



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΩΝΙΑΣ
ΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΣΤΡΑΝΤΖΕΣ CNC**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
(02114257)**

Επιβλέπων: Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Περίληψη

Στις στράντζες εμφανίζεται ένα σύνηθες πρόβλημα το οποίο δυσχεραίνει την κατεργασία κάμψης ελασμάτων. Το πρόβλημα αυτό είναι η απόκλιση της πραγματικής γωνίας κάμψης του κατεργαζόμενου ελάσματος από τη θεωρητική γωνία που έπρεπε να καμφθεί. Ειδικά τα τελευταία χρόνια οι ανάγκες για πολύ καλές ακρίβειες κατεργαζόμενων ελασμάτων έχουν αυξηθεί, κρίνεται αναγκαία η χρήση μετρητικού οργάνου το οποίο θα μετρά με ακρίβεια την πραγματική αυτή γωνία κάμψης. Ξεκινώντας τη διπλωματική εργασία, περιγράφηκε το πρόβλημα που δημιουργείται κατά την κατεργασία ελασμάτων σε στράντζες και τονίστηκε η ανάγκη χρήσης μετρητικού οργάνου για τον υπολογισμό της γωνίας κάμψης του ελάσματος. Έπειτα από βιβλιογραφική αναζήτηση και μελέτη, σχηματίστηκε μετρητική διάταξη και αναλύθηκε ο τρόπος λειτουργίας της. Επίσης, εξηγήθηκε ο τρόπος με τον οποίο η μετρητική διάταξη υπολογίζει τη ζητούμενη γωνία. Σε επόμενο στάδιο αναφέρεται συνοπτικά ο τρόπος λειτουργία των βηματικών κινητήρων, αφού τέτοιοι κινητήρες χρησιμοποιήθηκαν στην υπό μελέτη μετρητική διάταξη. Στη συνέχεια, επισημάνθηκαν κάποιοι κινητήρες του εμπορίου που είναι κατάλληλοι για την εφαρμογή αυτή. Κατ' αντιστοιχία έγινε αναφορά στο είδος των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων, στην αρχή λειτουργίας τους και καταγράφηκαν τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων αυτών. Επόμενο βήμα ήταν η αξιολόγηση του υπό μελέτη μηχανισμού από άποψη στατικής και δυναμικής καταπόνησης με τη βοήθεια σχεδιαστικού προγράμματος. Αφού προέκυψε ότι ο μηχανισμός βάσης του μετρητικού οργάνου ήταν ικανοποιητικός, έγινε λεπτομερής αναφορά στα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται η διάταξη. Έπειτα, υπογραμμίστηκε ο τρόπος κατασκευής του μετρητικού οργάνου και σχολιάστηκε η απαραίτητη συνδεσμολογία των αισθητήρων και των κινητήρων με τον αλγόριθμο του υπολογιστή για την αρμονική λειτουργία της μετρητικής διάταξης. Σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν κάποιες ενδεικτικές μετρήσεις μέσα από τις οποίες αξιολογήθηκε η ακρίβεια του μετρητικού οργάνου και τελειώνοντας προτάθηκαν κάποιες βελτιώσεις που επιδέχεται η μετρητική διάταξη για να γίνει πιο αποτελεσματική.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή Προβλήματος.....	1
1.2 Σκοπός Και Προδιαγραφές Μετρητικής Διάταξης	1
1.3 Υπάρχουσες Εφαρμογές Και Πατέντες.....	2
1.3.1 Μετρητικές Διατάξεις Εξ Αποστάσεως	2
1.3.2 Μετρητικές Διατάξεις Εξ Επαφή	3
1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	5
2. Περιγραφή Στράντζας	6
2.1 Κατηγορίες Στράντζών.....	6
2.1.1 Στράντζα Χειρός	6
2.1.2 Ηλεκτρική Στράντζα	7
2.1.3 Υδραυλική Και Πνευματική Στράντζα	7
3. Κάμψη Ελάσματος	9
3.1 Ορισμός Κάμψης.....	9
3.2 Κίνηση Μετάλλου	9
3.3 Ουδέτερος Άξονας	10
3.4 Διαδικασία Πλαστικοποίησης Διατομής.....	11
3.5 Ελαστική Επαναφορά.....	12
4. Επιλεγμένη Διάταξη	14
4.1 Περιγραφή	14
4.2 Τοποθέτηση Και Βαθμονόμηση.....	15
4.3 Διαδικασία.....	15
4.4 Εύρεση Σημείου Μέτρησης	16
4.5 Μέθοδος Υπολογισμού Γωνίας Σφάλματος.....	17
4.6 Εύρος Μετρούμενων Γωνιών.....	18
4.7 Απαιτούμενη Ακρίβεια Μέτρησης Αισθητήρων.....	18
4.8 Διευκρίνηση	19
4.9 Απαραίτητος Εξοπλισμός.....	19
4.10 Πλεονεκτήματα	19
4.11 Μειονεκτήματα	19
5. Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης Αισθητήρων	20
5.1 Βηματικοί Κινητήρες	20
5.1.1 Γενικά Στοιχεία.....	20
5.1.2 Αρχή Λειτουργίας.....	20
5.1.3 Μονοπολικόι-Διπολικόι.....	22

5.1.4	Μέθοδοι Βηματισμού	22
5.2	Μικροελεγκτής Arduino.....	26
5.3	Οδηγοί Βηματικών Κινητήρων	27
5.3.1	Driver DRV8825.....	27
5.3.2	Driver A4988	30
6.	Μηχανική Μελέτη Κατασκευής.....	32
7.	Επιλογή Βηματικών Κινητήρων	33
7.1	Υπολογισμός Απαραίτητων Φορτίων	33
7.2	Απαραίτητο Φορτίο Μαγνητικής Βάσης	34
7.3	Απαραίτητο Φορτίο Μεγάλου Κινητήρα	34
7.4	Απαραίτητο Φορτίο Μικρού Κινητήρα.....	36
8.	Επιλογή Και Ανάλυση Αισθητήρων	38
8.1	Χρήσιμοι Ορισμοί	38
8.1.1	Ορισμός Αισθητήρα.....	38
8.1.2	Χαρακτηριστικά Αισθητήρα.....	38
8.2	Ανάλυση Χωρητικών Αισθητήρων.....	39
8.2.1	Η Έννοια Της Χωρητικότητας.....	39
8.2.2	Χωρητικά Φαινόμενα.....	40
8.2.3	Αρχή Λειτουργίας Χωρητικού Αισθητήρα	40
8.2.4	Μηχανισμός Χωρητικού Αισθητήρα Για Ακριβές Μετρήσεις.....	41
8.3	Επιλογή Μετρητικού Οργάνου	42
8.4	Ολοκληρωμένη Διάταξη Χωρητικών Αισθητήρων	42
9.	Ανάλυση Κατασκευής	44
9.1	Μαγνητική Βάση.....	44
9.2	Πρώτος Άξονας	45
9.3	Πρώτη Βάση.....	45
9.4	Μεγάλος Βηματικός Κινητήρα	46
9.5	Δεύτερος Άξονας.....	47
9.6	Δεύτερη Βάση	47
9.7	Μικρός Βηματικός Κινητήρας	48
9.8	Πλατφόρμα.....	48
9.9	Δακτύλιοι Μόνωσης.....	49
10.	Ανάλυση Ηλεκτρικού Κυκλώματος.....	50
10.1	Αποτελούμενα Στοιχεία Κυκλώματος.....	50
10.1.1	Βηματικοί Κινητήρες	50
10.1.2	Πλακέτα Arduino	50
10.1.3	Drivers.....	50

10.1.4	Τροφοδοτικό	50
10.1.5	Πλακέτα Συνδεσμολογίας.....	51
10.1.6	Καλώδια Jumper	51
10.1.7	Καλώδιο USB Για Arduino	51
10.1.8	Πυκνωτές	51
10.2	Απαραίτητες Συνδεσμολογίες	52
10.2.1	Συνδεσμολογία Drivers-Step Motors.....	52
10.2.2	Συνδεσμολογία Χωρητικών Αισθητήρων-Πλακέτα Arduino.....	52
10.2.3	Συνδεσμολογία Μετρούμενου Ελάσματος-Γείωσης	52
11.	Περιβάλλον Arduino.....	54
11.1	Δομή προγράμματος Arduino	54
11.1.1	Setup	54
11.1.2	Loop	54
11.2	Επεξήγηση Εντολών Προγράμματος	54
11.3	Επεξήγηση Λογικής Προγράμματος	56
11.4	Διευκρινήσεις	58
11.4.1	Συντονισμός Κινητήρων	58
11.4.2	Τερματισμός Επαναληπτικής Διαδικασίας loop.....	58
11.4.3	Περαιτέρω Περιστροφή Πλατφόρμας	59
12.	Μετρήσεις Και Αποτελέσματα	61
12.1	Επαναληψιμότητα Οργάνου.....	62
12.2	Ακρίβεια Μέτρησης Οργάνου.....	65
12.3	Επαναληψιμότητα Χωρητικών Αισθητήρων	68
13.	Πρόταση Για Βελτιώσεις	70
13.1	Προτεινόμενος Μικρός Βηματικός Κινητήρας.....	70
13.2	Προτεινόμενοι Χωρητικοί Αισθητήρες.....	71
13.3	Προτεινόμενες Κατασκευαστικές Βελτιώσεις	72
13.4	Βάση Για Την Σωστή Θέση Εκκίνησης Των Βηματικών Κινητήρων.	73
13.5	Σχεδιασμός Και Εκτύπωση Ηλεκτρονικής Πλακέτας.....	74
14.	Κοστολόγηση Κατασκευής.....	75
15.	Συμπεράσματα	76
16.	Βιβλιογραφία.....	78
17.	Παράρτημα Α: Υπόλοιπες Επιλογές Διατάξεων	80
17.1	Δεύτερη Επιλογή	80
17.2	Τρίτη Επιλογή	81
17.3	Τέταρτη Επιλογή	83
17.4	Σύγκριση Επιλογών.....	85

18. Παράρτημα Β: Κατασκευαστικά Σχέδια.....	87
18.1 Πρώτος Άξονας	87
18.2 Δεύτερος Άξονας.....	88
18.3 Πρώτη Βάση.....	89
18.4 Δεύτερη Βάση	90
18.5 Πλατφόρμα.....	91
18.6 Πρώτος Μονωτής.....	92
18.7 Δεύτερος Μονωτής	93
18.8 Σχέδιο Γενικής Διάταξης.....	94
19. Παράρτημα Γ: Χρησιμοποιούμενος Αλγόριθμος.....	95

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1: Μετρητική Διάταξη Με Χρήση Λείζερ Και Μετρητή Θέσης	2
Εικόνα 1.2: Μετρητική Διάταξη Με Χρήση Λείζερ Και Κάμερα Ανίχνευσης Φωτός.....	3
Εικόνα 1.3: Πνευματικό Σύστημα Μέτρησης	3
Εικόνα 1.4: Μετρητική Διάταξη Εξωτερικής Επαφής	4
Εικόνα 1.5: Μετρητική Διάταξη Με Αισθητήρα Μέσα Στη Μήτρα.....	4
Εικόνα 1.6: Μετρητική Διάταξη Με Αισθητήρα Μέσα Στο Έμβολο Κάμψης.....	4
Εικόνα 2.1: Διάταξη Στράντζας.....	6
Εικόνα 2.2: Στράντζα Χειρός	7
Εικόνα 2.3: Ηλεκτρική Στράντζα	7
Εικόνα 2.4: Υδραυλική Στράντζα.....	8
Εικόνα 3.1: Παραμορφωμένο Έλασμα Κατά Την Κάμψη	9
Εικόνα 3.2: Κίνηση Ελάσματος Κατά Τη Διάρκεια Κάμψης	10
Εικόνα 3.3: Αναπτυσσόμενες Τάσεις Κατά Την Κάμψη	10
Εικόνα 3.4: Διάφορες Θέσεις Ουδέτερου Άξονα	11
Εικόνα 3.5: Διαδικασία Πλαστικοποίησης Διατομής.....	12
Εικόνα 3.6: Μεταβολή Τάσεων Κατά Την Κάμψη	13
Εικόνα 3.7: Υπεύθυνες Τάσεις Για Την Ελαστική Επαναφορά Υλικού	13
Εικόνα 4.1: Αναπαράσταση Μηχανισμού	14
Εικόνα 4.2: Σωστός Τρόπος Τοποθέτησης Μαγνητικής Βάσης Πάνω Στη Στράντζα.....	15
Εικόνα 4.3: Αναπαράσταση Αρχικής Θέσης Μηχανισμού	16
Εικόνα 4.4: Γεωμετρική Αναπαράσταση Χρησιμοποιούμενης Θεωρίας.....	17
Εικόνα 4.5: Γεωμετρικός Υπολογισμός Απαιτούμενης Ακρίβειας Αισθητήρων.....	18
Εικόνα 5.1: Αναπτυσσόμενες Δυνάμεις Στα Δόντια Του Κινητήρα	21
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα Ροπής-Συχνότητα Παλμών.....	21
Εικόνα 5.3: Απεικόνιση Μονοπολικού Και Διπολικού Βηματικού Κινητήρα	22
Εικόνα 5.4: Διέγερση Μίας Σπείρας.....	23
Εικόνα 5.5: Βηματισμός Υψηλής Ροπής	23
Εικόνα 5.6: Ακολουθία Μισού Βήματος.....	24
Εικόνα 5.7: Παλμική Τάση Λειτουργίας Μικροβηματισμού	25
Εικόνα 5.8: Λειτουργία Μαγνητών Στον Μικροβηματισμό	25
Εικόνα 5.9: Μικροελεγκτής Arduino	26
Εικόνα 5.10: Υποδοχές Arduino Uno.....	27
Εικόνα 5.11: Μορφή Driver DRV8825	27
Εικόνα 5.12: Θύρες Driver DRV8825.....	28
Εικόνα 5.13: Μέτρηση Τάσης Vref.....	28
Εικόνα 5.14: Συνδεσμολογία Driver DRV8825	29
Εικόνα 5.15: Μορφή Driver A4988	30
Εικόνα 5.16: Θύρες Driver A4988	31
Εικόνα 5.17: Συνδεσμολογία A4988	31
Εικόνα 6.1: Ανάλυση Παραμορφώσεων Κατασκευής	32
Εικόνα 7.1: Δυσμενέστερη Από Άποψη Ροπών Κατάσταση	34
Εικόνα 7.2: Επιλεγμένη Μαγνητική Βάση	34
Εικόνα 7.3: Επιλεγμένος Μεγάλος Βηματικός Κινητήρας	35
Εικόνα 7.4: Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα.....	35
Εικόνα 7.5: Επιλεγμένος Μικρός Βηματικός Κινητήρας.....	36
Εικόνα 7.6: Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα.....	37
Εικόνα 8.1: Μορφή Χωρητικών Αισθητήρων.....	39

Εικόνα 8.2: Παράλληλοι Οπλισμοί Πυκνωτή	40
Εικόνα 8.3: Αποτελούμενα Τμήματα Χωρητικού Αισθητήρα	41
Εικόνα 8.4: Προβληματικός Και Σωστός Σχεδιασμός Αισθητήρα Αντίστοιχα	41
Εικόνα 8.5: Ολοκληρωμένη Διάταξη Χωρητικών Αισθητήρων	43
Εικόνα 9.1: Αποτελούμενα Μέρη Κατασκευής	44
Εικόνα 9.2: Πρώτος Άξονας	45
Εικόνα 9.3: Πρώτη Βάση	45
Εικόνα 9.4: Μεγάλος Βηματικός Κινητήρας.....	46
Εικόνα 9.5: Δεύτερος Άξονας	47
Εικόνα 9.6: Δεύτερη Βάση	47
Εικόνα 9.7: Μικρός Βηματικός Κινητήρας.....	48
Εικόνα 9.8: Πλατφόρμα.....	48
Εικόνα 9.9: Δακτύλιοι Μόνωσης.....	49
Εικόνα 9.10: Συνδεσμολογία Μονωτών Με Αισθητήρες	49
Εικόνα 10.1: Τροφοδοτικό 12V.....	50
Εικόνα 10.2: Πλακέτα Breadboard.....	51
Εικόνα 10.3: Καλώδια Jumper	51
Εικόνα 10.4: Καλώδιο USB Για Arduino.....	51
Εικόνα 10.5: Πυκνωτής Κυκλώματος	52
Εικόνα 10.6: Σχηματικά Ολοκληρωμένο Κύκλωμα.....	53
Εικόνα 10.7: Πραγματικό Ολοκληρωμένο Κύκλωμα	53
Εικόνα 11.1: Διάγραμμα Ροής Αλγόριθμου	58
Εικόνα 11.2: Εντολές Συντονισμού Βηματικών Κινητήρων	58
Εικόνα 11.3: Εντολές Για Να Τρέξει Μια Φορά Η Επαναληπτική Διαδικασία Loop.....	59
Εικόνα 11.4: Εντολές Για Την Επιπλέον Κίνηση Της Πλατφόρμας.....	59
Εικόνα 11.5: Περίπτωση Περαιτέρω Ανθωρολογιακής Κίνησης Πλατφόρμας.....	60
Εικόνα 11.6: Περίπτωση Περαιτέρω Ωρολογιακής Κίνησης Πλατφόρμας.....	60
Εικόνα 12.1: Προσομοίωση Μετρητικού Οργάνου Σε Καταστάσεις Στράντζας.....	61
Εικόνα 12.2: Στάδια Μέτρησης Γωνίας Κάμψης	62
Εικόνα 12.3: Σημειακή Επαφή Αισθητήρα Με Έλασμα	65
Εικόνα 13.1: Προτεινόμενος Κινητήρας	71
Εικόνα 13.2: Χαρακτηριστικά Προτεινόμενου Κινητήρα.....	71
Εικόνα 13.3: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Προτεινόμενου Χωρητικού Αισθητήρα.....	72
Εικόνα 13.4: Προτεινόμενος Μετασχηματιστής	72
Εικόνα 13.5: Βελτίωση Οργάνου Με Την Κατάλληλη Τοποθέτηση Πειράκι	74
Εικόνα 17.1: Σχηματική Αναπαράσταση Μετρητικού Οργάνου	80
Εικόνα 17.2: Γεωμετρική Απόδειξη Δεύτερης Επιλογής.....	80
Εικόνα 17.3: Γεωμετρική Απόδειξη Τρίτης Επιλογής	81
Εικόνα 17.4: Τρόπος Μέτρησης Σημείων Από Το Λείζερ.....	82
Εικόνα 17.5: Διάταξη Μετρητικού Οργάνου	83
Εικόνα 17.6: Γεωμετρική Απόδειξη Τέταρτης Επιλογής Με Καθετότητα Και Χωρίς.....	84
Εικόνα 17.7: Τρόπος Υπολογισμού Γωνιών	85
Εικόνα 18.1: Κατασκευαστικό Σχέδιο Πρώτου Άξονα.....	87
Εικόνα 18.2: Κατασκευαστικό Σχέδιο Δεύτερου Άξονα	88
Εικόνα 18.3: Κατασκευαστικό Σχέδιο Πρώτης Βάσης	89
Εικόνα 18.4: Κατασκευαστικό Σχέδιο Δεύτερης Βάσης.....	90
Εικόνα 18.5: Κατασκευαστικό Σχέδιο Πλατφόρμας.....	91
Εικόνα 18.6: Κατασκευαστικό Σχέδιο Πρώτου Μονωτή.....	92
Εικόνα 18.7: Κατασκευαστικό Σχέδιο Δεύτερου Μονωτή	93
Εικόνα 18.8: Σχέδιο Γενικής Διάταξης.....	94

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή Προβλήματος

Ένα από τα βασικά προβλήματα που δημιουργούνται στη διαδικασία κάμψης ελασμάτων σε εργαλειομηχανή στράντζας είναι η απόκλιση της πραγματικής γωνίας κάμψης που αποκτά το κατεργαζόμενο έλασμα από τη θεωρητική γωνία που θα έπρεπε να καμφθεί. Αυτό συμβαίνει διότι τα μεταλλικά υλικά έχουν την τάση μετά από μια παραμόρφωση να επανέρχονται, έως ένα βαθμό, στην αρχική τους κατάσταση λόγω ελαστικής επαναφοράς. Ο μηχανισμός της ελαστικής επαναφοράς αναλύεται λεπτομερέστερα στην *Ενότητα 3* της εργασίας. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη για σχεδιασμό μετρητικής διάταξης, η οποία θα στερεώνεται πάνω σε στράντζα και θα μετρά με ακρίβεια την πραγματική γωνία κάμψης του ελάσματος. Αυτό θα διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τους χειριστές των εργαλειομηχανών αυτών αφού γνωρίζοντας την πραγματική γωνία κάμψης του κατεργαζόμενου ελάσματος θα είναι σε θέση να εκτελέσουν τις απαραίτητες ενέργειες ώστε το τελικό έλασμα να αποκτήσει την επιθυμητή γωνία κάμψης.

1.2 Σκοπός Και Προδιαγραφές Μετρητικής Διάταξης

Βασική επιδίωξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός ευέλικτης μετρητικής διάταξης, η οποία θα προσαρμόζεται πάνω σε στράντζα και θα μετρά με ακρίβεια τη γωνία κάμψης του κατεργαζόμενου ελάσματος. Γενικά έχουν αναπτυχθεί διάφορες μετρητικές διατάξεις για τη μέτρηση της γωνίας κάμψης ελάσματος. Κάποιες από αυτές βασίζονται σε μετρητικά όργανα εξ επαφής με το μετρούμενο έλασμα και άλλες εξ αποστάσεως. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί αρκετά το δεύτερο είδος διατάξεων, αφού μετρητικά όργανα όπως το λείζερ, ο χωρητικός αισθητήρας και ο αισθητήρας υπερήχων κυκλοφορούν ευρέως στο εμπόριο και οι μετρήσεις τους χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή ακρίβεια. Στόχος αυτών των διατάξεων είναι η ακριβής μέτρηση της γωνίας κάμψης, σε κλίμακα που αγγίζει και το εκατοστό της μοίρας. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος για τον οποίο αυτές οι μετρητικές διατάξεις κοστίζουν ακριβά στην αγορά.

Επομένως, σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να σχεδιαστεί και στη συνέχεια να κατασκευαστεί μία τέτοια μετρητική διάταξη της οποίας η αναλογία κόστους και ακρίβεια μέτρησης θα είναι ικανοποιητική για τον ενδιαφερόμενο αγοραστή. Επισημαίνεται ότι η διάταξη σχεδιάζεται με σκοπό να τοποθετείται σε στράντζες ευρείας χρήσης που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες.

Κάποιες από τις αρχικές προδιαγραφές της μετρητικής διάταξης είναι οι εξής: Αρχικά, η ακρίβεια του οργάνου πρέπει να κυμαίνεται κοντά στο ένα δέκατο της μοίρας και το κόστος να μην υπερβαίνει τετραψήφιο νούμερο. Έπειτα, οι διαστάσεις της διάταξης δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλες καθώς προορίζεται να είναι συμβατή με στράντζες διαφόρων μεγεθών. Η τοποθέτηση του οργάνου αυτού πάνω στη στράντζα πρέπει να γίνεται γρήγορα, εύκολα και χωρίς επίπονη και χρονοβόρα βαθμονόμηση. Επιπρόσθετα, το μετρητικό όργανο καλό θα είναι να έχει καλή αντοχή σε χτυπήματα και να υπάρχουν διαθέσιμα ανταλλακτικά στο εμπόριο, σε περίπτωση που υποστεί ζημιά κάποιο από τα εξαρτήματα της μετρητικής διάταξης, να μπορεί να βρεθεί στο εμπόριο ή να είναι εύκολα κατασκευάσιμο ώστε να αντικατασταθεί άμεσα. Στη συνέχεια, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η απαιτούμενη τάση της μετρητικής διάταξης να είναι αρκετά χαμηλή καθώς το ηλεκτρολογικό κύκλωμα της διάταξης είναι σε μεγάλο βαθμό ακάλυπτο. Στον *Πίνακα 1* φαίνονται ποσοτικοποιημένες όλες οι προδιαγραφές καθώς επίσης αναγράφεται η σημασία κάθε μίας προδιαγραφής

αξιολογούμενη σε κλίμακα από το 1 μέχρι το 5 και ορίζεται το διάστημα από την ιδανική μέχρι την οριακή τιμή μέσα στο οποίο πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των προδιαγραφών αυτών.

