας παραμόρφωσης

Υπάρχουν επιμηκυνσιόμετρα τα οποία είναι κατασκευασμένα από ημιαγώγιμα υλικά (semiconductor gage), από αντίστασης άνθρακα (carbon resistor gage) και από μεταλλικά φύλλα ή σύρματα (metallic foil or wire resistance). Σημειώνεται ότι ανάλογα με το υλικό που είναι κατασκευασμένος ο αισθητήρας, ποικίλει και η ευαισθησία του. Για παράδειγμα ο αισθητήρας που είναι κατασκευασμένος από αντίστασης άνθρακα έχει μεγαλύτερη ευαισθησία συγκριτικά με τον αισθητήρα που είναι κατασκευασμένος από μεταλλικά φύλλα.

Τα επιμηκυνσιόμετρα κατασκευασμένα από ημιαγώγιμα υλικά ή από μεταλλικά φύλλα τα οποία έχουν την μορφή που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, είναι και τα πιο δημοφιλή επιμηκυνσιόμετρα τα οποία χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της παραμόρφωσης.



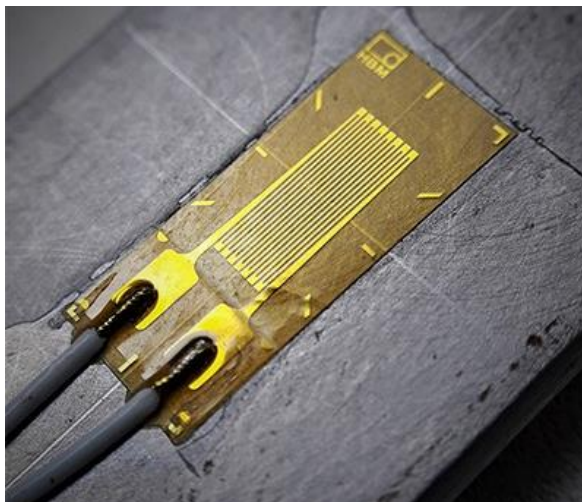
Εικόνα 1.13 : Αισθητήρας παραμόρφωσης

Τα συγκεκριμένα επιμηκυνσιόμετρα αποκαλούνται και «Bonded resistance gauges» και συνοδεύονται από χαρακτηριστικά και χαμηλό κόστος κατασκευής, τα οποία δικαιολογούν και την ευρεία χρήση τους. Τα υλικά από τα οποία είναι

κατασκευασμένα, τοποθετούνται σε πολύ λεπτά φύλλα και σε μορφή ζιγκ - ζαγκ με σκοπό την επίτευξη του επιθυμητού μήκους σε όσο το δυνατόν μικρότερη διάσταση. Παρόλο που το παραπάνω υλικό είναι συνεχόμενο, η τελική μορφή του μοιάζει με πλέγμα, για αυτό και συνήθως αποκαλείτε και με τον ίδιο τρόπο. Το υλικό στο οποίο είναι τοποθετημένο το παραπάνω πλέγμα ονομάζεται μήτρα ή φορέας και είναι φτιαγμένος από πολυμερή υλικά. Ο φορέας εκτός από την ηλεκτρική απομόνωση του παραπάνω πλέγματος με το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα, επίσης κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει την παραμόρφωση να μεταφέρεται στο πλέγμα με όσο το δυνατόν λιγότερες αλλοιώσεις (αυτό προκύπτει από τις ιδιότητες του ίδιου του υλικού).

Εύκολα μπορεί να υποψιαστεί κανείς ότι η μεταφορά της παραμόρφωσης από το υλικό που μετριέται στον αισθητήρα εξαρτάται από το υλικό που μεσολαβεί ανάμεσά τους και τα χαρακτηριστικά του υλικού αυτού. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραπάνω εφαρμογή ποικίλουν, και κάθε φορά, επιλέγεται το κατάλληλο για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα πιο συνηθής υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το κυανοακρυλικό (Cyanooacrylate cement), εποξειδική κόλλα (epoxy) νιτρικής κυτταρίνης (cellulose nitrate cement ) και για εφαρμογές με υψηλό περιβάλλον χρησιμοποιείται κεραμική κόλλα (ceramic cement). Η κόλλα που μεσολαβεί μεταξύ του αισθητήρα καθώς και ο φορέας του πλέγματος θα πρέπει να είναι σε θέση εκτός από το να μεταφέρουν την παραμόρφωση του υλικού που είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας χωρίς εξωτερικές αλλοιώσεις, αλλά, και να μην επιτρέπουν την μεταφορά θερμότητας από το υλικό στο πλέγμα.

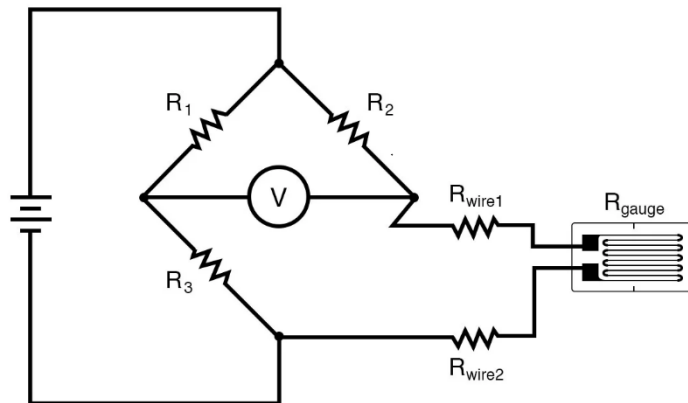
Υστέρα από την τοποθέτηση του αισθητήρα στο επιθυμητό σημείο μέτρησης, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτό παραμορφώνεται σχεδόν με το ίδιο τρόπο με το υλικό που είναι τοποθετημένο. Η παραμόρφωση του αισθητήρα σημαίνει και μεταβολή των διαστάσεων του πλέγματος του. Αυτή η μεταβολή έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η αντίσταση του πλέγματος του αισθητήρα. Άρα, για να μπορεί να μετρηθεί η παραμόρφωση του υλικού που είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας, αρκεί να μετρηθεί η μεταβολή της αντίστασης του πλέγματος του αισθητήρα. Πιο αναλυτικά, αυτή η μεταβολή της αντίστασης μετατρέπεται σε μεταβολή τάσης μέσω της γέφυρας Wheatstone, και με κατάλληλες διατάξεις όπως θα αναλυθούν και στη συνέχεια πραγματοποιείται η μέτρηση της μεταβολής της τάσης και σύμφωνα με αυτή υπολογίζεται η παραμόρφωση του υλικού, όπου είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας.



Εικόνα 1.14 : Αισθητήρια παραμόρφωσης πάνω σε δοκίμιο



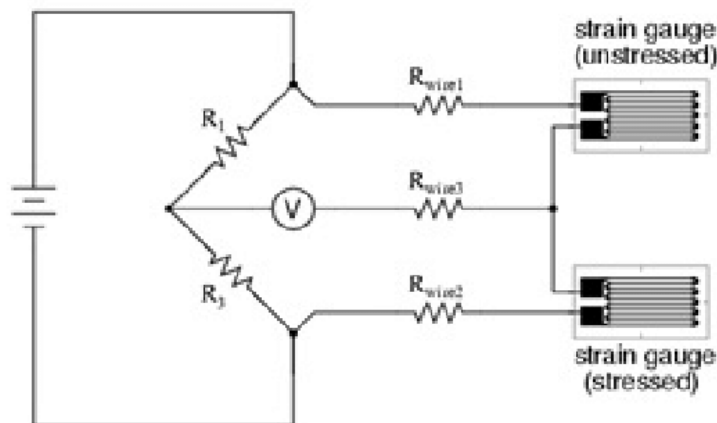
Τα ωμικά αισθητήρια παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε συνδυασμό με γέφυρες Wheatstone. Η συνδεσμολογία των συγκεκριμένων τύπων αισθητήρων με την γέφυρα Wheatstone παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1.15 : Συνδεσμολογία γέφυρας Wheatstone με ένα επιμηκυσιόμετρο

Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα φαίνεται ότι η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από τέσσερις αντιστάσεις, όπου οι  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  συνήθως, είναι αντιστάσεις υψηλής ακρίβειας και το  $R_{\text{gauge}}$  είναι η αντίσταση του πλέγματος του επιμηκυσιόμετρου. Οι αντιστάσεις  $R_{\text{wire1}}$  και  $R_{\text{wire2}}$  που αντιπροσωπεύουν την αντίσταση των αγωγών, οι οποίοι συνδέουν τον αισθητήρα με την γέφυρα, σημειώνεται ότι όταν το μήκος αυτών των αγωγών είναι μικρό, δεν λαμβάνεται υπόψη.

Υπάρχουν και άλλες παραλλαγές συνδεσμολογίας αισθητήρων παραμόρφωσης με την γέφυρα Wheatstone, όπως είναι δυνατή και η περίπτωση συνδεσμολογίας παραπάνω από έναν αισθητήρα σε μια γέφυρα. Μια τέτοια συνδεσμολογία παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Τα κυκλώματα αυτά παρουσιάζουν πολυπλοκότητα και συνήθως χρησιμοποιούνται για μέτρηση της συνολικής παραμόρφωσης σε διάφορα σημεία κάποιου υλικού και με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 1.16 : Συνδεσμολογία γέφυρας Wheatstone με δυο επιμηκυσιόμετρα

Τέλος, για να πετύχουμε την μέγιστη ακρίβεια στις μετρήσεις με την χρήση αισθητήριων παραμόρφωσης, πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες συνθήκες όπως χαμηλός ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος (να αποφεύγεται η τοποθέτηση του αισθητήρα κοντά σε πολύ ενεργοβόρες ηλεκτρικές συσκευές ή σε καλώδια που διαιρούνται από



μεγάλα ρεύματα) και η πηγή τάσης με την οποία τροφοδοτείται το σύστημα να μην παρουσιάζει διακυμάνσεις στην τάση τροφοδοσίας του συστήματος, αφού οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες μετρήσεις.

### Ο συντελεστής ευαισθησίας GF( Gauge Factor )

Ο συντελεστής ευαισθησίας διεθνώς αποκαλούμενος Gauge Factor ή GF, περιγράφει την αναλογία μεταβολής της αντίστασης σε σχέση ως προς την μεταβολή της παραμόρφωση, ενώ η παραμόρφωση, είναι η μεταβολή των διαστάσεων ενός σώματος, εξ αιτίας της εφαρμογής μιας δύναμης. Ως ποσότητα, η παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του μήκους ( $\Delta L$ ) προς το αρχικό μήκος ( $L$ ):

$$\epsilon = \Delta L / L$$

Η μαθηματική εξίσωση του συντελεστή ευαισθησίας GF είναι η εξής:

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\epsilon}$$

Όπου:

- GF → Είναι ο συντελεστής ευαισθησίας ή Gauge Factor
- $\Delta R$  → Η μεταβολή της αντίστασης
- R → Η αντίσταση του αισθητήρα σε κατάσταση ηρεμίας
- $\Delta L$  → Η μεταβολή του μήκους
- L → Αρχικό μήκος
- $\epsilon$  → Παραμόρφωση

Τυπική τιμή του συντελεστή ευαισθησίας ηλεκτρομηκυσιομέτρων είναι της τάξεως του δυο (2). Οι κατασκευαστές αισθητηρίων παραμόρφωσης πρέπει να καθορίζουν τον ακριβή συντελεστή για καθένα από τα αισθητήρια τους ξεχωριστά. Εάν εφαρμοστούν σε ένα σώμα που είναι τοποθετημένο αισθητήριο που έχει GF ίση με δυο (2), δύναμη για να προκαλεί παραμόρφωση του σώματος κατά 10 microstrain θα έχουν σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της αντίστασης του αισθητηρίου κατά 20  $\mu\Omega$  ( $20 \cdot 10^{-6} \Omega$ ).

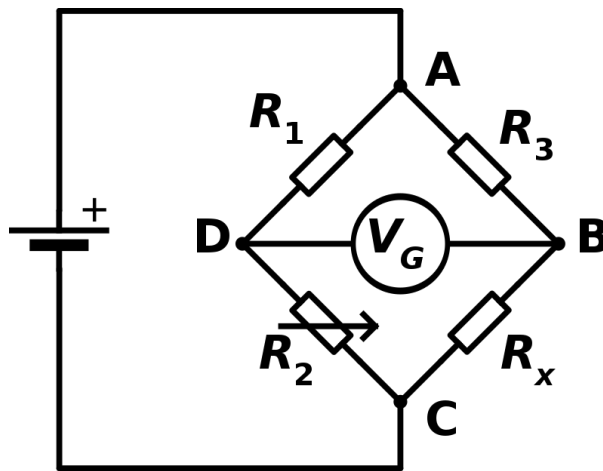
Στα περισσότερα μεταλλικά αντικείμενα η μέγιστη αναπτυσσόμενη παραμόρφωση που συναντάμε είναι της τιμής των 5000 microstrain και αν αναλογιστούμε ότι ο GF έχει τιμή 2, τότε η μέγιστη μεταβολή της αντίστασης του αισθητηρίου μπορεί να φτάσει στα 10000  $\mu\Omega$  (0.01 $\Omega$ ). Για τον λόγο αυτό τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιούμε πρέπει να έχουν το ελάχιστο μετρητικό βήμα του 1 $\mu\Omega$  ή 1 $\mu V$ .

Οι εξέλιξη της τεχνολογίας και οι σύγχρονες ανάγκες για μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια, έχουν οδηγήσει τους κατασκευαστές αντιστοίχων αισθητήρων, να κατασκευάζουν αισθητήρες με πολύ μεγαλύτερους συντελεστές ευαισθησίας από το δυο (2). Παρόλα αυτά ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία έχει συντελεστή ευαισθησίας ίση με 2.

## 1.6 ΓΕΦΥΡΑ WHEATSTONE

Η μετρητική διάταξη που υλοποιήθηκε χρησιμοποιεί ως αισθητήρα μέτρησης ωμικό επιμηκυνσιόμετρο. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας μεταβάλλει την αντίσταση της ανάλογα με την παραμόρφωση. Η μεταβολή της αντίστασης δεν μπορεί να μετρηθεί από τον μικροελεγκτή με άμεσο τρόπο. Έτσι για την μέτρηση της μεταβολής της αντίστασης απαιτείται η μετατροπή της από μεταβολή αντίστασης σε μεταβολή τάσης. Για την μετατροπή αυτή χρησιμοποιείται η γέφυρα Wheatstone.

Η γέφυρα Wheatstone είναι ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιούνταν αρχικά για τη μέτρηση μιας άγνωστης αντίστασης κάποιου κυκλώματος και κατόπιν συγκρίσεως με μια γνωστή πρότυπη αντίσταση. Σήμερα, συνήθως χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς σκοπούς καθώς και σε ειδικές διατάξεις μέτρησης.



Εικόνα 1.17 : Γέφυρα Wheatstone

Μια συνδεσμολογία μιας γέφυρας Wheatstone παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα. Αυτή αποτελείται από μια πηγή σταθερής τάσης, η οποία παρέχει σταθερό ρεύμα στο κύκλωμα. Η απαιτούμενη τιμή ρεύματος για την γέφυρα μπορεί πολύ απλά να υπολογιστεί από τον νόμο του Ohm:

$$I = V_s / R.$$

Όπου  $V_s$ , η τάση τροφοδοσίας και  $R$ , η συνολική αντίσταση της γέφυρας. Συνήθως, η τιμή του ρεύματος είναι πολύ μικρή. Σε μια γέφυρα που έχει συνολική αντίσταση  $120\Omega$  και τροφοδοτείται από πηγή τάσης  $5V$  απαιτεί ρεύμα λειτουργίας  $42mA$ . Τα συνηθισμένα όρια τάσης τροφοδοσίας σε γέφυρα και αισθητήρια παραμόρφωσης είναι από  $1-2V$  μέχρι  $25V$ . Τα όρια αυτά δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τάση τροφοδοσίας που έχει ορίσει ο κατασκευαστής για κάθε τύπο αισθητηρίων.

Τα σημεία D και B (εικόνα 1.17) περιέχουν ενδιάμεσα γαλβανόμετρο. Στην διάταξη μας, αντί για γαλβανόμετρο η τάση μετρείται από το κύκλωμα HX711. Είναι γνωστό, ότι το χαρακτηριστικό της γέφυρας Wheatstone είναι ότι δρα αποτελεσματικά στην ανίχνευση οποιασδήποτε κατάστασης μη ισορροπίας ανάμεσα στις αντιστάσεις των κλάδων της. Για το λόγο αυτό, και οι τέσσερις παραπάνω αντιστάσεις θα πρέπει να έχουν ίδιες τιμές. Σε αυτή την περίπτωση, και οι τέσσερις αντιστάσεις έχουν ίδια τιμή και η γέφυρα είναι σε ισορροπία, δηλαδή η τάση  $V_{DB}$  έχει τιμή  $0\text{ Volt}$ . Εάν σε

ένα κλάδο της γέφυρας είναι συνδεδεμένο κάποιος αισθητήρας παραμόρφωσης, και στο υλικό που είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας ασκηθεί κάποια δύναμη και το παραμορφώσει, τότε θα παραμορφωθεί και ο αισθητήρας, με αποτέλεσμα να μεταβάλεται η αντίσταση του. Σε αυτή την περίπτωση, οι τέσσερις αντιστάσεις της γέφυρας δεν θα έχουν ποια ίδια τιμή και για το λόγο αυτό, η γέφυρα δεν θα είναι πλέον σε ισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι η τάση  $V_{DB}$  αυτή την φορά θα έχει κάποια τιμή. Η τιμή αυτή είναι ανάλογη με την μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα και σύμφωνα με αυτή πραγματοποιείται και ο υπολογισμός της παραμόρφωσης.

## 1.7 ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (EMBEDDED SYSTEMS )

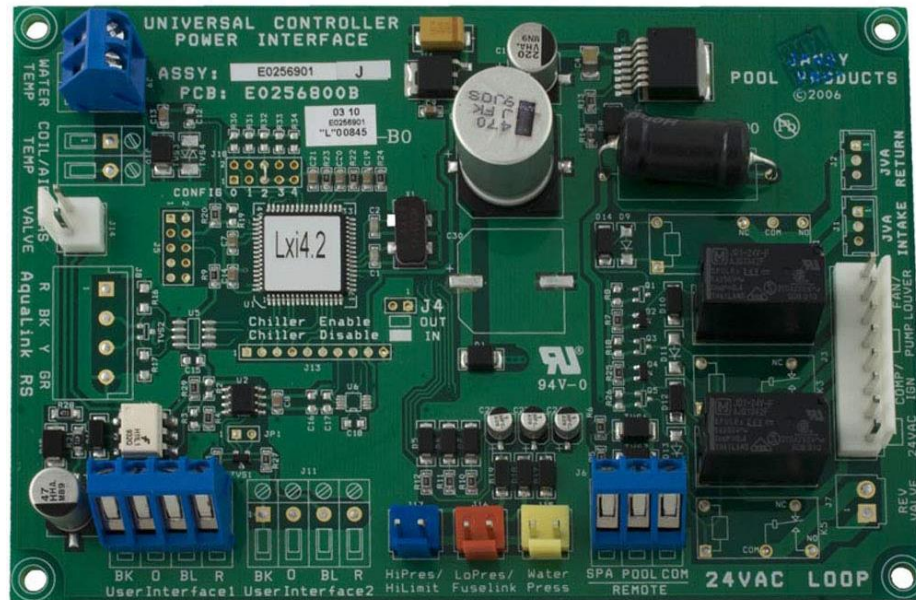
Με τον όρο ενσωματωμένα συστήματα περιγράφεται οποιαδήποτε συσκευή η οποία περιλαμβάνει έναν προγραμματιζόμενο επεξεργαστή, ο οποίος δεν είναι ένας επεξεργαστής γενικού σκοπού, αλλά προορίζεται να επιτελεί συγκεκριμένη λειτουργία. Τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν ίδια αρχιτεκτονική με τα τυπικά υπολογιστικά συστήματα. Όπως κάθε προγραμματιζόμενο ψηφιακό σύστημα, έτσι και αυτά διαθέτουν έναν ή περισσότερους επεξεργαστές, μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) και μνήμη ανάγνωσης μόνο (ROM) καθώς και διεπαφές εισόδου/εξόδου. Η διαφοροποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων έγκειται στη χρήση αποκλειστικά μικροεπεξεργαστών, με περισσότερες δυνατότητες διασύνδεσης εισόδου/εξόδου και λιγότερους πόρους (λόγου χάρη μικρότερη μνήμη). Με άλλα λόγια, ένα ενσωματωμένο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως μια μικρογραφία ενός τυπικού υπολογιστικού συστήματος.

Αρχικά, τα ενσωματωμένα συστήματα εμφανίστηκαν ως συσκευές ή προϊόντα χαμηλών επιδόσεων, λόγου χάρη ρολόγια και ηλεκτρονικοί υπολογιστές τσέπης. Ωστόσο σήμερα, στις τεχνολογικά αναπτυγμένες κοινωνίες, περιλαμβάνονται σε αρκετά πολύπλοκες συσκευές με αυξημένες απαιτήσεις επιδόσεων. Ενσωματωμένα συστήματα εξειδικευμένων εφαρμογών (περιορισμένης χρήσης, ενσωματώνονται στις ψηφιακές συσκευές) απαντώνται στις περισσότερες εφαρμογές της καθημερινότητας. Έτσι, τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν γίνει πλέον μέρος της καθημερινής ζωής των περισσότερων ανθρώπων. Στο σημείο αυτό, μπορεί να αναφερθεί ένας ακόμη γενικός ορισμός του ενσωματωμένου συστήματος, ο οποίος περιγράφει κάθε ενσωματωμένο σύστημα ως ένα ψηφιακό σύστημα που εκτελεί κάποια λειτουργία και δεν είναι προσωπικός υπολογιστής, φορητός υπολογιστής ή κεντρικός διακομιστής.

Στην καθημερινότητα μας χρησιμοποιούμε ένα σχετικά μεγάλο αριθμό από ενσωματωμένα συστήματα τα οποία πολλές φορές δεν γνωρίζουμε ότι υπάρχουν. Ορισμένα παραδείγματα τέτοιων συστημάτων αναφέρονται στην επόμενη παράγραφο.

Οι τηλεοράσεις έχουν ενσωματωμένους επεξεργαστές για να ελέγχουν την εικόνα, να ρυθμίζουν τα κανάλια, να εκτυπώνουν μηνύματα πάνω στην εικόνα, να απενεργοποιούν και να ενεργοποιούν τα κυκλώματα της τηλεόρασης. Οι συσκευές τηλε-ελέγχου (telecontrol) έχουν ενσωματωμένους επεξεργαστές για να μετατρέπουν τις εντολές του χρήστη σε σήματα υπερύθρων, για να ελέγχουν άλλες συσκευές. Όλα τα σύγχρονα αυτοκίνητα έχουν ένα πλήθος από ενσωματωμένους επεξεργαστές, είτε για την προστασία των επιβατών (σύστημα πέδησης ABS), είτε για βοηθητικές ενδείξεις, είτε για τη βελτίωση των συνθηκών οδήγησης. Οι σύγχρονες συσκευές νοικοκυριού (φούρνοι, πλυντήρια, ψυγεία κ.ά.) διαθέτουν ενσωματωμένους επεξεργαστές, για να προστατεύουν τα τρόφιμα ή τα ρούχα από λανθασμένες

ρυθμίσεις, να βελτιώνουν τις διαδικασίες συντήρησης ή μαγειρέματος. Οι αυτόματοι πωλητές έχουν ενσωματωμένους επεξεργαστές για να διεκπεραιώνουν τη λειτουργία της πώλησης αγαθών. Εκτυπωτές/Φαξ, έχουν ενσωματωμένα συστήματα για τον έλεγχο της εκτύπωσης, της μετατροπής των δεδομένων σε εντολές προς τους μηχανισμούς εκτύπωσης και της διασύνδεσης με άλλα συστήματα.



Εικόνα 1.18 : Ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου λειτουργίας πλυντηρίου ρούχων.

### 1.7.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, το χαρακτηριστικό των ενσωματωμένων συστημάτων, που αναφέρεται στο γεγονός ότι αποτελούνται από υλικό υψηλών επιδόσεων σε συνδυασμό με λογισμικό εξειδικευμένης λειτουργίας, αποτελεί τον βασικό παράγοντα της ανάπτυξής τους. Η λέξη ενσωματωμένο υποδηλώνει ότι το σύστημα είναι «ενσωματωμένο» σε μια άλλη συσκευή και ότι η λειτουργία του δε θα τροποποιηθεί από τη στιγμή που θα γίνει διαθέσιμο στην αγορά.