Αριθμός Προδιαγραφής	Μέτρο	Σημασία	Μονάδες	Οριακή Τιμή	Ιδανική Τιμή
1	Ακρίβεια Μέτρησης	5	Μοίρες	0.3	0.1
2	Κόστος	4	Ευρώ	1000	<1000
3	Συμβατότητα	3	-	Συμβατό Σε Στράντζες CNC	Σε Όλες Τις Στράντζες
4	Calibration	3	Λεπτά	5	<3
5	Χρόνος Μέτρησης	3	Δευτερόλεπτα	60	<30
6	Τάση λειτουργίας	3	Volts	20	12
7	Ευαισθησία-Αντοχή	2	-	Στιβαρή Κατασκευή	Προστατευτικό Κάλυμμα
8	Τοποθέτηση	2	Λεπτά	10	<5
9	Συνολική Μάζα	1	Κιλά	2	<2
10	Ανταλλακτικά	1	-	Εύκολα Κατασκευύσιμα	Διαθέσιμα Στο Εμπόριο

Πίνακας 1: Ποσοτικοποιημένες Προδιαγραφές Μετρητικού Οργάνου [1]

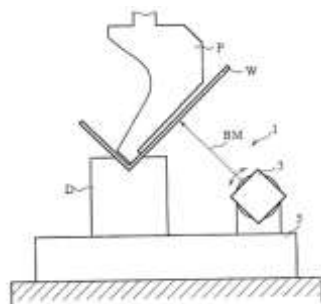
1.3 Υπάρχουσες Εφαρμογές Και Πατέντες

Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές και πατέντες πάνω σε αυτό το θέμα οι οποίες είναι πρωτότυπες και αξιόλογες. Σε αυτές τις πατέντες βασίστηκαν κάποιες από τις υποψήφιες επιλογές που αναλύονται στην εργασία αυτή. Παρακάτω γίνεται αναφορά κάποιων τέτοιων πατεντών ομαδοποιημένες ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιούν για την μέτρηση της ζητούμενης γωνίας.

1.3.1 Μετρητικές Διατάξεις Εξ Αποστάσεως

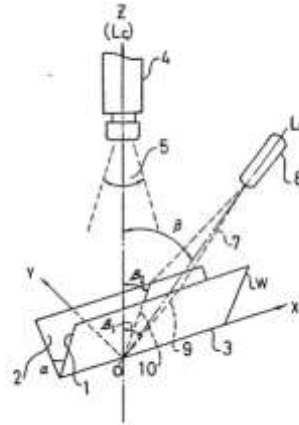
1.3.1.1 Με Χρήση Λείζερ

Οι περισσότερες εξ αποστάσεως μετρητικές διατάξεις χρησιμοποιούν λέιζερ ως βασικό αισθητήριο όργανο. Οι πατέντες [2] και [3] είναι κάποιες από αυτές¹. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη χρησιμοποιεί λέιζερ μέτρησης απόστασης και μια περιστρεφόμενη βάση με ενσωματωμένο μετρητή θέσης για να είναι συνεχώς γνωστή η κλίση στην οποία βρίσκεται η βάση αυτή. Έτσι στη γωνία-κλίση όπου η απόσταση είναι η μικρότερη δυνατή αυτή είναι και η κλίση της πλευράς του κατεργαζόμενου ελάσματος. Η δεύτερη πατέντα χρησιμοποιεί λέιζερ, για τη εκπομπή δέσμη φωτός πάνω στο έλασμα, και μία κάμερα ανίχνευσης φωτός, η οποία αναγνωρίζει τη γωνία πρόσκρουσης της δέσμης αυτής, υπολογίζοντας έτσι τη ζητούμενη γωνία.



Εικόνα 1.1: Μετρητική Διάταξη Με Χρήση Λείζερ Και Μετρητή Θέσης

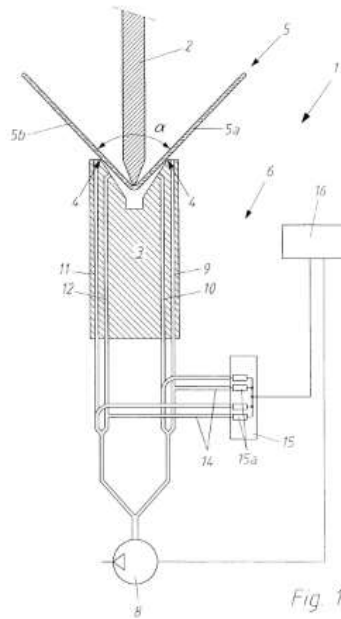
¹ Στην βιβλιογραφική αναφορά υπάρχουν πληροφορίες για τις πατέντες που αναφέρονται σε αυτή την ενότητα.



Εικόνα 1.2: Μετρητική Διάταξη Με Χρήση Λέιζερ Και Κάμερα Ανίχνευσης Φωτός

1.3.1.2 Με Πνευματικό Σύστημα

Οι πατέντες [4] και [5] χρησιμοποιούν αντλία πίεσης η οποία γεμίζει τον κενό χώρο ανάμεσα στο έλασμα και τη μήτρα με συγκεκριμένη ποσότητα αέρα. Καθ' όλη τη διαδικασία κάμψης ο χώρος αυτός ελαττώνεται αλλά η ποσότητα του αέρα παραμένει σταθερή. Αυτό που αλλάζει είναι η πίεση του αέρα και κατάλληλοι αισθητήρες πίεσης τοποθετημένοι σε αυτόν τον χώρο μετρούν την πίεση και με κατάλληλους υπολογισμούς υπολογίζουν τη ζητούμενη γωνία.

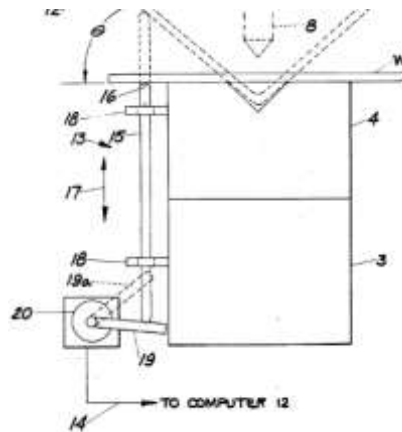


Εικόνα 1.3: Πνευματικό Σύστημα Μέτρησης

1.3.2 Μετρητικές Διατάξεις Εξ Επαφή

1.3.2.1 Με Εξωτερική Επαφή

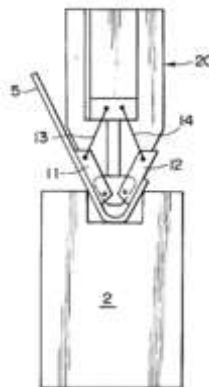
Οι πατέντες [6], [7], [8] και [9] βασίζονται σε αισθητήρες μετατόπισης οι οποίοι μέσω επαφής με το έλασμα μετρούν συγκεκριμένες μετατοπίσεις και με κατάλληλο τρόπο υπολογίζουν τη ζητούμενη γωνία κάμψης. Οι αισθητήρες απόστασης είναι τοποθετημένοι στην εξωτερική πλευρά του ελάσματος. Στην Εικόνα 1.4 φαίνεται μία τέτοια ενδεικτική μετρητική διάταξη.



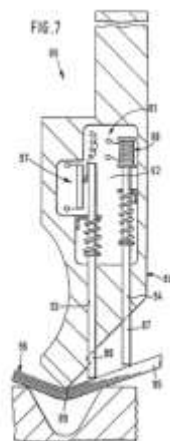
Εικόνα 1.4: Μετρητική Διάταξη Εξωτερικής Επαφής

1.3.2.2 Με Εσωτερική Επαφή

Οι πατέντες [10], [11], [12], [13], και [14] και αυτές βασίζονται σε αισθητήρες μετατόπισης μέσω επαφής, όπως και οι παραπάνω πατέντες, με τη διαφορά ότι αυτοί οι αισθητήρες τοποθετούνται εσωτερικά της μήτρα ή ακόμα και μέσα στο έμβολο κάμψης. Ενδεικτικά στην Εικόνα 1.5 και την Εικόνα 1.6 φαίνονται κάποιες από αυτές τις διατάξεις.



Εικόνα 1.5: Μετρητική Διάταξη Με Αισθητήρα Μέσα Στη Μήτρα



Εικόνα 1.6: Μετρητική Διάταξη Με Αισθητήρα Μέσα Στο Έμβολο Κάμψης

1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Στην αρχή της εργασίας αυτής γίνεται σύντομη αναφορά στα μέρη από τα οποία αποτελείται μια στράντζα καθώς και στα διάφορα είδη στραντζών που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Στη συνέχεια, επισημαίνεται ο μηχανισμός της ελαστικής παραμόρφωσης και ο λόγος για τον οποίο αυτή η ελαστική παραμόρφωση αποτελεί το βασικό πρόβλημα σε κατεργασίες κάμψης υλικών.

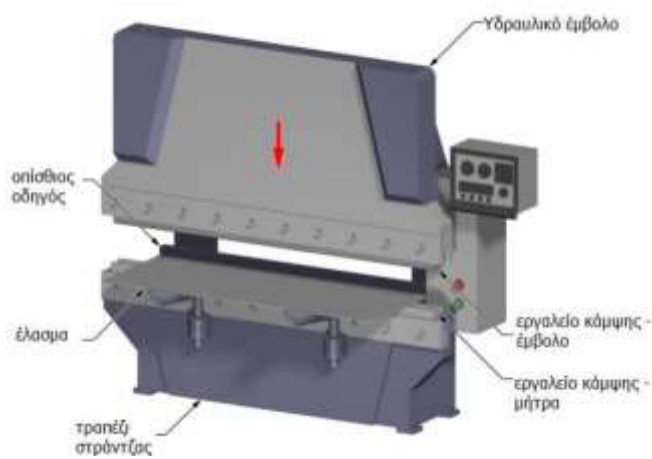
Στην επόμενη ενότητα σχολιάζεται η επιλογή της μετρητικής διάταξης και περιγράφεται η διαδικασία μέτρησης της ζητούμενης γωνίας, καθώς επίσης τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που έχει αυτή η μετρητική διάταξη σε σύγκριση με άλλες. Έπειτα, γίνεται αναφορά στον τρόπο μετάδοσης κίνησης των αισθητήρων με τη χρήση βηματικών κινητήρων, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των βηματικών κινητήρων και μελετώνται οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν οι κινητήρες αυτοί ώστε να ανταποκριθούν στις ανάγκες της μετρητικής διάταξης.

Συνεχίζοντας, έγινε στατική και δυναμική μελέτη στον μηχανισμό βάσης των αισθητήρων και αναφέρονται τα μέρη από τα οποία απαρτίζεται η βάση αυτή. Σε επόμενη ενότητα εξηγείται ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν χωρητικοί αισθητήρες και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους. Έπειτα, γίνεται αναφορά στο ηλεκτρικό κύκλωμα που έπρεπε να συναρμολογηθεί για την αρμονική σύνδεση των κινητήρων και των αισθητήρων με τον αλγόριθμο που προγράμματος Arduino για την ομαλή λειτουργία της μετρητικής διάταξης.

Τελειώνοντας την εργασία αυτή καταστρώθηκαν και εκτελέστηκαν κάποιες σειρές μετρήσεων για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του μετρητικού αυτού οργάνου και ως τελευταίο βήμα υπογραμμίζονται κάποιες βελτιώσεις οι οποίες θα μπορούν να κάνουν τη μετρητική αυτή διάταξη πιο αποτελεσματική.

2. Περιγραφή Στράντζας

Οι εργαλειομηχανές διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις μηχανές αφαίρεσης υλικού και τις μηχανές διαμόρφωσης υλικού. Η στράντζα ανήκει στην δεύτερη κατηγορία εργαλειομηχανών. Με τη χρήση της στράντζας επιδιώκεται η κατεργασία υλικών και πιο συγκεκριμένα η κάμψη ελασμάτων σε μια επιθυμητή κατάσταση. Βασικά τμήματα μιας τέτοιας μηχανής είναι η βάση της στράντζας ή αλλιώς τραπέζι της στράντζας το οποίο εδράζει όλο τον μηχανισμό. Πάνω στη βάση είναι τοποθετημένη η μήτρα πάνω στην οποία τοποθετείται το έλασμα και με οδηγό τη γεωμετρία της μήτρας επιδιώκεται η τελική διαμόρφωση του ελάσματος. Υπεύθυνο για την παραμόρφωση του ελάσματος είναι το εργαλείο κάμψης (έμβολο) το οποίο συμπιέζει το επίπεδο έλασμα και το κάμπτει. Γενικά υπάρχει μεγάλη ποικιλία τόσο μητρών όσο και εμβόλων και ο κατάλληλος συνδυασμός τους προσδίδει την τελική διαμόρφωση στο επεξεργαζόμενο έλασμα. Οι εργαλειομηχανές διαμόρφωσης ελασμάτων συνδυάζουν ισχυρές δυνάμεις με μεγάλες ταχύτητες και ακρίβεια κινήσεων, γι' αυτό τον λόγο απαιτείται μεγάλη ισχύς για την κατεργασία αυτή. Η ισχύς αυτή προσδίδεται στο σύστημα κυρίως μέσω ενός πνευματικού ή υδραυλικού συστήματος τα οποία μπορούν να προσδώσουν πολύ υψηλές τιμές ισχύος. Ωστόσο, σε στράντζες μικρού πάχους ελασμάτων η ισχύς μπορεί να προέλθει από κάποιο μηχανικό ή ηλεκτρικό σύστημα.



Εικόνα 2.1: Διάταξη Στράντζας [15]

2.1 Κατηγορίες Στραντζών

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες στραντζών ανάλογα με το είδος των κατεργαζόμενων ελασμάτων που είναι προορισμένες να επεξεργαστούν. Οι κατηγορίες αυτές ξεκινούν από τις στράντζες χειρός, οι οποίες είναι οι πιο απλές και έχουν περιορισμένες δυνατότητες και χρησιμοποιούνται για μεμονωμένες περιπτώσεις μέχρι και τις υδραυλικές στράντζες τύπου CNC οι οποίες χρησιμοποιούνται για μαζική παραγωγή στις βιομηχανίες. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στις επικρατέστερες κατηγορίες στραντζών που χρησιμοποιούνται.

2.1.1 Στράντζα Χειρός

Η στράντζα χειρός δεν είναι πλέον τόσο διαδεδομένη σε βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς η μυϊκή δύναμη που ασκείται από το χειριστή την κάνει δύσκολη για την μαζική παραγωγή. Παρόλα αυτά είναι χρήσιμη για διαμόρφωση μικρών και μεμονωμένων ελασμάτων. Οι εργαλειομηχανές αυτές έχουν δυνατότητα να κάμψουν έλασμα μήκους έως 2,5 μέτρα με πάχος έως 3mm. [16]



Εικόνα 2.2: Στράντζα Χειρός

2.1.2 Ηλεκτρική Στράντζα

Η ηλεκτρική στράντζα μοιάζει αρκετά με τη στράντζα χειρός αλλά η βασική διαφορά τους εμφανίζεται στον τρόπο που πηγάζει η δύναμη του εμβόλου, καθώς στο συγκεκριμένο είδος στράντζας η δύναμη παράγεται με ηλεκτρικό τρόπο, χωρίς να χρειάζεται μυϊκή δύναμη. Γενικά δεν είναι πολύ διαδεδομένες στο εμπόριο και έχουν δυνατότητα κάμψης ελασμάτων έως και 3 μέτρα με πάχος έως 4mm. [16]



Εικόνα 2.3: Ηλεκτρική Στράντζα

2.1.3 Υδραυλική Και Πνευματική Στράντζα

Οι υδραυλικές και πνευματικές στράντζες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία λόγω της ικανότητάς τους να διαμορφώνουν εύκολα και γρήγορα ελάσματα. Ακόμη, λόγω της μεγάλης ισχύς που παρέχει το υδραυλικό και το πνευματικό σύστημα μπορούν εύκολα να διαμορφώσουν ελάσματα με μεγάλο πάχος, έως και 30 χιλιοστών, πράγμα που είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί με τα παραπάνω είδη εργαλειομηχανών. [16]



Εικόνα 2.4: Υδραυλική Στράντζα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή μετρητικού οργάνου συμβατό για όσο τον δυνατών περισσότερα είδη στραντζών, αλλά κυρίως δίνεται έμφαση στις υδραυλικές και πνευματικές στράντζες, γιατί αυτές είναι που χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

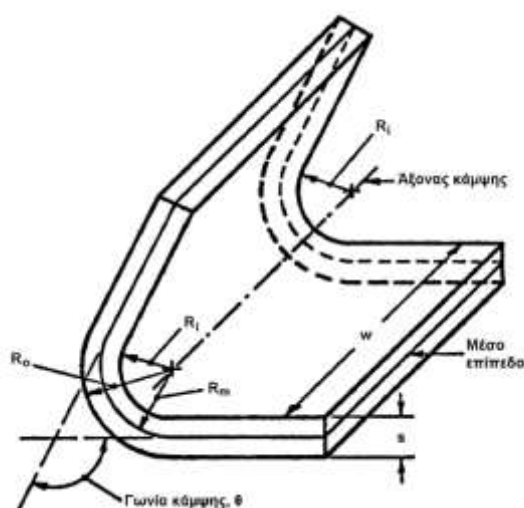
3. Κάμψη Ελάσματος

Στην Ενότητα αυτή θα γίνει σύντομη αναφορά στον μηχανισμό που είναι υπεύθυνος για την απόκλιση της πραγματικής γωνίας κάμψης ενός ελάσματος από τη θεωρητική τιμή. Σε όρους μηχανολογίας ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται ελαστική επαναφορά και αναλύεται παρακάτω. Επίσης, γίνεται αναφορά στην κάμψη ως τρόπος επεξεργασίας ελασμάτων, στον τρόπο κίνησης του μετάλλου μέσα στην μήτρα και στον ουδέτερο άξονα ο οποίος είναι χαρακτηριστικό της κάμψης ελασμάτων.

3.1 Ορισμός Κάμψης

Κάμψη είναι η ομοιόμορφη μόνιμη παραμόρφωση υλικού υπό τη μορφή ελάσματος ή ταινίας, η οποία επιτυγχάνεται με περιστροφή τμήματος αυτού περί ευθύγραμμο άξονα που βρίσκεται στο ουδέτερο επίπεδο της διατομής του και είναι κάθετος σ' αυτή. [17]

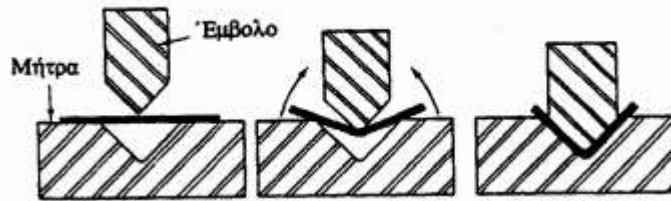
Η κάμψη είναι η απλούστερη από τις κατεργασίες διαμόρφωσης του επιπέδου ελάσματος, με μεγάλη πρακτική εφαρμογή, δεδομένου ότι με κατάλληλο συνδυασμό και επανάληψη καμπτικών παραμορφώσεων στο τεμάχιο, λαμβάνεται ποικιλία διατομών με ευρύτατη βιομηχανική χρήση.



Εικόνα 3.1: Παραμορφωμένο Έλασμα Κατά Την Κάμψη [17]

3.2 Κίνηση Μετάλλου

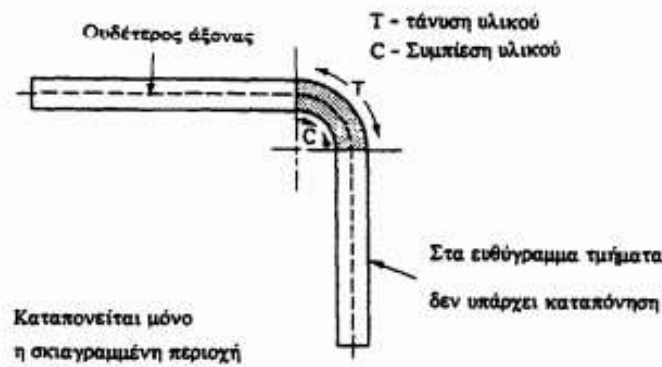
Κατά την κατεργασία της κάμψης, ένα μέρος του μεταλλικού ελάσματος στηρίζεται στην επίπεδη περιοχή της μήτρας για να μπορέσει να παραμορφωθεί κατάλληλα. Η ελεύθερη περιοχή του μετάλλου κάμπτεται προς τα κάτω, ώστε να πάρει το έλασμα την επιθυμητή μορφή. Το έλασμα, πιεζόμενο προς τα κάτω από το έμβολο, κινείται στον κενό χώρο για να καταλάβει τη νέα του θέση. Αυτή η κίνηση του μετάλλου μέσα στο κενό είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό για τις μήτρες κάμψης και η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Όταν σχεδιάζεται μία μήτρα κάμψης, η όλη κίνηση του μετάλλου πρέπει να ληφθεί υπόψη, ώστε να μην υπάρχει κανένα εμπόδιο στη διαδρομή του. Κατά την διαδικασία της κάμψης, το μεγαλύτερο μέρος του μετάλλου συνήθως παραμένει άκαμπτο και μόλις ένα μικρό μέρος του κινείται υπό την ενέργεια του εμβόλου. [18]



Εικόνα 3.2: Κίνηση Ελάσματος Κατά Τη Διάρκεια Κάμψης [18]

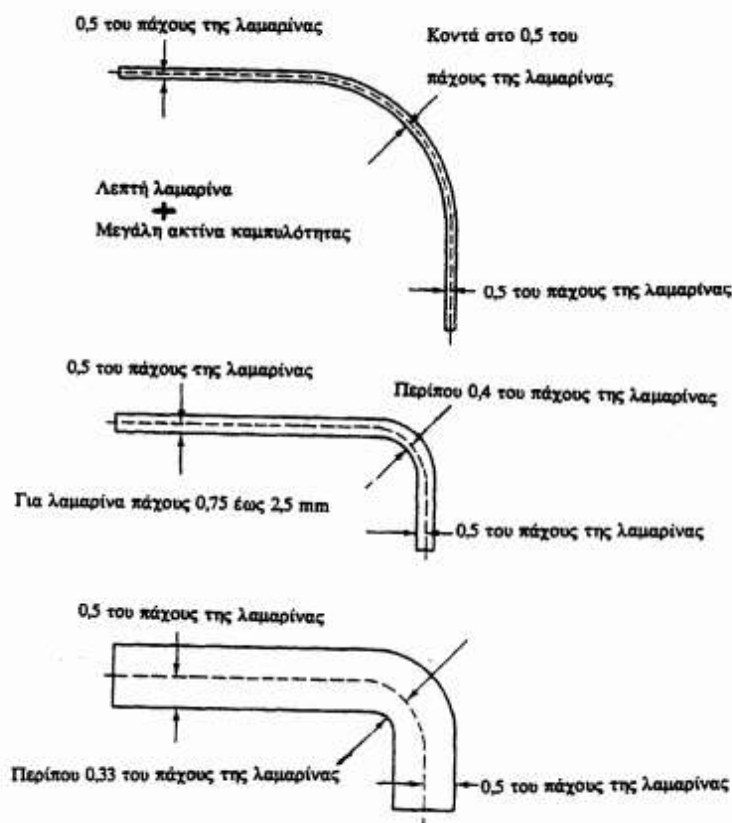
3.3 Ουδέτερος Άξονας

Κατά τη διαδικασία της κάμψης, το έλασμα καταπονείται σε εφελκυσμό στη μία επιφάνεια και θλίψη στην άλλη, άρα υπάρχει ένα σημείο όπου γίνεται αναστροφή τάσεων. Αυτή είναι η κεντρική γραμμή ή μέσο επίπεδο, όπου η τάση είναι μηδέν. Αυτή η γραμμή της μηδενικής τάσης καλείται ουδέτερος άξονας και φαίνεται στην *Εικόνα 3.3*. Πριν την κάμψη, το επίπεδο μεταλλικό κομμάτι ήταν ορισμένου μήκους. Το μήκος του ουδέτερου άξονα είναι ακριβώς ίσο με το αρχικό μήκος του κομματιού. Η εξωτερική πλευρά του μεταλλικού ελάσματος αυξήθηκε σε μήκος, ενώ η εσωτερική πλευρά μειώθηκε σε μήκος. Επειδή ο ουδέτερος άξονας είναι η αληθινή παράσταση του αρχικού μήκους του κομματιού, αυτός χρησιμοποιείται για να υπολογίζονται τα αναπτύγματα των προς κάμψη κομματιών. [18]



Εικόνα 3.3: Αναπτυσσόμενες Τάσεις Κατά Την Κάμψη [18]

Όταν το έλασμα αρχίζει να κάμπτεται, ο ουδέτερος άξονας είναι κοντά στο κέντρο του πάχους του. Καθώς η κάμψη προχωρεί, ο ουδέτερος άξονας μετακινείται προς την εσωτερική πλευρά της κάμψης, δηλαδή προς την θλιβόμενη πλευρά. Κατά κανόνα ο ουδέτερος άξονας μετρείται σε μια ορισμένη απόσταση από την εσωτερική πλευρά του μεταλλικού ελάσματος στην καμπτόμενη περιοχή. Το έλασμα λεπταίνει ελαφρώς στην καμπτόμενη περιοχή και η εξωτερική πλευρά στην περιοχή αυτή δεν έχει μια ακριβή διάσταση. Αντίθετα, η εσωτερική καμπτόμενη επιφάνεια σφίγγει στην ακτίνα καμπυλότητας της μεταλλικής μήτρας και έτσι εκεί έχει ακριβείς διαστάσεις. Γι' αυτό, τα περισσότερα κομμάτια διαστασιολογούνται με βάση την ακτίνα της εσωτερικής πλευράς σε όλες τις κάμψεις.

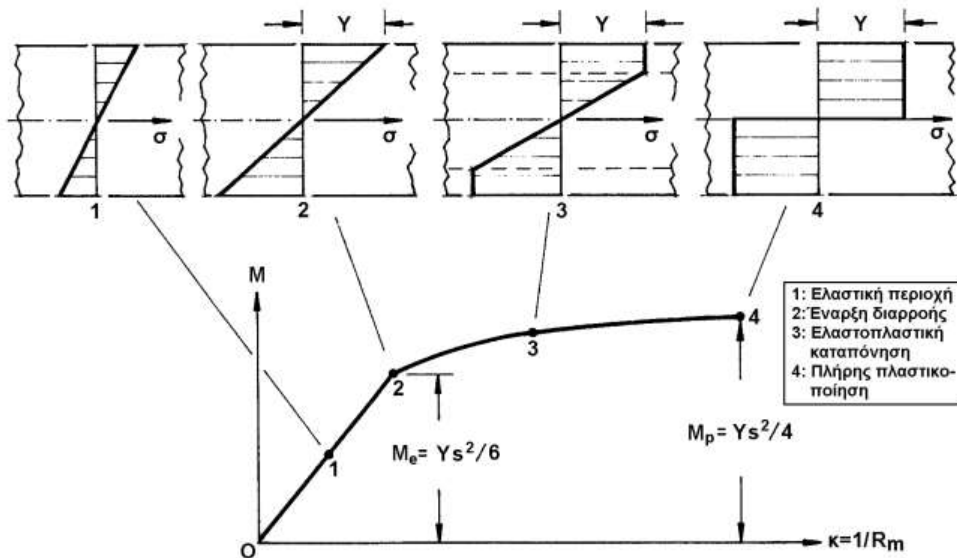


Εικόνα 3.4: Διάφορες Θέσεις Ουδέτερου Άξονα [18]

3.4 Διαδικασία Πλαστικοποίησης Διατομής

Κατά τη διαδικασία της κάμψης πραγματοποιείται μια προοδευτική πλαστικοποίηση της διατομής του ελάσματος. Διακρίνονται οι εξής φάσεις καταπόνησης:

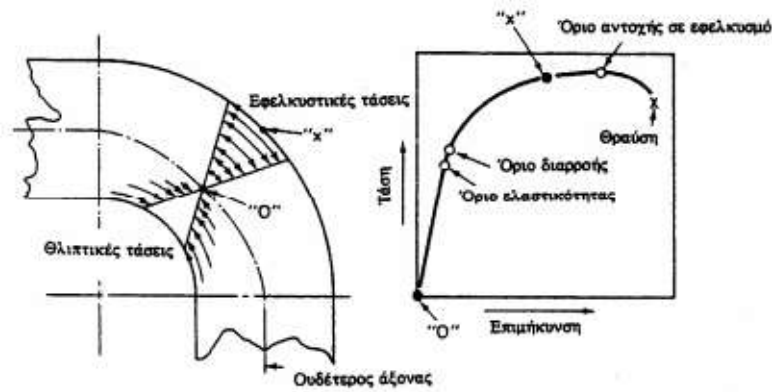
1. Καταπόνηση στην ελαστική περιοχή: Κύριο χαρακτηριστικό της φάσης αυτής είναι η γραμμική κατανομή της ορθής τάσης (σ_x) περί τον ουδέτερο άξονα της διατομής, λαμβάνοντας τιμές μικρότερες από το όριο διαρροής Y του υλικού του ελάσματος.
2. Έναρξη διαρροής: Σημειώνεται όταν η τάση στις ακραίες ίνες γίνει ίση με την τάση διαρροής Y . Η καμπτική ροπή που το προκαλεί ονομάζεται ροπή διαρροής (M_y).
3. Καταπόνηση στην ελαστοπλαστική περιοχή: Χαρακτηρίζεται από τη συνύπαρξη δύο ακραίων πλαστικών περιοχών και ενός ελαστικού πυρήνα.
4. Πλήρης πλαστικοποίηση της διατομής: Συμβαίνει όταν όλη η διατομή του ελάσματος εισέλθει στην πλαστική περιοχή. Η καμπτική ροπή που το επιτυγχάνει ονομάζεται ροπή πλήρους πλαστικοποίησης (M_p) και είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της πλαστικής κάμψης. Οι φάσεις αυτές φαίνονται στην *Εικόνα 3.5*. [17]



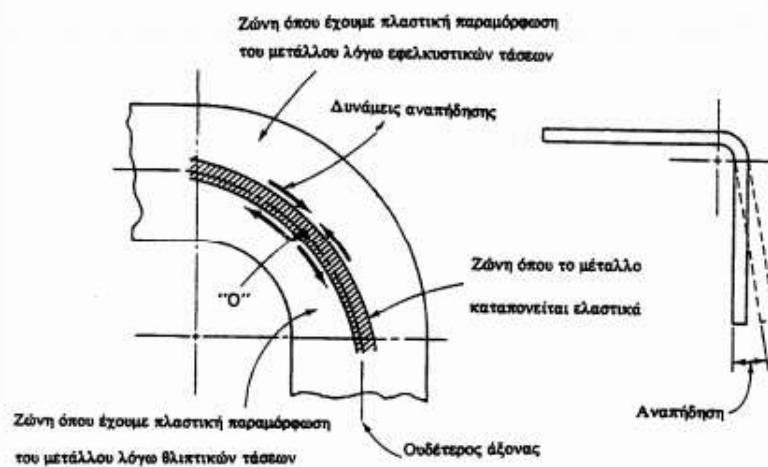
Εικόνα 3.5: Διαδικασία Πλαστικοποίησης Διατομής [17]

3.5 Ελαστική Επαναφορά

Με το πέρας της κατεργασίας κάμψης του ελάσματος, λόγω ενέργειας των καμπτικών δυνάμεων, προκαλείται ελαστική παραμόρφωση του υλικού. Στην κάμψη η μεγαλύτερη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται στην εξωτερική επιφάνεια του μετάλλου. Η εφελκυστική τάση μειώνεται προς το κέντρο του πάχους του μετάλλου και γίνεται μηδέν πάνω στον ουδέτερο άξονα. Στην Εικόνα 3.6 απεικονίζεται η αλλαγή μεταξύ εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στην καμπτική ζώνη. Αφού η εφελκυστική τάση μεταβάλλεται από τιμή μηδέν στο σημείο "Ο" επάνω στον ουδέτερο άξονα μέχρι μια μέγιστη τιμή στο σημείο "Χ" επάνω στην εξωτερική επιφάνεια, η καμπύλη τάσεων-καταπονήσεων του καθαρού εφελκυσμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της κάμψης. Ένας καλός σχεδιασμός κάμψη προϋποθέτει ότι η τάση εφελκυσμού στο σημείο "Χ" θα πρέπει να είναι κάτω από το όριο αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό. Εάν υπερβεί το όριο αντοχής σε εφελκυσμό, το μέταλλο μπορεί να σπάσει κατά τη διάρκεια της κάμψης. Ωστόσο, το έλασμα κοντά στον ουδέτερο άξονα έχει καταπονηθεί σε τιμές κάτω από το όριο ελαστικότητας. Έτσι, στο μέταλλο αναπτύσσεται μια στενή ελαστική λωρίδα εκατέρωθεν του ουδέτερου άξονα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7. Το μέταλλο πιο μακριά από τον ουδέτερο άξονα έχει καταπονηθεί πέρα από το όριο διαρροής του υλικού και έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Όταν το έμβολο συμπίεσης χαλαρώσει και χαθεί η επαφή του με το κατεργαζόμενο έλασμα, η ελαστική περιοχή η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στον ουδέτερο άξονα, προσπαθεί να επιστρέψει στην αρχική της επίπεδη κατάσταση, αλλά δεν μπορεί γιατί περιορίζεται από τη ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης. Όμως ελαφρώς επιστρέφει δημιουργώντας μια εξισορρόπηση μεταξύ ελαστικής και πλαστικής ζώνης και αυτή η επιστροφή του υλικού είναι γνωστή σαν ελαστική επαναφορά του υλικού (*Spring back*). [18]



Εικόνα 3.6: Μεταβολή Τάσεων Κατά Την Κάμψη [18]



Εικόνα 3.7: Υπεύθυνες Τάσεις Για Την Ελαστική Επαναφορά Υλικού [18]

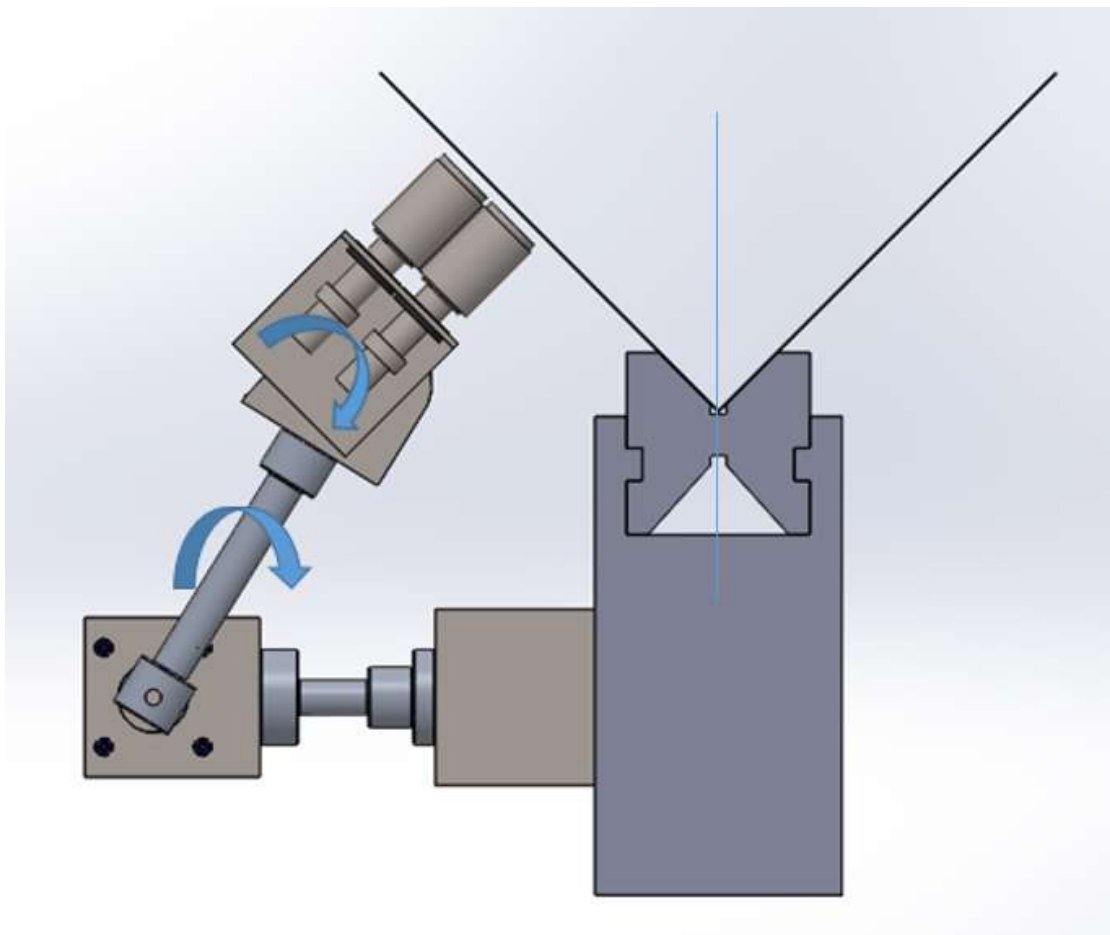
Αυτή η ελαστική επαναφορά του ελάσματος είναι και το βασικό πρόβλημα που δημιουργείται κατά τη διαδικασία της συγκεκριμένης κατεργασίας. Αναλυτικότερα, για όσο χρονικό διάστημα βρίσκεται το έμβολο σε επαφή με το έλασμα, το έλασμα έχει την επιθυμητή γωνία κάμψης. Όταν όμως χαθεί η επαφή αυτή, η ελαστική επαναφορά του ελάσματος τροποποιεί τη γωνία κάμψης του και επομένως η επιθυμητή γωνία με την πραγματική διαφέρουν. Αυτός είναι και ο λόγος που κρίνεται αναγκαία η χρήση μετρητικού οργάνου, για να είναι γνωστή ανά πάσα στιγμή η πραγματική γωνία κάμψης του ελάσματος και σε σύγκριση με τη θεωρητική να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες, ώστε να συμπίπτει η θεωρητική με την πραγματική τιμή της γωνίας αυτής.

4. Επιλεγμένη Διάταξη

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι για την επίτευξη τέτοιων μετρητικών διατάξεων, άλλες εξ επαφής του μετρητικού οργάνου με το έλασμα και άλλες εξ αποστάσεως, συνήθως με τη χρήση λέιζερ, χωρητικών ή υπέρηχων αισθητήρων. Σε κάποιες από αυτές έγινε σύντομη αναφορά στην *Ενότητα 1.3* της εργασίας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν κάποιες μετρητικές διατάξεις, συγκρίθηκαν μεταξύ τους και τελικά αποφασίστηκε αυτή που ικανοποιούσε περισσότερο τις αρχικές προδιαγραφές. Στην συνέχεια της εργασίας αναλύεται η επιλεγμένη διάταξη, ενώ οι υπόλοιπες αναφέρονται στο *Παράρτημα Α* της εργασίας.

4.1 Περιγραφή

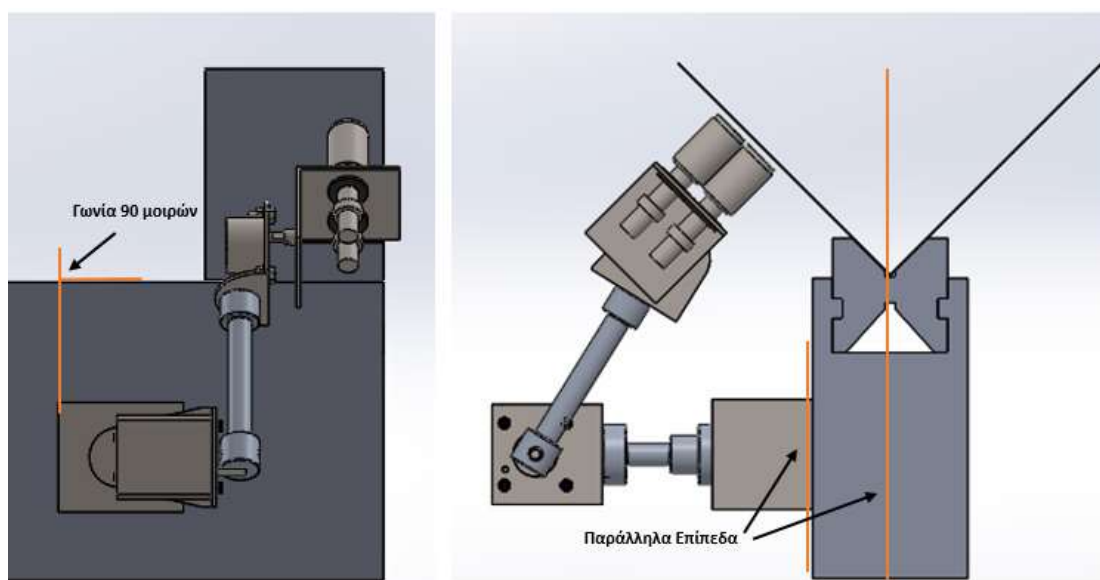
Το μετρητικό όργανο αποτελείται από δύο χωρητικούς αισθητήρες και τη βάση πάνω στην οποία τοποθετούνται και κινούνται στον χώρο, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.1*. Σκοπός του μηχανισμού της βάσης είναι να τοποθετήσει τους δύο αισθητήρες σε κατάλληλη απόσταση από το έλασμα και με τη σωστή γωνία-κλίση, ώστε αυτοί με τη σειρά τους να πάρουν τις απαραίτητες μετρήσεις. Συγκρίνοντας τις μετρήσεις που πήραν οι δύο αισθητήρες με τη γωνία-κλίση στην οποία βρίσκονται υπολογίζεται η γωνία σφάλματος της κάμψης. Υπογραμμίζεται ότι το μετρητικό όργανο σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να υπολογίζει το σφάλμα της γωνίας κάμψης του κατεργαζόμενου ελάσματος από την ιδανική γωνία που έπρεπε να καμφθεί. Δεν μετράει δηλαδή την ολική γωνία κάμψης που έχει αποκτήσει το έλασμα μετά την κατεργασία του.



Εικόνα 4.1: Αναπαράσταση Μηχανισμού

4.2 Τοποθέτηση Και Βαθμονόμηση

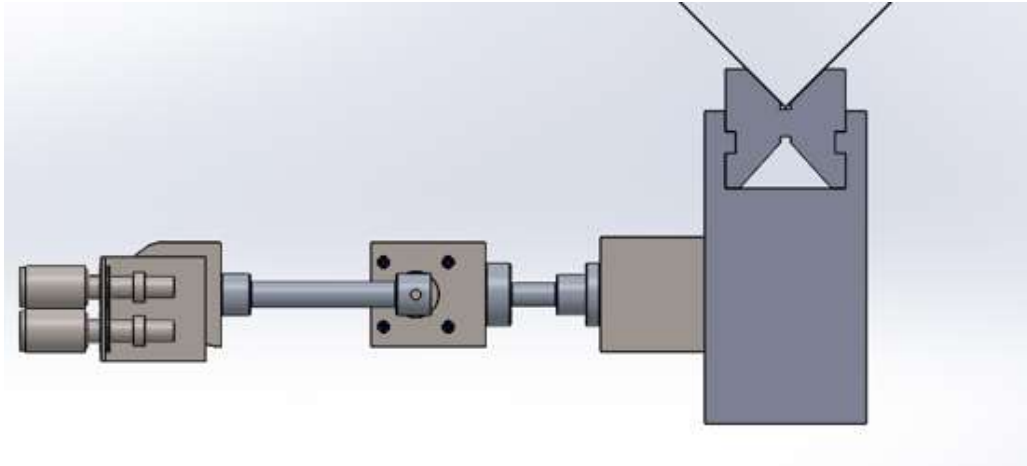
Καταρχάς, όσον αφορά την τοποθέτηση του μετρητικού οργάνου πάνω στην πλευρά της στράντζας είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κάθετα με μετρούμενο έλασμα, όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα της *Εικόνα 4.2*. Η τοποθέτηση αυτή γίνεται μέσω μια μαγνητικής βάσης η οποία έχει την ιδιότητα με το γύρισμα ενός μοχλού να μαγνητίζει και να απομαγνητίζει. Έτσι, η ακριβής τοποθέτηση πάνω στη στράντζα μπορεί να επιτευχθεί σχετικά εύκολα. Τονίζεται ότι για να λειτουργήσει σωστά η μετρητική διάταξη θα πρέπει η πλευρά της στράντζας πάνω στην οποία τοποθετείται η μαγνητική βάση να είναι παράλληλη με το κατακόρυφο επίπεδο της γωνίας κάμψης του ελάσματος, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα της *Εικόνα 4.2*. Έπειτα, ο κινούμενος άξονας περιστροφής καθώς και η πλατφόρμα πάνω στην οποία είναι τοποθετημένοι οι δύο χωρητικοί αισθητήρες πρέπει να εκκινούν από την κατάλληλη οριζόντια από το έδαφος θέση, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.3*. Τέλος, η τοποθέτηση του μετρητικού οργάνου πάνω στη στράντζα πρέπει να γίνεται σε κατάλληλο ύψος έτσι ώστε οι αισθητήρες να έχουν πρόσβαση στη μετρούμενη πλευρά του ελάσματος. Αυτά είναι τα κρίσιμα σημεία που πρέπει να προσέξει κάποιος κατά την τοποθέτηση του μετρητικού οργάνου πάνω στη στράντζα ώστε οι μετρήσεις να είναι αξιόπιστες.



Εικόνα 4.2: Σωστός Τρόπος Τοποθέτησης Μαγνητικής Βάσης Πάνω Στη Στράντζα

4.3 Διαδικασία

Κατά την εκκίνηση της κατεργασίας το μετρητικό όργανο θα πρέπει να βρίσκεται σε οριζόντια θέση όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.3*, για να μην επηρεάσει την αρχική κατάσταση και τη μετέπειτα κίνηση του κατεργαζόμενου ελάσματος. Στη συνέχεια, και αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της κάμψης, η βάση αρχίζει να κινείται με τη βοήθεια δύο βηματικών κινητήρων, με σκοπό να φέρει τους αισθητήρες στην ιδανική θέση για να πάρουν τις απαραίτητες μετρήσεις. Ο πρώτος βηματικός κινητήρας είναι υπεύθυνος να φέρει την πλατφόρμα σε κοντινή θέση από το έλασμα και ο δεύτερος κινητήρας να στρέψει την πλατφόρμα στην επιθυμητή γωνία-κλίση που πρέπει να έχει το τελικό έλασμα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.1*. Αφού έχουν έρθει οι αισθητήρες στη σωστή θέση και με τη σωστή κλίση, παίρνουν από μία σειρά μετρήσεων και η διαφορά στις τιμές τους προσδίδει την απόκλιση που έχει το έλασμα από την επιθυμητή τιμή.