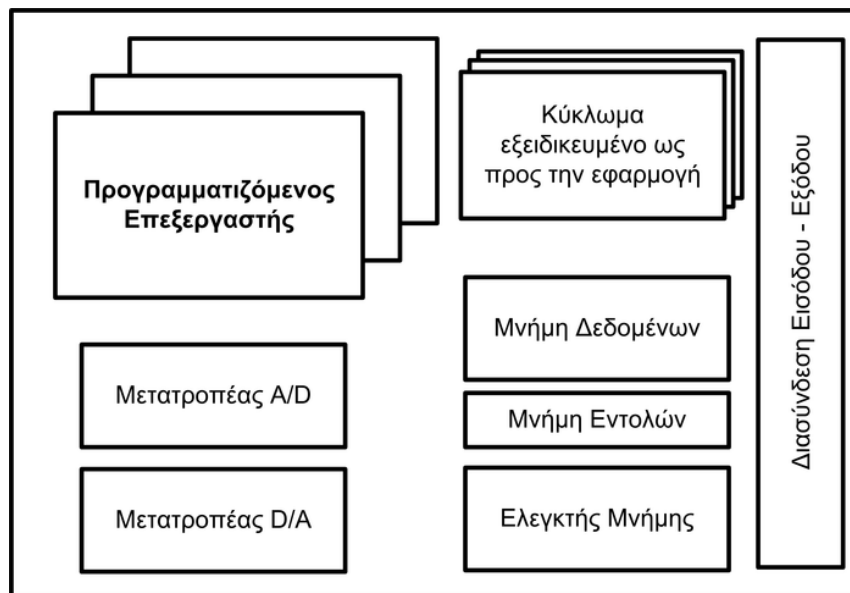
Τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν εξειδικευμένα συστήματα υπολογιστών, τα οποία είναι αφοσιωμένα στην εκτέλεση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας και είναι συνδυασμός υλικού και λογισμικού μέρους. Συνήθως, τα συστήματα αυτά αποτελούν τμήμα ενός μεγαλύτερου συστήματος ή προϊόντος.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά σχετικά με τα ενσωματωμένα συστήματα:

- Σχεδιάζονται για μια μόνο λειτουργία και την εκτελούν αδιαλείπτως.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λειτουργίες διαφορετικές από αυτές για τις οποίες έχουν σχεδιαστεί (μη επαναπρογραμματιζόμενα).
- Έχουν αυξημένους περιορισμούς, χάριν επίτευξης όσο το δυνατόν μικρότερου κόστους σχεδιασμού, υψηλών επιδόσεων, μικρού μεγέθους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (διαρκής λειτουργία αλλά μειωμένη απαίτηση συστήματος ψύξης), υψηλής αξιοπιστίας (απρόσκοπτη λειτουργία).

- Βασίζονται σε ένα πλήθος επεξεργαστών, διαφορετικών δομών και αρχιτεκτονικών.
- Διαθέτουν λειτουργικό πραγματικού χρόνου (Real Time Operating System - RTOS). Σε αντίθεση με τα κλασικά λειτουργικά συστήματα (Windows, Linux, FreeBSD) που συναντώνται σε προσωπικούς υπολογιστές, τα λειτουργικά συστήματα των ενσωματωμένων συστημάτων λαμβάνουν πάντα σοβαρά υπόψη τις προτεραιότητες των εφαρμογών, και αποδίδουν ολόκληρη την επεξεργαστική ισχύ τους σε εφαρμογές υψηλής προτεραιότητας.
- Διαθέτουν λειτουργικό σύστημα πολύ μικρού μεγέθους (μερικών KB), γεγονός που τα καθιστά μη φιλικά προς τον χρήστη (nonuserfriendly) ή τον προγραμματιστή.
- Το λειτουργικό τους σύστημα και οι εφαρμογές τους βρίσκονται τοποθετημένα σε μνήμη ROM (ονομάζεται και μνήμη εντολών). Αντιθέτως, το λειτουργικό σύστημα ενός προσωπικού υπολογιστή ή ενός διακομιστή βρίσκεται σε κάποια αποθηκευτική μονάδα δίσκου.

Ένα ενσωματωμένο σύστημα αποτελείται συχνά από πολλά τμήματα. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία που συνθέτουν ένα τυπικό ενσωματωμένο σύστημα.



Εικόνα 1.19 : Τα επιμέρους στοιχεία ενός ενσωματωμένου συστήματος

Συνήθως, ένα ενσωματωμένο σύστημα αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- Έναν ή περισσότερους επεξεργαστές (η μνήμη εντολών του επεξεργαστή βρίσκεται εκτός ολοκληρωμένου κυκλώματος, επειδή μπορεί να χρειαστεί να γίνει κάποια μικρή τροποποίηση της λειτουργίας του)
- Μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D converters)
- Μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (D/A converters)
- Μνήμη εντολών του λογισμικού του συστήματος

- Μνήμη δεδομένων όπου αποθηκεύονται ή διαβάζονται τα δεδομένα (αποτελείται συνήθως από μνήμη πάνω στο ολοκληρωμένο κύκλωμα και από κάποια παρασκηνακή μνήμη)
- Κυκλώματα εξειδικευμένα για την εφαρμογή που εκτελείται
- Ελεγκτή της μνήμης δεδομένων
- Διασύνδεση εισόδου/εξόδου.

### 1.7.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.

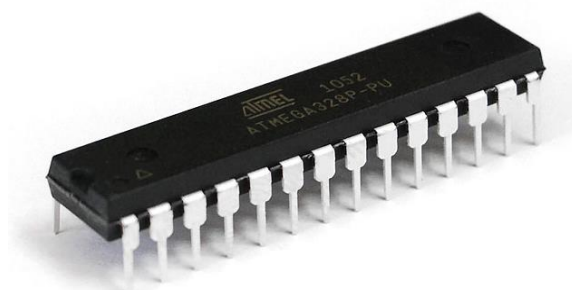
Το σύστημα μέτρησης παραμορφώσεων που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ανήκει στην «οικογένεια» των ενσωματωμένων συστημάτων, αφού η λειτουργία του βασίζεται σε έναν επεξεργαστή που βρίσκεται στην πλατφόρμα Arduino Uno. Είναι ένα όργανο μέτρησης ειδικού σκοπού και έχει σχεδιαστεί μονό και μονό για αυτή την λειτουργία.

Περιλαμβάνει έναν προγραμματιζόμενο επεξεργαστή, ο οποίος δεν είναι ένας επεξεργαστής γενικού σκοπού, αλλά προορίζεται να επιτελεί συγκεκριμένη λειτουργία. Διαθέτει μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) καθώς και μνήμη ανάγνωσης μόνο (ROM). Επιπλέον διαθέτει έναν αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα, ο οποίος έχει διακριτική ικανότητα των 10 bit και έχει πολλές εισόδους και εξόδους, από τις οποίες μόνο μια είσοδος χρησιμοποιείται μέσω ενός διακόπτη (push button). Η πραγματοποίηση των μετρήσεων, η επεξεργασία τους καθώς και η απεικόνιση τους βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328. Ο κώδικας που έχει αναπτυχθεί, έχει φορτωθεί στην μνήμη μικροελεγκτή και κάθε φορά που το σύστημα ενεργοποιείται, ξεκινά αυτόματα την εκτέλεση του προγράμματος που έχει φορτωμένο στην μνήμη του. Η διαδικασία αυτή δεν σταματάει μέχρις ότου διακοπεί η τροφοδοσία του συστήματος.

## 1.8 ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ

### 1.8.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ

Ο Μικροελεγκτής αποτελεί ουσιαστικά μια παραλλαγή του μικροεπεξεργαστή. Η λειτουργία του μπορεί να πραγματοποιηθεί με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα, λόγω των πολλών υποσυστημάτων που διαθέτει.



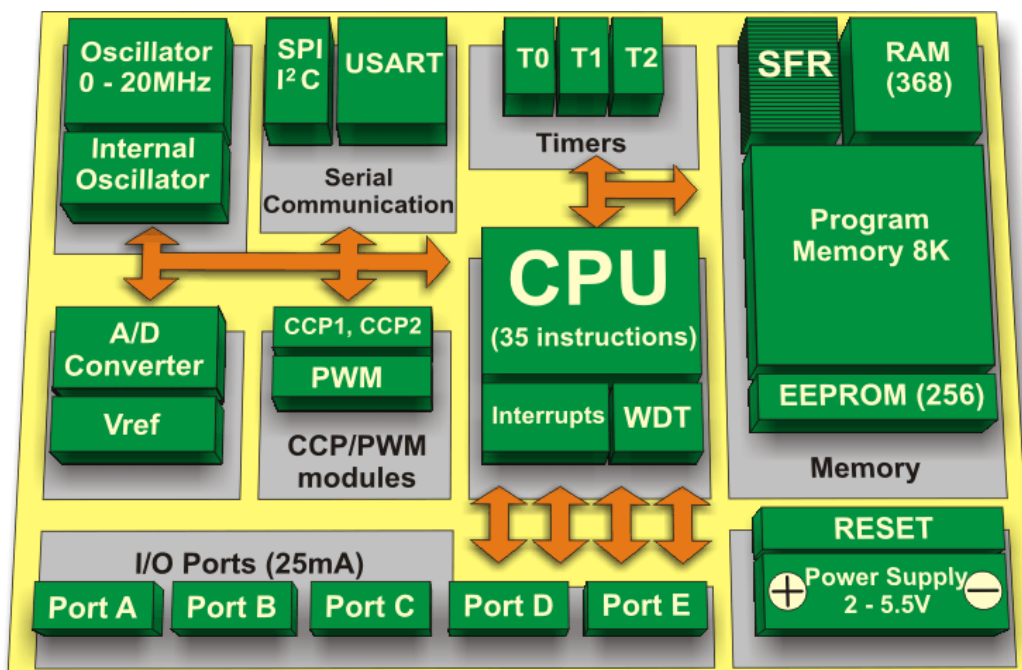
Εικόνα 1.20 : Μικροελεγκτής ATmega328

Οι περισσότεροι μικροελεγκτές βασίζονται στην αρχιτεκτονική των τεσσάρων βασικών συστατικών που απαιτούνται για ένα ψηφιακό σύστημα. Αυτά

περιλαμβάνουν έναν επεξεργαστικό πυρήνα (CPU), τη μνήμη για το πρόγραμμα και τα δεδομένα (RAM), χώρο μόνιμης αποθήκευσης (Flash σε έναν μικροελεγκτή), καθώς επίσης και τις θύρες I/O για επικοινωνία με εξωτερικές περιφερειακές μονάδες.

Τέλος, όπως ένας υπολογιστής έχει την δυνατότητα να εκτελεί διάφορα προγράμματα και να διαθέτει περιφερειακές συσκευές, επεξεργαστή και μνήμη, έτσι και ο μικροελεγκτής διαθέτει τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν και, μάλιστα, σε ένα μόνο chip, ενώ η αποθήκευση των προγραμμάτων που εκτελούν οι μικροελεγκτές, γίνεται πάντα στη μνήμη του προγράμματος.

Η οργάνωση των μικροελεγκτών είναι παρόμοια με εκείνη των κλασικών υπολογιστικών συστημάτων. Αποτελούνται, όπως μπορείτε να παρατηρήσετε στην παρακάτω εικόνα, από τις παρακάτω λειτουργικές μονάδες:



Εικόνα 1.21 : Οι λειτουργικές μονάδες ενός μικροελεγκτή

- Το μικροεπεξεργαστή (ή αλλιώς κεντρική μονάδα επεξεργασίας), η οποία περιλαμβάνει την αριθμητική και λογική μονάδα, που επεξεργάζεται τα δεδομένα, τη μονάδα ελέγχου, που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο και το συντονισμό όλων των μονάδων του συστήματος, και τους καταχωρητές, που χρησιμεύουν για προσωρινή αποθήκευση.
- Μονάδες εισόδου/εξόδου, με τις οποίες το σύστημα επικοινωνεί με το εξωτερικό του περιβάλλον.
- Την μνήμη, που χρησιμεύει για την αποθήκευση των εντολών του προγράμματος, των αρχικών δεδομένων και των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων.
- Την μονάδα σειριακής επικοινωνίας για να μπορεί να επικοινωνήσει με άλλες περιφερειακές συσκευές.

- Τους μετατροπείς (ADC, DAC..) που μετατρέπουν αναλογικά σήματα σε ψηφιακά και αντίστροφα.
- Δίαυλος δεδομένων: Η μεταφορά της δυαδικής πληροφορίας ανάμεσα στις διάφορες μονάδες του μικροελεγκτή γίνεται παράλληλα από ένα σύνολο γραμμών, που αναφέρονται σαν δίαυλος δεδομένων (data bus). Οι γραμμές αυτές αναφέρονται σαν γραμμές δεδομένων.
- Τέλος, η απαίτηση της ενεργοποίησης στοιχειωδών λειτουργιών σε προ-καθορισμένα χρονικά διαστήματα, δημιουργεί την ανάγκη ύπαρξης μιας βάσης χρόνου, που αναφέρεται ως κύκλωμα χρονισμού (clock). Το κύκλωμα χρονισμού αποτελείται συνήθως από ένα κρυσταλλικό ταλαντωτή, που παράγει τετραγωνικούς παλμούς σταθερής συχνότητας. Η συχνότητα αυτή του ταλαντωτή καθορίζει και τη συχνότητα λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή.

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό σε σχέση με άλλα υπολογιστικά συστήματα είναι ότι ολόκληρη η μονάδα επεξεργασίας περιέχεται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, που κατασκευάζεται σε ένα μικρό κομμάτι πυριτίου και αναφέρεται σαν μικροεπεξεργαστής. Η ενσωμάτωση όλων των στοιχείων της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα, συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του μικρού μεγέθους, της υψηλής αξιοπιστίας και του χαμηλού κόστους. Ο μικροεπεξεργαστής συνδέεται κατάλληλα με τα ολοκληρωμένα κυκλώματα της μνήμης και των μονάδων εισόδου/εξόδου, για να αποτελέσει το υπολογιστικό σύστημα που ονομάζουμε μικροελεγκτή.

### 1.8.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ

Το “πακέτο” ενός μικροελεγκτή φέρει κάποια βασικά χαρακτηριστικά που τον καθιστά προτιμότερο για την χρήση του σε εφαρμογές έναντι της χρήσης των επιμέρους στοιχείων που τον απαρτίζουν ξεχωριστά (επεξεργαστής, μνήμες, συσκευές εισόδου- εξόδου). Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να συνοψισθούν σε :

- Χαμηλό κόστος: Είναι ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά που κάποιος σχεδιαστής λαμβάνει υπόψη. Η συνεχής απελευθέρωση στην αγορά μικροελεγκτών από διάφορες εταιρίες βελτίωσαν την ποιότητα αυτών και μείωσαν τις τιμές λόγω ανταγωνισμού.

- Μικρότερο μέγεθος: Η ολοκλήρωση των βασικών στοιχείων από τα οποία απαρτίζεται, μείωσε τις διαστάσεις σε σχέση με τη χρήση των επιμέρους στοιχείων ως σύνολο.

- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος: Το γεγονός ότι οι μικροελεγκτές λειτουργούν σε συγκριτικά χαμηλές συχνότητες που φτάνουν τα 32KHz, οδηγεί στην κατανάλωση μικρών ποσών ισχύος της τάξης των mW ακόμα και  $\mu$ W. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να εισέρχονται σε κατάσταση αναμονής (sleepmode), δηλαδή, καταστέλλουν προσωρινά την λειτουργία της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας και των περιφερειακών, οπότε αυτό μπορεί να γίνει μειώνοντας κατά πολύ την κατανάλωση ισχύος του μικροελεγκτή. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις ως προς αυτήν την παράμετρο.

- Αυτονομία: Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενσωμάτωσης σύνθετων περιφερειακών υποσυστημάτων όπως μνήμες και θύρες επικοινωνίας. Έτσι, πολλοί μικροελεγκτές δεν χρειάζονται κανένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για να λειτουργήσουν.



- Επίτευξη ελέγχου ή μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο: Ενώ οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές πρέπει να τρέχουν λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου (όπως RT-Linux, QNX κ.ά.) για να το επιτύχουν, οι μικροελεγκτές δεν απαιτούν επιπλέον λογισμικό.

- Μειωμένες εκπομπές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και μειωμένη ευαισθησία σε αντίστοιχες παρεμβολές από άλλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές: Το πλεονέκτημα αυτό προκύπτει από το μικρότερο αριθμό και μήκος εξωτερικών διασυνδέσεων, καθώς και των χαμηλότερων ταχυτήτων λειτουργίας.

- Περισσότεροι διαθέσιμοι ακροδέκτες για ψηφιακές εισόδους-εξόδους (για δεδομένο μέγεθος ολοκληρωμένου κυκλώματος), λόγω της μη δέσμευσής τους για την σύνδεση εξωτερικών περιφερειακών.

- Η βασική αρχιτεκτονική των μικροελεγκτών δεν διαφέρει από αυτή των κοινών μικροεπεξεργαστών, αν και στους πρώτους συναντάται συχνά η αρχιτεκτονική μνήμης τύπου Harvard, η οποία χρησιμοποιεί διαφορετικές αρτηρίες σύνδεσης της μνήμης προγράμματος και της μνήμης δεδομένων (π.χ. οι σειρές από την Microchip). Στους κοινούς μικροεπεξεργαστές συνηθίζεται η ενιαία διάταξη μνήμης τύπου Von-Neuman.

- Η ενσωμάτωση περιφερειακών σημαίνει ευκολότερη υλοποίηση εφαρμογών, λόγω των απλούστερων διασυνδέσεων. Επιπλέον, έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία, λόγω των λιγότερων διασυνδέσεων και μικρό μέγεθος συνολικού υπολογιστικού συστήματος.

Παρόλαυτά κάποια από μειονεκτήματα του μικροελεγκτή είναι :

- Η μη αλλαγή του προγράμματος για τον λόγο ότι είναι γραμμένο στην ROM.

- Η δυσκολία του προγραμματισμού του.

- Έχει μεγάλο χρόνο ανάπτυξης: Για να ολοκληρωθεί ένα προϊόν, μπορεί να απαιτηθεί από 1 εβδομάδα μέχρι 1 χρόνο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή του υλικού που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου συστήματος μέτρησης παραμόρφωσης. Για κάθε διάταξη που περιλαμβάνει η συγκεκριμένη διάταξη, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και στον τρόπο λειτουργίας της. Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος, αξιοποιήθηκε η πλατφόρμα Arduino Uno Rev3, και εφόσον η καρδιά του συστήματος είναι ο μικροελεγκτής ATmega 328, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στις δυνατότητες που διαθέτει, εστιάζοντας κυρίως στις περιφερειακές μονάδες που αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Στην συνέχεια, περιγράφεται η LCD οθόνη QC2004A τεχνολογίας υγρών κρυστάλλων και ο τρόπος επικοινωνίας της με το Arduino. Παρακάτω, γίνεται μια ανάλυση του αισθητήρα παραμόρφωσης. Περιγράφεται ο ADC (Analog To Digital Converter) μετατροπέας XH711 καθώς και οι δυνατότητες του. Τέλος, πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή του τροφοδοτικού του συστήματος.

#### 2.2 Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ARDUINO UNO REV3

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η πλατφόρμα Arduino Uno Rev3, που χρησιμοποιείται στην παρούσα πτυχιακή εργασία και αποτελεί ένα από τα δημοφιλή μέλη της οικογένειας Arduino. Οι δυνατότητες της παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον και αναλύονται στην συνέχεια αυτής της παραγράφου.



Εικόνα 2.1 : οι δυο όψεις της πλατφόρμας Arduino

##### 2.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Το Arduino ξεκίνησε σε ένα μικρό εργοστάσιο στην πόλη της Ιβρέα (Interaction Design Institute Ivrea γνωστό και ως Interaction Ivrea, IDII ή Ivrea), η οποία είναι μια κωμόπολη της επαρχίας Τορίνο στην περιοχή Πεδεμόντιο της βορειοδυτικής Ιταλίας. Στην ίδια περιοχή, είχε ως έδρα επίσης και η εταιρία υπολογιστών Olivetti. Στόχος

ήταν να υλοποιηθεί μία πλατφόρμα για τον έλεγχο προγραμμάτων διαδραστικών σχεδίων από μαθητές, η οποία θα ήταν πιο φθηνή από τα άλλα συστήματα που ήταν διαθέσιμα εκείνη την περίοδο. Οι ιδρυτές Massimo Banzi και David Cueartielles ονόμασαν την συγκεκριμένη πλατφόρμα Arduino από τον Arduino της Ιβρέα, βασιλιά της Ιταλίας.

## 2.2.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ARDUINO

Το Arduino θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια open-source αναπτυξιακή πλατφόρμα, η οποία ενσωματώνει ένα μικροελεγκτή και έχει την δυνατότητα να συνδέεται με ένα Η/Υ. Μέσω του Η/Υ ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προγραμματίσει τον αντίστοιχο μικροελεγκτή, αξιοποιώντας το διαθέσιμο αναπτυξιακό περιβάλλον του Arduino. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη διαδραστικών εφαρμογών, που αξιοποιούν πληθώρα αισθητηρίων και έχουν την δυνατότητα να ελέγχουν εξωτερικές διατάξεις και συσκευές. Οι παραπάνω εφαρμογές μπορούν να είναι αυτόνομες ή να ελέγχονται μέσω κάποιου προγράμματος στον Η/Υ του χρήστη.

## 2.2.3 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ARDUINO UNO REV 3

Το Arduino Uno Rev3 είναι μια υπολογιστική πλατφόρμα βασισμένη στο μικροελεγκτή ATmega328 της Atmel. Έχει 14 ψηφιακούς ακροδέκτες εισόδου και εξόδου, από τους οποίους οι 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PWM (Pulse Width Modulation) έξοδοι. Διαθέτει επίσης, 6 αναλογικές εισόδους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση αναλογικών τιμών από εξωτερικά στοιχεία όπως ποτενσιόμετρα, αναλογικοί αισθητήρες κτλ. Επιπλέον, η πλατφόρμα Arduino Uno περιλαμβάνει ένα κεραμικό κρύσταλλο στα 16 MHz, μία θύρα USB (Universal Serial Port), μια υποδοχή για εξωτερική τροφοδοσία, μια ICSP (In Circuit Serial Programming) σύνδεση και ένα κουμπί reset. Επίσης, το Arduino Uno χρησιμοποιεί το μικροελεγκτή ATmega16U2, που αναλαμβάνει τον ρόλο του μετατροπέα από USB σε Serial. Τα γενικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας Arduino Uno παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

<b>Γενικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας Arduino Uno Rev 3</b>	
Microcontroller	ATmega328
CPU	8-bit AVR
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

Πίνακας 2 : Γενικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας Arduino Uno

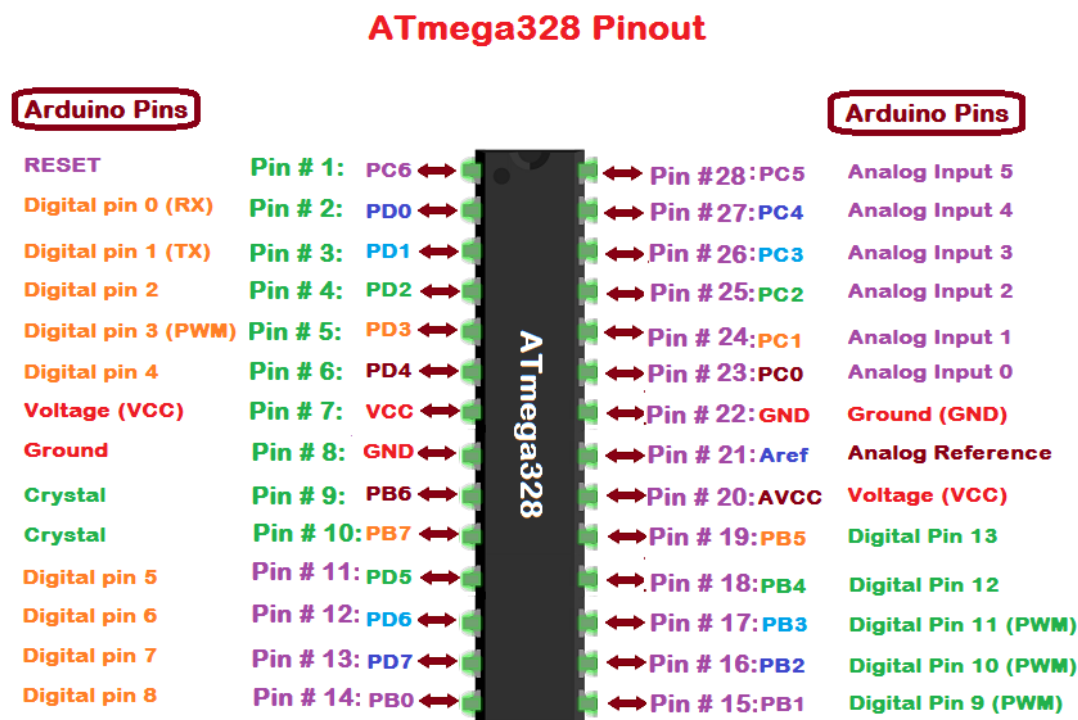
Η υπολογιστική πλατφόρμα Arduino Uno Rev3, εκτός από τους ακροδέκτες εισόδου – εξόδου, έχει επίσης κάποιους ακροδέκτες, οι οποίοι έχουν συγκεκριμένες λειτουργίες. Στον πίνακα 3, αναλύεται ο σκοπός και οι λειτουργίες κάθε ακροδέκτη της παραπάνω πλατφόρμας.