Εικόνα 4.3: Αναπαράσταση Αρχικής Θέσης Μηχανισμού

4.4 Εύρεση Σημείου Μέτρησης

Από τη γεωμετρία του αριστερού μισού της Εικόνα 4.4 ισχύουν:

$$x_{1\alpha} = L \sin(\theta_1) \Leftrightarrow \theta_1 = \arcsin\left(\frac{x_{1\alpha}}{L}\right) \quad 4-1$$

$$y_{1\alpha} = L \cos(\theta_1) \Leftrightarrow \theta_1 = \arccos\left(\frac{y_{1\alpha}}{L}\right) \quad 4-2$$

Με αυτόν τον τρόπο οι συντεταγμένες των σημείων 1_α και 1_β με τη γωνία της άρθρωσης συσχετίζονται. Το σημείο 1_α είναι το σημείο στο οποίο πρέπει οι αισθητήρες να προσεγγίσουν για να μετρήσουν τις απαραίτητες αποστάσεις. Πρέπει λοιπόν να υπολογιστούν τα σημεία 1_α ($x_{\alpha 1}$, $y_{\alpha 1}$) και 1_β ($x_{\beta 1}$, $y_{\beta 1}$). Για να συμβεί αυτό αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η εξίσωση της ευθείας της πλευρά του ελάσματος. Αυτή δίνεται από την σχέση:

$$y - y_B = \lambda(x - x_B) \quad 4-3$$

Όπου x_B , y_B είναι γνωστά από τις διαστάσεις της μήτρας και από το σημείο τοποθέτησης του μετρητικού οργάνου και:

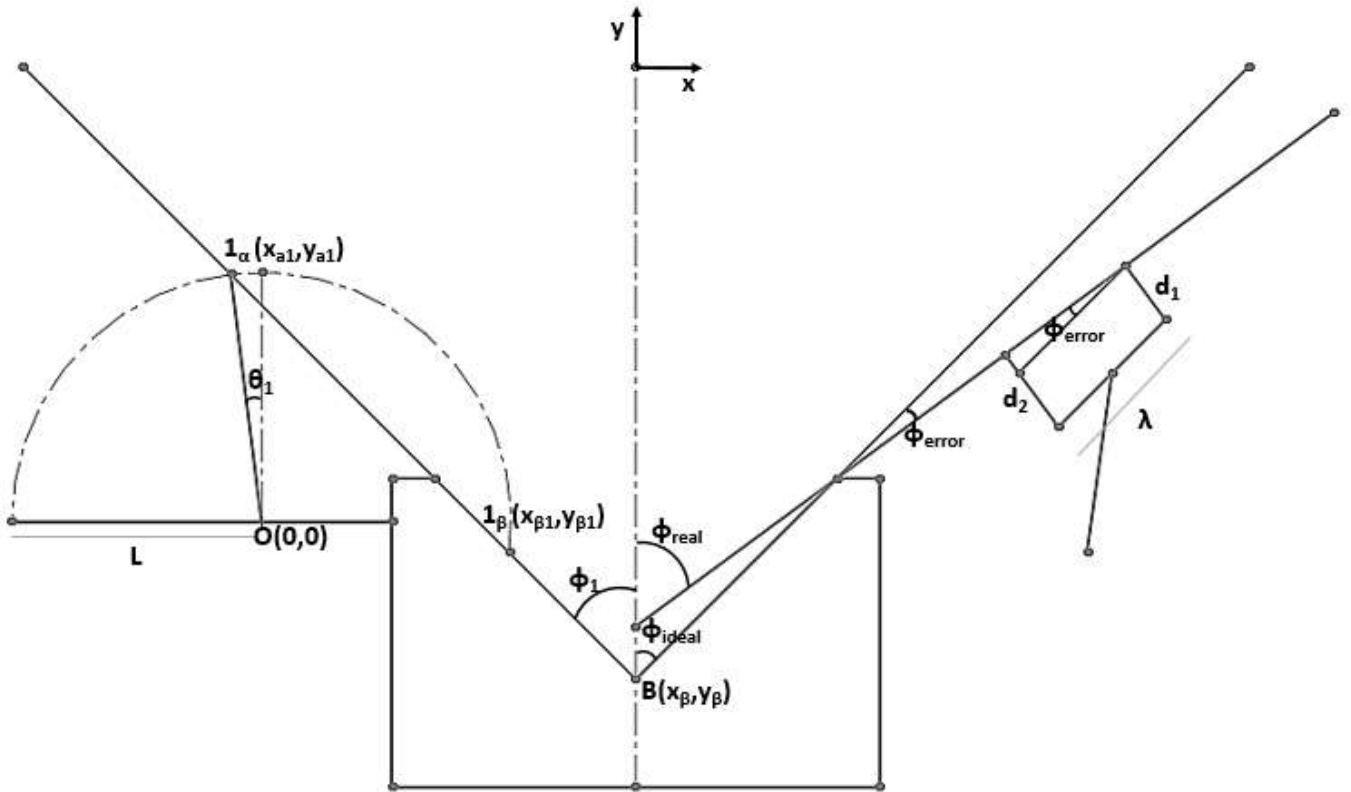
$$\lambda = \varepsilon\varphi(90 + \varphi_1) \quad 4-4$$

Προκύπτει δηλαδή:

$$y - y_B = \varepsilon\varphi(90 + \varphi_1)(x - x_B) \quad 4-5$$

Επίσης, ο μηχανισμός της βάσης των αισθητήρων εκτελεί κυκλική τροχιά γύρω από την άρθρωση με εξίσωση κίνησης:

$$x^2 + y^2 = L^2 \quad 4-6$$



Εικόνα 4.4: Γεωμετρική Αναπαράσταση Χρησιμοποιούμενης Θεωρίας

Εξισώνοντας τις σχέσεις 4-5 και 4-6 υπολογίζονται δύο σημεία 1_α και 1_β τα οποία είναι οι τομές του κύκλου με την ευθεία. Από αυτά επιλέγεται το σημείο με τη μικρότερη τετμημένη, δηλαδή με τη μικρότερη τιμή x , έτσι ώστε η μετακίνηση του μετρητικού οργάνου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και να αποφευχθεί τυχόν σύγκρουση των αισθητήρων με την πλευρά του ελάσματος.

4.5 Μέθοδος Υπολογισμού Γωνίας Σφάλματος

Για τη μέτρηση της γωνίας σφάλματος επιδιώκεται η πλατφόρμα πάνω στην οποία είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες να είναι παράλληλη με το έλασμα στην ιδανική του παραμόρφωση, δηλαδή όταν έχει γωνία κάμψης φ_{ideal} . Στην ιδανική περίπτωση οι δύο αισθητήρες απόστασης θα πρέπει να μετρούν την ίδια απόσταση δηλαδή, $d_2 - d_1 = 0$. Ωστόσο, αν το έλασμα λόγω της ελαστικής παραμόρφωσης ανοίξει και η γωνία κάμψης μεγαλώσει τότε οι μετρήσεις των αισθητήρων θα είναι διαφορετικές $d_1 \neq d_2$ και μάλιστα η διαφορά τους $d_2 - d_1$ υποδεικνύει το σφάλμα της γωνίας. Από το δεξί μισό της Εικόνα 4.4 ισχύει ότι:

$$\tan(\varphi_{error}) = \frac{d_2 - d_1}{\lambda} \Leftrightarrow \varphi_{error} = \arctan\left(\frac{d_2 - d_1}{\lambda}\right) \quad 4-7$$

Όπου $d_2 - d_1$ υπολογίζεται και λ γνωστή απόσταση μεταξύ των αισθητήρων.

4.6 Εύρος Μετρούμενων Γωνιών

Είναι δεδομένο ότι οι χωρητικοί αισθητήρες απόστασης που χρησιμοποιούνται έχουν εύρος μέτρησης από 0 μέχρι 2.5mm. Αυτό περιορίζει το εύρος των γωνιών που μπορεί να μετρήσει το όργανο. Για το εύρος μέτρησης των αισθητήρων καθώς και την απόσταση μεταξύ τους ισχύουν:

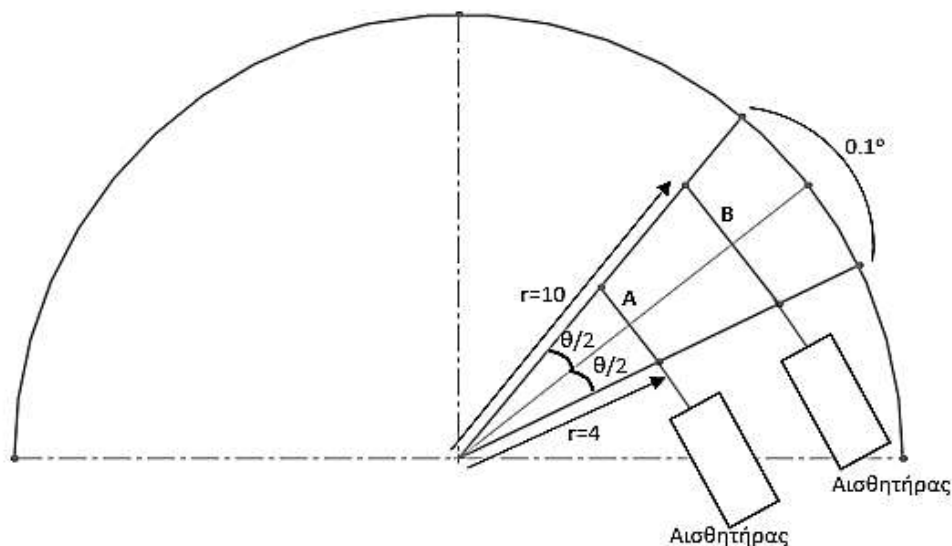
$$\begin{aligned}\lambda &= 25mm \\ d_{1min} &= 0mm \\ d_{2max} &= 2.5mm\end{aligned}$$

Από τη σχέση 4-7 με τα παραπάνω δεδομένα ισχύει ότι:

$$\tan(\varphi_{error_max}) = \frac{d_2 - d_1}{\lambda} \Leftrightarrow \varphi_{error_max} = \arctan\left(\frac{2.5}{25}\right) \Leftrightarrow \varphi_{error_max} = 5.5^\circ \quad 4-8$$

Για την αύξηση του εύρους των μετρούμενων γωνιών μπορεί η πλατφόρμα να μην γίνεται παράλληλη με την ιδανική γωνία αλλά σε μια μεγαλύτερη γωνία έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η μέτρηση. Βεβαίως, η αύξηση της γωνίας θα πρέπει να προστεθεί στην υπολογιζόμενη φ_{error} .

4.7 Απαιτούμενη Ακρίβεια Μέτρησης Αισθητήρων



Εικόνα 4.5: Γεωμετρικός Υπολογισμός Απαιτούμενης Ακρίβειας Αισθητήρων

Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στην απαραίτητη ακρίβεια που πρέπει να έχουν οι αισθητήρες του μετρητικού οργάνου έτσι ώστε να επιτευχθεί ακρίβεια μέτρησης της τάξης του ενός δέκατου της μοίρας. Στην Εικόνα 4.5 φαίνεται ο γεωμετρικός τρόπος μετατροπής της τιμής της γωνίας σφάλματος σε τιμή απόστασης. Άλλωστε οι αισθητήρες μετατόπισης μετρούν γραμμική απόσταση ενώ η μετρούμενη γωνία μετρείται σε γωνιακή μετατόπιση. Από την Εικόνα 4.5 ισχύει:

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{A}{2r} \Leftrightarrow A = 2r \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \Leftrightarrow$$

$$A = 17,45r \text{ (}\mu\text{m)} \quad 4-9$$

όπου θ η ζητούμενη ακρίβεια του μετρητικού οργάνου που ισούται με 0.1° και r η απόσταση μέτρησης του αισθητήρα από τη βάση της μήτρας, μετρούμενη σε εκατοστά.

Άρα για εύρος r από 4 μέχρι 10 cm προκύπτει για το A και το B ότι πρέπει να κυμαίνονται ανάμεσα στα 70 μm με 174 μm αντίστοιχα. Για να επιτευχθεί ακρίβεια μέτρησης 0.1° το μετρητικό όργανο πρέπει να έχει ακρίβεια από A=70 μm μέχρι B=174 μm , ανάλογα με το ύψος των σημείων που γίνεται η μέτρηση. Οι *capacitive sensors MEI 2.5mm* έχουν ακρίβεια $\pm 1.2\%$ του εύρους μέτρησής τους, δηλαδή περίπου 30 μm , άρα μπορεί να επιτευχθεί η συγκεκριμένη ακρίβεια με τους συγκεκριμένους αισθητήρες.

4.8 Διευκρίνιση

Η χρησιμοποίηση μιας τέτοιας μετρητικής διάταξης είναι ικανή να υπολογίσει τη γωνία σφάλματος του κατεργαζόμενου ελάσματος αλλά με την προϋπόθεση ότι το σφάλμα αυτό είναι συμμετρικό ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της γωνίας κάμψης. Επισημαίνεται ότι το μετρητικό όργανο σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπολογίζει το σφάλμα της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της πλευράς του μετρούμενου ελάσματος και του κατακόρυφου συμμετρικού επιπέδου σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιθυμητή γωνία κάμψης, την ϕ_{error} όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.4*. Δηλαδή, αν παραδείγματος χάριν η ιδανική γωνία κάμψης είναι 90 μοιρών, το μετρητικό όργανο θα υπολογίσει την απόκλιση της μισής γωνίας δηλαδή αυτής των 45 μοιρών και θα το πολλαπλασιάσει δύο φορές για να βρει το ολικό σφάλμα της γωνίας.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού θα πρέπει να τοποθετηθεί ένα όμοιο μετρητικό όργανο και από την απέναντι πλευρά της μήτρας. Με τη χρήση δύο οργάνων, όπου το καθένα θα υπολογίζει το σφάλμα της μισής γωνίας, και με πρόσθεση των δύο αυτών σφαλμάτων θα προσδιορίζεται το ολικό σφάλμα της γωνίας, χωρίς να χρειάζεται η προϋπόθεση της συμμετρίας.

4.9 Απαραίτητος Εξοπλισμός

- Ένας κινητήρας για να περιστρέφει την πλατφόρμα
- Ένας κινητήρας για να περιστρέφει τη βάση
- Δύο Αισθητήρες απόστασης (capacitive sensor)
- Βάση για την τοποθέτηση των παραπάνω αισθητήρων
- Αποθηκευτική μνήμη και επεξεργαστή
- Μαγνητική βάση για τη σταθεροποίηση του μηχανισμού πάνω στη στράντζα.

4.10 Πλεονεκτήματα

- Ακριβές μετρήσεις
- Συμβατή με διάφορες στράντζες
- Μέτρηση εξ αποστάσεως
- Οικονομικά μετρητικά όργανα
- Γρήγορη και εύκολη βαθμονόμηση
- Εύκολα κατασκευάσιμη διάταξη

4.11 Μειονεκτήματα

- Μικρές ανοχές κατά την κατασκευή, ακριβή κατασκευή
- Προϋποθέτει το έλασμα να είναι ενιαίο και λείο
- Όχι ταυτόχρονη μέτρηση της ζητούμενης γωνίας με την κατεργασία του ελάσματος

5. Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης Αισθητήρων

Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στον τρόπο λειτουργίας των χρησιμοποιούμενων βηματικών κινητήρων για την κίνηση των δύο αισθητήρων. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο μικροελεγκτής Arduino του συστήματος και τέλος θα γίνει αναφορά στους οδηγούς των βηματικών κινητήρων που χρησιμοποιήθηκαν.

5.1 Βηματικοί Κινητήρες

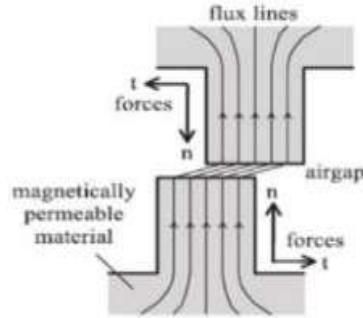
5.1.1 Γενικά Στοιχεία

Ο βηματικός κινητήρας είναι μια συσκευή ηλεκτρομηχανικής κίνησης η οποία μετατρέπει το ψηφιακό σήμα σε μηχανική κίνηση. Βασικά μέρη ενός τέτοιου κινητήρα είναι το κινούμενο μέρος, ο δρομέας ο οποίος είναι ένας μόνιμος μαγνήτης και το ακίνητο μέρος, ο στάτης ο οποίος αποτελείται από τυλίγματα. Για να λειτουργήσει ένας βηματικός κινητήρας χρειάζεται μια μονάδα ελέγχου (driver), η οποία ενεργοποιεί τα τυλίγματα του στάτη ξεχωριστά με βάση μια συγκεκριμένη ακολουθία παλμών. Άρα ο βηματικός κινητήρας λειτουργεί με παλμούς, κάθε παλμός δίνει εντολή να ενεργοποιηθεί ένα τύλιγμα και έτσι ο δρομέας έλκετε από το συγκεκριμένο τύλιγμα που ενεργοποιήθηκε κάνοντας έτσι ένα βήμα, εξίσου και η ονομασία του βηματικός κινητήρας.

Ο βηματικός κινητήρας μετατρέπει τους παλμούς σε διακριτή γωνιακή μετατόπιση του δρομέα ή γωνιακό βήμα (step). Παραδείγματος χάριν ένας κινητήρας με 200 βήματα ανά περιστροφή έχει βηματική γωνία του ισούται με $360/200=1.8^\circ$. Η συνολική γωνία που διανύει ο δρομέας είναι ίση με τη βηματική γωνία επί τον αριθμό των βημάτων, δηλαδή όταν έχει εφαρμοστεί ένας ορισμένος αριθμός παλμών, ο δρομέας θα έχει περιστραφεί κατά μία ορισμένη γωνία. Έτσι ένας βηματικός κινητήρας εκθέτει τις άριστες λειτουργικές ιδιότητες όπως είναι η γρήγορη έναρξη και παύση και γενικά η ακριβής οδήγηση, δηλαδή η ελέγξιμη ταχύτητα ή η θέση, σαν απάντηση στους παλμούς βημάτων εισαγωγής που εφαρμόζονται συνήθως από ένα κατάλληλο κύκλωμα ελέγχου, το λεγόμενο (driver). [19],[20]

5.1.2 Αρχή Λειτουργίας

Οι βηματικοί κινητήρες τόσο στο σταθερό τους μέρος (στάτη) όσο και στο στρεφόμενο (δρομέα) περιέχουν δόντια από μαγνητικά αγωγίμο υλικό. Όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται με ρεύμα, το μαγνητικό αυτό υλικό των δοντιών δημιουργεί μια μαγνητική ροή ανάμεσα στα δόντια του στάτη και του δρομέα. Αυτή η μαγνητική ροή παράγει στα δόντια ίσες και αντίθετες δυνάμεις των οποίων η κάθετη συνιστώσα (n) τείνει να μειώσει το διάκενο ανάμεσα στον στάτη και τον δρομέα ενώ η εφαπτόμενη (t) τείνει να μετακινήσει πλαγίως τα δόντια, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.1*. Η εφαπτόμενη δύναμη (t) είναι και η δύναμη που παίζει τον καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του βηματικού κινητήρα. Όταν η μαγνητική ροή που τα διαπερνά αφαιρείται ή εφαρμόζεται σε άλλο ζεύγος δοντιών, οι δυνάμεις έλξης μηδενίζονται. [19],[20]

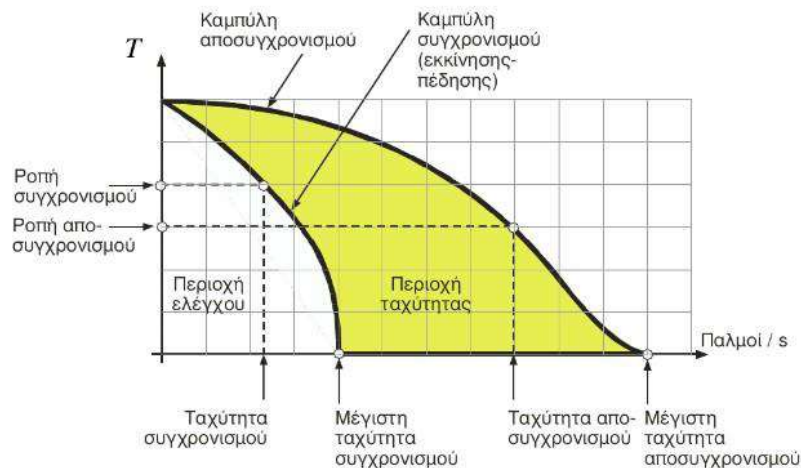


Εικόνα 5.1: Αναπτυσσόμενες Δυνάμεις Στα Δόντια Του Κινητήρα [20]

Η περιστροφή κατά γωνιακά βήματα επιτυγχάνεται διεγείροντας το κατάλληλο τύλιγμα στον στάτη, ενώ μπορεί να αντιστρέφεται η φορά των βημάτων. Επειδή ο κινητήρας στρέφεται μόνο κατά διακριτά γωνιακά βήματα, ο δρομέας επιταχύνεται και επιβραδύνεται συνεχώς, ακόμη και όταν φαίνεται να περιστρέφεται με "σταθερή" ταχύτητα. Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται παλμικά.

Για την αποτελεσματική λειτουργία του κινητήρα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα. Η συμπεριφορά του κινητήρα εξαρτάται από την οδήγησή του, και επομένως αυτό ισχύει και για την καμπύλη ροπής-στροφών. Συχνά, η χαρακτηριστική δίνεται σαν ροπή-συχνότητα παλμών, επειδή η τελευταία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής.

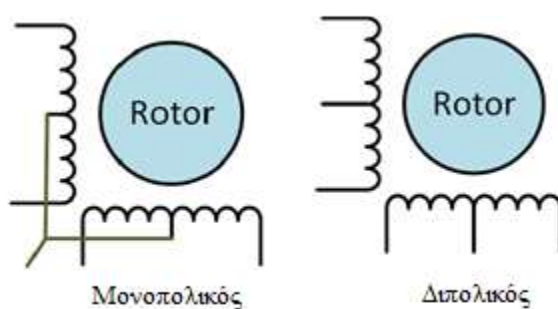
Η χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-συχνότητα παλμών των βηματικών κινητήρων περιλαμβάνει δύο καμπύλες, την καμπύλη συγχρονισμού (pull-in) και την καμπύλη αποσυγχρονισμού (pull-out), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα Ροπής-Συχνότητα Παλμών [20]

Οι καμπύλες αυτές χωρίζουν το διάγραμμα ροπής-ταχύτητας σε δύο περιοχές. Στην πρώτη, την περιοχή ελέγχου, ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει, να σταματήσει, ή να αλλάξει φορά με ένα μόνο παλμό. Στην περιοχή αυτή, ο κινητήρας μπορεί να εργάζεται σαν διάταξη ελέγχου θέσης ανοικτού βρόχου. Στη δεύτερη περιοχή, την περιοχή ταχύτητας, ο κινητήρας εργάζεται αφού επιταχυνθεί από την πρώτη. Ο κινητήρας στρέφεται χωρίς να αποσυγχρονίζεται, αλλά δεν μπορεί να σταματήσει ή να αλλάξει φορά περιστροφής. Για να συμβεί αυτό, ο κινητήρας θα πρέπει πρώτα να οδηγηθεί στην περιοχή ελέγχου. [20]

5.1.3 Μονοπολικό-Διπολικό



Εικόνα 5.3: Απεικόνιση Μονοπολικού Και Διπολικού Βηματικού Κινητήρα [20]

Οι βηματικοί κινητήρες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατασκευής τους αλλά και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Δύο βασικοί τρόποι διαχωρισμού τους, είναι με βάση το δρομέα και τα τυλίγματα στο στάτη.

5.1.3.1 Μονοπολικό

Οι μονοπολικό βηματικοί κινητήρες έχουν στο στάτη τυλίγματα καθένα από τα οποία έχει μια κεντρική ελικοτομή. Οι ελικοτομές έχουν δύο τρόπους σύνδεσης. Ο πρώτος τρόπος σύνδεσης είναι να φέρονται έξω από τον κινητήρα σαν δυο ξεχωριστά καλώδια ενώ ο δεύτερος είναι αυτά τα καλώδια να ενώνονται εσωτερικά και να φέρονται έξω από τον κινητήρα σαν ένα καλώδιο. Επομένως οι μονοπολικό βηματικοί κινητήρες συνήθως έχουν έξι ή πέντε ακροδέκτες.