Ακροδέκτης	Λειτουργία	Περιγραφή
0-13	Ψηφιακοί είσοδοι-εξοδοί	Κάθε ένας από τους 14 ψηφιακούς ακροδέκτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος ή έξοδος, χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις <code>pinMode()</code> , <code>digitalWrite()</code> , και <code>digitalRead()</code> . Λειτουργούν στα 5 V με ρεύμα έως 20 mA επίσης διαθέτουν και pull-up αντιστάσεις 20-50kΩ
A0-A5	Αναλογικοί είσοδοι	Διαβάζουν αναλογικά σήματα τάσης από 0-5V επιστρέφοντας μια ακέραιη τιμή από 0 έως 1023 (10-bit ακρίβεια).
3.3V	Τροφοδοσία +3.3V	Η DC τάση +3.3 V προέρχεται από το σταθεροποιητή τάσης της πλατφόρμας Arduino.
5V	Τροφοδοσία +5V	Η DC τάση 5V προέρχεται από το σταθεροποιητή τάσης που διαθέτει η πλατφόρμα Arduino. Επίσης ο ίδιος ακροδέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απευθείας τροφοδότηση της πλατφόρμας παρακάμπτοντας το σταθεροποιητή τάσης.
GND	Γείωση (0V)	Όλες οι διαφορές δυναμικού της πλατφόρμας είναι σε σχέση με τον ακροδέκτη GND που χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς.
Vin	Εξωτερική τροφοδοσία	Ο ακροδέκτης Vin χρησιμοποιείται ως τάση τροφοδοσίας για την πλατφόρμα Arduino όταν η τροφοδοσία δεν προέρχεται από την USB θύρα.
IOREF	+5 V	Παρέχει την τάση αναφοράς του μικροελεγκτή. Μια συσκευή που συνδέεται στην πλατφόρμα μπορεί να διαβάσει την τάση IOREF και επιλέξει την κατάλληλη τάση τροφοδοσίας.
0 → RX 1 → TX	Σειριακή Επικοινωνία	Χρησιμοποιούνται για λήψη (RX) και αποστολή (TX) σειριακών δεδομένων. Οι ακροδέκτες αυτοί συνδέονται με του αντίστοιχους ακροδέκτες του ολοκληρωμένου FTDI USB to-TTL Serial.
2 και 3	Εξωτερικές Διακοπές (Interrupts)	Ενεργοποιούν την αντίστοιχη διακοπή κάθε φορά που ανιχνεύεται παλμός τάσης. Οι ενεργοποίηση των διακοπών πραγματοποιείται με την συνάρτηση <code>attachInterrupt()</code> .
3, 5, 6, 9, 10, 11	PWM	Παρέχουν μια PWM έξοδο με Duty Cycle από 0-100% αξιοποιώντας την συνάρτηση <code>analogWrite()</code> η οποία δέχεται ως όρισμα ένα 8-bit ακέραιο αριθμό χωρίς πρόσημο.
10(SS), 11(MOSI), 12(MISO), 13(SCK)	SPI	Αυτοί οι ακροδέκτες επιτρέπουν την SPI επικοινωνία η οποία υποστηρίζεται μέσω της SPI βιβλιοθήκης που διαθέτει το περιβάλλον προγραμματισμού του Arduino.
13	LED	Ο ακροδέκτης 13 είναι συνδεδεμένος με ένα LED που διαθέτει η πλατφόρμα Arduino.
4 (SDA) 5 (SCL).	I2C	Υποστηρίζει το πρωτόκολλο I2C χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες τις Γλώσσας προγραμματισμού Wiring.
AREF	Εξωτερική τάση αναφοράς	Χρησιμοποιείται ως εξωτερική τάση αναφοράς μέσω της συνάρτησης <code>analogReference()</code>
RESET	Reset.	Αν τεθεί σε κατάσταση LOW τότε επανενεκινεί τον Μικροελεγκτή.

Πίνακας 3 : Τα χαρακτηριστικά των ακροδεκτών της πλατφόρμας Arduino Uno

## 2.3 Ο ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ ATmega328

Ο ATmega328 μικροελεγκτής ανήκει στην κατηγορία των «Low Power Atmel AVR 8bit Microcontrollers» και είναι ο μικροελεγκτής που αξιοποιείται για την υλοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος, μέσω της πλατφόρμας Arduino Uno. Είναι των 8 bit και βασίζεται στην προχωρημένη RISC (Reduced Instruction Set Computing) αρχιτεκτονική. Όπως παρουσιάζεται εικόνα 2.2, ο πυρήνας του ATmega328 αποτελείται από την CPU (Central Processing Unit), την μνήμη SRAM (Static Random Access Memory), την μνήμη EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory), την μνήμη Flash και ένα σύνολο περιφερειακών μονάδων. Πιο συγκεκριμένα, για τα περιφερικά του ATmega328 θα αναφερθούμε στη συνέχεια του κεφαλαίου.



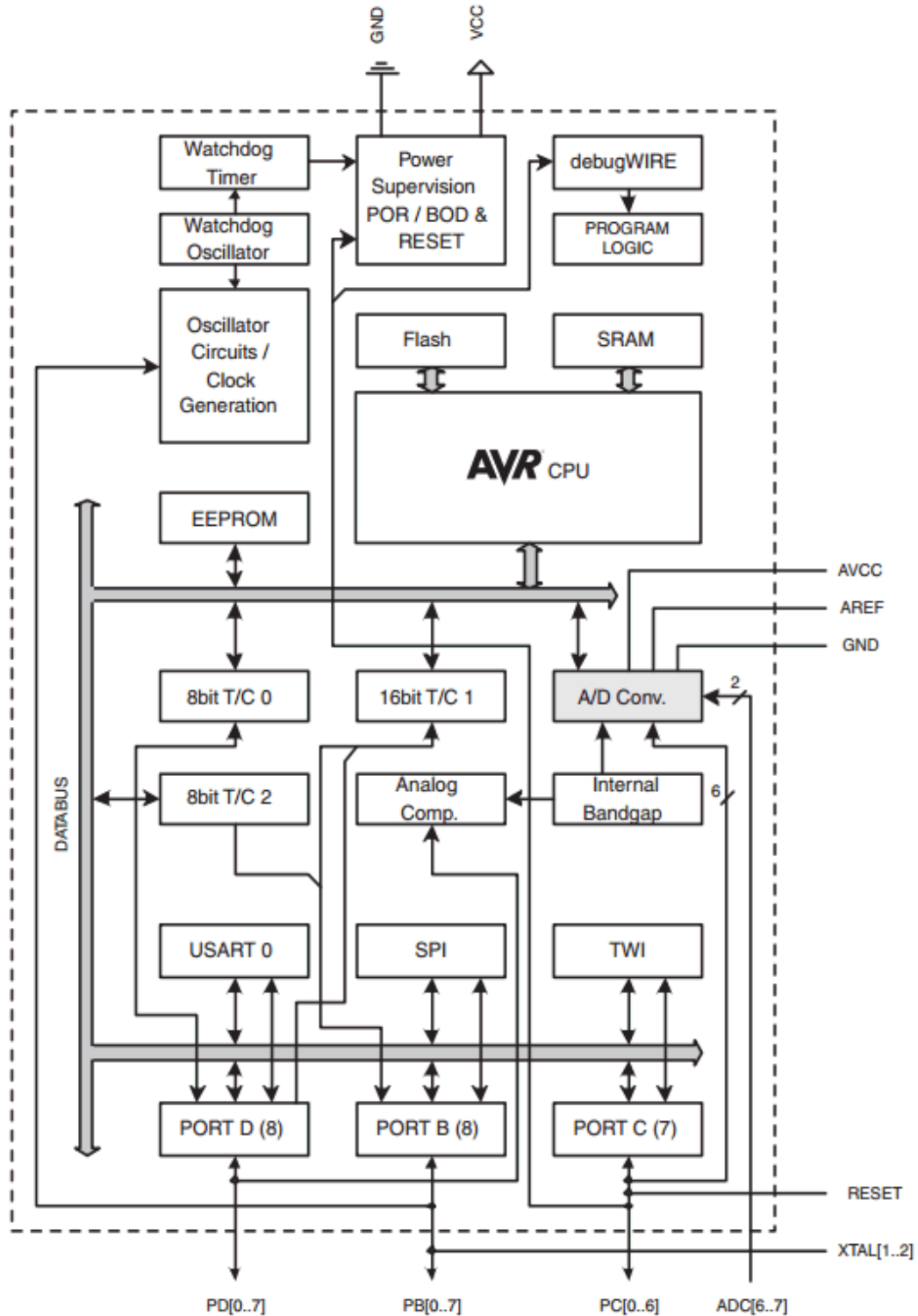
Εικόνα 2.2 : Ο χάρτης των ακροδεκτών του Arduino Uno και του μικροελεγκτή

### 2.3.1 Η CPU ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ATmega328

Σε αυτή την ενότητα, γίνεται μια σύντομη περιγραφή της CPU του ATmega328 η οποία βασίζεται στην AVR αρχιτεκτονική (εικόνα 23), που είναι μια τροποποιημένη Harvard αρχιτεκτονική.

Η βασική λειτουργία της CPU του ATmega328 είναι η διασφάλιση της σωστής εκτέλεσης του προγράμματος. Η CPU έχει επίσης την δυνατότητα να προσπελαύνει τις διαθέσιμες μνήμες, να εκτελεί υπολογισμούς, να ελέγχει τις περιφερειακές μονάδες, και να διαχειρίζεται τις διακοπές (interrupts). Στον πυρήνα της CPU υπάρχει

μια ALU (Arithmetic Logic Unit - Αριθμητική Λογική Μονάδα), η οποία υποστηρίζει αριθμητικές και λογικές πράξεις μεταξύ των καταχωρητών (registers) ή μεταξύ μιας σταθεράς και ενός καταχωρητή. Διαθέτει επίσης, ένα καταχωρητή κατάστασης (Status Register), όπου τα bit του αλλάζουν κατάσταση ανάλογα με το αποτέλεσμα της ALU. Για παράδειγμα το bit 1 γίνεται HIGH όταν το αποτέλεσμα της ALU είναι 0.



Εικόνα 2.3 : Μπλοκ διάγραμμα ενός AVR μικροελεγκτή



αποθήκευση των δεδομένων του προγράμματος, συνεπώς τα δεδομένα των μεταβλητών ή των πινάκων του προγράμματος αποθηκεύονται στην μνήμη SRAM. Η συγκεκριμένη μνήμη χάνει τα δεδομένα της, όταν διακοπεί η τάση τροφοδοσίας του μικροελεγκτή ή όταν πατηθεί το κουμπί reset. Τέλος, ο ATmega328 διαθέτει 1KB μνήμη EEPROM, η οποία χρησιμοποιείται για εγγραφή ή ανάγνωση δεδομένων. Σε αντίθεση με την μνήμη SRAM, δε χάνει τα δεδομένα της μετά από απώλεια της τάσης τροφοδοσίας ή επανεκκίνηση.

### 2.3.3 ΣΕΙΡΙΑΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

Ο ATmega328 υποστηρίζει τρία είδη σειριακής επικοινωνίας, αξιοποιώντας τις μονάδες USART (Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter), SPI (Serial Peripheral Interface) και την TWI (Two Wire serial Interface). Κάθε μια από τις παραπάνω μονάδες, αξιοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις της εφαρμογής, αλλά και τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μονάδας.

## 2.4 Η ΟΘΟΝΗ LCD

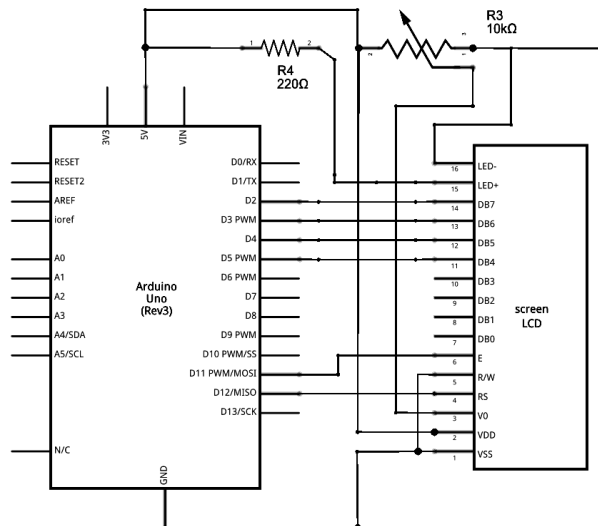
Η τελική διάταξη περιλαμβάνει μια οθόνη τεχνολογίας υγρών κρυστάλλων, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 2.5. Το συγκεκριμένο μοντέλο υποστηρίζει 2 γραμμές χαρακτήρων και 16 χαρακτήρες ανά γραμμή και διαθέτει μπλε φόντο με λευκούς χαρακτήρες. Για τη λειτουργία της, απαιτείται να συμπεριλαμβάνεται στο κώδικα που θα φορτωθεί στο μικροελεγκτή της πλατφόρμας, η βιβλιοθήκη «Liquid Crystal». Η χρήση της οθόνης στη συγκριμένη διάταξη, είναι να εμφανίζει την λειτουργία που εκτελείται από τον μικροελεγκτή και να εμφανίζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Εικόνα 2.5 : Η LCD οθόνη

Στην εικόνα 2.6, αναδεικνύεται ο τρόπος συνδεσμολογίας της οθόνης με την πλατφόρμα Arduino. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, για τη λειτουργία της οθόνης χρειάζεται να συνδεθεί μια αντίσταση 220 ohm και ένα ποτενσιόμετρο που ελέγχει την αντίθεση της οθόνης. Τέλος, στον πίνακα 4 συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται τα σύμβολα των ακροδεκτών της οθόνης και η αντιστοιχία τους με τους ακροδέκτες της πλατφόρμας Arduino Uno.





Εικόνα 2.6 : Η συνδεσμολογία της οθόνης HD44780U με την πλατφόρμα Arduino Uno

LCD PIN	Σύμβολο	Arduino pin
LCD PIN 1	R <sub>ss</sub>	Στη γείωση του arduino
LCD PIN 2	V <sub>dd</sub>	Στα 5v του arduino
LCD PIN 3	V <sub>0</sub>	Μεσαίο pin ποτενσιόμετρου
LCD PIN 4	R <sub>s</sub>	Arduino Pin 12
LCD PIN 5	R <sub>w</sub>	Στη γείωση του arduino
LCD PIN 6	E	Arduino Pin 11
LCD PIN 7 - 10	-	Δεν χρησιμοποιείτε
LCD PIN 11	D4	Arduino Pin 5
LCD PIN 12	D5	Arduino Pin 4
LCD PIN 13	D6	Arduino Pin 3
LCD PIN 14	D7	Arduino Pin 2
LCD PIN 15	-	-
LCD PIN 16	A	Στα 3,3v του Arduino

Πίνακας 4 : Οι ακροδέκτες τις οθόνης HD44780U

## 2.5 Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ – ADC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΗΧ711

### 2.5.1 Η ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΗΧ711

Το Arduino Uno διαθέτει τον μικροελεγκτή ATmega328, το οποίο έχει ενσωματωμένο Analog To Digital Converter των 10 bit. Αυτό πρακτικά, σημαίνει ότι για μια τάση αναφοράς 0-5 Volt, θα μπορεί να το μετατρέψει σε 0 – 1023 ψηφία. Άρα, η διακριτική ικανότητα της μέτρησης θα είναι:

$$5/1024=4,88 \text{ m Volt}$$

Όπως θα δούμε και στην συνέχεια, η μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα και της διάταξης μετρήσεων (γέφυρας Whetstone), σε σχέση με την παραμόρφωση είναι πάρα πολύ μικρές. Άρα, η διακριτική ικανότητα της μέτρησης, πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, για να μπορεί να ανιχνεύει αυτές της πολύ μικρές μεταβολές. Για

αυτό το λόγο, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το υπάρχον Analog To Digital Converter των 10 bit, το οποίο έχει ενσωματωμένο το ATmega328.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω ζητήματος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο ενισχυτής – μετατροπέας HX711, το οποίο διαθέτει Analog To Digital Converter των 24 bit, άρα η διακριτική ικανότητα του είναι  $5/16777216 = 0,298\mu\text{Volt}$ , το οποίο είναι ικανοποιητικό για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

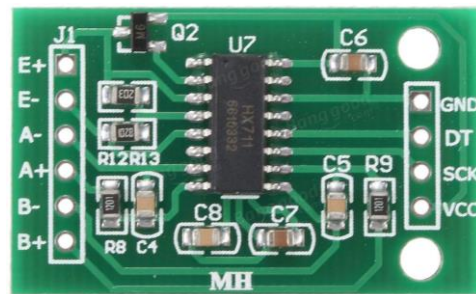
## 2.5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ HX711

Ο ενισχυτής – ADC μετατροπέας HX711 διαθέτει 5 ακροδέκτες συνδέσεις από την αριστερή μεριά και άλλες 5 από την δεξιά πλευρά. Στα αριστερά υπάρχουν οι συνδέσεις:

- (E+) θετικός ακροδέκτης τροφοδοσίας του αισθητήρα
- (E-) αρνητικός ακροδέκτης τροφοδοσίας του αισθητήρα
- (A+) θετικός ακροδέκτης εισόδου του αναλογικού σήματος του καναλιού A
- (A-) αρνητικός ακροδέκτης εισόδου του αναλογικού σήματος του καναλιού A
- (B+) θετικός ακροδέκτης εισόδου του αναλογικού σήματος του καναλιού B
- (B-) αρνητικός ακροδέκτης εισόδου του αναλογικού σήματος του καναλιού B

Στην δεξιά πλευρά υπάρχουν οι συνδέσεις:

- VCC παροχή τάσης 5V
- GND γείωση της πλακέτας
- DT DATA
- SCK CLOCK



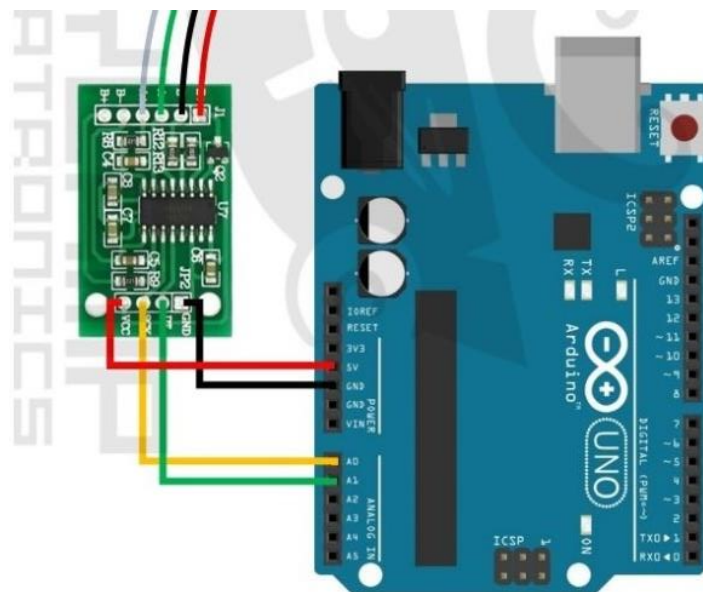
Εικόνα 2.7 : Ο ενισχυτής – ADC μετατροπέας HX711

Το HX711 διαθέτει δύο κανάλια διαφορετικής εισόδου, ένα ενσωματωμένο chip χαμηλού θορύβου με δυνατότητα επιλογής ενίσχυσης 32, 64 και 128. Έχει ενσωματωμένο ρυθμιστή τροφοδοσίας, για τροφοδοσία των αισθητήρων και του ADC. Επίσης, περιλαμβάνει ενσωματωμένο ταλαντωτή με δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικού κρύσταλλου και ενσωματωμένο chip για ενεργοποίηση – απενεργοποίηση. Η μεταφορά δεδομένων πραγματοποιείται μέσω σειριακής επικοινωνίας, η οποία έχει δυο ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων εξόδου (10SPS και 80SPS). Η τρέχουσα κατανάλωση, συμπεριλαμβανομένου του αναλογικού ρυθμιστή τροφοδοσίας είναι: κανονική λειτουργία  $<1.5\text{mA}$ , μείωση ισχύος  $<1\mu\text{A}$ . Το εύρος τάσης λειτουργίας είναι από 2.6 ~ 5.5V, ενώ το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας είναι από -40 ~ + 85 βαθμούς κελσίου.

Επίσης, διαθέτει πολυπλέκτη εισόδου, το οποίο ενεργοποιεί, είτε το κανάλι A είτε το B και το οδηγεί στο χαμηλού θορύβου προγραμματιζόμενο ενισχυτή κέρδους (PGA). Το κανάλι A μπορεί να προγραμματιστεί με κέρδος 128 ή 64, όταν η τροφοδοσία είναι 5V. Το κανάλι B έχει σταθερό κέρδος 32. Τέλος, το ολοκληρωμένο κύκλωμα HX711 περιλαμβάνει ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης και εξαλείφει την ανάγκη ενός εξωτερικού ρυθμιστή για την παροχή τάσης για τον ADC και τον αισθητήρα.

### 2.5.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ HX711

Όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω, η επικοινωνία του HX711 με την πλατφόρμα arduino πραγματοποιείται μέσω των ακροδεκτών SCK και DT. Οι ακροδέκτες αυτοί, συνδέονται σε ακροδέκτες του arduino, οι όποιοι υποστηρίζουν ψηφιακή είσοδο και έξοδο. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα που σχεδιάστηκε, χρησιμοποιεί τον ακροδέκτη A0 για την λήψη των δεδομένων από το ακροδέκτη DT του HX711, ενώ ο ακροδέκτης A1, χρησιμοποιείται για να δώσει τον παλμό ρολογιού στο HX711, και συνδέεται στο SCK ακροδέκτη του HX711.

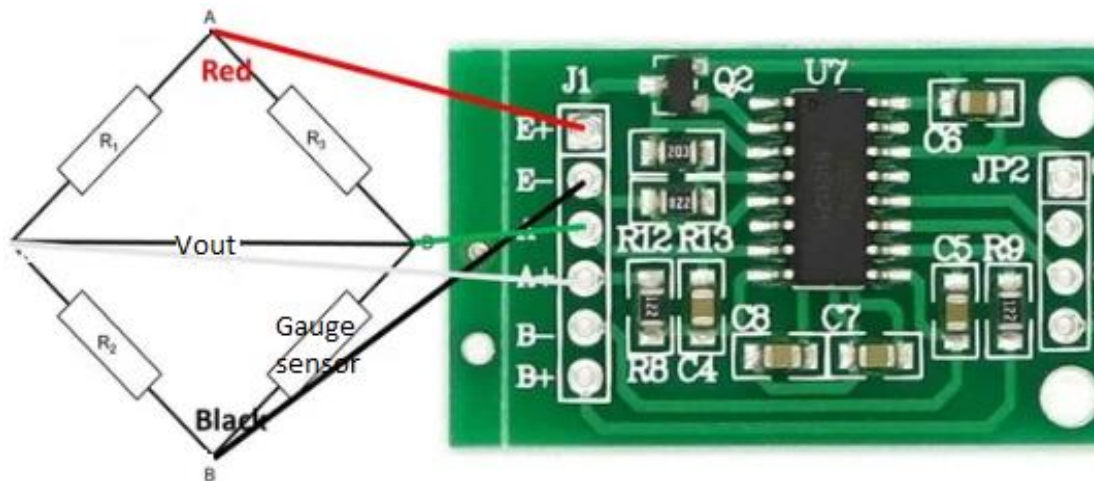


Εικόνα 2.8 :Συνδεσμολογία του ADC μετατροπέας HX711 με την πλατφόρμα arduino Uno

Στην διαδικασία ανάγνωσης των δεδομένων, επιλογής καναλιού, επιλογής κέρδους και απενεργοποίησης χρησιμοποιούνται οι ακροδέκτες PD\_SCK και DOUT. Όταν τα δεδομένα εξόδου δεν είναι έτοιμα για ανάγνωση, ο ακροδέκτης DOUT είναι σε υψηλό δυναμικό. Η είσοδος ρολογιού στον ακροδέκτη PD\_SCK πρέπει να είναι σε χαμηλό δυναμικό. Όταν το δυναμικό στον ακροδέκτη DOUT είναι χαμηλό, δηλώνει ότι η αναλογικοψηφιακή μετατροπή έχει ολοκληρωθεί και τα δεδομένα είναι έτοιμα προς ανάγνωση. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, με την εφαρμογή 25~27 θετικών παλμών ρολογιού στον ακροδέκτη PD\_SCK, τα δεδομένα εμφανίζονται στην έξοδο, στον ακροδέκτη DOUT. Κάθε παλμός στον ακροδέκτη PD\_SCK εμφανίζει ένα bit στην έξοδο DOUT, ξεκινώντας με το MSB πρώτα, μέχρι και τα 24 bits να εμφανιστούν στην έξοδο. Τα 24 bits δεδομένων είναι σε μορφή συμπληρώματος ως προς δύο. Ο 25ος παλμός στον ακροδέκτη PD\_SCK θα οδηγήσει τον ακροδέκτη DOUT σε υψηλό δυναμικό πάλι. Η επιλογή του καναλιού και του κέρδους ελέγχεται από τον αριθμό των παλμών ρολογιού στον ακροδέκτη PD\_SCK. Ο αριθμός των παλμών ρολογιού στον ακροδέκτη PD\_SCK δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 25 ή μεγαλύτερος από 27 παλμούς, σε μία περίοδο μετατροπής, για να αποφευχθεί η πρόκληση σφάλματος στη σειριακή επικοινωνία.

Η συνδεσμολογία του HX711 με την γέφυρα και τον αισθητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9. Η γέφυρα Wheatstone χρησιμοποιείται με σκοπό την μετατροπή της μεταβολής της αντίστασης σε μεταβολή τάσης, η οποία μπορεί να μετρηθεί από τον μικροελεγκτή.

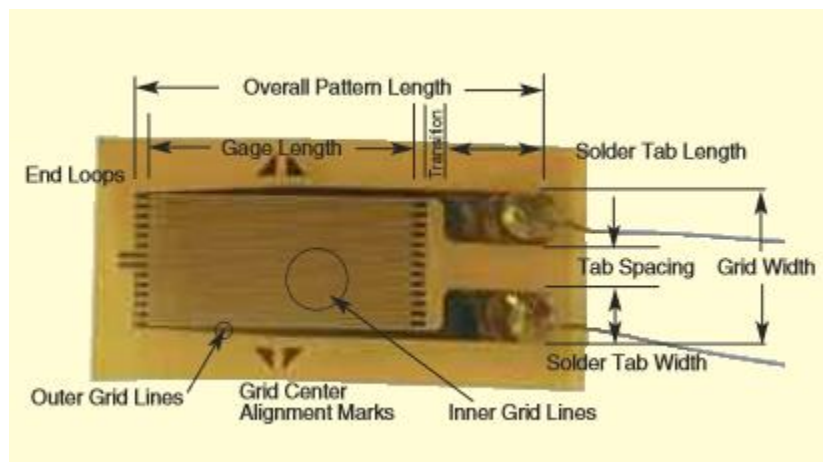
Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι ακροδέκτες E+ και E- εφαρμόζουν μια σταθερή τάση στα δυο άκρα τις γέφυρας ( $V_s$ ), ενώ οι ακροδέκτες A+ και A-, χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την τάση στους άλλους δυο ακροδέκτες της γέφυρας ( $V_{out}$ ). Οι παραπάνω τιμές των τάσεων θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης .



Εικόνα 2.9 :Συνδεσμολογία του ADC μετατροπέα HX711 με γέφυρα Wheatstone.

## 2.6 Ο αισθητήρας επιμήκυνσης που χρησιμοποιήθηκε

Γενικά, ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε (εικόνα 2.10) είναι μια υψηλής ακρίβειας αντίσταση, της οποίας η τιμή αλλάζει με την παραμόρφωση. Συνήθως, χρησιμοποιείται για μέτρηση, παραμόρφωσης ή βάρους. Διαθέτει υψηλή ακρίβεια, σταθερότητα και είναι εύκολο στην χρήση και στην τοποθέτηση.



Εικόνα 2.10 : Ο αισθητήρας BF120.

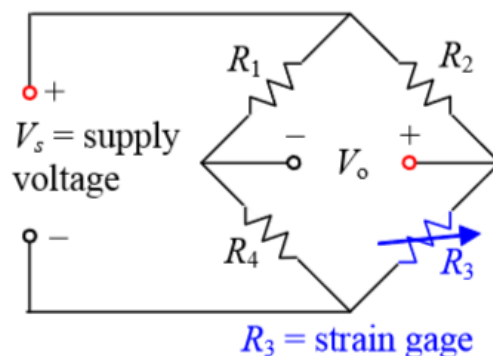
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αισθητήρα είναι:

- Αντίσταση: 120 ohms
- Διαστάσεις : 6.6 x3.4mm
- Διαστάσεις σύρματος του πλέγματος: 3.0\*2.44mm
- Συνολικό μήκος του σύρματος: 3-5 cm long wire
- Ονομαστικές τιμές ανοχής της αντίστασης σε κανονικές συνθήκες:  $120 \pm 3\Omega$
- Μέση τιμή της ανοχής της αντίστασης:  $\leq 0.5\Omega$
- Όριο θερμοκρασιών τοποθέτησης: (-30 -60)
- Συντελεστής ευαισθησίας:  $2 \pm 1\%$
- Όριο παραμόρφωσης σε θερμοκρασίες δωματίου: 20000  $\mu\text{m}/\text{m}$
- Αντίσταση μόνωσης σε θερμοκρασίες δωματίου: 10000M $\Omega$
- Υλικά πλέγματος: νικέλιο και κράμα χαλκού μαγγανίου

Για να μετρήσουμε την παραμόρφωση μέσω του παραπάνω αισθητήρα, αρχικά, πρέπει να το τοποθετήσουμε σε μια μεταλλική λεπτή επιφάνεια, που ονομάζεται φορέας. Ο φορέας προσαρμόζεται στο σώμα του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την παραμόρφωση. Με τον τρόπο αυτό, η αναπτυσσόμενη στο σώμα παραμόρφωση, μεταφέρεται στον αισθητήρα, ο οποίος αποκρίνεται μεταβάλλοντας γραμμικά την ηλεκτρική του αντίσταση. Εκτός από τον αισθητήρα των 120  $\Omega$ , υπάρχουν επίσης αισθητήρες που η ονομαστική αντίστασή τους, κυμαίνονται μεταξύ 30 ως 3 000  $\Omega$ . Οι πιο συνηθισμένες, όμως, τιμές είναι 120, 350 και 1000  $\Omega$ . Η τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω στο δοκίμιο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και χρήζει προσοχής, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή μεταφορά της παραμόρφωσης από το δοκίμιο στο φορέα και στη συνέχεια στο μεταλλικό στοιχείο. Η εν λόγω εργασία επικεντρώνεται στην μέτρηση της επιμήκυνσης μέσω του συγκεκριμένου τύπου αισθητήρα, άρα στη συνέχεια θα αναφερθεί ο τρόπος υπολογισμού της.

Σε ιδανικές συνθήκες, η ηλεκτρική αντίσταση του συγκεκριμένου αισθητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με την παραμόρφωση. Το μεταλλικό όμως στοιχείο, καθώς και το μετρούμενο δοκίμιο, επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, οι αισθητήρες υφίστανται επεξεργασία κατά την κατασκευή τους, ώστε να αντισταθμίζονται οι όποιες επιδράσεις της θερμοκρασίας σε αυτό. Παρ' όλα αυτά, δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθεί τελείως η επίδραση της θερμοκρασίας. Αναφέρεται στο συγκεκριμένο σύστημα, για λόγους πολυπλοκότητας, δεν θα λάβουμε υπόψη τον παράγοντα της θερμοκρασίας.

Η συνδεσμολογία του αισθητήρα με την γέφυρα Wheatstone παρουσιάζεται στο σχήμα 31, και ονομάζεται "Quarter Bridge Circuit".



Εικόνα 2.12 Γέφυρα Wheatstone

Για να μετρηθεί η επιμήκυνση από την συγκριμένη διάταξη, μία από τις αντιστάσεις, στην περίπτωση αυτή, η  $R_3$  είναι η αντίσταση που μεταβάλλεται όταν το δοκίμιο επιμηκύνεται. Δηλαδή, η αντίσταση  $R_3$  αποτελεί τον αισθητήρα, ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω στο δοκίμιο. Εφόσον θεωρήσαμε ότι η ηλεκτρική αντίσταση του αισθητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με την παραμόρφωση, και η μεταβολή αυτή αντικατοπτρίζεται στην τάση  $V_o$  της γέφυρας, συμπεραίνουμε, ότι για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης, αρκεί να υπολογίσουμε την τάση  $V_o$  του παράπνου κυκλώματος. Εάν εφαρμόσουμε το νόμο του Ohm για τον υπολογισμό της τάσης  $V_o$ , καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$V_o = V_s \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$

Όπου οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$ , και ο αισθητήρας έχουν σταθερή τιμή  $120\Omega$ , η τάση  $V_s$  είναι μια σταθερή συνεχόμενη τάση, η οποία συνδέεται στα δυο άκρα της παραπάνω γέφυρας και η  $V_o$  είναι η τάση που θέλουμε να υπολογίσουμε (είναι η τάση στα υπόλοιπα δυο άκρα της παραπάνω γέφυρας). Όταν ο αισθητήρας είναι σε κατάσταση ηρεμίας, τότε η αντίσταση της είναι  $120\Omega$  και είναι ίση με την  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_4$ . Σε αυτή την περίπτωση, η γέφυρα είναι σε κατάσταση ισορροπίας και η τάση  $V_o$  έχει μηδενική τιμή. Όταν ο αισθητήρας παραμορφωθεί, τότε η αντίστασή της από  $R_3$  θα γίνει  $R_3 + \Delta R_3$ , και η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$V_o = V_s \frac{\Delta R_3 R_1}{(R_2 + R_{3\text{αρχικό}} + \Delta R_3)(R_1 + R_4)}$$

Εάν λάβουμε υπόψιν, ότι η  $\Delta R_3$  είναι πολύ μικρότερη από την  $R_3$ , τότε μπορούμε να απλοποιήσουμε την παραπάνω σχέση και να καταλήξουμε στην:

$$V_o \approx V_s \frac{\Delta R_3 R_1}{(R_2 + R_{3\text{αρχικό}})(R_1 + R_4)}$$

Το  $\Delta R_3$  ισούται με την αρχική τιμή της επί το συντελεστή ευαισθησίας της και την παραμόρφωση ( $\epsilon$ ), δηλαδή:

$$\Delta R_3 = R_{3\text{αρχικό}} \cdot GF \cdot \epsilon$$

Αντικαθιστώντας την  $\Delta R_3$  και λύνοντας ως προς το « $\epsilon$ » καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$\epsilon \approx \frac{V_o}{V_s} \frac{1}{GF} \frac{(R_2 + R_{3\text{αρχικό}})^2}{(R_2 R_{3\text{αρχικό}})}$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω, εάν λάβουμε υπόψιν ότι η  $R_{3\text{αρχικό}}$  είναι ίση με την  $R_2$ . Οπότε, σε αυτή την περίπτωση, η τιμή της παραμόρφωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$\epsilon \approx 4 \frac{V_o}{V_s} \frac{1}{GF}$$



Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της παραμόρφωσης. Έστω ότι το  $V_s=5$  Volt,  $V_o=1.13$ mVolt,  $GF=2.0$  .

$$\varepsilon \approx 4 \frac{1.13}{5} \frac{1}{2} \left( \frac{1V}{1000mVolt} \right) = 0.000452 \text{ Strain}$$

Επειδή το  $\varepsilon$  είναι πολύ μικρό μέγεθος, συνήθως το μετατρέπουμε σε  $\mu\text{strain}$ . Άρα  $\varepsilon=0.000452 \times (10^6 \mu\text{strain/strain})= 452 \mu\text{strain}$

## 2.7 ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ 5Volt DC 1Amp

Για την τροφοδοσία του συστήματος έχει χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχές και σε κατάλληλη τιμή. Οι αποτίσεις για ηλεκτρική ισχύ για την λειτουργία του συστήματος είναι σχετικά χαμηλές, οπότε ένας μετατροπέας που διαθέτει στην έξοδο του 5 Volt DC 1Amp, είναι κατάλληλος για την τροφοδοσία του συστήματος. Ένας τέτοιος μετατροπέας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

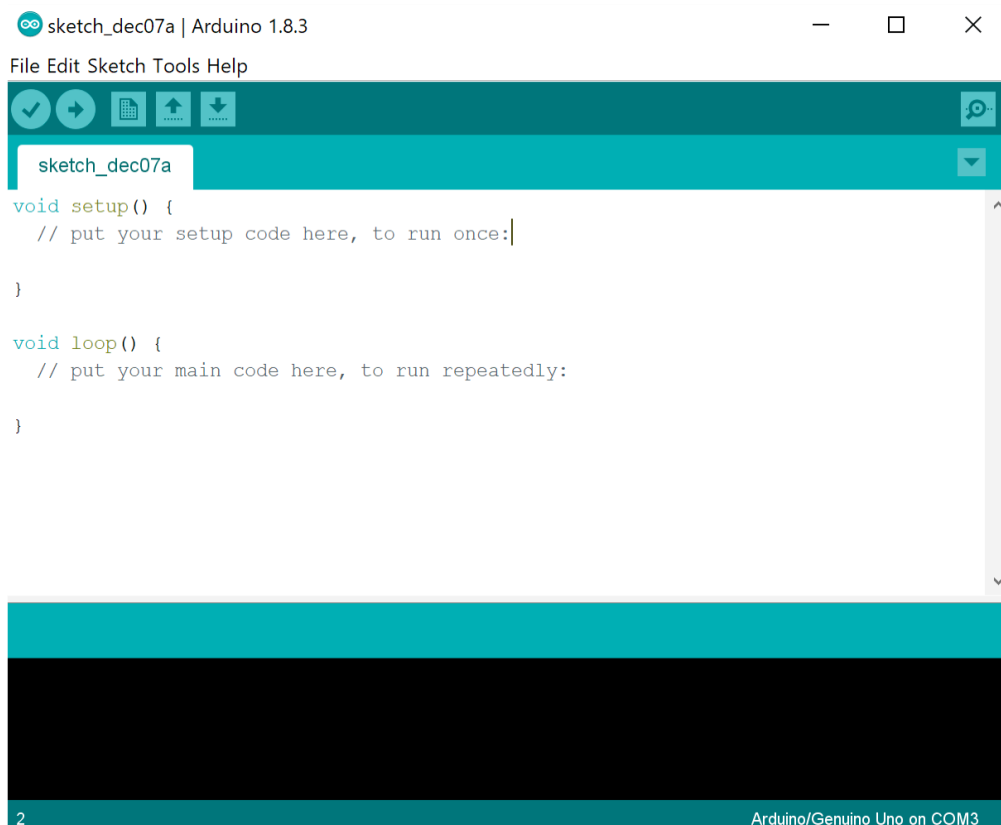


Εικόνα 2.13 : Το τροφοδοτικό του συστήματος

## 2.8 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ARDUINO

Για τον προγραμματισμό της πλατφόρμας Arduino έχει αναπτυχθεί μία εφαρμογή γραμμένη σε JAVA και διατίθεται για τα λειτουργικά Windows, Mac και Linux. Η εφαρμογή αυτή αποκαλείται Arduino IDE και για την συγγραφή προγραμμάτων στο συγκεκριμένο περιβάλλον χρησιμοποιείται η γλώσσα προγραμματισμού Wiring - Processing (C, C++). Τα προγράμματα που αναπτύσσει ο χρήστης ονομάζονται σκίτσα ή sketches και αποθηκεύονται ως αρχεία με επέκταση .ino. Για την μεταγλώττιση των προγραμμάτων από C, C++, στις κατάλληλες AVR εντολές της γλώσσας μηχανής, το IDE χρησιμοποιεί τα εργαλεία GNU toolchain και AVR Libc. Επίσης, με το εργαλείο avrdude, πραγματοποιείται η φόρτωση εκτελέσιμου κώδικα στην μνήμη Flash του μικροελεγκτή, που διαθέτει η πλατφόρμα Arduino. Το περιβάλλον αυτό, διαθέτει αρκετά έτοιμα παραδείγματα και βιβλιοθήκες, τα οποία είναι χρήσιμα για χρήστες, οι οποίοι δεν είναι εξοικειωμένοι με την ανάπτυξη εφαρμογών μικροελεγκτή.

Το περιβάλλον ανάπτυξης προγραμμάτων για το Arduino που παρουσιάζεται στην εικόνα 33, διαθέτει μια περιοχή επεξεργασίας κειμένου για τη συγγραφή του κώδικα, μια περιοχή μηνυμάτων, μια γραμμή εργαλείων με κουμπιά συντομεύσεων καθώς και ένα μενού επιλογών. Κατά την σύνταξη των προγραμμάτων, το περιβάλλον προγραμματισμού παρέχει στον χρήστη δυνατότητες αντιγραφής / επικόλλησης και αναζήτησης / αντικατάστασης κειμένου. Στην περιοχή μηνυμάτων, εμφανίζονται μηνύματα που σχετίζονται με τυχόν σφάλματα που προέκυψαν κατά τον συντακτικό έλεγχο ή την μεταγλώττιση του προγράμματος, μηνύματα επιβεβαίωσης μετά από την αποθήκευση ή φόρτωση του προγράμματος, καθώς και πληροφορίες που σχετίζονται με τον μικροελεγκτή, όπως το ποσοστό μνήμης που καταλαμβάνει ο κώδικας και τα διαθέσιμα δεδομένα. Στην κάτω δεξιά γωνία του περιβάλλοντος ανάπτυξης, εμφανίζεται το όνομα της πλατφόρμας που είναι συνδεδεμένη στον υπολογιστή (πχ. Arduino Uno) και η σειριακή θύρα που χρησιμοποιείται (πχ.COM3). Το μενού που υπάρχει στη γραμμή εργαλείων του Arduino IDE, επιτρέπει την δημιουργία νέων sketches, την αποθήκευση και το άνοιγμα υφιστάμενων sketches. Επίσης, παρέχονται επιλογές όπως ο έλεγχος και η φόρτωση των sketches στο Arduino. Τέλος, μέσω της επιλογής Serial monitor ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ενεργοποιήσει το παράθυρο του Serial monitor για την επιβεβαίωση της λειτουργίας της εφαρμογής του.









Εικόνα 2.14 : Το περιβάλλον Arduino IDE



## 2.8.1 ΟΙ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ARDUINO IDE

Το περιβάλλον Arduino IDE διαθέτει μια σειρά από εικονίδια συντομεύσεων στην γραμμή εργαλείων, τα οποία επιτρέπουν μια σειρά από ενέργειες, όπως ο έλεγχος του προγράμματος, η φόρτωση του εκτελέσιμου κώδικα, η δημιουργία ενός νέου sketch κλπ. Τα εικονίδια συντομεύσεων και η περιγραφή της λειτουργίας τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Εικονίδιο	Όνομα	Εξήγηση της λειτουργίας
	Επαλήθευση (Verify)	Ελέγχει το πρόγραμμα του χρήστη για τυχόν συντακτικά λάθη (Compile).
	Φόρτωση (Upload)	Μεταγλωττίζει το πρόγραμμά και φορτώνει τον παραγόμενο εκτελέσιμο κώδικα στην αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino.
	Νέο (New)	Δημιουργεί ένα νέο Sketch.
	Άνοιγμα (Open)	Παρουσιάζει ένα μενού με όλα τα σκίτσα στο προεπιλεγμένο φάκελο αποθήκευσης (Sketchbook) ώστε ο χρήστης να επιλέξει το επιθυμητό sketch
	Αποθήκευση (Save)	Αποθηκεύει το τρέχον sketch.
	Σειριακή οθόνη (Serial Monitor)	Ενεργοποιεί το Serial Monitor

Πινάκας 5 : Οι λειτουργίες της γραμμής συντομεύσεων του Arduino IDE.

Τέλος, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει κάποια από τις διαθέσιμες πρόσθετες επιλογές μέσω των πέντε υπο-μενού: Αρχείο (File), Επεξεργασία (Edit), Sketch, Εργαλεία (Tools), Βοήθεια (Help). Τα μενού αυτά έχουν ευαισθησία πλαισίου, δηλαδή μόνο τα στοιχεία που σχετίζονται με τις εργασίες που πραγματοποιούνται είναι ενεργοποιημένα.

## 2.8.2 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Η δομή του προγράμματος, το οποίο αναπτύσσεται στο περιβάλλον προγραμματισμού του Arduino, παρουσιάζεται στο πρόγραμμα 1. Όπως παρατηρείται, το πρόγραμμα αποτελείται από τρία βασικά μέρη, το πρώτο μέρος, όπου γίνεται η δήλωση των γενικών μεταβλητών (Global variables) και των συμπεριλαμβανόμενων βιβλιοθηκών. Το δεύτερο μέρος, όπου γίνονται οι απαραίτητες αρχικοποιήσεις (συνάρτηση setup), και το τρίτο μέρος όπου γράφεται το κυρίως πρόγραμμα (συνάρτηση loop).

*//δήλωση παγκοσμίων μεταβλητών*

```
Void setup()  
{  
//αρχικοποιήσεις  
}  
Void loop()  
{
```

```
//Κώδικας  
}
```

Πρόγραμμα 1 : Δομή του προγράμματος.

Όλα τα προγράμματα που γράφονται, πρέπει να είναι της παραπάνω μορφής και πρέπει οπωσδήποτε να περιλαμβάνει και τα τρία μέρη, ακόμα και αν σε κάποιο από αυτά δεν είναι γραμμένο κάποια δήλωση, αρχικοποίηση ή εντολή.

Για να γίνει κατανοητό κάποιο μέρος του προγράμματος ή κάποιες εντολές μέσα στο πρόγραμμα, υπάρχει η δυνατότητα να γραφτούν σχόλια ή κομμάτια κειμένου, που επεξηγούν την λειτουργία του προγράμματος. Το τμήμα του κώδικα που βρίσκεται μεταξύ των συμβόλων `"/*` και `*/` ή το κείμενο που βρίσκονται μετά από το σύμβολο `//` (πρόγραμμα 2), αποτελούν σχόλια του κώδικα και δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την μεταγλώττιση και την φόρτωση του εκτελέσιμου κώδικα στον μικροελεγκτή.

```
/* Analog input, analog output, serial output Reads an analog input pin, maps  
the result to a range from 0 to 255 and uses the result to set the pulsewidth  
modulation (PWM) of an output pin. Also prints the results to the serial monitor. This  
example code is in the public domain.  
*/
```

```
pinMode (ledPin, OUTPUT); // set the ledPin as output.
```

Πρόγραμμα 2 : Σχόλια

### 2.8.3 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ

Η δήλωση Void πριν από το όνομα της συνάρτησης (πχ setup), δηλώνει ότι αυτή η συνάρτηση δεν επιστρέφει κάποιο αποτέλεσμα. Τα τυχόν ορίσματα της συνάρτησης αναγράφονται μέσα στις παρενθέσεις που ακολουθούν το όνομα της συνάρτησης. Στην περίπτωση της συνάρτησης setup, δεν υπάρχουν ορίσματα και για τον λόγο αυτό μετά το όνομα της συνάρτησης, ακολουθούν μόνο οι παρενθέσεις. Ο κώδικας της συνάρτησης βρίσκεται μέσα σε αγκύλες και συχνά καλείται ως σώμα της συνάρτησης. Υπάρχουν συναρτήσεις, οι οποίες είναι έτοιμες και παρέχονται από την ομάδα σχεδιασμού του Arduino, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα ο χρήστης δημιουργήσει τις δικές του συναρτήσεις ανάλογα με τις ανάγκες του. Για την σωστή λειτουργία του προγράμματος που αναπτύσσεται με το Arduino IDE πρέπει να συμπεριλαμβάνονται οπωσδήποτε οι δυο βασικές συναρτήσεις, η συνάρτηση setup() και η συνάρτηση loop().