Ανεξάρτητα με τον αριθμό καλωδίων οι κινητήρες αυτοί οδηγούνται με τον ίδιο τρόπο: τα κεντρικά καλώδια (ή το κεντρικό καλώδιο) συνδέεται με την τροφοδοσία και τα καλώδια από τις άκρες των τυλιγμάτων γειώνονται. Ενεργοποιώντας πρώτα το μισό τύλιγμα και στη συνέχεια το άλλο μισό, οι μαγνητικοί πόλοι αλλάζουν. Ένα σημαντικό μειονέκτημα τους είναι ότι, κάθε φορά, χρησιμοποιείται μόνο το ήμισυ των διαθέσιμων περιελίξεων. Αυτό έχει ως συνέπεια, η παραγόμενη ροπή να είναι περίπου το ήμισυ της ροπής σε σχέση με τη ροπή που θα παραγόταν από τον αντίστοιχο διπολικό κινητήρα. Ο μονοπολικό κινητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως διπολικός, μη συνδέοντας το κοινό τύλιγμα. [20]

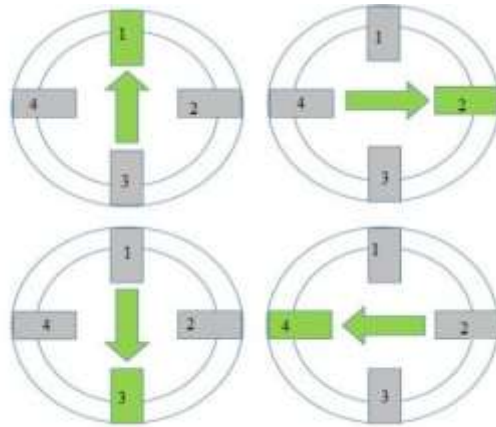
5.1.3.2 Διπολικό

Αντίθετα με τους μονοπολικό κινητήρες, οι διπολικό δεν έχουν κεντρικές ελικοτομές στα τυλίγματα τους, δηλαδή δεν υπάρχει καλώδιο που να ξεκινά από τη μέση ενός τυλιγματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να περνά μέσα από όλο το τύλιγμα και όχι από το μισό όπως συμβαίνει στους μονοπολικό κινητήρες και έτσι οι διπολικό κινητήρες παράγουν περισσότερη ροπή στρέψης από τους μονοπολικό αντίστοιχου μεγέθους. Τονίζεται ότι οι διπολικό κινητήρες απαιτούν πολύπλοκο κύκλωμα ελέγχου. [20]

5.1.4 Μέθοδοι Βηματισμού

5.1.4.1 Μονό Βήμα - Διέγερση Μίας Σπείρας (Single Step – Single Coil Excitation)

Αυτός είναι ο πιο απλός τρόπος βηματισμού ενός κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση ενεργοποιείται ένας ηλεκτρομαγνήτης κάθε φορά. Παρακάτω φαίνεται η ακολουθία παλμών για τη μέθοδο μονού βήματος:



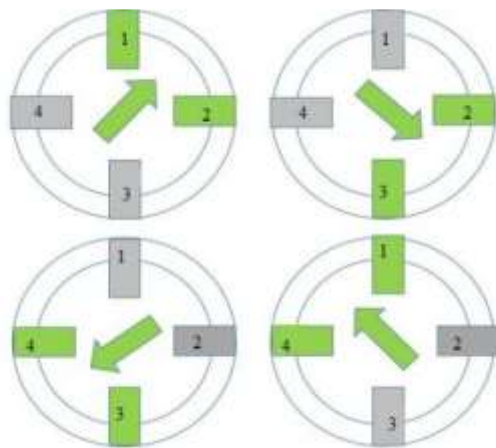
Εικόνα 5.4: Διέγερση Μίας Σπείρας [20]

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Πίνακας 2: Παλμοί Ανά Φάση Μονού Βήματος

5.1.4.2 Βηματισμός Υψηλής Ροπής (High Torque Step – Two Coil Excitation)

Με αυτόν τον τρόπο βηματισμού επιτυγχάνονται μεγάλες τιμές ροπής στην περιστροφή του δρομέα. Σε αυτή την περίπτωση ενεργοποιούνται δύο ηλεκτρομαγνήτες συγχρόνως κάθε φορά. Παρακάτω φαίνεται η ακολουθία παλμών για βηματισμό υψηλής ροπής:



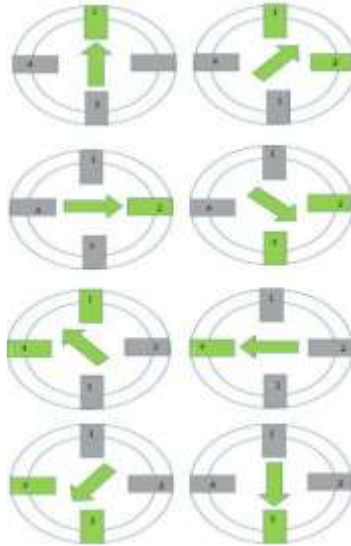
Εικόνα 5.5: Βηματισμός Υψηλής Ροπής [20]

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Πίνακας 3: Παλμοί Ανά Φάση Υψηλής Ροπής

5.1.4.3 Μισό Βήμα (Half Step)

Η διαφορά μεταξύ μονού και μισού βήματος είναι ότι για κινητήρες με το ίδιο γωνιακό βήμα, η μέθοδος του μισού βήματος δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια κίνησης αφού ο δρομέας κινείται μισό βήμα τη φορά. Ωστόσο για να επιτευχθεί αυτός ο βηματισμός η ταχύτητα περιστροφής θα είναι η μισή.



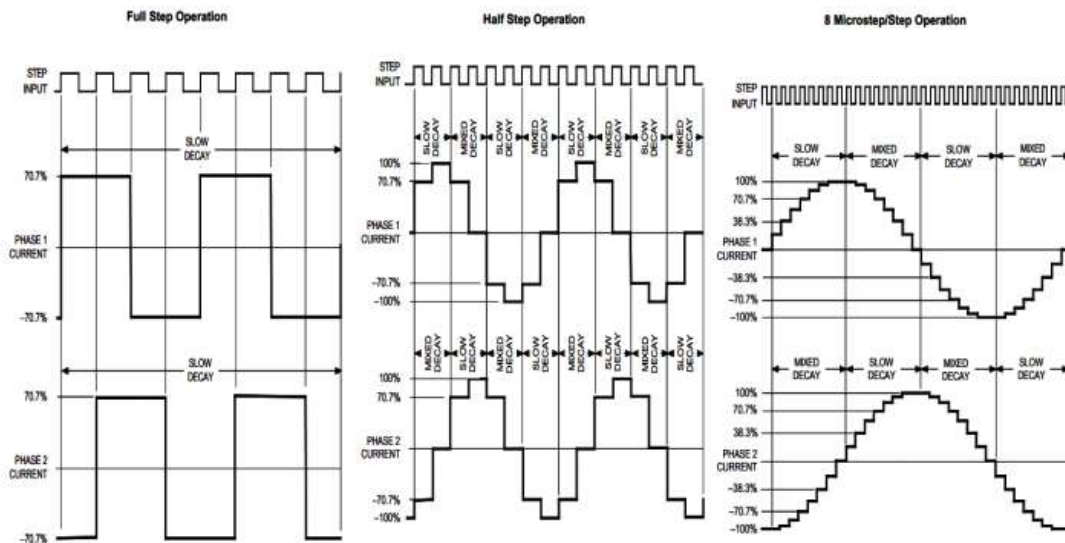
Εικόνα 5.6: Ακολουθία Μισού Βήματος [20]

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

Πίνακας 4: Παλμοί Ανά Φάση Μισού Βήματος

5.1.4.4 Μικροβηματισμός

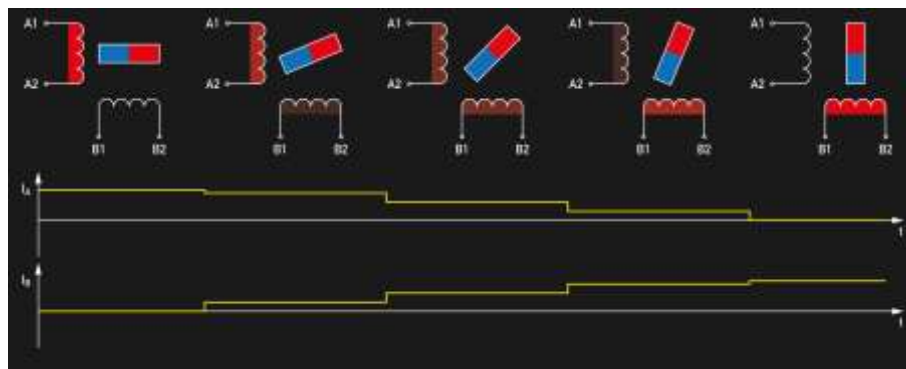
Ο Μικροβηματισμός (*Microstepping*) είναι σχετικά μία νέα τεχνολογία στην οδήγηση βηματικών κινητήρων. Ελέγχοντας με ηλεκτρονικό τρόπο τα ρεύματα των τυλιγμάτων του στάτη, δίνοντας παλμούς μέσω ενός μικροεπεξεργαστή, επιτυγχάνονται υποπολλαπλάσια του βήματος. Ο ελεγκτής μικροβηματισμού είναι ένας οδηγός που στέλνει παλμούς στον κινητήρα σε μορφή ιδανικής κυματομορφής. Ο στόχος του μικροβηματισμού ουσιαστικά είναι να λειτουργεί ο βηματικός κινητήρας ομαλότερα. Λόγω της κατασκευής και της φύσης των βηματικών κινητήρων η περιστροφή τους δεν είναι ομαλή καθώς ο κινητήρας κινείται βήμα-βήμα. Αυτό ωστόσο λόγω της γρήγορης εναλλαγής των βημάτων δεν παρατηρείτε ιδιαίτερα. Για τις εφαρμογές όμως που η ομαλότητα είναι απαραίτητη ο μικροβηματισμός επιβάλλεται. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η κυματομορφή των παλμών στον μικροβηματισμό.



Εικόνα 5.7: Παλμική Τάση Λειτουργίας Μικροβηματισμού [21]

Επίσης, ο μικροβηματισμός μπορεί να βελτιώσει, έως ένα βαθμό, την ακρίβεια οδήγησης του βηματικού κινητήρα, εις βάρος της ροπής συγκράτησης. Η βελτίωση της ακρίβειας οδήγησης πραγματοποιείται επειδή η διακριτική ικανότητα του κινητήρα αυξάνεται αφού κάθε βήμα του κινητήρα υποδιαιρείται σε επιμέρους βήματα. Άρα ενώ αρχικά κάποιος κινητήρας χρειάζεται 200 βήματα ανά περιστροφή δηλαδή 1.8 μοίρες ανά βήμα, με τη λειτουργία του μικροβηματισμού μπορούν να αυξηθούν τα βήματα αυτά ακόμα και 32 φορές και να γίνουν 6400 βήματα ανά περιστροφή ή αλλιώς η βηματική γωνία να γίνει ίση με 0.056 μοίρες.

Ωστόσο, ένα τμήμα της ροπής χάνεται επειδή πλέον ο κάθε παλμός διαιρείται σε τμήματα, τα οποία μεταβάλλουν τη μαγνητική δύναμη των διπλανών τυλιγμάτων του στάτη σταδιακά. Δηλαδή το ήδη ενεργοποιημένο τυλίγμα αρχίζει να απενεργοποιείται σε στάδια και το επόμενο αρχίζει να ενεργοποιείται και αυτό σε στάδια και αντίστοιχα μεταβάλλεται και η μαγνητική δύναμη μεταξύ του στάτη και του δρομέα, αφού είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που διαρρέεται στα τυλίγματα του στάτη. Έτσι ναι μεν η μετάβαση του δρομέα από το ένα τυλίγμα στο άλλο γίνεται ομαλά και σε αρκετά βήματα αλλά πλέον η μαγνητική δύναμη διαιρείται στα αντίστοιχα βήματα. Αντίθετα, στη λειτουργία του κινητήρα χωρίς μικροβηματισμό η απενεργοποίηση και η ενεργοποίηση των τυλιγμάτων γίνεται σε ένα βήμα, η μετάβαση γίνεται πιο απότομα αλλά και με την πλήρη ισχύ του κάθε τυλιγματος του στάτη. Η εξήγηση αυτή φαίνεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.8: Λειτουργία Μαγνητών Στον Μικροβηματισμό [22]

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις μπορεί ο κινητήρας να είναι ικανός να προσδώσει την ίδια μέγιστη ροπή με ή χωρίς την ενεργοποίηση της λειτουργίας του μικροβηματισμού, ωστόσο στην περίπτωση αυτή χάνεται η περαιτέρω ακρίβεια που θα πρόσδιδε στον κινητήρα η λειτουργία του μικροβηματισμού. Αυτό συμβαίνει επειδή πρακτικά ο δρομέας θα βρίσκεται κάπου ανάμεσα στα δύο τυλίγματα του στάτη, χωρίς όμως να είναι γνωστή η ακριβής του θέση αφού η εξωτερική ροπή που ασκείται στο άξονα του κινητήρα από την εξωτερική κατασκευή θα υπερνικά τη μαγνητική μεταβολή της δύναμης με αποτέλεσμα να μετατοπίζει στιγμιαία τη θέση του δρομέα. Άρα ναι μεν θα γίνει πιο ομαλή η κίνηση του κινητήρα αλλά η ακρίβεια θα παραμείνει η ίδια. Μόνο με σημαντική μείωση της ροπής θα υπάρξει βελτίωση στην ακρίβεια του κινητήρα.

5.2 Μικροελεγκτής Arduino



Εικόνα 5.9: Μικροελεγκτής Arduino

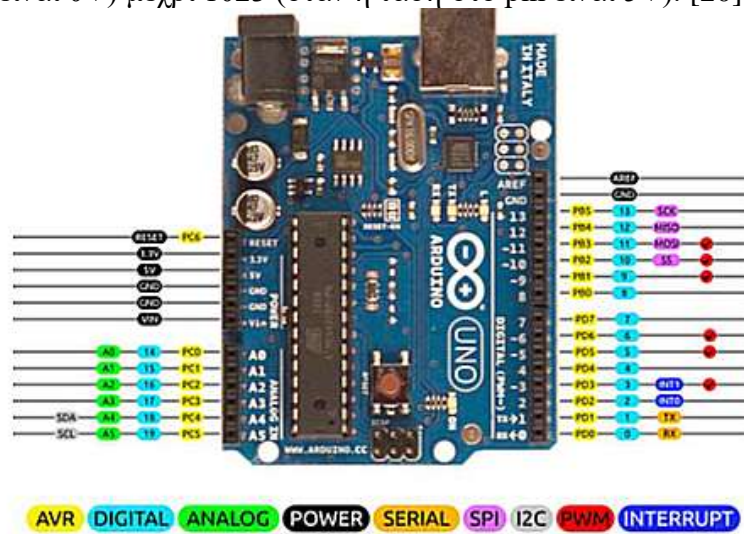
Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα *Wiring* (ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++).

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής έγινε χρήση του Arduino UNO για τον προγραμματισμό και την αυτοματοποίηση της κίνησης των βηματικών κινητήρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη λειτουργία του συστήματος.

Το Arduino διαθέτει σειριακό interface. Ο μικροελεγκτής υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία, την οποία το Arduino προωθεί μέσα από έναν ελεγκτή ώστε να συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB. Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται για την μεταφορά των προγραμμάτων που σχεδιάζονται από τον υπολογιστή στο Arduino αλλά και για αμφίδρομη επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή μέσα από το πρόγραμμα την ώρα που εκτελείται. Επιπλέον, στην πάνω πλευρά του Arduino βρίσκονται 18 υποδοχές (pins), που μπορούν να λειτουργήσουν ως ψηφιακές εισοδοι και εξοδοι. Λειτουργούν στα 5V και καθένα μπορεί να παρέχει ή να δεχτεί το πολύ 20mA. Ως ψηφιακή έξοδος, ένα από αυτά τα pin μπορεί να τεθεί μέσα από το πρόγραμμά σε κατάσταση *HIGH* ή *LOW*, οπότε το Arduino θα ξέρει αν πρέπει να διοχετεύσει ή όχι ρεύμα στο συγκεκριμένο pin.

Τέλος, στην κάτω πλευρά του Arduino, με τη σήμανση *ANALOG IN*, υπάρχει μια ακόμη σειρά από 6 pin, αριθμημένα από το 0 ως το 5. Το καθένα από αυτά δύναται να λειτουργεί ως αναλογική είσοδος κάνοντας χρήση του ADC (*Analog to Digital Converter*) που είναι ενσωματωμένο στο μικροελεγκτή. Επομένως είναι δυνατόν να τροφοδοτηθεί ένα από τα pin αυτά με μία τάση η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 0V ως μια τάση αναφοράς V_{ref} η οποία, αν δεν προηγηθεί κάποια αλλαγή είναι προ-ρυθμισμένη στα 5V. Τότε, μέσα από το

πρόγραμμα λαμβάνεται η τιμή του pin ως ένα ακέραιο αριθμό ανάλυσης 10-bit, από 0 (όταν η τάση στο pin είναι 0V) μέχρι 1023 (όταν η τάση στο pin είναι 5V). [20]



Εικόνα 5.10: Υποδοχές Arduino Uno

5.3 Οδηγοί Βηματικών Κινητήρων

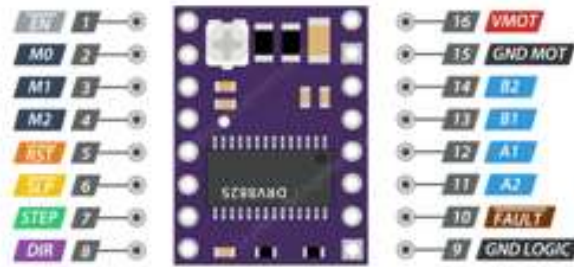
5.3.1 Driver DRV8825

5.3.1.1 Γενικά Στοιχεία

Το DRV8825 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, σχεδιασμένο για οδήγηση διπολικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως εκτυπωτές, σκάνερ και διάφορα άλλα αυτόματα συστήματα. Περιέχει ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί με ρεύμα 8.2 έως 45 Volt και είναι ικανό να αποδώσει έως και 2.2 Ampere σε full-step. Με τις διόδους επικοινωνίας step και dir μπορεί να γίνει εύκολα η επικοινωνία μεταξύ του οδηγού και του controller. Επίσης δίνεται η επιλογή sleep-mode που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και επομένως και την υπερβολική αύξηση θερμοκρασίας όταν δεν λειτουργεί ο κινητήρας. [20]



Εικόνα 5.11: Μορφή Driver DRV8825



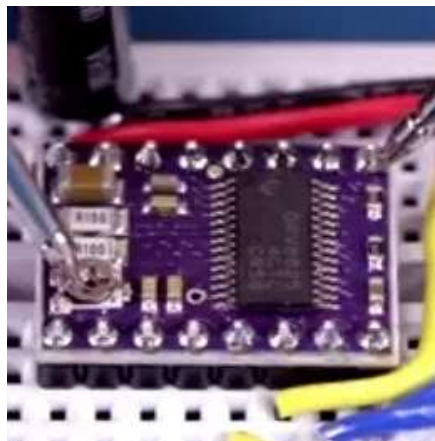
Εικόνα 5.12: Θύρες Driver DRV8825

5.3.1.2 Ρύθμιση Έντασης Ρεύματος.

Το ρεύμα που τροφοδοτεί τα τυλίγματα του κινητήρα ρυθμίζεται μέσω σταθερής συχνότητας παλμικής διαμόρφωσης. Για να βρεθεί το ρεύμα που θα διαρρέει τον κινητήρα χρειάζεται να γίνει ο ακόλουθος υπολογισμός.

$$I = \frac{V_{ref}}{5R_{sense}} \quad 5-1$$

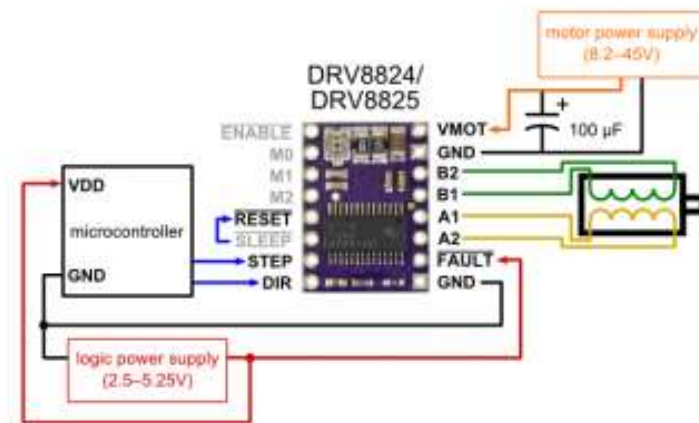
Για την μέτρηση του V_{ref} αφού έχει συνδεθεί το driver σε τροφοδοσία τοποθετείται το θετικό άκρο (κόκκινο) του πολυμέτρου στον κοχλία ρυθμιστή-ποτενσιόμετρο και το αρνητικό (μαύρο) σε μια γείωση (ground pin), όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.13*.



Εικόνα 5.13: Μέτρηση Τάσης V_{ref}

5.3.1.3 Pins Και Συνδεσμολογία.

Στην *Εικόνα 5.14* διακρίνονται τα pins του driver καθώς και η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε για την ομαλή επικοινωνία της πλακέτας του Arduino με το Driver και τον βηματικό κινητήρα.



Εικόνα 5.14: Συνδεσμολογία Driver DRV8825 [23]

5.3.1.4 Επεξήγηση Υποδοχών (Pins)

- **ENABLE**

Αυτό το Pin ενεργοποιεί και απενεργοποιεί όλα τα Pins του driver. Όταν τεθεί σε λογικό HIGH, τα Pins είναι απενεργοποιημένα. Το Pin αυτό δεν χρειάζεται να συνδεθεί κάπου, άρα ουσιαστικά είναι σε λογικό LOW, με συνέπεια την ενεργοποίηση των εξόδων.

- **M0,M1,M2**

Τα Pins αυτά χρησιμοποιούνται για την περίπτωση του Microstepping. Επιλέγοντας ποια από αυτά θα είναι HIGH και ποια LOW καθορίζουν την υποδιαίρεση του βήματος όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

M0	M1	M2	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	1/4 step
High	High	Low	1/8 step
Low	Low	High	1/16 step
High	Low	High	1/32 step
Low	High	High	1/32 step
High	High	High	1/32 step

Microstep selection pin logic levels & resolutions

Πίνακας 5: Βηματισμός Driver DRV8825 [24]

- **RESET**

Το Pin αυτό συνδέεται μόνιμα στα 5V ώστε να ενεργοποιηθεί ο οδηγός. Διαφορετικά αγνοούνται όλες οι εισοδοί step.

- **SLEEP**

Το SLEEP χρησιμεύει στο να ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται εσωτερικά κυκλώματα με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της καταναλωμένης ενέργειας. Θέτοντας το

sleep σε λογικό LOW το DVRV8825 μπαίνει σε καταστολή. Ενώ με λογικό HIGH λειτουργεί κανονικά.

- **STEP**

Ο κάθε παλμός στην είσοδο STEP αντιστοιχεί σε ένα microstep του βηματικού κινητήρα με κατεύθυνση όπως έχει επιλεγεί από το Pin DIR. Οι παλμοί δίνονται από το Arduino.

- **DIR**

Στο DIR συνδέεται μια έξοδος του μικροελεγκτή, ώστε με την κατάλληλη βιβλιοθήκη να στείλει το σωστό σήμα ώστε να λειτουργήσει ο κινητήρας.

- **VMOT**

Το Pin αυτό συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής (8.2-45V) και είναι η τάση που θα τροφοδοτήσει τον κάθε κινητήρα.

- **GND**

Το ένα GND (γείωση) συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής και το άλλο με το GND του driver.

- **1A , 1B και 2A , 2B**

Τα Pins 1A και 2A συνδέονται με τη μία φάση του κινητήρα.

Τα Pins 1B και 2B συνδέονται με τη δεύτερη φάση του κινητήρα.

- **FAULT**

Το Pin αυτό στην περίπτωση που το driver σταματήσει για ασφάλεια είτε λόγω υπερθέρμανσης είτε λόγω προστασίας ρεύματος, γίνεται λογικό LOW με σκοπό να αποφευχθεί η καταστροφή του.

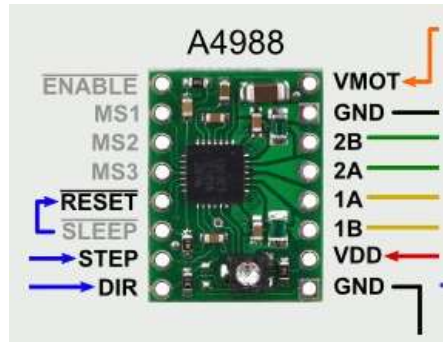
5.3.2 Driver A4988

5.3.2.1 Γενικά Στοιχεία

Το A4988 είναι ένα ολοκληρωμένο, σχεδιασμένο για οδήγηση διπολικών κινητήρων παρόμοιο με το DRV8825 και με τη διαφορά να βρίσκεται στο ρεύμα και την τάση που μπορεί να δεχθεί. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να δεχθεί τάση 8 έως 35 Volt αντί 8 έως 45V του DRV8825 και ρεύμα 1,5Ampere αντί Ampere του DRV8825.



Εικόνα 5.15: Μορφή Driver A4988



Εικόνα 5.16: Θύρες Driver A4988

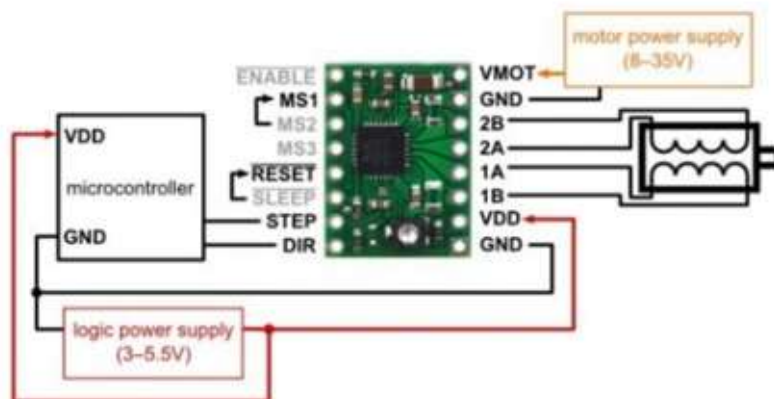
5.3.2.2 Ρύθμιση Έντασης Ρεύματος.

Η ρύθμιση της έντασης του ρεύματος γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως αναλύθηκε προηγουμένως για το ολοκληρωμένο DRV8825. Με την διαφορά να βρίσκεται στην τιμή της εσωτερικής αντίστασης και κατ' επέκταση στον συντελεστή του τύπου για τον υπολογισμό της έντασης του ρεύματος.

$$I = \frac{V_{ref}}{8R_{sense}} \quad 5-2$$

5.3.2.3 Pins Και Συνδεσμολογία.

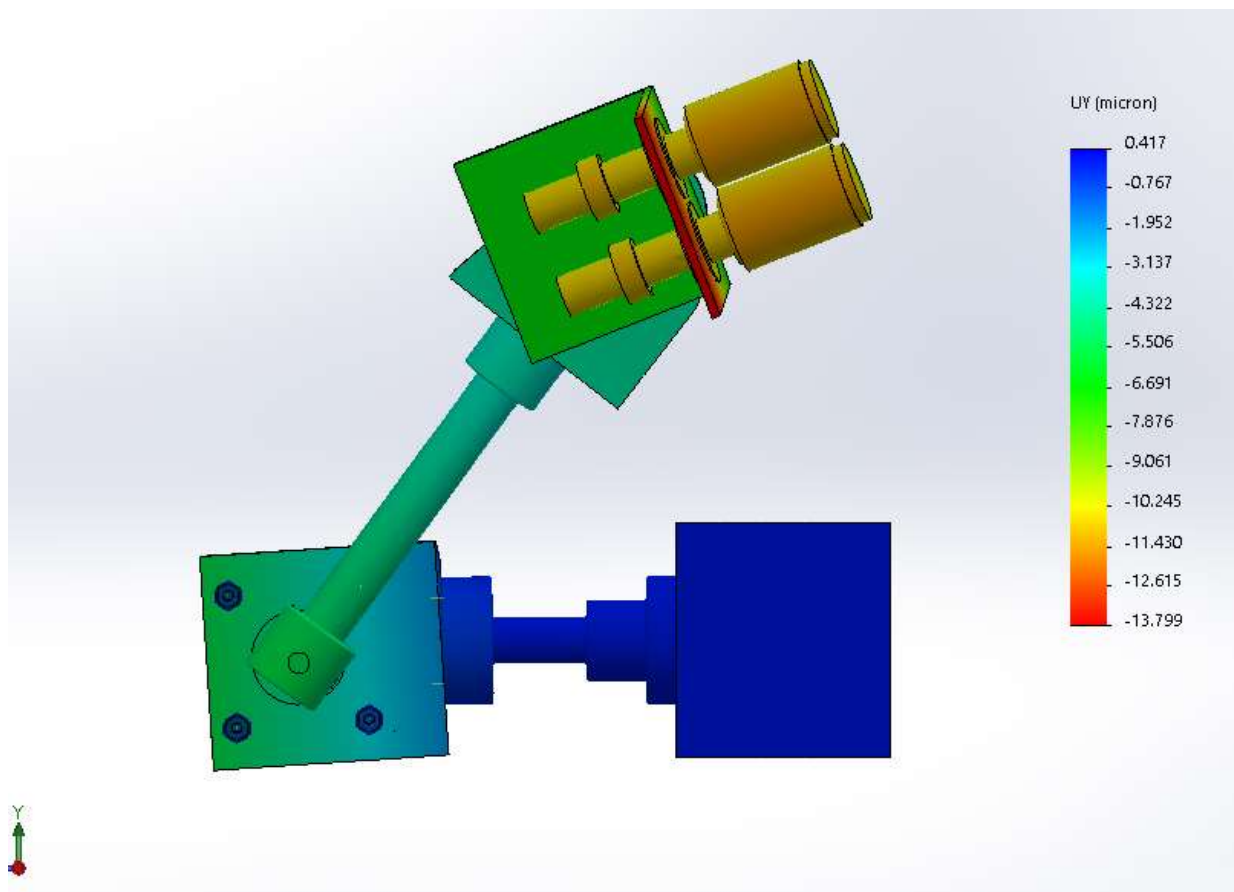
Στην Εικόνα 5.17 διακρίνονται τα Pins του driver καθώς και η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε. Η λειτουργία των Pins είναι όμοια με αυτή του DRV8825.



Εικόνα 5.17: Συνδεσμολογία A4988 [25]

6. Μηχανική Μελέτη Κατασκευής

Όπως αναφέρθηκε στην *Ενότητα 4.7* το μετρητικό σφάλμα των δύο χωρητικών αισθητήρων κυμαίνεται στα 30 μm . Επομένως, κρίνεται σκόπιμο ο μηχανισμός της βάσης να είναι στιβαρός με σκοπό να μην δημιουργείται βέλος κάμψης πάνω από τα 30 μm , ώστε να μην επιβαρύνει περαιτέρω σε σφάλμα το μετρητικό όργανο. Έπειτα από στατική ανάλυση σε σχεδιαστικό πρόγραμμα προκύπτει ότι για την περιοχή λειτουργίας του μετρητικού οργάνου το βέλος κάμψης του είναι περίπου 14 μm , όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 6.1*. Η τιμή αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική καθώς δεν επιβαρύνει την ακρίβεια των δύο αισθητήρων. Βέβαια πρέπει να επισημανθεί ότι για να προκύψει αυτή η ακρίβεια που φαίνεται στην εικόνα οι δύο κινητήρες θεωρήθηκαν ως στιβαρά σώματα με τους άξονές τους να μην παραμορφώνονται. Στην πραγματικότητα όμως δεν μπορεί να συμβεί κάτι τέτοιο καθώς οι άξονες συγκρατούνται για να μην στραφούν με μαγνητική δύναμη, της οποίας το σφάλμα που δημιουργεί μπορεί να είναι μεγαλύτερο από αυτό το 14 μm . Η τιμή αυτή του σφάλματος υπολογίζεται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε βηματικού κινητήρα. Το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή την ανάλυση είναι ότι η κατασκευή από μόνη της, εξαιρουμένων των δύο κινητήρων, δεν επιβαρύνει σημαντικά το σφάλμα των μετρήσεων.



Εικόνα 6.1: Ανάλυση Παραμορφώσεων Κατασκευής

7. Επιλογή Βηματικών Κινητήρων

Βασική προϋπόθεση για τη σωστή επιλογή των δύο κινητήρων είναι η ικανότητά τους να μπορούν να προσδώσουν τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία. Επιπλέον, κατά την επιλογή των κινητήρων πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η βηματική γωνία του κάθε κινητήρα, δηλαδή ο αριθμός των βημάτων μιας ολόκληρης περιστροφής του άξονά τους. Αυτό είναι σημαντικό γιατί μέσω του αριθμού των βημάτων φανερώνεται η διακριτική ικανότητα του κινητήρα η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια του μετρητικού οργάνου που μελετήθηκε ακριβώς στην προηγούμενη ενότητα της εργασίας. Τέλος, είναι σημαντικό οι δύο βηματικοί κινητήρες να μην έχουν υπερβολικό βάρος γιατί πρέπει η μαγνητική βάση να μπορεί να αντέξει το φορτίο που θα δημιουργηθεί από όλον τον μηχανισμό. Ιδικά για τον δεύτερο κινητήρα πρέπει να είναι αρκετά ελαφρύς γιατί πρέπει ο μεγάλος κινητήρας να μπορεί να τον σηκώσει.

7.1 Υπολογισμός Απαραίτητων Φορτίων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των απαραίτητων φορτίων που πρέπει να σηκώσουν οι δύο κινητήρες και η μαγνητική βάση είναι η εξής. Αρχικά για τον υπολογισμό της μαγνητικής βάσης με τη βοήθεια σχεδιαστικού προγράμματος υπολογίστηκε το συνολικό βάρος του μετρητικού οργάνου και εντοπίστηκε η θέση στην οποία βρίσκεται αυτό (κέντρο βάρους). Έπειτα βρέθηκε η απόσταση του κέντρου βάρους από τη μαγνητική βάση και πλέον με τον τύπο της ροπής:

$$M = F\Delta x \quad 7-1$$

υπολογίστηκε η απαραίτητη στατική ροπή που χρειάζεται να συγκρατεί η μαγνητική βάση. Στη συνέχεια για τη δυναμική ροπή υπολογίζεται η ροπή αδράνειας του οργάνου και με βάση τον τύπο:

$$\Sigma M = I\dot{\omega} \quad 7-2$$

όπου

$$\Sigma M = M_{\text{μαγνήτη}} - F\Delta x \quad 7-3$$

η συνισταμένη δύναμη των ροπών που εφαρμόζονται στην μαγνητική βάση, I η ροπή αδράνειας και $\dot{\omega}$ η επιτάχυνση, υπολογίζεται η δυναμική ροπή του μαγνήτη ($M_{\text{μαγνήτη}}$) που πρέπει να προσδώσει η μαγνητική βάση το σύστημα.

Με την ίδια μεθοδολογία υπολογίζονται και τα αντίστοιχα φορτία που πρέπει να προσδώσουν στο σύστημα οι δύο κινητήρες με τη μόνη διαφορά πως πλέον για τον υπολογισμό του κέντρου βάρους και της ροπής αδράνειας συμπεριλαμβάνονται τα στοιχεία του συστήματος που πρέπει να σηκώσει ο αντίστοιχος κινητήρας. Για τον μεγάλο κινητήρα τα στοιχεία που βρίσκονται από τον δεύτερο άξονα και μετά και για τον μικρό κινητήρα τα στοιχεία που βρίσκονται από την πλατφόρμα και έπειτα.

7.2 Απαραίτητο Φορτίο Μαγνητικής Βάσης

Με βάση την παραπάνω ανάλυση το βάρος, η απόσταση του κέντρου βάρους από την μαγνητική βάση και η ροπή αδράνειας όλης της βάσης υπολογίστηκαν αντίστοιχα:

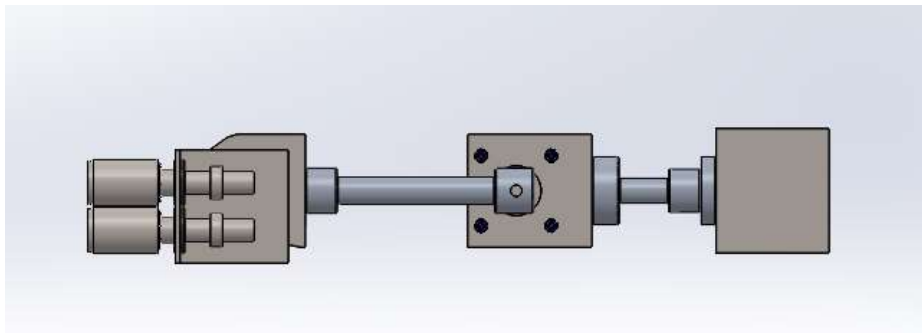
$$M_{\text{μαγνητικής_βάσης}} = 2.51\text{kg}$$

$$d_{\text{μαγνητικής_βάσης}} = 0.067\text{m}$$

$$I_{\text{μαγνητικής_βάσης}} = 0.0327\text{kgm}^2$$

Η ροπή που πρέπει να προσδίδει ο μαγνήτης για να μπορεί να κρατά σταθερό το μηχανισμό σε στατική κατάσταση όταν αυτός βρίσκεται στη δυσμενέστερη κατάσταση όπως φαίνεται στην *Εικόνα 7.1*, δηλαδή όταν ο μηχανισμός είναι οριζόντιος, είναι:

$$M = 1.686\text{Nm}$$



Εικόνα 7.1: Δυσμενέστερη Από Αποψη Ροπών Κατάσταση

Επομένως η συνολική ροπή που πρέπει να παράγει ο κινητήρας υπολογίζεται:

$$\Sigma M_{\text{μαγνητική_βάση}} = I\dot{\omega}$$

$$M_{\text{μαγνητική_βάση}} - M = I\dot{\omega}$$

7-4

$$M_{\text{μαγνητική_βάση}} = 1.686 + 0.0327\dot{\omega}$$

Με προϋπόθεση ότι η γωνιακή ταχύτητα είναι περίπου 2rad/s προκύπτει ότι:

$$M_{\text{μαγνητική_βάση}} = 1.75\text{Nm}$$

Μία από τις πολλές μαγνητικές βάσεις που κυκλοφορούν στην αγορά και ικανοποιούν τις παραπάνω προϋποθέσεις είναι αυτή που φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 7.2: Επιλεγμένη Μαγνητική Βάση

7.3 Απαραίτητο Φορτίο Μεγάλου Κινητήρα

Όμοια με προηγουμένως, το βάρος, η απόσταση του κέντρου βάρους από τον μεγάλο κινητήρα και η ροπή αδράνειας του τμήματος που πρέπει να σηκώσει ο μεγάλος κινητήρας υπολογίστηκαν αντίστοιχα:

$$M_{big_motor} = 0.4kg$$

$$d_{big_motor} = 0.137m$$

$$I_{big_motor} = 0.00823kgm^2$$

Η ροπή που πρέπει να παράγει ο κινητήρας για να μπορεί να κρατά σταθερό το μηχανισμό σε στατική κατάσταση όταν αυτός βρίσκεται στη δυσμενέστερη κατάσταση, δηλαδή όταν ο μηχανισμός είναι οριζόντιος, είναι:

$$M = 0.55Nm$$

Επομένως η συνολική ροπή που πρέπει να παράγει ο κινητήρας υπολογίζεται:

$$\Sigma M_{big_motor} = I\dot{\omega}$$

$$M_{big_motor} - M = I\dot{\omega}$$

7-5

$$M_{big_motor} = 0.55 + 0.00823\dot{\omega}$$

Με προϋπόθεση ότι η γωνιακή ταχύτητα είναι περίπου $2rad/s$ προκύπτει ότι:

$$M_{big_motor} = 0.57Nm$$

Ένας κινητήρας που ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις είναι ο:
NEMA 17 Geared Stepper Motor Gear Ratio 5:1, 42BYGHW615AG5,18-X [26]



Εικόνα 7.3: Επιλεγμένος Μεγάλος Βηματικός Κινητήρας [26]

ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Stepper Specs:
 - Step Angle (degrees): 1.8
 - 2-Phase (4-Wires)
 - Rated Voltage: 4.2V
 - Rated Current: 1.5A/Phase
 - Holding Torque: 36N.cm (3600g-cm)
 - Resistance: 2.8Ω/phase
 - Inductance: 3.6mH/phase
- Planetary Gearbox:
 - Holding Torque: 186N.cm (18600g-cm)
 - Step Angle (degrees): 0.34
 - 1036 steps/rev

Εικόνα 7.4: Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα [26]

Από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου διπολικού κινητήρα παρατηρείται ότι είναι ικανός να αντέξει και να σηκώσει το απαιτούμενο φορτίο. Επίσης, για

μια περιστροφή του άξονά του χρειάζεται 1036 steps πράγμα που μεταφράζεται σε 0.34 μοίρες ανά βήμα. Με μια πρώτη ματιά αυτή η τιμή δεν φαίνεται να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του μετρητικού οργάνου, αφού επιδιώκεται να έχει σφάλμα μέτρησης κοντά στο ένα δέκατο της μοίρας. Ωστόσο, το driver του βηματικού αυτού κινητήρα δίνει τη δυνατότητα για μικροβηματισμό, δηλαδή τα 1036 steps/rev μπορούν να αυξηθούν μέχρι και 16 φορές και να γίνουν 16576 steps/rev, ή αλλιώς σε 0.02 μοίρες ανά βήμα. Αυτή η τιμή πλέον είναι αρκετά ικανοποιητική. Τέλος, ο κινητήρας αυτός ζυγίζει περίπου 500 γραμμάρια και είναι μέσα στις δυνατότητες του φορτίου που μπορεί να κρατήσει η μαγνητική βάση και οι διαστάσεις του δεν προκαλούν κάποιο πρόβλημα όσον αφορά την διαστασιολόγηση του μετρητικού οργάνου.

7.4 Απαραίτητο Φορτίο Μικρού Κινητήρα

Ομοίως τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά για το τμήμα που πρέπει να σηκώσει ο μικρός κινητήρας βρέθηκαν:

$$M_{\text{small_motor}} = 0.21\text{kg}$$

$$d_{\text{small_motor}} = 0.021\text{m}$$

$$I_{\text{small_motor}} = 0.0002285\text{kgm}^2$$

Επίσης, η ροπή που πρέπει να παράγει ο κινητήρας για να μπορεί να κρατά σταθερό τον μηχανισμό σε στατική κατάσταση όταν αυτός βρίσκεται στη δυσμενέστερη κατάσταση, δηλαδή όταν ο μηχανισμός είναι οριζόντιος, είναι:

$$M = 0.032\text{Nm}$$

Επομένως η συνολική ροπή που πρέπει να παράγει ο κινητήρας υπολογίζεται:

$$\Sigma M_{\text{small_motor}} = I\dot{\omega}$$

$$M_{\text{small_motor}} = 0.046 + 0.0002285\dot{\omega}$$

7-6

Με προϋπόθεση ότι η γωνιακή ταχύτητα είναι περίπου 2rad/s προκύπτει ότι:

$$M_{\text{small_motor}} = 0.033\text{Nm}$$

Ένας κινητήρας που ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις είναι ο:

Step Motor 28BYJ-48-12V [27]



Εικόνα 7.5: Επιλεγμένος Μικρός Βηματικός Κινητήρας [27]

ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Unipolar stepper with 0.1" spaced 5-pin cable connector
- 32 steps per revolution
- 1/16.025 geared down reduction
- 5V-12V DC suggested operation
- Holding Torque @ 12VDC: 250 gram-force*cm, 25 N*mm/ 3.5 oz-force*in

Εικόνα 7.6: Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα [27]

Παρατηρείται ότι ο συγκεκριμένος μονοπολικός κινητήρας μπορεί να σηκώσει οριακά το απαιτούμενο φορτίο. Βέβαια κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης ροπής έχουν συμπεριληφθεί και κάποιοι συντελεστές ασφαλείας. Επομένως, δεν προβλέπεται να υπάρξει αδυναμία στο να σηκώσει το απαιτούμενο φορτίο. Από πλευρά steps/rev ο συγκεκριμένος κινητήρας έχει τιμή 513 steps/rev. Ομοίως με προηγουμένως μπορεί να εφαρμοσθεί η λειτουργία του μικροβηματισμού και να αυξηθεί η τιμή αυτή έως και 32 φορές και να γίνει 16416 steps/rev ή αλλιώς 0.022 μοίρες ανά βήμα. Το βάρος του κινητήρα είναι πολύ ικανοποιητικό με τιμή μόλις στα 37 γραμμάρια και αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί τον κινητήρα αυτόν διότι πρέπει να μπορεί να τον αντέχει να τον μετακινεί ο μεγάλος κινητήρας. Τέλος από θέμα διαστάσεων δεν δημιουργεί πρόβλημα στην διαστασιολόγηση του μετρητικού οργάνου.

8. Επιλογή Και Ανάλυση Αισθητήρων

Στην ενότητα αυτή αρχικά θα δοθούν ορισμοί για κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων. Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στις αρχές και τον τρόπο λειτουργίας των χωρητικών αισθητήρων καθώς θα σχολιαστούν οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν τέτοιου είδους αισθητήρες.

8.1 Χρήσιμοι Ορισμοί

8.1.1 Ορισμός Αισθητήρα

Με τον όρο αισθητήρα περιγράφεται η συσκευή που ανιχνεύει ένα σήμα, μία διέγερση ή μία φυσική ποσότητα και τη μετατρέπει σε μία μετρήσιμη έξοδος, συνήθως σε ηλεκτρικό σήμα. [28]

8.1.2 Χαρακτηριστικά Αισθητήρα

Η **συμβατότητα** είναι ένα μέγεθος που περιγράφει κατά πόσον η εγκατάσταση του οργάνου θα επηρεάσει την τιμή της παραμέτρου που πρόκειται να μετρήσει. Το ιδανικό από άποψη συμβατότητας θεωρητικά είναι ένα όργανο που δεν την επηρεάζει καθόλου.

Το **εύρος** λειτουργίας ενός αισθητήρα ορίζεται από τα όρια, εντός των οποίων μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα. Συνήθως, εκφράζεται με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρήσει.

Η **ακρίβεια** ενός αισθητήρα καθορίζεται από το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να περιέχεται στην ένδειξή του. Στην πράξη όλες οι συσκευές παράγουν σφάλμα στις μετρήσεις τους και η επιδίωξη είναι το σφάλμα αυτό να είναι όσο τον δυνατόν μικρότερο.

Επαναληψιμότητα ονομάζεται ο βαθμός στον οποίο μια συσκευή παρέχει το ίδιο αποτέλεσμα τροφοδοτούμενος με την ίδια είσοδο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Η **διακριτική ικανότητα** ενός αισθητήρα καθορίζεται από το μικρότερο διάστημα που μπορεί να μετρηθεί από αυτόν. Όσο μεγαλύτερη η διακριτική ικανότητα που διαθέτει μία αισθητήρια διάταξη, τόσο μικρότερο βήμα μετράει.

Η **ευαισθησία** ενός οργάνου είναι η ελάχιστη μεταβολή της εισόδου του που είναι σε θέση να δώσει μεταβολή στην έξοδό του.

Η **υστέρηση** προκαλεί διαφορές στην έξοδο ενός αισθητήρα όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Έτσι παράγεται σφάλμα και επηρεάζεται η ακρίβεια της συσκευής.