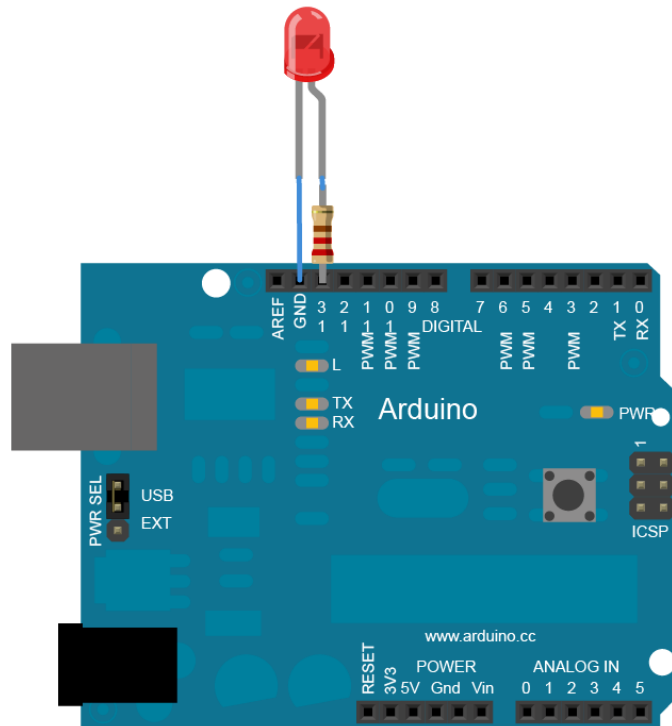
- **Συνάρτηση setup()**

Η συνάρτηση setup() εκτελείται στην αρχή του προγράμματος και μόνο την πρώτη φορά. Χρησιμοποιείται για τις αρχικοποιήσεις ιδιοτήτων, βιβλιοθηκών και διαφόρων μεταβλητών. Οι μεταβλητές που δηλώνονται στην συνάρτηση setup() δεν είναι προσβάσιμες από άλλες συναρτήσεις, συμπεριλαμβανομένης και της loop(). Στην συνάρτηση setup() πραγματοποιείται, επίσης, η αρχικοποίηση των συσκευών που είναι συνδεδεμένες με το Arduino όπως η οθόνη, κλπ.

- **Συνάρτηση loop()**

Η συνάρτηση loop() εκτελείται αμέσως μετά από την συνάρτηση setup(). Στην συνάρτηση loop() γράφεται το κύριο σώμα του προγράμματος. Όπως παρατηρείται και από το όνομα της συνάρτησης, ο κώδικας που περιλαμβάνεται σε αυτή την συνάρτηση, επαναλαμβάνεται συνεχώς. Επομένως, ο μικροελεγκτής εκτελεί την συνάρτηση loop, μέχρι να πατηθεί το κουμπί RESET ή να διακοπεί η τάση τροφοδοσίας του μικροελεγκτή.

Παρακάτω ακολουθεί ένα παράδειγμα (πρόγραμμα 3), που περιλαμβάνει όλες τις παραπάνω βασικές έννοιες. Στο sketch αυτό, υλοποιείται μια εφαρμογή που ανάβει και σβήνει ένα led κάθε ένα δευτερόλεπτο. Τα αντικείμενα που είναι απαραίτητα για την υλοποίηση του παραδείγματος, είναι μια πλακέτα Arduino, ένα LED και μια αντίσταση όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 34.



Εικόνα 2.15: Ένα Arduino Uno συνδεδεμένο με ένα led.

```
/* Example:  
Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.  
*/  
void setup()// the setup function runs once when you press reset or power the board  
{  
  pinMode(13, OUTPUT); // initialize digital pin 13 as an output  
}  
void loop()// the loop function runs over and over again forever  
{  
  digitalWrite(13, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)  
  delay(1000);           // wait for a second  
  digitalWrite(13, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
```

```
delay(1000);           // wait for a second
                        }
```

### Πρόγραμμα 3: παράδειγμα blink

Εδώ, παρατηρείται, ότι έχει ορισθεί ο ακροδέκτης 13, για να χρησιμοποιηθεί ως έξοδος, μέσω της συνάρτησης `pinMode(13, OUTPUT)`. Αυτό συμβαίνει μέσα στην συνάρτηση `setup()`, η οποία όπως αναφέρθηκε, εκτελείται μόνο μια φορά όταν ξεκινάει το Arduino. Παρακάτω, ορίζεται η συνάρτηση `loop()`, στην οποία παρατηρείται ανάθεση στον ακροδέκτη 13 της τάσης των 5V με την συνάρτηση `digitalWrite(13, HIGH)`. Με την χρήση της συνάρτησης `delay(1000)` διατηρείται η τάση στον ακροδέκτη 13, για ένα δευτερόλεπτο. Με την συνάρτηση `digitalWrite(13, LOW)` αφαιρείται από τον ακροδέκτη η τάση 5V, για επίσης ένα δευτερόλεπτο. Η συνάρτηση `loop()` εκτελείται διαρκώς, για όση ώρα είναι σε λειτουργία η πλακέτα του Arduino.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

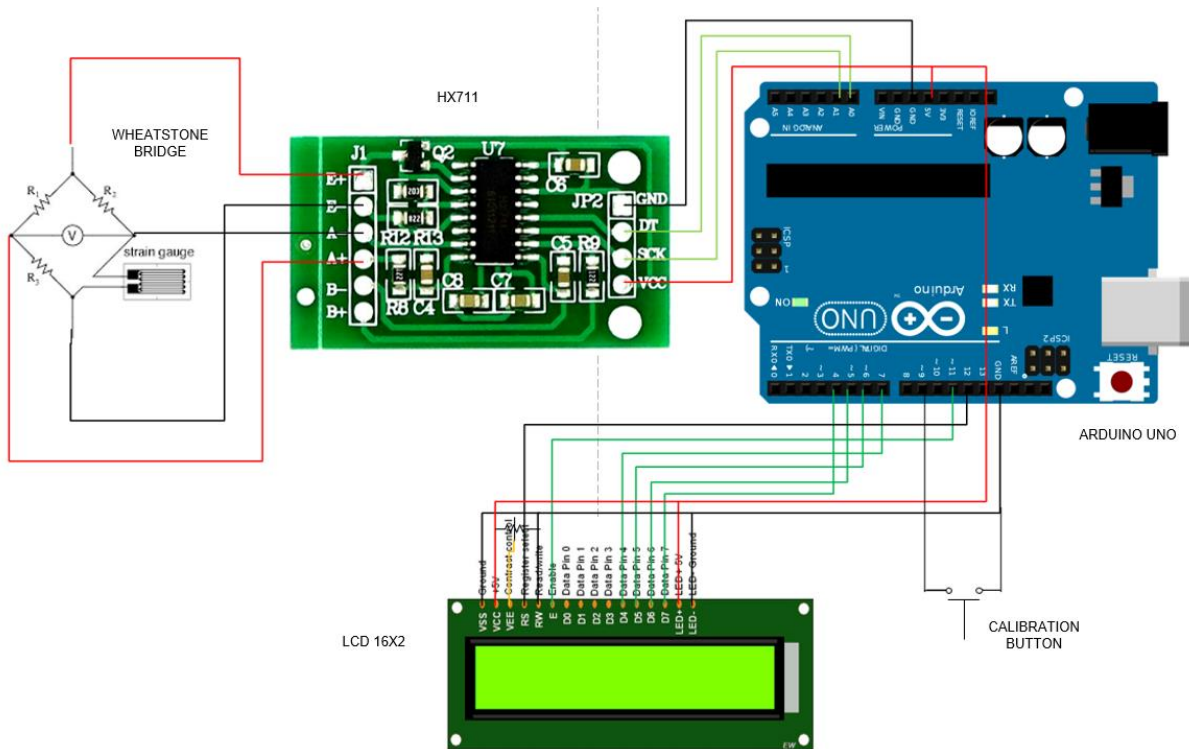
Το συγκεκριμένο όργανο μέτρησης της παραμόρφωσης, που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας, έχει την δυνατότητα να υπολογίζει και να εμφανίζει στην LCD οθόνη που διαθέτει το σύστημα, την επιμήκυνση που παρουσιάζει το δοκίμιο, όπου είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας μέτρησης. Επιπλέον, έχει την δυνατότητα αρχικοποίησης ή μηδενισμού του συστήματος, με σκοπό την έναρξη της νέας μέτρησης και την απαλλαγή από το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται αυτόματα από το σύστημα, πατώντας το push button που διαθέτει. Κατά την εκτέλεση των διαδικασιών αρχικοποίησης και μέτρησης, το σύστημα εμφανίζει το κατάλληλο μήνυμα στην οθόνη, με σκοπό να ενημερώνει τον χρήστη για την λειτουργία που εκτελείται.



Εικόνα 3.1 : Το ολοκληρωμένο σύστημα

Για την επίτευξη των παραπάνω λειτουργιών, αρχικά αναπτύχθηκε με το Arduino IDE πρόγραμμα που εκτελεί ο μικροελεγκτής ATmega328 της πλατφόρμας Arduino. Το πρόγραμμα που γράφτηκε, αναλαμβάνει την λήψη των μετρήσεων από τον αισθητήρα και την πραγματοποίηση των απαιτούμενων υπολογισμών, σύμφωνα με το θεριστικό υπόβαθρο. Τέλος, τα παραπάνω αποτελέσματα των υπολογισμών και διαδικασιών παρουσιάζονται στην οθόνη του συστήματος.

### 3.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

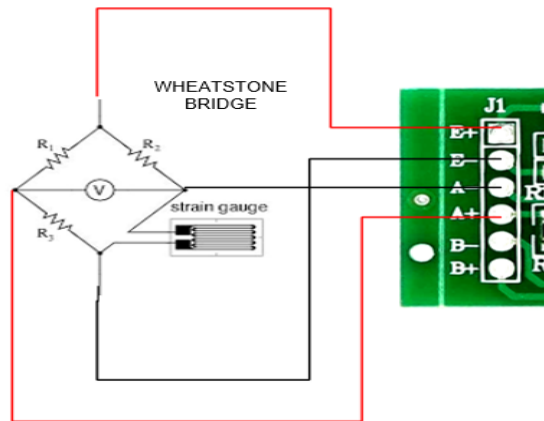


Εικόνα 3.2: Η τοπολογία της διάταξης που υλοποιήθηκε

Στην εικόνα 3.2, φαίνεται η τοπολογία της διάταξης που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Η υλοποίηση έγινε αξιοποιώντας την ιδιότητα του ηλεκτροεπιμικηνοσιόμετρου. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει την ιδιότητα να αλλάζει την ωμική του αντίσταση, όταν πάνω σε αυτόν ασκείται κάποια δύναμη και το αναγκάζει να παραμορφώνεται. Η μεταβολή της αντίστασης μετατρέπεται σε μεταβολή τάσης, μέσω της γέφυρας Wheatstone. Η ανίχνευση της συγκριμένης αναλογικής μεταβολής πραγματοποιείται από τον μετατροπέα HX711. Στην συνέχεια, μετατρέπεται σε ψηφιακά δεδομένα, τα οποία στέλνονται στον μικροελεγκτή στην πλατφόρμα Arduino. Ο μικροελεγκτής πραγματοποιεί τους απαραίτητους υπολογισμούς και εμφανίζει τα επιθυμητά αποτελέσματα στην οθόνη του συστήματος.

#### 3.2.1 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ WHEATSTONE

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3, ο αισθητήρας μέτρησης συνδέεται σε σειρά σε έναν από τους τέσσερις κλάδους της γέφυρας Wheatstone, ενώ στους άλλους τρεις κλάδους είναι συνδεδεμένοι 3 αντιστάσεις ακρίβειας, οι οποίοι φέρουν την ίδια τιμή με την τιμή του αισθητήρα.

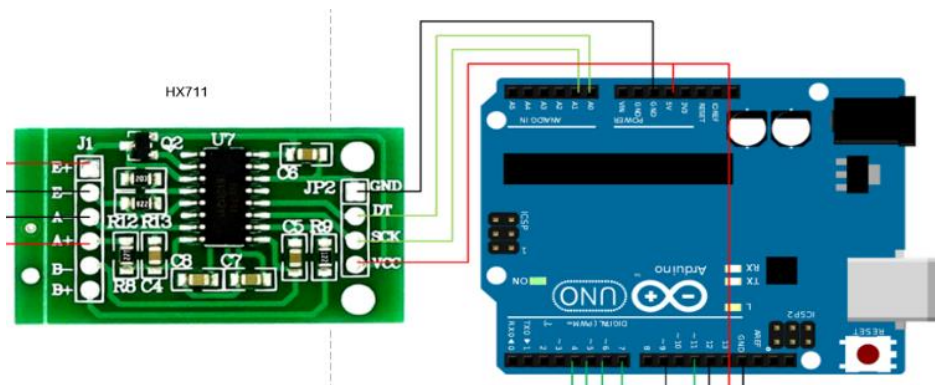


Εικόνα 3.3: Η συνδεσμολογία της γέφυρας Wheatstone με τον μετατροπέα HX711

Στους δυο ακροδέκτες της γέφυρας Wheatstone εφαρμόζεται μια σταθερή συνεχόμενη τάση, η οποία παρέχεται από τους ακροδέκτες “E+” και “E-” του μετατροπέα HX711. Στους υπόλοιπους δυο ακροδέκτες της γέφυρας πραγματοποιείται η μέτρηση της μεταβολής της τάσης. Η μεταβολή αυτή προκύπτει από την μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα και μετριέται από τον μετατροπέα HX711 μέσω των ακροδεκτών “A+” και “A-”.

### 3.2.2 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ HX711 ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ARDUINO

Στην εικόνα 3.4, φαίνεται η ακριβής συνδεσμολογία του μετατροπέα HX711 με την πλατφόρμα Arduino .



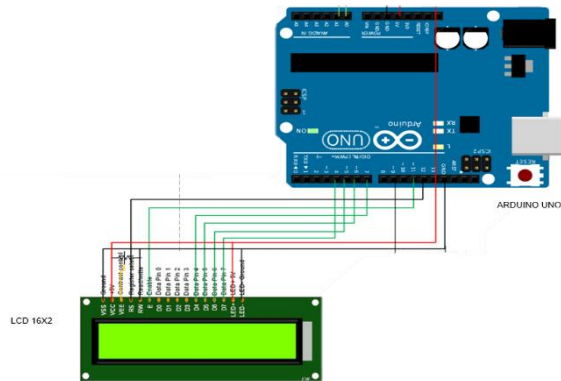
Εικόνα 3.4 : Η συνδεσμολογία του μετατροπέα HX711 με την πλατφόρμα Arduino

Για την λειτουργία του μετατροπέα απαιτείται μια σταθερή συνεχόμενη τάση της τάξης των 5 Volt. Η τάση αυτή, παρέχεται από την πλατφόρμα Arduino μέσω του ακροδέκτη “5V”, η οποία συνδέεται στον ακροδέκτη “VCC” του μετατροπέα HX711. Για την λειτουργία του ολοκληρωμένου κυκλώματος, που είναι τοποθετημένο στον HX711, απαιτείται η παροχή του ρολογιού χρονισμού, η οποία γίνεται μέσω του ακροδέκτη “SCK”, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στον ακροδέκτη “A1” της πλατφόρμας που χρησιμοποιείται. Για την μεταφορά των ψηφιακών δεδομένων από τον HX711 στον μικροελεγκτή, χρησιμοποιείται ο ακροδέκτης “DT” και συνδέεται στον

ακροδέκτη “A0”. Τέλος, συνδέονται οι γειώσεις των δυο κυκλωμάτων μεταξύ τους, δηλαδή το “GND” με το “GND” .

### 3.2.3 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ LCD ΟΘΟΝΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ARDUINO

Στην εικόνα 3.5, παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της LCD οθόνης με την πλατφόρμα που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 3.5 : Η συνδεσμολογία της LCD οθόνης με την πλατφόρμα Arduino

Η συνδεσμολογία των ακροδεκτών των δυο συσκευών παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα και η αντιστοιχία τους φαίνεται στον πίνακα 6.

LCD Pin	Arduino Pin
LCD VSS Pin	Arduino GND Pin
LCD VDD Pin	Arduino 5V Pin
LCD V0 Pin	Potentiometer
LCD RS Pin	Arduino 12 Pin
LCD RW Pin	Arduino GND Pin
LCD E Pin	Arduino 11 Pin
LCD D0 Pin	-
LCD D1 Pin	-
LCD D2 Pin	-
LCD D3 Pin	-
LCD D4 Pin	Arduino 7 Pin
LCD D5 Pin	Arduino 6 Pin
LCD D6 Pin	Arduino 5 Pin
LCD D7 Pin	Arduino 4 Pin
LCD A Pin	Arduino 5V Pin
LCD K Pin	Arduino GND Pin

Πίνακας 6 : Η αντιστοιχία των ακροδεκτών της LCD οθόνης με της πλατφόρμα Arduino

Οι ακροδέκτες “ VSS” και “VDD” χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία της οθόνης, ενώ οι ακροδέκτες “A” και “K” χρησιμοποιούνται για την φωτεινότητα της. Τέλος, οι υπόλοιποι συνδεδεμένοι ακροδέκτες χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και παρουσίαση δεδομένων.



### 3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η τιμή της παραμόρφωσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση η οποία περιγράφεται και στην παράγραφο 2.6.

$$\varepsilon = 4 \frac{V_o}{V_s} \frac{1}{S}$$

Η τιμή της τάσης  $V_o$ , που εφαρμόζεται στους δυο ακροδέκτες της γέφυρας είναι ίση με 3,77V. Η ευαισθησία του αισθητήρα είναι δεδομένη από τον κατασκευαστή και έχει τιμή  $GF = 2$ , ενώ η τιμή του  $V_s$  σε κατάσταση ηρεμίας (όταν δεν ασκούνται δυνάμεις στο δοκίμιο που είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας), θεωρητικά, σε ιδανικές συνθήκες θα πρέπει να είναι 0 V, αφού οι 3 αντιστάσεις και ο αισθητήρας έχουν ίδια τιμή, άρα η γέφυρα βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας και το  $V_s$  θα πρέπει να είναι 0V. Στην πραγματικότητα όμως, οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές και υπάρχουν έστω και πολύ μικρές διαφορές μεταξύ των αντιστάσεων και του αισθητήρα. Ακόμα και μια διαφορά θερμοκρασίας στο χώρο, θα οδηγούσε σε τέτοιες μικροδιαφορές και όπως είναι γνωστό, η γέφυρα Wheatstone χαρακτηρίζεται από την μεγάλη ευαισθησία με αποτέλεσμα η τιμή της τάσης  $V_s$  σε κατάσταση ηρεμίας, να μην είναι πάντα μηδενική. Επίσης, η διακριτική ικανότητα του μετατροπέα, όπως θα δούμε στην συνέχεια, είναι της τάξης των nanoVolt, έτσι η παραμικρή μεταβολή της τάσης θα είναι αισθητή. Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, το σύστημα κατά την ενεργοποίηση του υπολογίζει το σφάλμα αυτό και στην συνέχεια την αφαιρεί από της κανονικές μετρήσεις.

#### Υπολογισμός της επιμήκυνσης

Μετρώντας την τιμή της τάσης στην έξοδο της γέφυρας Wheatstone για διάφορες περιπτώσεις παραμόρφωσης, διαπιστώθηκε, ότι ανάλογα με την παραμόρφωση του δοκιμίου αυτή, κυμαίνεται από +3.6 με -3.6.mV (εύρος 7.214mV) και μετριέται σε ψηφιακή μορφή από τον μετατροπέα HX711. Ο μετατροπέας αυτός, έχει διακριτική ικανότητα 24bits, δηλαδή  $2^{24} = 16,777,215$ . Άρα, η ελάχιστη μεταβολή της τάσης που μπορεί να διακρίνει για το παραπάνω εύρος τιμών είναι:

$$7.214\text{mV} / 16,777,216 = 0.43 \text{ nanoVolt}$$

Επειδή ο μετατροπέας δεν παίρνει αρνητικές ψηφιακές τιμές, αλλά για αρνητικές τιμές της τάσης, αντιστοιχεί τις τιμές από 0-8388607 και για θετικές τιμές τάσης, αντίστοιχα, από 8388607 -16777215.

Άρα, για μια δύναμη στο δοκίμιο, το οποίο προκαλεί μεταβολή στην αντίσταση του αισθητήρα και αυτή με την σειρά της προκαλεί μεταβολή της τάσης εξόδου της γέφυρας κατά 0,5mV. Η λειτουργία που εκτελεί το σύστημα για τον υπολογισμό της επιμήκυνσης είναι η εξής:

Μετατροπή της  $V_o$  από τον μετατροπέα σε ψηφιακή μορφή:

Αφού θεωρήσαμε δεδομένο ότι η  $V_o = +0,5\text{mV}$  και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι 0, τότε ο HX711 θα διαβάξει την τιμή:

$$0,5\text{mV} / 0.43 \text{ nV} = 1162790 \rightarrow 1162790 + 8388607 = 9551397$$

Άρα, ο HX711 θα μεταφέρει στον Arduino την τιμή 9551397.

Υπολογισμός της πραγματικής τιμής της τάσης (Vo):

$$V_o = ((9551397 - (8388607 + \text{σφάλμα μόνιμης κατάστασης})) \times 0.43 \text{ mV}) = 0.5 \text{ mV}$$

Υπολογισμός της επιμήκυνσης :

Αφού:  $V_s = 3.77\text{V}$  ,  $V_o = 0.5\text{mV}$  ,  $GF = 2$ , τότε σύμφωνα με τον τύπο

$$\epsilon = 4 \frac{V_o}{V_s} \frac{1}{GF}, \text{ έχουμε:}$$

$$\epsilon = 4(0.5\text{mV}/3.77\text{V}) \cdot (1/2) \cdot (1\text{V}/1000\text{mV}) = 0.0002652 \text{ Strain} = 265.2 \mu\text{Strain}$$

Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών, το σύστημα στέλνει τις τιμές που υπολόγισε στην LCD οθόνη χαρακτήρων 2x16.

### 3.4 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ATmega328

Στην συνέχεια του κεφαλαίου, ακολουθεί η ανάλυση του προγράμματος που αναπτύχθηκε και φορτώθηκε στον μικροελεγκτή ATmega328 της πλατφόρμας Arduino Uno. Για την καλύτερη κατανόηση, το πρόγραμμα χωρίζεται σε «διαδικασίες», οι οποίες καλούνται κάθε φορά, για να πραγματοποιήσουν μετρήσεις, υπολογισμούς κλπ. Για κάθε διαδικασία, αντιστοιχεί μια παράγραφος, στην οποία θα πραγματοποιείται η ανάλυση και η περιγραφή της.