Ο **θόρυβος** δημιουργείται κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, οι αλληλεπιδράσεις με άλλα όργανα και άλλα. Η βάση λειτουργίας κάθε αισθητήρα καθορίζει κατά πόσον επηρεάζεται η ακρίβειά του και τη διακριτική ικανότητά του λόγω θορύβου.

Γραμμικότητα ονομάζεται ο βαθμός στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός για μια περιοχή τιμών.

Οι διαστάσεις ενός αισθητήρα αναφέρονται στο μέγεθός του.

Οι αισθητήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το είδος εξόδου τους, στους αισθητήρες αναλογικής εξόδου και στους αισθητήρες ψηφιακής εξόδου.

Αισθητήρες αναλογικής εξόδου: Το σήμα στην έξοδο είναι αναλογικό με την έννοια του συνεχούς. Το μέγεθος της μετρούμενης μεταβλητής είναι ανάλογο του πλάτους της τάσης που δίνει ο αισθητήρας. Βασικό τους μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι το ηλεκτρικό σήμα που δίνουν μπορεί να αλλοιωθεί από το θόρυβο. Συνεπώς θα υπάρξει σφάλμα στη μέτρηση.

Αισθητήρες ψηφιακής εξόδου: Το σήμα στην έξοδο είναι ψηφιακό, δηλαδή παίρνει διακριτές τιμές. Η πληροφορία για το μέγεθος του μετρούμενου μεγέθους είναι υπό μορφή δυαδικού αριθμού ή παλμών σειράς. Στην περίπτωση αυτή η μέτρηση δεν αλλοιώνεται τόσο εύκολα. [28]

8.2 Ανάλυση Χωρητικών Αισθητήρων



Εικόνα 8.1: Μορφή Χωρητικών Αισθητήρων

8.2.1 Η Έννοια Της Χωρητικότητας

Η χωρητικότητα (*capacitance*) ενός πυκνωτή περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο δύο αγωγοί επηρεάζουν το ηλεκτρικό πεδίο που βρίσκεται ανάμεσά τους. Πιο συγκεκριμένα, εάν δύο μεταλλικές πλάκες είναι τοποθετημένες με ένα κενό ανάμεσά τους και εφαρμοσθεί ηλεκτρική τάση σε μία από τις δύο πλάκες τότε θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο αυτές πλάκες. Η έννοια της χωρητικότητας δηλώνει την ικανότητα δύο οπλισμών να συγκρατούν-αποθηκεύουν αυτό το ηλεκτρικό φορτίο. Δηλαδή ένας πυκνωτής με μεγάλη χωρητικότητα έχει την ικανότητα να συγκρατεί περισσότερο ηλεκτρικό φορτίο από έναν πυκνωτή μικρότερης χωρητικότητας. Η τιμή της χωρητικότητας καθορίζει πόσο ρεύμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να μεταβάλει την τάση του οπλισμού. Κατ' αντιστοιχία είναι σαν να πρέπει να αυξηθεί η στάθμη του νερού κατά ένα εκατοστό σε ένα βαρέλι και σε ένα ποτήρι. Το βαρέλι θα χρειαστεί πολύ περισσότερο εισερχόμενο νερό για να αυξηθεί η στάθμη του σε σχέση με το ποτήρι επειδή το βαρέλι έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από ότι το ποτήρι. Ο παραπάνω συλλογισμός με μαθηματική σχέση φαίνεται στον παρακάτω τύπο: [29]

$$i = C \frac{dV}{dt} \quad 8-1$$

Όπου: i η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τους δύο οπλισμούς,

C η χωρητικότητα των οπλισμών και

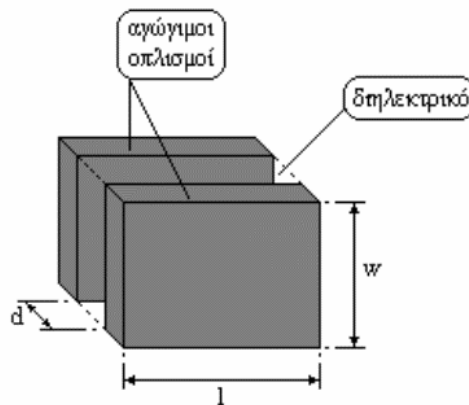
$\frac{dV}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής της τάσης μεταξύ των δύο οπλισμών

8.2.2 Χωρητικά Φαινόμενα

Ένα ηλεκτρικό στοιχείο που εμφανίζει την ιδιότητα της χωρητικότητας είναι ο πυκνωτής ο οποίος αποτελείται από δύο παράλληλους αγωγίσιμους οπλισμούς μεταξύ των οποίων υπάρχει ένα διηλεκτρικό υλικό. Η χωρητικότητα μετριέται σε farad και δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d} \quad 8-2$$

όπου A το εμβαδόν του κάθε οπλισμού του πυκνωτή μετρούμενο σε τετραγωνικά μέτρα, ϵ_0 η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του ελεύθερου χώρου που ισούται με 8.85×10^{-12} F/m, ϵ_r η ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού κενού και d η απόσταση μεταξύ των οπλισμών, μετρούμενη σε μέτρα. [28]



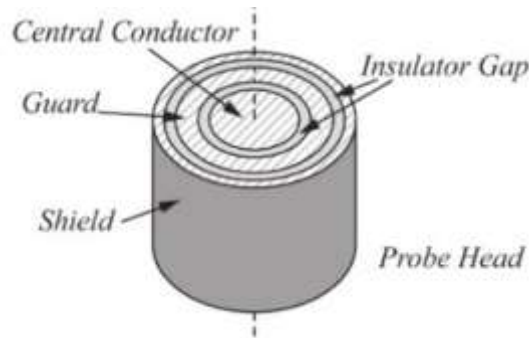
Εικόνα 8.2: Παράλληλοι Οπλισμοί Πυκνωτή [28]

Η λειτουργία των χωρητικών αισθητήρων βασίζεται στη μεταβολή της χωρητικότητας ενός πυκνωτή (C). Υπάρχουν τρεις τρόποι που μπορούν να προκαλέσουν μια τέτοια μεταβολή: η μεταβολή της επιφάνειας επικάλυψης A , της ηλεκτρικής διαπερατότητας του διηλεκτρικού κενού ϵ_r ή της απόστασης d μεταξύ των οπλισμών, όπως φαίνεται και στον Τύπο 8-2. Σε έναν χωρητικό αισθητήρα η επιφάνεια επικάλυψης των οπλισμών είναι σταθερή καθώς και η ηλεκτρική διαπερατότητα του αέρα είναι σταθερή, άρα η μοναδική μεταβλητή στον παραπάνω μαθηματικό τύπο είναι η απόσταση μεταξύ των οπλισμών. Δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ότι η χωρητικότητα C του οπλισμού και η απόσταση d είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. [28]

$$C \approx \frac{1}{d} \quad 8-3$$

8.2.3 Αρχή Λειτουργίας Χωρητικού Αισθητήρα

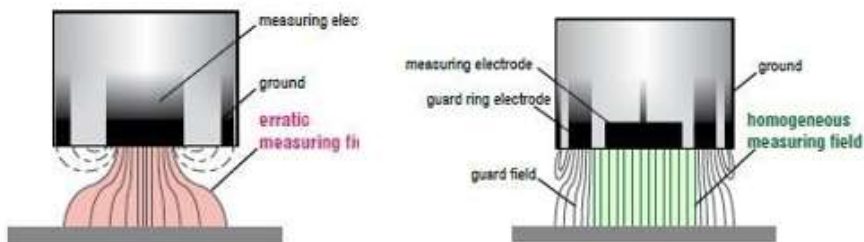
Η πιο απλή διάταξη χωρητικού αισθητήρα είναι ο αισθητήρας μετατόπισης στον οποίο ο ένας οπλισμός του πυκνωτή παραμένει σταθερός σε ένα σημείο αναφοράς πάνω στον αισθητήρα και ο άλλος οπλισμός είναι το ίδιο το μετρούμενο υλικό, του οποίου η μετατόπιση μετρείται. Ανάλογα με την κίνηση του μετρούμενου στόχου αλλάζει η απόστασή του από τον σταθερό οπλισμό, προκαλώντας ανάλογη μεταβολή στη χωρητικότητα του πυκνωτή. Από τον αισθητήρα με τον σταθερό οπλισμό διέρχεται εναλλασσόμενη τιμή ηλεκτρικού ρεύματος και ανάλογα την μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή μεταβάλλεται και η εξερχόμενη τάση, όπως φαίνεται και στην μαθηματική Σχέση 8-1, η οποία είναι και το μέγεθος που υποδεικνύει την απόσταση του αισθητήρα από τον μετρούμενο στόχο. [29]



Εικόνα 8.3: Αποτελούμενα Τμήματα Χωρητικού Αισθητήρα

8.2.4 Μηχανισμός Χωρητικού Αισθητήρα Για Ακριβές Μετρήσεις

Όταν εφαρμοσθεί τάση σε έναν αγωγό, εκπέμπεται ηλεκτρικό πεδίο προς όλες τις κατευθύνσεις. Για την ακριβή μέτρηση, το ηλεκτρικό πεδίο που προέρχεται από τον πυκνωτικό αισθητήρα πρέπει να είναι περιορισμένο-συγκρατημένο ανάμεσα στην ευαίσθητη περιοχή (*central conductor*) (Εικόνα 8.3) του αισθητήρα και την περιοχή στόχου του υλικού που πρέπει να μετρηθεί (*measuring spot*). Εάν το ηλεκτρικό πεδίο εξαπλωθεί σε άλλες περιοχές του υλικού-στόχου τότε το αποτέλεσμα της μέτρησης της μετατόπισης θα αλλοιωθεί, γιατί θα έχει χαθεί η εστίαση που πρέπει να έχει ο πυκνωτής (αριστερό μέρος της Εικόνα 8.4). Έτσι πρέπει το ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή να μένει σε συγκεκριμένα όρια όπως φαίνεται στο δεξί μέρος της Εικόνα 8.4, καταλαμβάνοντας την πράσινη περιοχή, ώστε να υπάρχει ομοιογένεια στο ηλεκτρικό πεδίο. Για να επιτευχθεί αυτό εφαρμόζεται η εξής μέθοδος. Σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα προστατευτικό δακτυλίδι (*guard ring*) το οποίο θα δημιουργήσει άλλη μία περιοχή η οποία θα είναι αγώγιμη και θα δημιουργεί και αυτή το ίδιο ηλεκτρικό πεδίο με αυτό της ευαίσθητης περιοχής του αισθητήρα. Έτσι η τάση θα διατηρείται σταθερή τόσο στο προστατευτικό δακτυλίδι όσο και στην ευαίσθητη περιοχή του αισθητήρα ή αλλιώς η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο περιοχών θα είναι μηδενική. Έτσι, όταν εφαρμοσθεί η τάση στην ευαίσθητη περιοχή ένα ξεχωριστό κύκλωμα εφαρμόζεται με την ίδια ακριβώς τάση στο προστατευτικό δακτυλίδι. Επειδή δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αυτών περιοχών δεν δημιουργείται ροή ρεύματος μεταξύ τους και κατ' επέκταση ηλεκτρικό πεδίο. Με την ίδια λογική εφαρμόζεται η μέθοδος του προστατευτικού δακτυλιδιού σε κάθε αγωγό δίπλα ή πίσω από την ευαίσθητη περιοχή ώστε η μόνη περιοχή με διαφορά δυναμικού να είναι η περιοχή της ευαίσθητης περιοχής με την περιοχή του στόχου. Για να δημιουργηθούν αυτά τα ξεχωριστά κυκλώματα δεν πρέπει να υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ τους γι' αυτό τον λόγο τοποθετούνται δακτυλίδια μονωτές (*insulator gap*) ανάμεσα στις περιοχές των κυκλωμάτων. Για τον ίδιο λόγο πρέπει να αποφορτίζεται πλήρως και το μετρούμενο υλικό του στόχου, χρησιμοποιώντας κάποια γείωση, έτσι ώστε ούτε αυτό να προκαλεί ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αλλοιώνει τις μετρήσεις του χωρητικού αισθητήρα. [29]



Εικόνα 8.4: Προβληματικός Και Σωστός Σχεδιασμός Αισθητήρα Αντίστοιχα [30]

8.3 Επιλογή Μετρητικού Οργάνου

Επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν χωρητικοί αισθητήρες για τη μέτρηση των απαραίτητων αποστάσεων για διάφορους λόγους. Καταρχάς, είναι οικονομικότεροι σε σχέση με άλλου είδους αισθητήρων απόστασης, όπως laser και η ακρίβεια των μετρήσεών τους είναι αρκετά καλή. Επίσης, οι μετρήσεις των χωρητικών αισθητήρων γίνονται εξ αποστάσεως. Αυτό είναι πολύ σημαντικό αφού η οποιαδήποτε επαφή με το κατεργαζόμενο έλασμα μπορεί να του προκαλούσε φθορά. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι μπορούν να μετρήσουν μεγάλο πλήθος μεταλλικών ειδών καθώς επίσης οι διάφορες μετρήσεις μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε ψηφιακή μορφή με τη χρήση κατάλληλου μετασχηματιστή.

Γενικά υπάρχει μεγάλο πλήθος χωρητικών αισθητήρων, μερικοί αρκετά προηγμένοι και εύχρηστοι ωστόσο, για λόγους ευκολίας και οικονομίας αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν κάποιοι συγκεκριμένοι αισθητήρες, με τους αντίστοιχους μετασχηματιστές τους, οι οποίοι ήταν διαθέσιμοι στον εργαστηριακό χώρο του Πολυτεχνείου. Σημειώνεται ότι η χρήση των συγκεκριμένων αισθητήρων έγινε κυρίως για το πειραματικό κομμάτι και σε παρακάτω τμήμα της εργασίας (Ενότητα 13.2) προτείνονται χωρητικοί αισθητήρες πιο προηγμένοι με καλύτερα χαρακτηριστικά.

Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι την εταιρίας WAYNE KERR και το μοντέλο DIMEQ TE100 MkII. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως στη λεπτομερή ανάλυση της επιλεγμένης λύσης (Ενότητα 4.1), χρειάζονται δύο όμοιοι τέτοιοι αισθητήρες, με τον καθένα να παίρνει από μία μέτρηση και συγκρίνοντας τις δύο αυτές τιμές αποστάσεων, υπολογίζεται η τιμή σφάλματος της γωνίας κάμψης. Το ακριβές μοντέλο των δύο αισθητήρων είναι ME1 οι οποίοι μπορούν να πάρουν μετρήσεις από απόσταση μέχρι και 2.5 mm. Στον Πίνακα 6 απεικονίζονται κάποια πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά για τους capacitive sensors που χρησιμοποιήθηκαν.

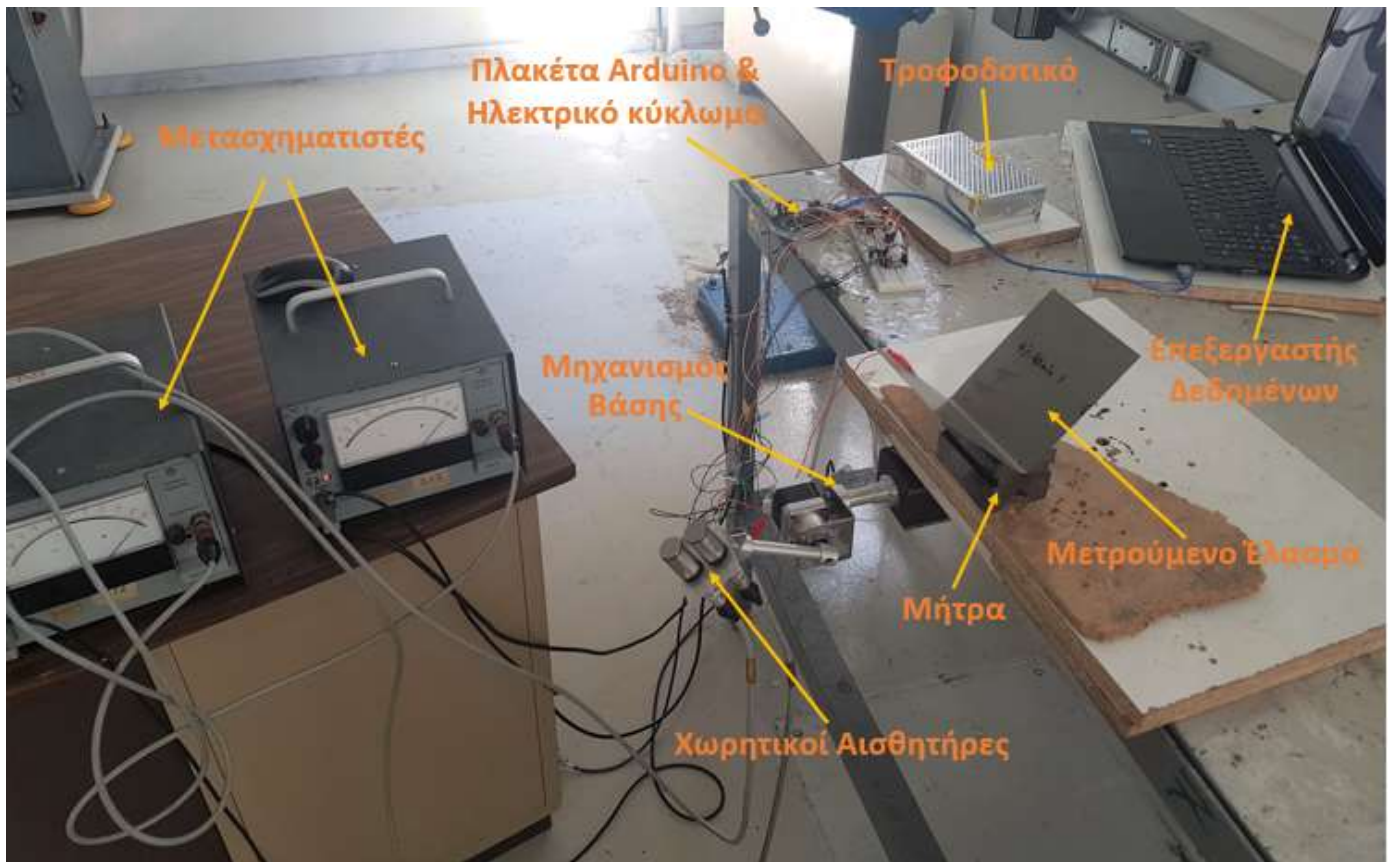
Εύρος λειτουργίας	από 0.1mm μέχρι 2.5mm
Ακρίβεια	±0.03mm ή ±0.005 volts
Επαναληψιμότητα	±1%
Διακριτική ικανότητα	25μm
Ευαισθησία	καλύτερη από 0.5% του εύρους λειτουργίας
Υστέρηση	μικρότερη από 170μs
Θόρυβος	επηρεάζεται από ηλεκτρικό πεδίο
Γραμμικότητα	καλύτερη από 0.5% για εύρος από 0.25mm μέχρι 2.5mm

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά Χρησιμοποιούμενων Αισθητήρων

8.4 Ολοκληρωμένη Διάταξη Χωρητικών Αισθητήρων

Η διάταξη αποτελείται από δύο αισθητήρες σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμεταλλεύονται τις μεταβολές στη χωρητικότητά τους και να τις μεταφράζουν σε μεταβολές απόστασης του αισθητήρα από το μετρούμενο έλασμα. Επίσης, αποτελείται από δύο ηλεκτρικούς μετασχηματιστές, ένας για κάθε αισθητήρα, οι οποίοι μετατρέπουν τις πληροφορίες για την μεταβολή της χωρητικότητας σε ηλεκτρική τάση και τις προωθούν σε μία συσκευή (Iaprtor) η οποία αποθηκεύει τις αλλαγές αυτές της τάσης και τις επεξεργάζεται κατάλληλα έτσι ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα από τη μέτρηση. Για την ομαλή λειτουργία όλων των παραπάνω απαιτούνται κατάλληλα καλώδια μεταφοράς σημάτων που παράγουν οι αισθητήρες στους μετασχηματιστές, καθώς επίσης απαιτείται κατάλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο θα μεταφέρει τις πληροφορίες από τους μετασχηματιστές στο

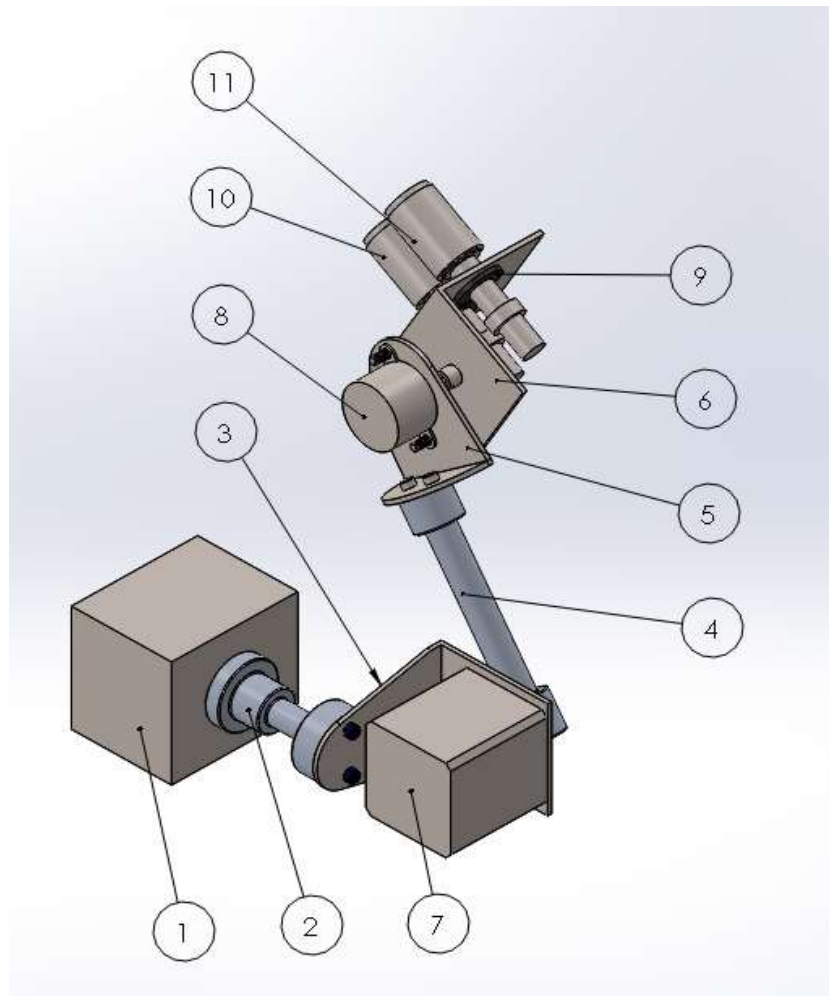
laptop και τέλος ένα τροφοδοτικό τάσης για να παρέχει την απαραίτητη ισχύς στη διάταξη. Όλα αυτά τα μέρη της διάταξης γίνονται φανερά στην *Εικόνα 8.5*.



Εικόνα 8.5: Ολοκληρωμένη Διάταξη Χωρητικών Αισθητήρων

9. Ανάλυση Κατασκευής

Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί με λεπτομέρεια η λειτουργία του κάθε εξαρτήματος της κατασκευής καθώς επίσης θα αναφερθεί το υλικό και ο τρόπος κατασκευής τους. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται αριθμημένα τα μέρη που αποτελούν τον μηχανισμό της βάσης του μετρητικού οργάνου.