#### **Δήλωση συμπεριλαμβανόμενων βιβλιοθηκών και μεταβλητών.**

Αρχικά, στο πρόγραμμα που φορτώθηκε στον μικροελεγκτή της πλατφόρμας Arduino Uno, γίνεται δήλωση των βιβλιοθηκών που χρησιμοποιούνται. Στην συνέχεια, γίνεται η δήλωση των σταθερών και των γενικών μεταβλητών, που χρησιμοποιούνται στο κώδικα. Η βιβλιοθήκη, η οποία συμπεριλαμβάνεται στο πρόγραμμα, είναι η «LiquidCrystal.h» και αξιοποιείται για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με την LCD οθόνη του συστήματος. Στην συνέχεια, γίνεται ο ορισμός των ακροδεκτών του μικροελεγκτή, οι οποίοι αξιοποιούνται από το σύστημα μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, οι ακροδέκτες A0 και A1 αξιοποιούνται για την επικοινωνία με το μετατροπέα HX711. Ο ακροδέκτης D9 χρησιμοποιείται για να ενεργοποιήσει την διαδικασία μηδενισμού του σφάλματος μόνιμης κατάστασης και ελέγχεται από τον διακόπτη που διαθέτει το σύστημα. Τέλος, ορίζονται οι μεταβλητές που αξιοποιούνται από το πρόγραμμα.

```
#include <LiquidCrystal.h>           // Liquid Crystal LCD library
LiquidCrystal lcd(12,11,7, 6, 5, 4); // Liquid Crystal LCD Pin Initialisation

//*****Pin Initialisation*****

#define DT A0                         // Data Read pin
```

```

#define SCK A1                // Clock pin
#define sw 9                  // Switch pin for calibration
long sample=0;               // Sample for calibrating process
//float val=0;
long count=0;                // Instant Reading value

```

### Η διαδικασία που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις ( readCount(void))

Η διαδικασία αυτή, εκτελείται κάθε φορά που χρειάζεται να ληφθεί μια νέα μέτρηση από τον αισθητήρα. Περιλαμβάνει τις εντολές που χρειάζονται για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με το HX711 και τις εντολές για την πραγματοποίηση της μέτρησης. Η διαδικασία επικοινωνίας του μετατροπέα με το Arduino περιγράφεται στην παράγραφο. Τέλος, αποθηκεύει τα δεδομένα σε μια μεταβλητή, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το κυρίως πρόγραμμα για την πραγματοποίηση των απαραίτητων υπολογισμών.

```

//*****Sensor Reading Value Routine*****//

```

```

unsigned long readCount(void)
{
  unsigned long Count;
  unsigned char i;
  pinMode(DT, OUTPUT);
  digitalWrite(DT,HIGH);
  digitalWrite(SCK,LOW);
  Count=0;
  pinMode(DT, INPUT);
  while(digitalRead(DT));
  for (i=0;i<24;i++)
  {
    digitalWrite(SCK,HIGH);
    Count=Count<<1;
    digitalWrite(SCK,LOW);
    if(digitalRead(DT))
      Count++;
  }
  digitalWrite(SCK,HIGH);

```

```
Count=Count^0^800000;  
digitalWrite(SCK,LOW);  
return(Count);
```

### Η συνάρτηση setup

Στην συνάρτηση setup πραγματοποιείται ο ορισμός των ακροδεκτών που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι ή έξοδοι. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση της οθόνης του συστήματος και στην οθόνη εμφανίζεται το μήνυμα «Strain Measurement». Τέλος, καλείται για εκτέλεση η διαδικασία του μηδενισμού του σφάλματος μόνιμης κατάστασης του συστήματος, με σκοπό το σύστημα κάθε φορά που ενεργοποιείται, να έχει μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

```
//*****General Initializations and set up*****  
void setup()  
{  
  Serial.begin(9600);           // Serial port init  
  pinMode(SCK, OUTPUT);        // Clock pin set up  
  pinMode(sw, INPUT_PULLUP);   // Switch pin set up  
  lcd.begin(16, 2);            // LCD Screen start  
  lcd.print(" Strain ");       // LCD print  
  lcd.setCursor(0,1);  
  lcd.print(" Measurement ");  
  delay(1000);  
  lcd.clear();  
  calibrate();  
}
```

### Η συνάρτηση «loop»

Στην συνάρτηση loop, έχει γραφτεί το μέρος του προγράμματος, το οποίο εκτελείται επανειλημμένα από τον μικροελεγκτή. Αρχικά, καλείται η διαδικασία που πραγματοποιεί την μέτρηση από τον αισθητήρα, μέσω του μετατροπέα HX711. Στην συνέχεια, πραγματοποιούνται οι πράξεις και οι υπολογισμοί, που απαιτούνται για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης. Το αποτέλεσμα των υπολογισμών εμφανίζεται στην οθόνη. Τέλος, γίνεται έλεγχος για ενεργοποίηση ή μη της διαδικασίας του καλιμπραρίσματος και μηδενίζονται οι απαιτούμενες μεταβλητές με σκοπό να είναι έτοιμες για την επόμενη μέτρηση.

```

//*****Main program*****//

void loop()
{
  count = readCount();           // reciveing the sensor value from the routine
  "readCount()"
  long val1=(count-sample);      // error deleting
  float vout=(val1*0.43);        // Vout calculating (in nVolts ) 1=0.43nV
  float vs=3.77;                // Vs is in Volt
  //int e=(vout/3.77)*0.002;     //microstrain (float
  e=4*(vout/vs)*(1/2)*(1V/1000mVolt)
  lcd.setCursor(0,0);           // LCD print the Data
  lcd.print("Measured Strain");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("  ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(e);
  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print("microstrain");

  if(digitalRead(sw)==0)       // If the switch is presserd
  {                             // Start Calibrating procedure
    sample=0;
    count=0;
    calibrate();
  }
}

```

### **Η διαδικασία του καλιμπραρίσματος (void calibrate())**

Η διαδικασία αυτή, εκτελείται κάθε φορά, κατά την διάρκεια του ξεκινήματος του συστήματος, με σκοπό να αφαιρέσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Δηλαδή, μετρά την τιμή του σφάλματος και την αποθηκεύει σε μια μεταβλητή. Η τιμή αυτή, αφαιρείται από την κανονική μέτρηση στο κυρίως πρόγραμμα και έτσι πραγματοποιείται ο μηδενισμός του σφάλματος μόνιμης κατάστασης. Για το λόγο αυτό, συνιστάται κάθε φορά που το σύστημα θέτεται σε λειτουργία, το δοκίμιο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση να βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Η διαδικασία αυτή, εκτελείται επίσης όταν πατηθεί το κουμπί που διαθέτει το σύστημα.

```
/**Calibrating procedure**/
```

```
void calibrate()
{
    // LCD Print "calibrating"
    lcd.clear();
    lcd.print("Calibrating...");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Please Wait...");
    for(int i=0;i<100;i++) // Start sampling for calibrating
    {
        count=readCount(); // Add sample values
        sample+=count;
    }
    sample/=100;
    count=0;
    lcd.clear();
}
```

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

#### 4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Το ολοκληρωμένο σύστημα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, αποτελείται από ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος και τον αισθητήρα μέτρησης. Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, έχει φορτωθεί στον μικροελεγκτή και διατηρείται στη μνήμη του, οπότε δεν χρειάζεται να φορτωθεί κάθε φορά που απενεργοποιείται το σύστημα. Το γεγονός αυτό, κάνει το συγκεκριμένο όργανο εύκολο στη χρήση του, καθώς, το μόνο που χρειάζεται είναι απλώς και μόνο να συνδεθεί το τροφοδοτικό σε κάποια παροχή ρεύματος και είναι έτοιμο για χρήση. Εάν μετά από μια μέτρηση το σημείο ηρεμίας του συστήματος αλλάξει, τότε με το πάτημα του αντίστοιχου κουμπιού το σύστημα επανέρχεται στην κατάσταση ηρεμίας και είναι έτοιμο για την επόμενη μέτρηση.



Εικόνα 4.1 : Η τελική μετρητική διάταξη

Όταν το σύστημα ενεργοποιηθεί, αρχικά στην οθόνη εμφανίζεται το μήνυμα “Strain Measurement” (εικόνα 4.2 ), που παραμένει για 2 δευτερόλεπτα. Στο χρονικό διάστημα αυτό, ο μικροελεγκτής πραγματοποιεί κάποιες αρχικοποιήσεις για τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται και προετοιμάζεται για την επόμενη λειτουργία.



Εικόνα 4.2 : Η εκτέλεση της πρώτης διαδικασίας

Όπως έχει προαναφερθεί, την πρώτη φορά που ενεργοποιείται το σύστημα, αυτόματα εκτελεί και την διαδικασία καλιμπραρίσματος, με σκοπό να μηδενίσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Όταν εκτελείται η διαδικασία αυτή, στην οθόνη εμφανίζεται το μήνυμα «Calibrating ... Please Wait...». Για την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας απαιτούνται κάποια δευτερόλεπτα. Ο μικροελεγκτής πραγματοποιεί 100 μετρήσει και υπολογίζει το μέσο όρο των τιμών αυτών, που αντιστοιχεί στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Ύστερα, το σφάλμα μόνιμης κατάστασης αφαιρείται από την κανονική μέτρηση. Με το μήνυμα «Calibrating ... Please Wait...» (Εικόνα 4.3), ο χρήστης ενημερώνεται για την λειτουργία που εκτελεί ο μικροελεγκτής εκείνη την στιγμή και αναμένει μέχρις ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία.



Εικόνα 4.3 : Η εκτέλεση της διαδικασίας του καλιμπραρίσματος.



Μετά την εκτέλεση της διαδικασίας του καλιμπραρίσματος, ο μικροελεγκτής μεταβαίνει στην κανονική λειτουργία μετρήσεων. Στο σημείο αυτό, το σφάλμα έχει υπολογιστεί και έχει αφαιρεθεί από την κανονική μέτρηση. Επομένως, το αποτέλεσμα του «Measured Strain» σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να είναι μηδενικό.

Η παραπάνω περίπτωση παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4, όπου το σύστημα μέτρησης βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας και έτοιμο να πραγματοποιήσει κάποια μέτρηση.



Εικόνα 4.4 : Το σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας

Το επιμηκυσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εφαρμογή, έχει την δυνατότητα να μετρήσει θετικές και αρνητικές τιμές της επιμήκυνσης. Το πρόσημο της επιμήκυνσης εξαρτάται από τις δυνάμεις που ασκούνται στο δοκίμιο, που είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας μέτρησης και τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Για παράδειγμα, στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η περίπτωση, που η ασκούμενη δύναμη στο δοκίμιο το έχει οδηγήσει σε επιμήκυνση 15 microstrain.



Εικόνα 4.5 : Το σύστημα σε κανονική λειτουργία με θετική μέτρηση.

Όταν στο δοκίμιο εφαρμοστεί κάποια δύναμη αντίθετης φοράς με την προηγούμενη περίπτωση, τότε το όργανο μέτρησης το αντιλαμβάνεται και ως εκ τούτου, το αποτέλεσμα της παραμόρφωσης θα έχει τιμές αρνητικές. Μια τέτοια περίπτωση, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6, στην οποία η δύναμη που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, έχει αντίθετη φορά από αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.5. Σε αυτή την περίπτωση, το όργανο μέτρησης υπολογίζει την επιμήκυνση, η οποία έχει τιμή 17microstrain και αντίθετη φορά με την προηγούμενη μέτρηση.



Εικόνα 4.6 : Το σύστημα σε κανονική λειτουργία με αρνητική μέτρηση.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί και η δυνατότητα επιπρόσθετης μέτρησης παραμόρφωσης, όταν το δοκίμιο είναι ήδη παραμορφωμένο. Δηλαδή, εάν στο δοκίμιο ασκείται δύναμη «Α», που έχει παραμορφώσει το δοκίμιο κατά 15 microstrain

και στην συνέχεια ασκηθεί κάποια επιπλέον δύναμη «B» και χρειάζεται να μετρηθεί η παραμόρφωση που προκλήθηκε, μόνο από την δύναμη «B» (από το ήδη παραμορφωμένο σημείο λόγω της δύναμης «A»), τότε το όργανο μέτρησης είναι σε θέση να εκτελεί τέτοια μέτρηση. Σε αυτή την περίπτωση, αρχικά θα πρέπει να καταγραφεί η παραμόρφωση από την δύναμη «A», στην συνέχεια θα πρέπει να πατηθεί το κουμπί καλιμπραρίσματος (άρα η τιμή της παραμόρφωσης από την δύναμη «A» θα αφαιρεθεί), και ύστερα να ασκηθεί η δύναμη «B». Έτσι το αποτέλεσμα που θα εμφανιστεί στην οθόνη, θα αντιστοιχεί στην παραμόρφωση του δοκιμίου, η οποία οφείλεται αποκλειστικά στην δύναμη «B».

## **4.2 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ**

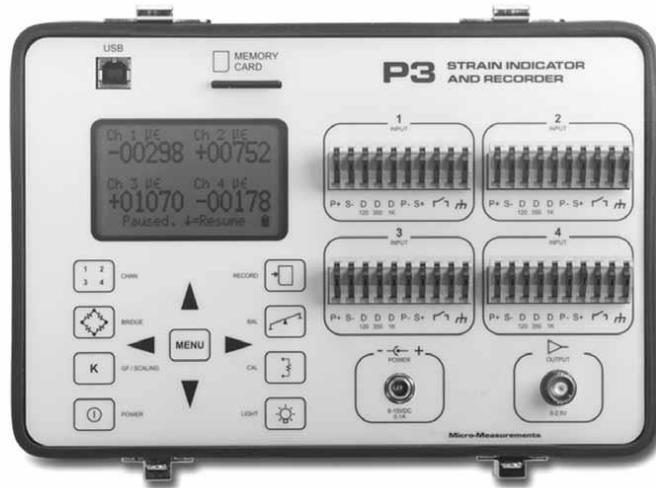
Για την κατασκευή των οργάνων μέτρησης, απαιτείται η καθόλα στήριξής τους σε κάποιες θεωρίες, οι οποίες όμως, δεν φέρουν πάντοτε τα αναμενόμενα αποτελέσματα που έχουν συλλογιστεί στο θεωρητικό υπόβαθρο και αυτό, διότι η πράξη έρχεται και τις διαψεύδει. Το αποτέλεσμα αυτό, προκύπτει, είτε από το γεγονός ότι η θεωρία ήταν από τη βάση της ελλιπής, είτε από τη παράκαμψη κάποιων βασικών στοιχείων της. Ως εκ τούτου, οι έγκυρες θεωρίες είναι εκείνες, οι οποίες έχουν επαληθευτεί και γνωρίζουμε επακριβώς τα αποτελέσματά τους.

Το ίδιο ισχύει και με το όργανο μέτρησης παραμορφώσεων που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, το οποίο, παρόλο που είναι σε θέση να μετράει και να εμφανίζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων, αυτό δεν μας οδηγεί και στο συμπέρασμα, ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι και αξιόπιστα. Επομένως, η επιβεβαίωση των μετρήσεων είναι μια διαδικασία, η οποία όχι μόνο θα εξακριβώνει την αξιοπιστία του οργάνου, αλλά συνάμα θα αναδεικνύει το ποσοστό του σφάλματος μετρήσεων για διάφορες περιπτώσεις.

Για την επιβεβαίωση των μετρήσεων που δίνει η συσκευή μέτρησης παραμορφώσεων, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, αντίστοιχες μετρήσεις πάρθηκαν, χρησιμοποιώντας μια εμπορική συσκευή μέτρησης παραμορφώσεων, της οποίας η ακρίβεια θεωρείται αποδεκτή.

### **4.2.1 Η ΣΥΣΚΕΥΗ STRAIN INDICATOR AND RECORDER P3.**

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε, για την επιβεβαίωση των μετρήσεων, είναι η «Strain Indicator and Recorder P3», της εταιρίας Vishay και η μπροστινή όψη της συγκεκριμένης συσκευής παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7. Είναι ένα φορητό όργανο που λειτουργεί με μπαταρία και έχει δυνατότητα μέτρησης, τεσσάρων εισόδων ταυτόχρονα. Η συσκευή αυτή, είναι σχεδιασμένη για χρήση σε μεγάλη ποικιλία φυσικών δοκιμών και εφαρμογών μέτρησης.



Εικόνα 4.7 : Η επάνω όψη της συσκευής Strain Indicator and Recorder P3.

Το P3 διαθέτει ψηφιακό καταγραφικό δεδομένων και για την εμφάνιση των απαιτούμενων πληροφοριών, χρησιμοποιεί μια μεγάλη LCD οθόνη. Η σύνδεση του αισθητήρα με την συσκευή γίνεται μέσω μπλοκ ακροδεκτών, που διαθέτει η ίδια. Ο ρυθμός καταγραφής δεδομένων μπορεί να ρυθμιστεί από τον χρήστη, με τη μέγιστη ταχύτητα καταγραφής να φτάνει έως μια καταγραφή ανά κανάλι, το δευτερόλεπτο.

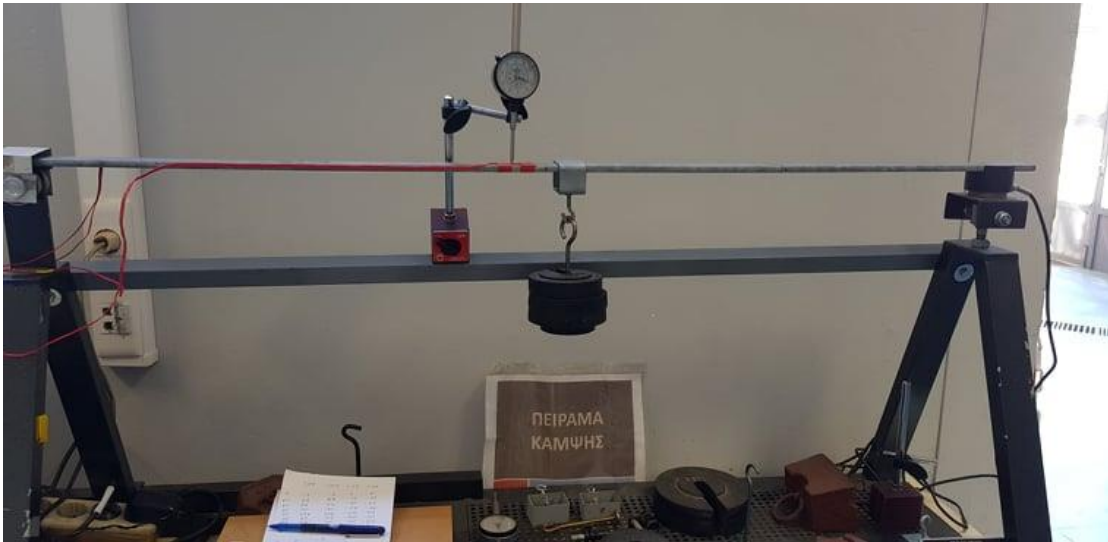


Εικόνα 4.8: Η συσκευή Strain Indicator and Recorder P3.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποθηκεύονται σε αποσπώμενο μέσο αποθήκευσης και μεταφέρονται μέσω USB σε κεντρικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων βασίζονται σε ένα πολύ σταθερό κύκλωμα μέτρησης, το οποίο μπορεί να πραγματοποιεί μετρήσεις ακρίβειας  $\pm 0,1\%$  και με διακριτική ικανότητα 1 microstrain.

#### 4.2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Αρχικά, ενεργοποιήθηκε η συσκευή μέτρησης Strain Indicator and Recorder P3 και στην συνέχεια, συνδέθηκαν οι διαθέσιμοι αισθητήρες μέτρησης στα κανάλια 1,2,3 και 4 της συσκευής. Αναφέρεται, ότι οι αισθητήρες μέτρησης είναι τοποθετημένοι σε μια αμφιέριστη δοκό, η οποία δέχεται εγκάρσια δύναμη. Η ασκούμενη δύναμη θα έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση της δοκού (εικόνα 4.9)



Εικόνα 4.9

Για τη μέτρηση της επιμήκυνσης στην άνω και κάτω επιφάνεια της δοκού, έχουν τοποθετηθεί τέσσερα ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρα (δύο στην άνω επιφάνεια και δύο στην κάτω), περίπου στο μέσο του μήκους της δοκού. Οι μετρήσεις από τα ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρα αυτά παίρνονται, χρησιμοποιώντας την εμπορική συσκευή, καθώς και το σύστημα της παρούσας εργασίας. Πρώτα, τα τέσσερα ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρα συνδέθηκαν στην εμπορική συσκευή Vishay P3. Αρχικά, καταγράφεται η ένδειξη του οργάνου όταν η δοκός βρίσκεται σε ηρεμία, δηλαδή η δύναμη που ασκείται σε αυτό είναι 0 Newton. Στην συνέχεια, ασκείται στο δοκίμιο εγκάρσια δύναμη 10 Newton και καταγράφεται η επιμήκυνση του δοκιμίου, σύμφωνα με το όργανο μέτρησης. Η διαδικασία αυτή, επαναλαμβάνεται μέχρι η δύναμη να φτάσει τα 40 Newton (με πρόσθεση δύναμης 10 Newton κάθε φορά) και στην συνέχεια η δύναμη που εφαρμόζεται, μειώνεται μέχρι να φτάσει στην τιμή 0 Newton.

Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί μια διαδικασία επιβεβαίωσης των μετρήσεων, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε επί 5 φορές, για το κάθε ένα ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρο. Το κάθε ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρο αντιστοιχεί σε ένα κανάλι (Channel) της συσκευής (π.χ. το ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρο 1 αντιστοιχεί στο Channel 1 κ.λ.π.). Τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων καταγράφηκαν και παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Στην δεξιά στήλη του κάθε πίνακα που αντιστοιχεί στο κάθε κανάλι, έχει υπολογιστεί και η μέση τιμή των 5 μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Τέλος, σημειώνεται ότι όλες οι μετρήσεις που παρουσιάζονται έχουν μονάδες «micro strain».

P3						
CHANNEL 1						
N(NEWTON)	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3	SAMPLE 4	SAMPLE 5	AVERAGE
0	-2	-1	0	-4	5	-0,4
10	27	30	31	26	35	29,8
20	58	64	67	59	69	63,4
30	89	95	98	88	99	93,8
40	122	128	131	123	131	127
30	89	98	101	89	100	95,4
20	58	67	69	57	69	64
10	23	32	34	23	35	29,4
0	-10	-1	0	-10	2	-3,8

Πίνακας 4.1: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το κανάλι 1 της συσκευής P3.

P3						
CHANNEL 2						
N(NEWTON)	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3	SAMPLE 4	SAMPLE 5	AVERAGE
0	-5	-30	-12	1	0	-9,2
10	29	-3	15	29	30	20
20	60	28	51	62	62	52,6
30	90	56	75	90	91	80,4
40	120	86	104	122	123	111
30	91	59	73	93	94	82
20	62	29	44	63	64	52,4
10	28	1	9	31	31	20
0	-2	-33	-27	0	0	-12,4

Πίνακας 4.2: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το κανάλι 2 της συσκευής P3.

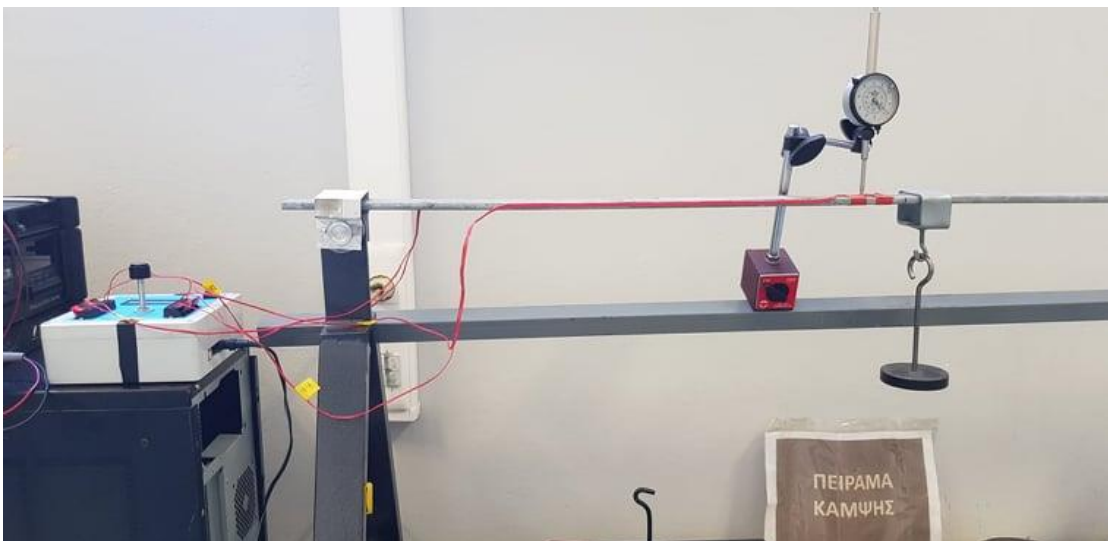
P3						
CHANNEL 3						
N(NEWTON)	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3	SAMPLE 4	SAMPLE 5	AVERAGE
0	2	-3	-2	1	2	0
10	-28	-32	-31	-29	-27	-29,4
20	-61	-64	-65	-62	-60	-62,4
30	-91	-94	-93	-91	-89	-91,6
40	-122	-125	-123	-123	-120	-122,6
30	-93	-97	-96	-94	-92	-94,4
20	-64	-67	-67	-64	-62	-64,8
10	-31	-34	-33	-32	-30	-32
0	-1	-3	-2	-1	1	-1,2

Πίνακας 4.3: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το κανάλι 3 της συσκευής P3.

P3						
CHANNEL 4						
N(NEWTON)	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3	SAMPLE 4	SAMPLE 5	AVERAGE
0	-1	-15	-12	-1	0	-5,8
10	-30	-44	-41	-30	-28	-34,6
20	-62	-76	-74	-62	-61	-67
30	-92	-106	-102	-90	-91	-96,2
40	-123	-137	-134	-121	-121	-127,2
30	-94	-109	-107	-91	-91	-98,4
20	-64	-81	-78	-61	-61	-69
10	-31	-47	-44	-30	-30	-36,4
0	0	-17	-14	1	-1	-6,2

Πίνακας 4.4: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το κανάλι 4 της συσκευής P3.

Οι παραπάνω μετρήσεις συγκρίθηκαν με αντίστοιχες μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν με το όργανο μέτρησης που κατασκευάστηκε. Το επόμενο βήμα, λοιπόν, είναι η πραγματοποίηση των ίδιων μετρήσεων που έγιναν με την συσκευή P3, να γίνουν αυτή τη φορά με το όργανο που κατασκευάστηκε (εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10

Τα ίδια αισθητήρια που χρησιμοποιήθηκαν, αυτή την φορά συνδέθηκαν στο όργανο μέτρησης που βασίζεται στην πλατφόρμα Arduino υπο, και με τον ίδιο τρόπο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και για τα 4 διαθέσιμα κανάλια της συσκευής. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.



ARDUINO						
CHANNEL 1						
N(NEWTON)	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3	SAMPLE 4	SAMPLE 5	AVERAGE
0	-2	-1	-2	0	-1	-1,2
10	18	29	28	31	30	27,2
20	57	63	62	65	64	62,2
30	76	94	94	100	97	92,2
40	114	126	128	135	131	126,8
30	85	93	95	102	98	94,6
20	58	61	62	67	64	62,4
10	26	25	27	29	27	26,8
0	-4	-6	-4	-2	-6	-4,4

Πίνακας 4.5: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το κανάλι 1 της που βασίζεται στην πλατφόρμα Arduino.

ARDUINO						
CHANNEL 2						
N(NEWTON)	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3	SAMPLE 4	SAMPLE 5	AVERAGE
0	-1	-3	-2	-1	0	-1,4
10	29	28	28	30	30	29
20	61	64	63	65	64	63,4
30	92	94	94	96	96	94,4
40	126	128	128	130	129	128,2
30	94	95	96	97	97	95,8
20	63	63	64	66	64	64
10	27	27	29	30	29	28,4
0	-4	-5	-4	-2	-3	-3,6

Πίνακας 4.6: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το κανάλι 2 της που βασίζεται στην πλατφόρμα Arduino.

ARDUINO						
CHANNEL 3						
N(NEWTON)	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3	SAMPLE 4	SAMPLE 5	AVERAGE
0	0	-1	0	-1	-2	-0,8
10	-31	-34	-31	-33	-33	-32,4
20	-67	-67	-66	-68	-68	-67,2
30	-98	-98	-98	-99	-100	-98,6
40	-132	-132	-132	-134	-133	-132,6
30	-100	-100	-100	-101	-102	-100,6
20	-69	-69	-69	-66	-71	-68,8
10	-34	-34	-34	-31	-36	-33,8
0	-2	-2	-2	0	-4	-2

Πίνακας 4.7: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το κανάλι 3 της που βασίζεται στην πλατφόρμα Arduino.



ARDUINO						
CHANNEL 4						
N(NEWTON)	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3	SAMPLE 4	SAMPLE 5	AVERAGE
0	-1	-2	0	-1	0	-0,8
10	-32	-34	-31	-33	-32	-32,4
20	-66	-69	-66	-67	-67	-67
30	-100	-100	-98	-99	-98	-99
40	-132	-134	-131	-132	-131	-132
30	-101	-103	-99	-101	-100	-100,8
20	-71	-72	-69	-69	-69	-70
10	-36	-37	-34	-35	-34	-35,2
0	-3	-5	-2	-3	-2	-3

Πίνακας 4.8: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το κανάλι 4 της που βασίζεται στην πλατφόρμα Arduino.

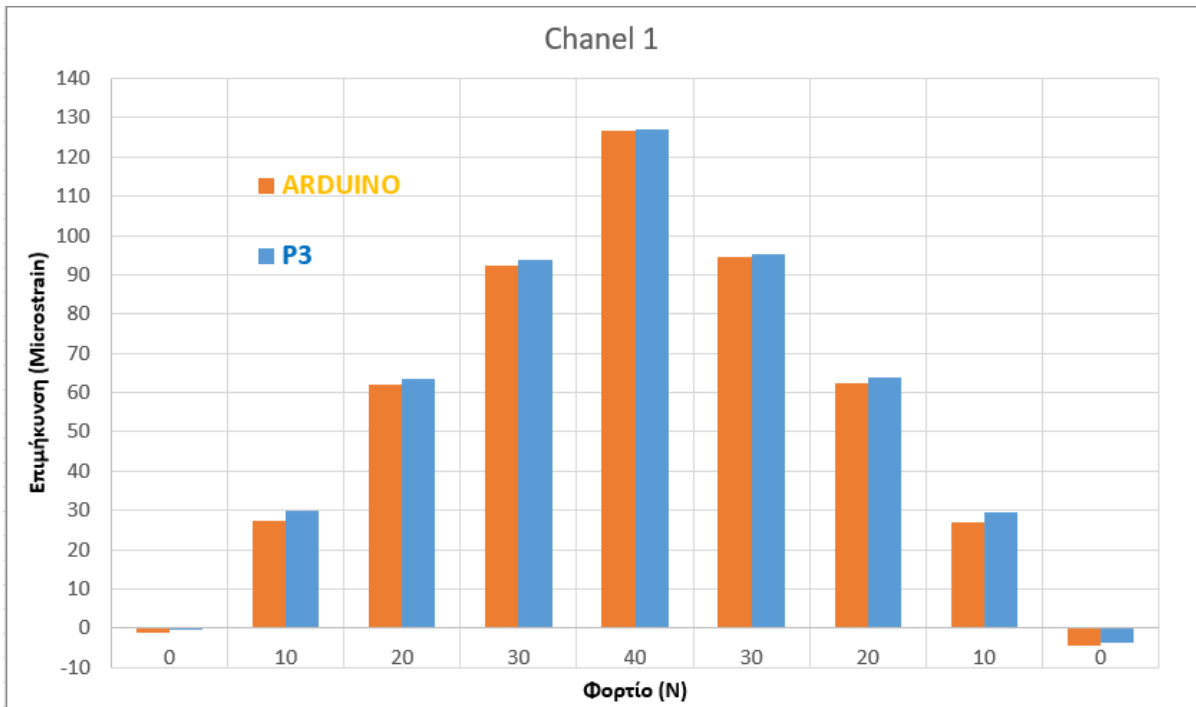
Οι μέσες τιμές των 5 μετρήσεων για το κάθε κανάλι και για τις δυο συσκευές παρουσιάζονται στον πίνακα 4.9.

N(NEWTON)	CHANNEL 1		CHANNEL 2		CHANNEL 3		CHANNEL 4	
	ARDUINO	P3	ARDUINO	P3	ARDUINO	P3	ARDUINO	P3
0	-1,2	-0,4	-1,4	-9,2	-0,8	0	-0,8	-5,8
10	27,2	29,8	29	20	-32,4	-29,4	-32,4	-34,6
20	62,2	63,4	63,4	52,6	-67,2	-62,4	-67	-67
30	92,2	93,8	94,4	80,4	-98,6	-91,6	-99	-96,2
40	126,8	127	128,2	111	-132,6	-122,6	-132	-127,2
30	94,6	95,4	95,8	82	-100,6	-94,4	-100,8	-98,4
20	62,4	64	64	52,4	-68,8	-64,8	-70	-69
10	26,8	29,4	28,4	20	-33,8	-32	-35,2	-36,4
0	-4,4	-3,8	-3,6	-12,4	-2	-1,2	-3	-6,2

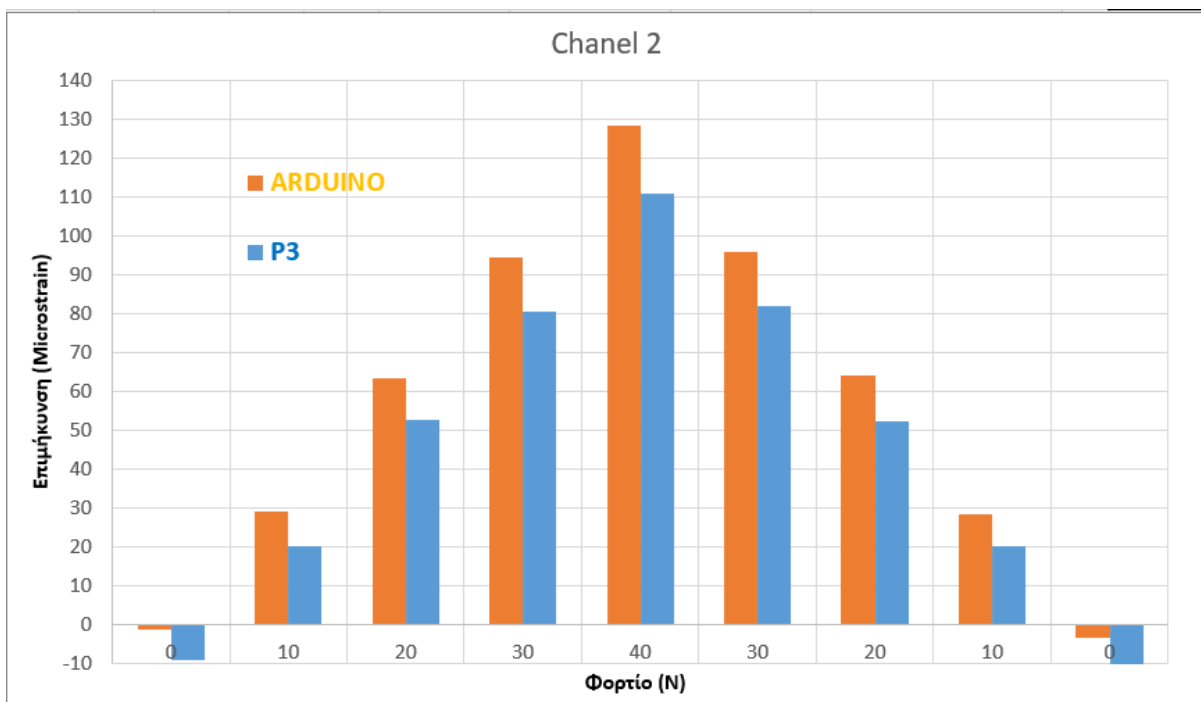
Πίνακας 4.9. Οι μεσαίες τιμές των 5 μετρήσεων για το κάθε κανάλι και για τις δυο συσκευές.

#### 4.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗΣ

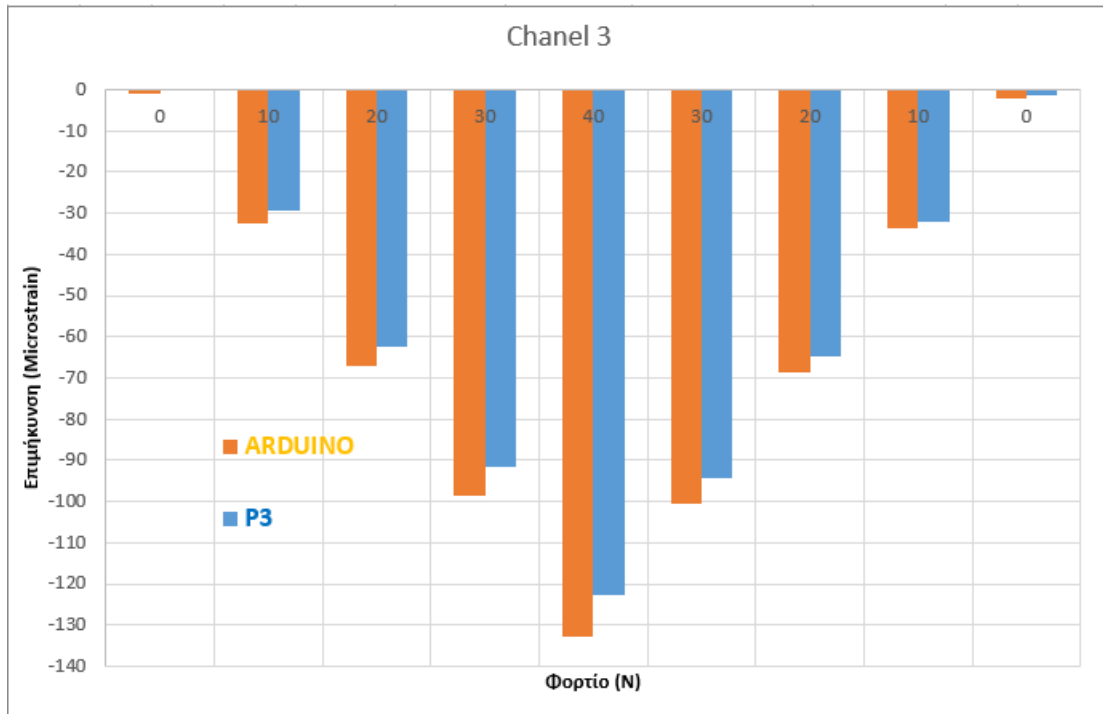
Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να παρατηρηθεί η διαφορά στις μετρήσεις μεταξύ των δυο οργάνων μέτρησης, για το κάθε κανάλι ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, απεικονίζονται οι μεσαίες τιμές των 5 μετρήσεων για κάθε επίπεδο της δύναμης που ασκήθηκε στη δοκό. Δηλαδή, στον οριζόντιο άξονα αντιστοιχούν οι τιμές της δύναμης και στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται η παραμόρφωση της δοκού.



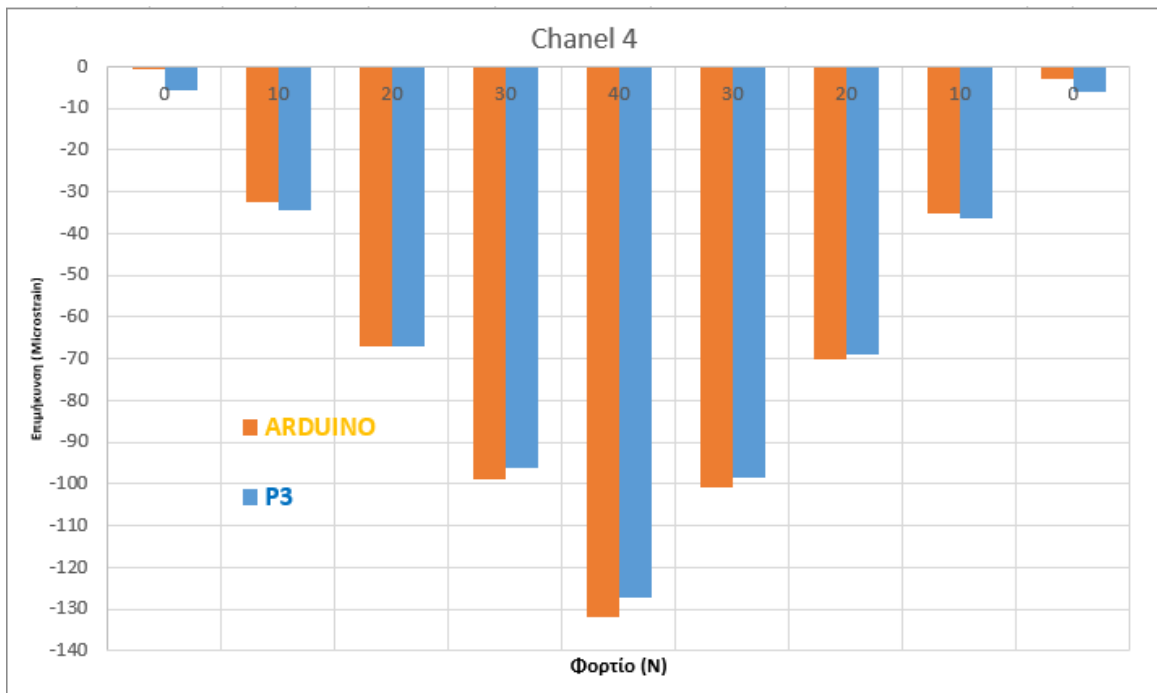
Σχήμα 4.1: Η γραφική παράσταση «δύναμης – επιμήκυνσης» για το κανάλι 1 των δυο οργάνων μέτρησης



Σχήμα 4.2: Η γραφική παράσταση «δύναμης – επιμήκυνσης» για το κανάλι 2 των δυο οργάνων μέτρησης



Σχήμα 4.3: Η γραφική παράσταση «δύναμης – επιμήκυνσης» για το κανάλι 3 των δυο οργάνων μέτρησης

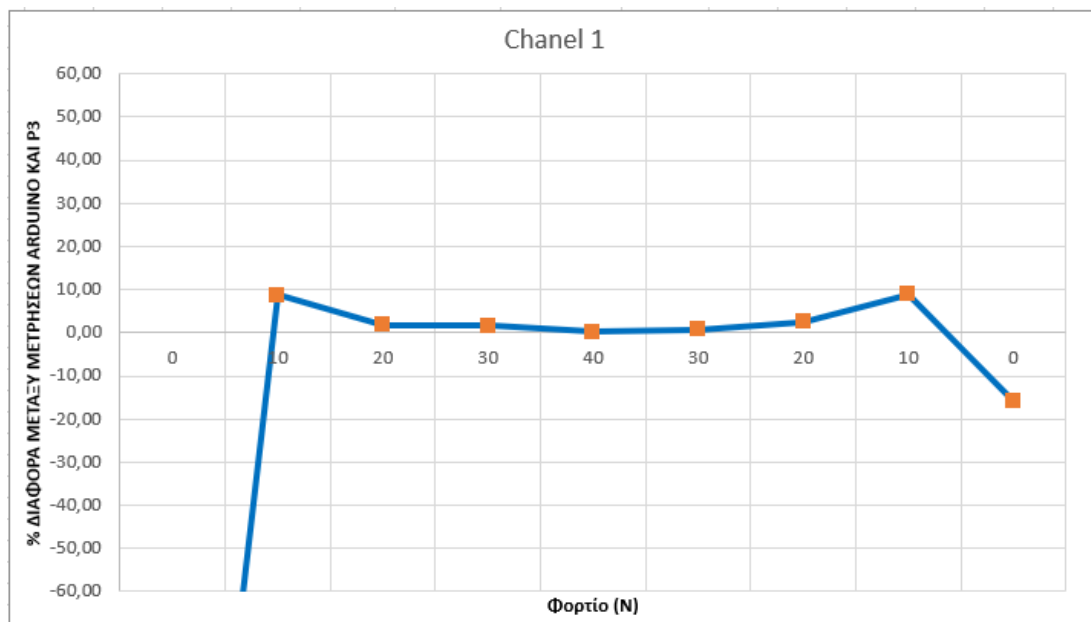


Σχήμα 4.4: Η γραφική παράσταση «δύναμης – επιμήκυνσης» για το κανάλι 4 των δυο οργάνων μέτρησης

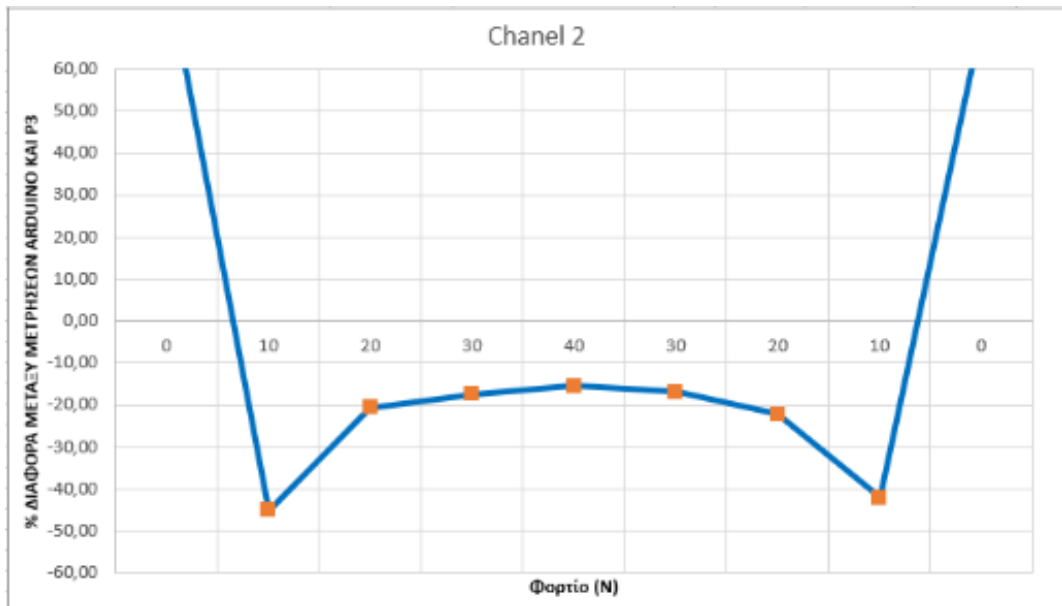
Παρατηρώντας τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, φαίνεται ότι τα σημεία των μετρήσεων που αντιστοιχούν στο πρώτο κανάλι των συσκευών, σχεδόν συμπίπτουν. Το γεγονός αυτό, μεταφράζεται ως ένα πρώτο, ικανοποιητικό

αποτέλεσμα, όσον αφορά την αξιοπιστία και την ακρίβεια των μετρήσεων του συστήματος, που κατασκευάστηκε. Από την άλλη, παρατηρώντας το δεύτερο σχήμα, φαίνονται τα σημεία των μετρήσεων, που αντιστοιχούν στο δεύτερο κανάλι των συσκευών. Εκεί διακρίνεται μια διαφορά μεταξύ των μετρήσεων, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται και η τιμή της επιμήκυνσης. Οι μετρήσεις που αφορούν τα κανάλια 3 και 4 παρουσιάζουν κάποιες διαφορές, αλλά μικρότερες σε σχέση με το δεύτερο κανάλι. Τα αίτια αυτών των διαφορών θα αναλυθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου.

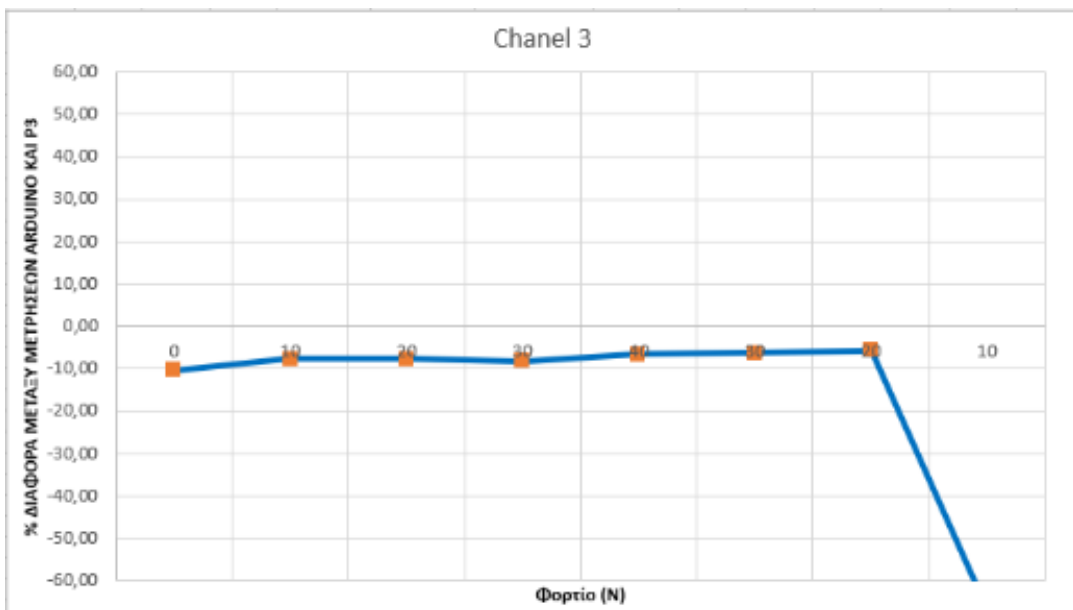
Η ακρίβεια των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από την εμπορική συσκευή μέτρησης παραμορφώσεων P3, θεωρείται αποδεκτή. Επομένως, το ποσοστό % της διαφοράς των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με την παραπάνω συσκευή και των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με την συσκευή που βασίζεται στο Arduino, είναι ένα μέγεθος, το οποίο δείχνει το ποσοστό που απέχουν οι μετρήσεις του συστήματος που υλοποιήθηκε από τις πραγματικές. Για να είναι πιο ευδιάκριτες αυτές οι διαφορές, παρουσιάζονται σε μορφή γραφικών παραστάσεων και για το κάθε κανάλι ξεχωριστά (σχήμα 4.5, σχήμα 4.6, σχήμα 4.7 και σχήμα 4.8).



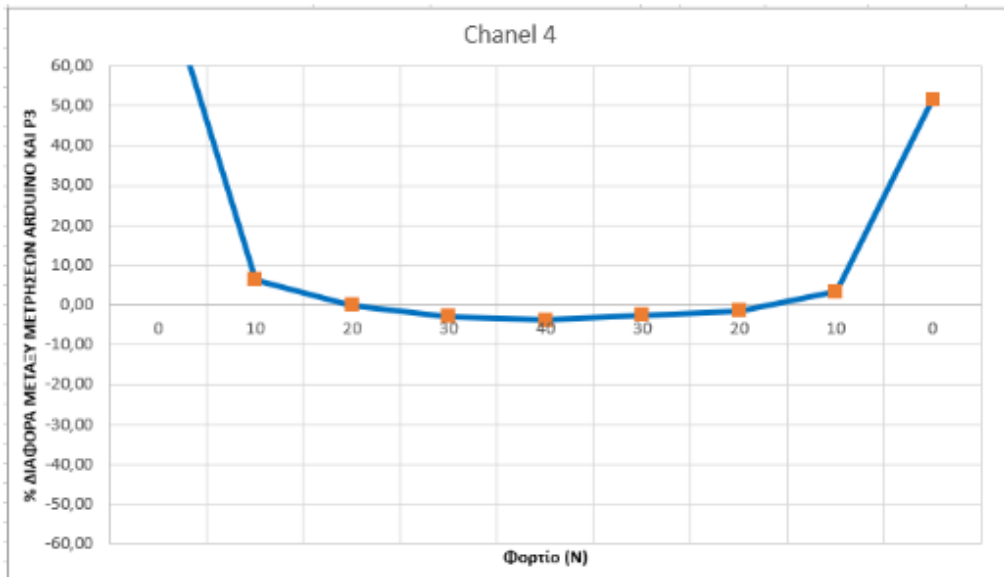
Σχήμα 4.5: Η γραφική παράσταση «δύναμης –% διαφοράς μεταξύ των μετρήσεων του Arduino και P3, για το κανάλι 1 των δυο συσκευών μέτρησης



Σχήμα 4.6: Η γραφική παράσταση «δύναμης –% διαφοράς μεταξύ των μετρήσεων του Arduino και P3, για το κανάλι 2 των δυο συσκευών μέτρησης



Σχήμα 4.7: Η γραφική παράσταση «δύναμης –% διαφοράς μεταξύ των μετρήσεων του Arduino και P3, για το κανάλι 3 των δυο συσκευών μέτρησης



Σχήμα 4.8: Η γραφική παράσταση «δύναμης –% διαφοράς μεταξύ των μετρήσεων του Arduino και P3, για το κανάλι 4 των δυο συσκευών μέτρησης

Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, το ποσοστό που απέχουν οι μετρήσεις του συστήματος που υλοποιήθηκε, από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από την συσκευή μέτρησης παραμορφώσεων P3, εξαρτάται από τη δύναμη που ασκήθηκε στη δοκό. Δηλαδή, για δυνάμεις 0N έως 10N το συγκεκριμένο ποσοστό είναι αρκετά μεγάλο, ενώ για δυνάμεις πάνω από 20 N, περιορίζεται και δεν ξεπερνάει το 10%. Επίσης, παρατηρούνται κάποιες διαφορές μεταξύ των μετρήσεων διαφορετικών καναλιών των δυο συσκευών. Πιο συγκεκριμένα, εάν δεν λάβουμε υπόψη την μέτρηση με μηδενική ασκούμενη δύναμη, τα κανάλια 1,3 και 4 παρουσιάζουν ποσοστό % της διαφοράς, που κυμαίνεται από 0% έως 10%, ενώ για το κανάλι 2 το συγκεκριμένο ποσοστό ξεπερνάει το 40%. Σύμφωνα με τα παραπάνω, φαίνεται ότι το ηλεκτρονικό κύκλωμα από το οποίο αποτελείται το κανάλι 2 της συσκευής που υλοποιήθηκε, προσθέτει κάποια αντίσταση στο συνολικό κύκλωμα (λόγω κακής σύνδεσης των ηλεκτρονικών στοιχείων), η οποία δημιουργεί ένα σφάλμα στις μετρήσεις. Όσον αφορά τα υπόλοιπα κανάλια, το ποσοστό % της διαφοράς είναι κάτω από το 10% και είναι αποδεκτό για τέτοιου είδους μετρήσεις.

Ένα ακόμα μέγεθος, το οποίο αφορά το εύρος των μετρήσεων είναι και η τυπική απόκλιση (Standard deviation). Το συγκεκριμένο μέγεθος, δείχνει το πόσο μια μέτρηση, απέχει από το μέσο όρο του συνόλου και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2},$$

Όπου:

- s → Η τυπική απόκλιση
- N → Ο αριθμός του συνόλου των δειγμάτων
- $x_i$  → Η τιμή ενός δείγματος
- $\bar{x}$  → Η μέση τιμή των δειγμάτων

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, έγινε ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης για τα 5 δείγματα των μετρήσεων, για κάθε επίπεδο δύναμης που εφαρμόστηκε στη δοκό. Η διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα τέσσερα κανάλια των συσκευών και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Τυπική απόκλιση				
P3				
N(NEWTON)	CHANNEL 1	CHANNEL 2	CHANNEL 3	CHANNEL 4
0	3.362	12.716	2.345	7.120
10	3.564	14.283	2.074	7.335
20	4.827	14.484	2.074	7.348
30	5.070	15.176	1.949	7.294
40	4.301	15.969	1.817	7.694
30	5.941	15.460	2.074	8.877
20	6.000	15.469	2.168	9.721
10	5.941	14.036	1.581	8.385
0	5.762	16.227	1.483	8.585

Πίνακας 4.10: Οι τιμές της τυπικής απόκλισης που έγιναν από το όργανο της εταιρίας Vishay

Τυπική απόκλιση				
ARDUINO				
N(NEWTON)	CHANNEL 1	CHANNEL 2	CHANNEL 3	CHANNEL 4
0	0.837	1.140	0.837	0.837
10	5.263	1.000	1.342	1.140
20	3.114	1.517	0.837	1.225
30	9.391	1.673	0.894	1.000
40	7.918	1.483	0.894	1.225
30	6.348	1.304	0.894	1.483
20	3.362	1.225	1.789	1.414
10	1.483	1.342	1.789	1.304
0	1.673	1.140	1.414	1.225

Πίνακας 4.11: Οι τιμές της τυπικής απόκλισης που έγιναν από το όργανο που υλοποιήθηκε

## 4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

### 4.3.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το πρώτο κανάλι των δυο συσκευών, συμπεραίνουμε, ότι η θεωρία που εφαρμόστηκε σε συνδυασμό με το κύκλωμα που υλοποιήθηκε, καθώς και το πρόγραμμα για τον υπολογισμό της επιμήκυνσης που αναπτύχθηκε, είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν αξιόπιστες

μετρήσεις επιμήκυνσης, ανάλογης αξιοπιστίας με το επιμηκυνσιόμετρο «Strain Indicator and Recorder P3». Όσο για την διαφορά που παρατηρείται για τα υπόλοιπα κανάλια, αυτή προφανώς οφείλεται στο κύκλωμα που συνδέει τον αισθητήρα με την γέφυρα Wheatstone, και όχι στον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται το μετρούμενο μέγεθος.

Αναφέρεται επίσης, ότι το κύκλωμα του επιμηκυνσιόμετρου έχει δημιουργηθεί σε ένα εργαστήριο, το οποίο σημαίνει ότι περιλαμβάνει ηλεκτρονικές κολλήσεις και εν γένει, προστίθεται το σφάλμα του ανθρώπινου παράγοντα. Ο διακόπτης που αναλαμβάνει την επιλογή του καναλιού προς χρήση, είναι ένας μηχανικός διακόπτης με μεταλλικές ηλεκτρικές επαφές. Οπότε, λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία της γέφυρας Wheatstone και την ιδιότητα του παραπάνω διακόπτη, μπορούμε να αποδεχτούμε την διαφορά των μετρήσεων, που προκύπτουν μεταξύ των δυο συστημάτων, εφόσον αυτές είναι δικαιολογημένες.

Η διάταξη που υλοποιήθηκε, παρουσιάζει απλότητα, διότι για τη λειτουργία του, δεν κάνει χρήση περίπλοκων κυκλωμάτων και συσκευών, πάρα μόνο αξιοποιεί τις δυνατότητες ενός μικροελεγκτή, σε συνδυασμό με έναν μετατροπέα, μια οθόνη και μια γέφυρα Wheatstone. Το γεγονός αυτό, συνδέεται άμεσα και με το κόστος της συγκεκριμένης συσκευής, το οποίο είναι αρκετά χαμηλό, σε σχέση με αντίστοιχα εμπορικά όργανα. Τέλος, αναφέρεται ότι όλα τα στοιχεία, από τα οποία αποτελείται το συγκεκριμένο όργανο, είναι τοποθετημένα σε ένα πλαστικό κουτί, με σκοπό την προστασία τους, καθώς και να κάνει πιο εύκολη την μεταφορά του σε οποιοδήποτε σημείο χρειαστεί και γενικότερα, να είναι πιο εύχρηστο.

#### 4.3.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Μετά την πραγματοποίηση πραγματικών μετρήσεων με το επιμηκυνσιόμετρο που κατασκευάστηκε και το επιμηκυνσιόμετρο P3 του ομίλου «VISHAY PRECISION», αποδείχτηκε, ότι η λειτουργία του συστήματός μας είναι αξιόπιστη. Τα σφάλματα που παρατηρήθηκαν για τα κανάλια 2, 3 και 4 είναι δικαιολογημένα και έχουν συγκριμένες αιτίες. Επομένως, μια μελλοντική επέκταση της συγκεκριμένης συσκευής, είναι η σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος με κατάλληλο λογισμικό και στην συνέχεια η τύπωση κανονικής πλακέτας PCB (Printed Circuit Board). Η χρήση της τυπωμένης πλακέτας σε συνδυασμό με ένα πιο αξιόπιστο μπλοκ ακροδεκτών σύνδεσης του αισθητήρα με το επιμηκυνσιόμετρο, θα οδηγούσε σε ακόμα πιο αξιόπιστες μετρήσεις και γενικότερα η συσκευή θα ήταν πιο ολοκληρωμένη.

Μια επιπρόσθετη πρόταση για μελλοντική επέκταση, είναι η παροχή τροφοδοσίας της συσκευής μέσω μπαταριών. Το χαρακτηριστικό αυτό, θα έδινε την δυνατότητα στην συσκευή να πραγματοποιεί μετρήσεις σε απομακρυσμένα σημεία, που δεν υπάρχει καλωδιακή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η απομακρυσμένη αποστολή δεδομένων, είναι μια δυνατότητα που συνηθίζεται να συμπεριλαμβάνεται σε διάφορα όργανα μέτρησης. Επομένως, η ενσωμάτωση μιας επιπλέον πλακέτας στο ήδη υπάρχον κύκλωμα, η οποία θα αναλαμβάνει την αποστολή των μετρήσεων ασύρματα, θα έδινε την δυνατότητα στο συγκεκριμένο όργανο, να πραγματοποιεί μετρήσεις σε διάφορα σημεία, όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη.

Τέλος, θα μπορούσε επίσης, να προστεθεί μια ακόμη πλακέτα, η οποία θα έδινε την δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικής συσκευής αποθήκευσης δεδομένων. Η πλακέτα αυτή, θα έδινε την δυνατότητα στο συγκεκριμένο όργανο, εκτός από το να εμφανίζει τα δεδομένα στην ενσωματωμένη οθόνη, να μπορεί να καταγράφει τις



μετρήσεις με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία τους. Μια πλακέτα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για το παραπάνω σκοπό, είναι η «Micro SD card adapter», που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Η συγκεκριμένη πλακέτα προτείνεται να χρησιμοποιηθεί για μελλοντικές επεκτάσεις της συγκεκριμένης συσκευής, εφόσον είναι πλήρως συμβατή με την πλακέτα Arduino.



Εικόνα 4.11: Η πλακέτα «Micro SD card adapter».

## Παράρτημα

### Οδηγίες χρήσης του συστήματος μέτρησης της παραμόρφωσης που υλοποιήθηκε

#### Οδηγίες

- 1) Αρχικά, συνδέστε το διαθέσιμο επιμηκυνσιόμετρο στο επιθυμητό διαθέσιμο κανάλι της συσκευής.



- 2) Εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα διαθέσιμα επιμηκυνσιόμετρα, συνιστάται να συνδεθούν στα τέσσερα διαθέσιμα κανάλια (ένα στο κάθε κανάλι) , πριν την ενεργοποίηση της συσκευής



- 3) Εξασφαλίστε ότι το δοκίμιο όπου είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας, να βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, λίγο πριν την ενεργοποίηση της συσκευής.



- 4) Στην συνέχεια, τοποθετήστε το τροφοδοτικό του συστήματος σε κάποια παροχή ηλεκτρικής ενέργειας (πρίζα) και το σύστημα θα ενεργοποιηθεί αυτόματα .
- 5) Κατά την ενεργοποίηση της συσκευής, εμφανίζεται στην οθόνη του συστήματος το μήνυμα «Strain Measurement».



- 6) Στην συνέχεια, αναμένεται η συσκευή να υπολογίζει και να μηδενίζει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, για το κανάλι που έχει επιλεγθεί από το

κεντρικό διακόπτη. Αυτό το χρονικό διάστημα (κάποια δευτερόλεπτα) η συσκευή εμφανίζει το μήνυμα «Calibrating Please wait».



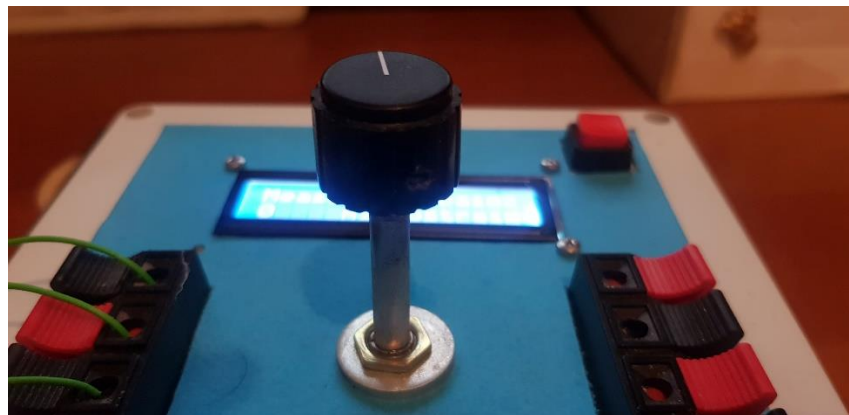
- 7) Όταν το βήμα 6 ολοκληρωθεί, το σύστημα εμφανίζει το μήνυμα «Measured Strain» και είναι έτοιμο να πραγματοποιήσει κάποια μέτρηση.



- 8) Η ενεργοποίηση της διαδικασίας μηδενισμού του σφάλματος μόνιμης κατάστασης, πραγματοποιείται από το κουμπί (push button), που διαθέτει η συσκευή στο πάνω μέρος.



- 9) Η επιλογή του επιθυμητού καναλιού προς χρήση, πραγματοποιείται από το κεντρικό διακόπτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο επάνω μέρος της συσκευής.



## Σημαντικές Παρατηρήσεις

- 1) Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να πραγματοποιεί μετρήσεις για μόνο ένα κανάλι κάθε φορά.
- 2) Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που εμφανίζονται στην οθόνη αντιστοιχούν στο κανάλι που έχει επιλεγθεί από το κεντρικό διακόπτη.
- 3) Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έχουν πρόσημο ανάλογα με την φορά της δύναμης, που ασκείται στο υλικό, που είναι τοποθετημένο το επιμηκυνσιόμετρο
- 4) Η συσκευή μπορεί να πραγματοποιήσει μετρήσεις, μόνο με επιμηκυνσιόμετρα, τα οποία έχουν ονομαστική αντίσταση 120 Ωhm και συντελεστή ευαισθησίας δυο (2) (Gauge Factor = 2).

### Ο κώδικας που φορτώθηκε στον μικροελεγκτή

```
#include <LiquidCrystal.h>           // Liquid Crystal LCD library
LiquidCrystal lcd(12,11,7, 6, 5, 4); // Liquid Crystal LCD Pin Initialisation

//*****Pin
Initialisation*****

#define DT A0           // Data Read pin
#define SCK A1         // Clock pin
#define sw 9           // Switch for calibration

long sample=0;         // Sample for calibrating
//float val=0;
long count=0;         // Instant Reading value

//*****Sensor Reading Value
Routine*****

unsigned long readCount(void)
{
  unsigned long Count;
  unsigned char i;
  pinMode(DT, OUTPUT);
  digitalWrite(DT,HIGH);
  digitalWrite(SCK,LOW);
  Count=0;
  pinMode(DT, INPUT);
  while(digitalRead(DT));
  for (i=0;i<24;i++)
  {
    digitalWrite(SCK,HIGH);
    Count=Count<<1;
    digitalWrite(SCK,LOW);
    if(digitalRead(DT))
```

```

    Count++;
}
digitalWrite(SCK,HIGH);
Count=Count^0x800000;
digitalWrite(SCK,LOW);
return(Count);
}

//*****General Initialisations and set
up*****

void setup()
{
  Serial.begin(9600);           // Serial port init
  pinMode(SCK, OUTPUT);        // Clock pin set up
  pinMode(sw, INPUT_PULLUP);   // Switch pin set up
  lcd.begin(16, 2);            // LCD Screen start
  lcd.print(" Strain ");       // LCD print
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" Measurement ");
  delay(2000);
  lcd.clear();
  calibrate();
}

//*****
*****

void loop()
{
  count = readCount();         // reciveing the sensor value from the rutine
  "readCount()"
  long val1=(count-sample);    // error deleting
  float vout=(val1*0.43);      // Vout calculating (in nVolts ) 1=0.43nV
  float vs=3.77;              // Vs is in Volt
  //int e=(vout/3.77)*0.002;   //microstrain (float
  e=4*(vout/vs)*(1/2)*(1V/1000mVolt)
  lcd.setCursor(0,0);         // LCD print the Data
  lcd.print("Measured Strain");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("  ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(e);
  lcd.setCursor(5,1);

```

```

lcd.print("microstrain");

if(digitalRead(sw)==0)                // If the switch is pressed
{                                       // Start Calibrating procedure
  sample=0;
  count=0;
  calibrate();
}
}

//*****Calibrating
procedure*****
void calibrate()
{                                       // LCD Print "calibrating"
  lcd.clear();
  lcd.print("Calibrating...");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Please Wait...");
  for(int i=0;i<100;i++)                // Start sampling for calibrating
  {
    count=readCount();                 // Add sample values
    sample+=count;
  }
  sample/=100;
  count=0;
  lcd.clear();
}
//*****
*****

```



## Βιβλιογραφία

- 1) Τρικαλινός, Χ. (2014). *Εισαγωγή στη θεωρία Σφαλμάτων*. Πανεπιστήμιο Αθηνών Τμήμα Φυσικής Εργαστήριο Φυσικής, Αθήνα.
- 2) Thompson, A. & Taylor, B.N. (2008). *Guide for the Use of the International System of Units (SI)*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- 3) Fornasini, P. (2008). *The Uncertainty in Physical Measurements*. New York: Springer.
- 4) Taylor, J.R. (1997). *An Introduction to Error Analysis*. Sausalito, Calif. : University Science Books,
- 5) Δρης, Ε.Α. (2015). *Περί Μονωδών Μέτρησης και Άλλα Σχετικά*. Αθήνα: Ε.Μ. Πολυτεχνείου
- 6) Γαλιατσάτου, Ν.Δ., Λιαναρδάτου, Γ.Σ., Λιαναρδάτου, Δ.Σ. (2016). *Αντοχή Υλικών*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- 7) Τσαμασφύρος, Γ.Ι. (2000). *Μηχανική παραμόρφωση σωμάτων Ι. Αθήνα: Συμμετρία*.
- 8) Γεωργαντζίνος, Κ. Σ. (2020). *Πείραμα εφελκυσμού μμεταλλικών δοκιμίων*. Αναρτήθηκε από [https://eeyem.eap.gr/wp-content/uploads/2016/09/APA\\_ver2.pdf](https://eeyem.eap.gr/wp-content/uploads/2016/09/APA_ver2.pdf).
- 9) Wilson, J.S. (2005). *Sensor Technology Handbook 1st Edition*. USA: Elsevier.
- 10) Fraden, J. (2010). *Handbook of Modern Sensors*. New York: Springer.
- 11) Woodford, C. (2020). *How strain gauges work*. Retrieved from <https://www.explainthatstuff.com/straingauge.html>.
- 12) Khan, A.S., Wang, X. (2001). *Strain Measurements and Stress Analysis*. Mishawaka: Prentice Hall.
- 13) Window, A.L. (1992). *Strain Gauge Technology*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers Group.
- 14) Timmis, H. (2011). *Practical Arduino Engineering*. New York: Springer.
- 15) Kelly, J.F. (2013). *Arduino Adventures*. Germany: Springer.
- 16) Premeaux, E. & Evans, B. (2011). *Arduino Projects to Save the World*. New York: Springer.
- 17) Warren, J.D., Adams, J. & Molle, H. (2011). *Arduino Robotics*. New York: Springer.
- 18) Karniven, K. and Karniven, T. (2011). *Make: Arduino Bots and Gadgets*. Canada: O'Reilly.
- 19) Αλατσαθιανός, Σ. (2004). *Ανάπτυξη Εφαρμογών με Μικροελεγκτές*. Β. Γκιούρδας Εκδοτική.
- 20) Παπάζογλου, Π.Μ., Λιώνης, Σ.Π. (2014). *Ανάπτυξη Εφαρμογών με το Arduino, 2η Έκδοση*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλα.
- 21) *Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes InSystem Programmable Flash*. (02/2013). Retrieved from <https://www.farnell.com/datasheets/1693866.pdf>.
- 22) Valvano, J.W. (2019). *Embedded Microcomputer Systems: Real Time Interfacing*. USA: GoldBooks.
- 23) Knight, S. (2018). *Arduino for Beginners*. Independently Published.
- 24) Blum, R. (2014). *Arduino Programming in 24 Hours*. Sam's Publishing.
- 25) *Practical Strain Gage Measurements*. (1999). Agilent Technologies. Retrieved from [https://eeyem.eap.gr/wp-content/uploads/2016/09/APA\\_ver2.pdf](https://eeyem.eap.gr/wp-content/uploads/2016/09/APA_ver2.pdf).

- 26) Cimbala, J.M. (October 2013). *Stress, Strain, and Strain Gages*: State University. Retrieved from [https://www.me.psu.edu/cimbala/me345/Lectures/Strain\\_gages.pdf](https://www.me.psu.edu/cimbala/me345/Lectures/Strain_gages.pdf)
- 27) Zhang, J. & Kazunori, H. (2018). *Molecular Sensors and Nanodevices*. Academic Press.
- 28) Bøving, K.G. (1989). *Non-Destructive Examination Methods for Condition Monitoring*. Denmark: Butterworths.
- 29) Zike, S. & Mikkelsen, L.P. (2013). *Correction of Gauge Factor for Strain Gauges Used in Polymer Composite Testing*. Springer.
- 30) Lehman, T., Stockmann, M., Ihlemann, J., Merger, T. (2018). *Applications of electrical strain gages in the fields of monitoring and material mechanics*. Germany: WILEY.
- 31) Zamboni, J. (13/03/2018). *How to Calculate Percent Deviation*. Retrieved from <https://sciencing.com/calculate-dispersion-10018216.html>.
- 32) OLPC Greece. (n.d). Retrieved at 10 July 2020 from OLPC Wiki: <https://en.wikipedia.org/wiki/St>.