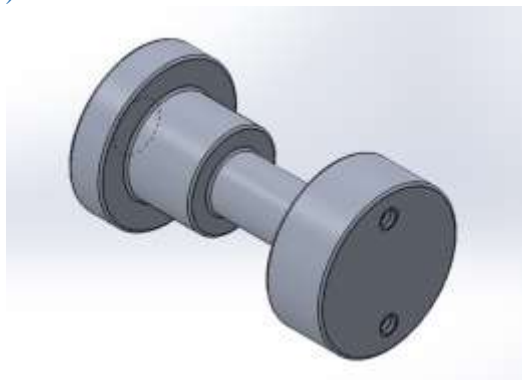
Εικόνα 9.1: Αποτελούμενα Μέρη Κατασκευής:

Μαγνητική βάση (1), Πρώτος άξονας (2), Πρώτη βάση (3), Δεύτερος άξονας (4), Δεύτερη βάση (5), Πλατφόρμα (6), Μονωτικοί δακτύλιοι (9), Αισθητήρες (10,11), Μεγάλος βηματικός κινητήρας (7), Μικρός βηματικός κινητήρας (8)

9.1 Μαγνητική Βάση (1)

Η μαγνητική βάση αποσκοπεί στη εύκολη και σωστή τοποθέτηση του μετρητικού οργάνου πάνω στη στράντζα. Πιο συγκεκριμένα, το μετρητικό όργανο έχει σχεδιαστεί για να τοποθετείται στην πλάγια πλευρά της μεταλλικής βάσης της στράντζας. Η μαγνητική βάση έχει την ικανότητα, με το γύρισμα ενός μοχλού να μαγνητίζει και να απομαγνητίζει. Έτσι, μπορεί εύκολα και γρήγορα να τοποθετείται με ακρίβεια και να στηρίζει σταθερά την κατασκευή. Είναι σημαντικό να έχει γίνει μελέτη για τη ροπή που απαιτείται ώστε η κατασκευή να μένει σταθερή ακόμα και στη δυσμενέστερη κατάσταση, όταν αυτή βρίσκεται σε οριζόντια θέση (Εικόνα 7.1). Η μελέτη αυτή έχει πραγματοποιηθεί στην Ενότητα 7.2 της εργασίας αυτής. Με γνωστή τη ροπή αυτή επιλέγεται η κατάλληλη μαγνητική βάση του εμπορίου η οποία φαίνεται στην Εικόνα 7.2.

9.2 Πρώτος Άξονας (2)

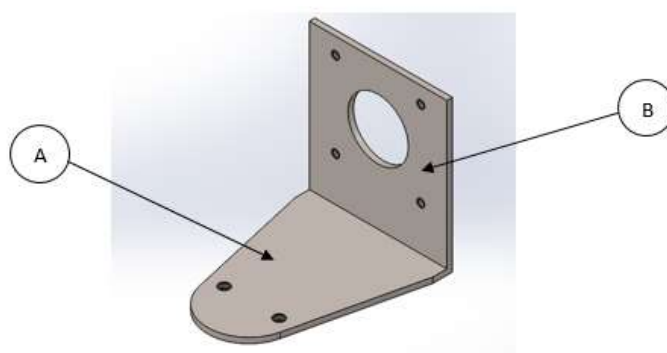


Εικόνα 9.2: Πρώτος Άξονας

Ο άξονας αυτός είναι σχεδιασμένος ώστε να ενώνει τη μαγνητική βάση με τη βάση του πρώτου βηματικού κινητήρα. Αναλυτικότερα, η μία του πλευρά βιδώνεται με έναν κοχλία πάνω στη μαγνητική βάση και η άλλη του πλευρά έχει δύο οπές με σπειρώματα για να μπορεί να συναρμολογηθεί με τη βάση του κινητήρα. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι πρώτα πρέπει να συναρμολογηθεί ο άξονας με τη μαγνητική βάση και αφού βιδωθεί και στερεωθεί σφιχτά έπειτα ανοίγονται οι δύο οπές σε κατακόρυφη θέση. Αυτή η διευκρίνιση είναι σημαντική για να βρεθεί σε κάθετη θέση η μαγνητική βάση με τη βάση του κινητήρα.²

Ο άξονας αυτός θα μπορούσε να γίνει κυλινδρικός με ίδια διάμετρο σε όλο του το μήκος, αλλά για να μειωθεί το βάρος επιλέχθηκε στα σημεία που δεν υπάρχουν οπές και δεν υπάρχει ανάγκη για μεγάλη διάμετρο να μειωθεί. Βέβαια πρέπει να γίνει έλεγχος για το ποια είναι η ελάχιστη δυνατή διάμετρος που μπορεί να κατασκευαστεί ο άξονας ώστε να μην υπάρξει ενδεχόμενο κάμψης μεγαλύτερη από τα επιτρεπτά όρια ή αστοχίας υλικού. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι αλουμίνιο γιατί έχει την ιδιότητα να είναι αρκετά ελαφρύ και ταυτόχρονα να έχει καλές αντοχές σε κάμψη και αστοχία. Όσον αφορά τον τρόπο κατασκευής του, ο άξονας αυτός απέκτησε αυτή την αξονική γεωμετρία σε συμβατικό τόρνο και οι οπές ανοίχτηκαν σε συμβατική φρέζα.

9.3 Πρώτη Βάση (3)



Εικόνα 9.3: Πρώτη Βάση

² Περαιτέρω πληροφορίες για τα εξαρτήματα της κατασκευής φανερόνται στα κατασκευαστικά σχέδια στο Παράρτημα Β της εργασίας.

Η λειτουργία της συγκεκριμένης βάσης είναι να στερεώνει τον κινητήρα με την υπόλοιπη κατασκευή, δηλαδή τη μαγνητική βάση και τον πρώτο άξονα. Για τον λόγο αυτό η βάση αυτή αποτελείται από δύο κάθετα επίπεδα το Α και το Β, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 9.3*. Στο επίπεδο Α υπάρχουν οπές οι οποίες αποσκοπούν στην κοχλιοσύνδεση της βάσης αυτής με τον πρώτο άξονα. Στο επίπεδο Β υπάρχουν οπές με κατάλληλη γεωμετρία ώστε να μπορεί να συναρμολογηθεί ο τυποποιημένος κινητήρας με τη βάση αυτή. Επίσης, στο επίπεδο αυτό υπάρχει κατάλληλη οπή ώστε να περνά ο άξονας του κινητήρα. Επισημαίνεται ότι οι δύο οπές που βρίσκονται στο επίπεδο Α καθώς και οι τέσσερις οπές του επιπέδου Β πρέπει να είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε ο κινητήρας που θα στερεωθεί πάνω στη βάση αυτή να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθυγραμμισμένος με τη μαγνητική βάση. Τυχόν απόκλιση από την ευθυγράμμιση αυτή θα δημιουργήσει προβλήματα στις μετρήσεις του οργάνου.

Αντίστοιχα με τον προηγούμενο άξονα γίνεται προσπάθεια να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το βάρος της βάσης, γι' αυτό τον λόγο το Α επίπεδο δεν είναι παραλληλόγραμμο καθώς έχουν αφαιρεθεί τα τμήματα που δεν προσφέρουν κάποιο όφελος στην κατασκευή. Το υλικό της βάσης αυτής επιλέχθηκε να είναι χάλυβας που είναι στιβαρό μέταλλο και δεν κάμπτεται εύκολα, καθώς είναι αναγκαίο η βάση αυτή να μην κάμπτεται καθόλου παρόλο το μόλις δύο χιλιοστών πάχος της. Η διαμόρφωση της βάσης αυτής έγινε με στράντζα χειρός και οι οπές ανοίχτηκαν σε συμβατική φρέζα.

9.4 Μεγάλος Βηματικός Κινητήρας (7)



Εικόνα 9.4: Μεγάλος Βηματικός Κινητήρας [31]

Ο κινητήρας αυτός τοποθετείται πάνω στην προαναφερθείσα βάση και ο ρόλος του είναι να κινεί τον δεύτερο άξονα (4) σε κυκλική τροχιά. Είναι σημαντικό ο βηματικός αυτός κινητήρας να είναι επιλεγμένος σωστά έτσι ώστε να έχει την απαραίτητη ισχύς για την απαιτούμενη ροπή. Η μελέτη για την απαραίτητη ισχύς πραγματοποιήθηκε στην *Ενότητα 7.3* της εργασίας. Ο κινητήρας αυτός δεν θα πρέπει να έχει υπερβολικό βάρος και μεγάλες διαστάσεις έτσι ώστε πρώτον να μπορεί η μαγνητική βάση να τον συγκρατήσει και δεύτερον να μην επιβαρύνει την συνολική διαστασιολόγηση του μετρητικού οργάνου. Ο κινητήρας που επιλέχθηκε είναι ο *NEMA 17 Geared Stepper Motor Gear Ratio 5:1* [26]

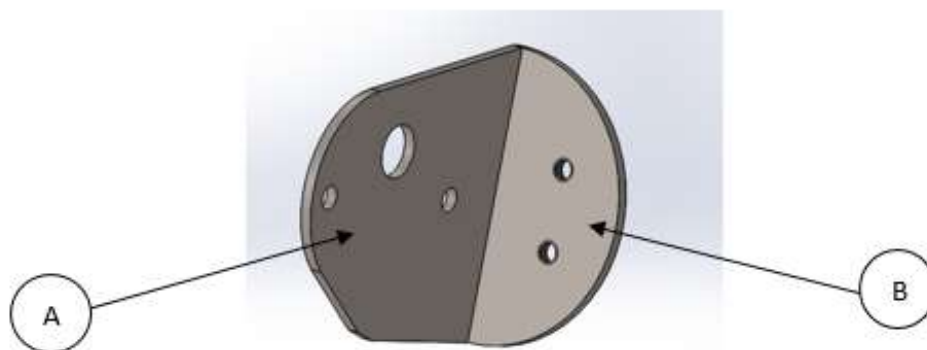
9.5 Δεύτερος Άξονας (4)



Εικόνα 9.5: Δεύτερος Άξονας

Ο άξονας αυτός από την μία του πλευρά προσδένεται πάνω στον άξονα του μεγάλου κινητήρα (7) και από την άλλη πλευρά ενώνεται με τη δεύτερη βάση (5) που φέρει τον μικρό κινητήρα (8). Η πλευρά που ενώνεται με τον μεγάλο κινητήρα (7) έχει διαμπερές οπή για να περνάει ο άξονας του κινητήρα και άλλη μία κάθετη στην προηγούμενη οπή για να περνάει ένας κοχλίας και να σφίγγει τον άξονα αυτόν πάνω στην πατούρα του άξονα του κινητήρα (7). Με την ίδια λογική με τον προηγούμενο άξονα, επιλέχθηκε να μειωθεί η διάμετρος του άξονα στα τμήματα που το επιτρέπει. Για τον άξονα αυτόν επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί αλουμίνιο για να ελαττωθεί το βάρος του. Ο τρόπος κατασκευής του είναι ίδιος με αυτόν του πρώτου άξονα, δηλαδή χρειάστηκε κατεργασία σε συμβατικό τόρνο και φρέζα.

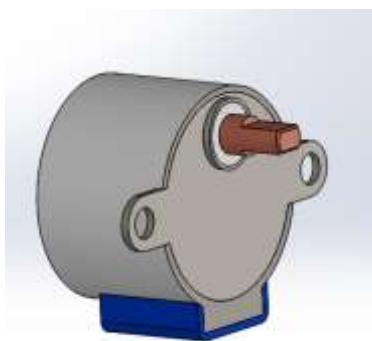
9.6 Δεύτερη Βάση (5)



Εικόνα 9.6: Δεύτερη Βάση

Η λογική της βάσης αυτής είναι ακριβώς η ίδια με αυτή της προηγούμενης βάσης που αναφέρθηκε παραπάνω. Η μία πλευρά της συνδέεται με τον προηγούμενο άξονα (4) και η άλλη της πλευρά συγκρατεί το μικρό βηματικό κινητήρα (8). Ομοίως με την προηγούμενη βάση έτσι και σε αυτή για να μειωθεί το βάρος της βάσης, αφαιρέθηκαν τα τμήματα τα οποία δεν έχουν κάποια χρηστική ουσία για την κατασκευή. Επιλέχθηκε να κατασκευαστεί από χάλυβα. Η βάση αυτή απέκτησε την ορθή γωνία αφού κατεργάστηκε σε στράντζα χειρός και τις οπές σε φρέζα.

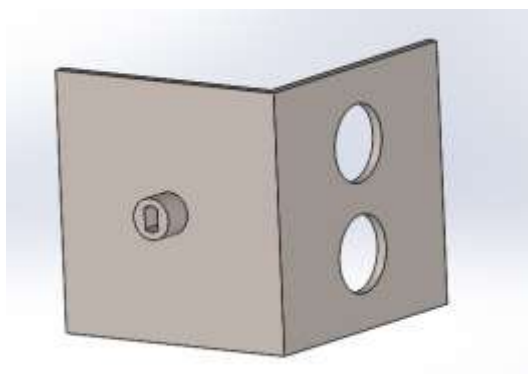
9.7 Μικρός Βηματικός Κινητήρας (8)



Εικόνα 9.7: Μικρός Βηματικός Κινητήρας [32]

Ο βηματικός αυτός κινητήρας συγκρατείται πάνω στην προηγούμενη βάση (5) με κοχλιοσύνδεση και ο άξονάς του κινεί την πλατφόρμα (6) με τους αισθητήρες απόστασης. Για την επιλογή αυτού του κινητήρα έγινε η ίδια μελέτη με αυτή του προηγούμενου κινητήρα. Μελετήθηκε αρχικά η ισχύς που πρέπει να προσδίδει στην πλατφόρμα για να την κινεί και στη συνέχεια επιλέχθηκε αυτός που έχει το μικρότερο βάρος έτσι ώστε να μην επιβαρύνει τον προηγούμενο κινητήρα που θα πρέπει να τον μετακινεί. Η μελέτη αυτή έχει γίνει σε στην *Ενότητα 7.4*. Τελικά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο *Step Motor 28BYJ-48-12V*. [27]

9.8 Πλατφόρμα (6)



Εικόνα 9.8: Πλατφόρμα

Ο ρόλος της πλατφόρμας αυτής είναι να συγκρατεί τους δύο αισθητήρες απόστασης σε σταθερή θέση. Η πλατφόρμα αποτελείται από δύο κάθετα επίπεδα, ένα για να ενώνεται σταθερά με τον άξονα του μικρού κινητήρα (8) και ένα που φέρει δύο οπές μέσα στις οποίες στερεώνονται οι δύο αισθητήρες. Το υλικό της πλατφόρμας αυτής πρέπει να μην είναι μαγνητικό για να μην υπάρξουν επιπλοκές στις μετρήσεις των δύο αισθητήρων. Γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του αλουμίνιο.

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται πως οι οπές θα πρέπει να σχεδιαστούν και να ανοιχτούν πολύ προσεκτικά καθώς πρέπει η απόσταση των κέντρων των κύκλων να είναι γνωστή και οι οπές να είναι όσο το δυνατόν πιο κάθετες με την επιφάνεια του επιπέδου. Αυτή η επισήμανση είναι σημαντική για δύο λόγους. Πρώτον η απόσταση των δύο κέντρων των κύκλων χρειάζεται για τον υπολογισμό της γωνίας σφάλματος που υπολογίζει το μετρητικό όργανο και δεύτερον γιατί στις οπές θα στερεωθούν οι χωρητικοί αισθητήρες και αυτοί για να πάρουν σωστές μετρήσεις πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κάθετοι τόσο μεταξύ τους όσο και με

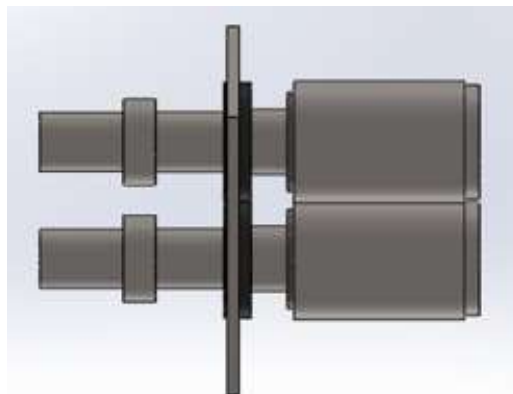
την πλευρά του μετρούμενου ελάσματος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί και στην κάμψη της βάσης αφού πρέπει τα δύο επίπεδα να είναι ακριβώς κάθετα. Αν χαθεί αυτή η καθετότητα σε κάποια από αυτά τα κρίσιμα σημεία της κατασκευής τότε οι μετρήσεις δεν θα αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα. Η κατασκευή της πλατφόρμας έγινε σε στράντζα χειρός και οι οπές σε φρέζα.

9.9 Δακτύλιοι Μόνωσης (9)



Εικόνα 9.9: Δακτύλιοι Μόνωσης

Όπως αναφέρεται και στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή των χωρητικών αισθητήρων, οι αισθητήρες αυτοί επηρεάζονται από το ηλεκτρικό ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες είναι μεταλλικοί και η λειτουργία τους είναι να υπολογίζουν την μεταβολή της χωρητικότητας ανάμεσα στους αισθητήρες και τον μετρούμενο στόχο. Για να το πετύχουν αυτό είναι απαραίτητο να διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα καθ' όλη την διάρκεια της μέτρησης, όπως αναλύθηκε και στην *Ενότητα 8.2.1*. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό πως επειδή οι δύο αυτοί αισθητήρες διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα και λόγω του μεταλλικού υλικού της πλατφόρμας που τα συγκρατεί, αλουμίνιο το οποίο είναι αγωγίμο υλικό, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των αισθητήρων το οποίο αλλοιώνει τις μετρήσεις. Γι' αυτό τον λόγο κρίνεται αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μονωτικό υλικό το οποίο θα μονώνει τους αισθητήρες με την πλατφόρμα. Έτσι, σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν δύο πλαστικοί δακτύλιοι για τη μόνωση κάθε αισθητήρα, με τη γεωμετρία που φαίνεται στην *Εικόνα 9.9*. Με αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκε η πλήρης μόνωση των δύο αισθητήρων με την πλατφόρμα. Οι δακτύλιοι αυτοί κατασκευάστηκαν σε συμβατικό τόρνο. Η συναρμολόγησή του με τους αισθητήρες και την πλατφόρμα φαίνεται στην *Εικόνα 9.10*.



Εικόνα 9.10: Συνδεσμολογία Μονωτών Με Αισθητήρες

10. Ανάλυση Ηλεκτρικού Κυκλώματος

Σημαντικό κομμάτι της εργασίας αυτής αποτέλεσε η συνδεσμολογία όλων αυτών των στοιχείων μεταξύ τους για την ομαλή λειτουργία της μετρητικής διάταξης. Τα βασικά στοιχεία για την κατασκευή του κυκλώματος φαίνονται στην παρακάτω λίστα (Πίνακας 7).

Στοιχείο	Μοντέλο	Ποσότητα
Βηματικός κινητήρας	NEMA 17 Gear Ratio 5:1	x1
Βηματικός κινητήρας	28BYJ-48	x1
Πλακέτα Arduino	UNO R3	x1
Πλακέτα συνδεσμολογίας	Breadboard	x1
Driver	A4988	x1
Driver	DRV8825	x1
Πυκνωτής	100μF, 50V	x2
Τροφοδοτικό	12Volts	x1
Καλώδιο	USB Cable for Arduino	x1
Καλώδια	Jumper	x60

Πίνακας 7: Αποτελούμενα Στοιχεία Ηλεκτρικού Κυκλώματος

10.1 Αποτελούμενα Στοιχεία Κυκλώματος

10.1.1 Βηματικοί Κινητήρες

Τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών κινητήρων έχουν αναφερθεί λεπτομερέστατα στην *Ενότητα 5.1*.

10.1.2 Πλακέτα Arduino

Για την πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε έχει γίνει αναφορά στην *Ενότητα 5.2*.

10.1.3 Drivers

Οι χρησιμοποιούμενοι drivers έχουν αναφερθεί στην *Ενότητα 5.3*.

10.1.4 Τροφοδοτικό

Το συγκεκριμένο ηλεκτρικό κύκλωμα από τις κατασκευαστικές πληροφορίες των κινητήρων απαιτεί συνεχή τάση μεγαλύτερη ή ίση των 12 Volts. Αυτή την τάση μπορεί να την παρέχει κάποια μπαταρία, επειδή όμως στο εμπόριο δεν κυκλοφορούν μπαταρίες με τόσο μεγάλη τάση και αυτές που είναι κοντά στα 12-16 Volts μετά από λίγο χρονικό διάστημα λειτουργία πέφτει η τάση τους, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένα φθινό τροφοδοτικό των 12 Volts, το οποίο θα δέχεται ρεύμα από πρίζα και θα τροφοδοτεί το κύκλωμα με σταθερή τάση 12 Volts.



Εικόνα 10.1: Τροφοδοτικό 12V

10.1.5 Πλακέτα Συνδεσμολογίας

Η πλακέτα αυτή βοηθά στη συναρμολόγηση όλων των στοιχείων του κυκλώματος μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, παρέχει ειδικές θύρες στις οποίες τοποθετούνται οι drivers και οι πυκνωτές και δίπλα τους τοποθετούνται τα καλώδια. Οι θύρες κάθε γραμμής της πλακέτας αυτής συνδέονται μεταξύ τους και έχουν την ίδια τάση.



Εικόνα 10.2: Πλακέτα Breadboard

10.1.6 Καλώδια Jumper

Τα συγκεκριμένα καλώδια χρησιμοποιούνται για την σύνδεση διαφόρων στοιχείων ενός κυκλώματος πάνω σε πλακέτα Breadboard. Τα καλώδια αυτά κυκλοφορούν ευρέως στο εμπόριο σε διάφορα χρώματα και είναι αρκετά οικονομικά.



Εικόνα 10.3: Καλώδια Jumper

10.1.7 Καλώδιο USB Για Arduino

Το συγκεκριμένο καλώδιο είναι αυτό που ενώνει την πλακέτα του Arduino με την θύρα USB του υπολογιστή και μεταβιβάζει τις πληροφορίες που παρέχει το πρόγραμμα του υπολογιστή στην πλακέτα του Arduino και αυτή με τη σειρά της στους drivers μέχρι να φτάσει στην κίνηση των βηματικών κινητήρων.



Εικόνα 10.4: Καλώδιο USB Για Arduino

10.1.8 Πυκνωτές

Σύμφωνα με τους κατασκευαστές των drivers, στη συνδεσμολογία των κινητήρων με τα αντίστοιχα drivers τους είναι απαραίτητη η χρήση πυκνωτών, όπως φαίνεται στην Εικόνα

5.14. Οι πυκνωτές αυτοί πρέπει να έχουν χωρητικότητα 100μF και να αντέχουν σε τάση μέχρι 50 Volts.



Εικόνα 10.5: Πυκνωτής Κυκλώματος

10.2 Απαραίτητες Συνδεσμολογίες

10.2.1 Συνδεσμολογία Drivers-Step Motors

Από την στιγμή που χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες σε μία εφαρμογή είναι απαραίτητοι οι αντίστοιχοι drivers τους. Και αυτό γιατί οι drivers μετατρέπουν τις πληροφορίες που δέχονται από την πλακέτα Arduino σε μορφή κατανοητή για τον κινητήρα. Οι βασικές πληροφορίες που δέχεται ένας driver αφορούν το βήμα, την κατεύθυνση του βήματος, την εντολή ενεργοποίησης/απενεργοποίησης και σε περίπτωση που γίνεται χρήση του μικροβηματισμού, την υποδιαίρεση του βήματος. Επίσης τροφοδοτούνται με ρεύμα που το προωθούν στους κινητήρες. Στην ουσία οι πληροφορίες που συλλέγονται από το driver μεταβιβάζονται στον αντίστοιχο κινητήρα με τον εξής τρόπο. Το driver και ο κινητήρας συνδέονται με τέσσερα καλώδια, ένα για κάθε πόλο του κινητήρα και ανάλογα πιο καλώδιο στέλνει παλμικό σήμα εκείνη τη χρονική στιγμή, ενεργοποιείται ο αντίστοιχος πόλος ο οποίος μαγνητίζει τον δρομέα του κινητήρα, με αποτέλεσμα να τον στρέψει. Στην προκειμένη περίπτωση επειδή χρησιμοποιούνται δύο βηματικοί κινητήρες, χρειάζονται δύο drivers ένας για κάθε κινητήρα.

10.2.2 Συνδεσμολογία Χωρητικών Αισθητήρων-Πλακέτα Arduino

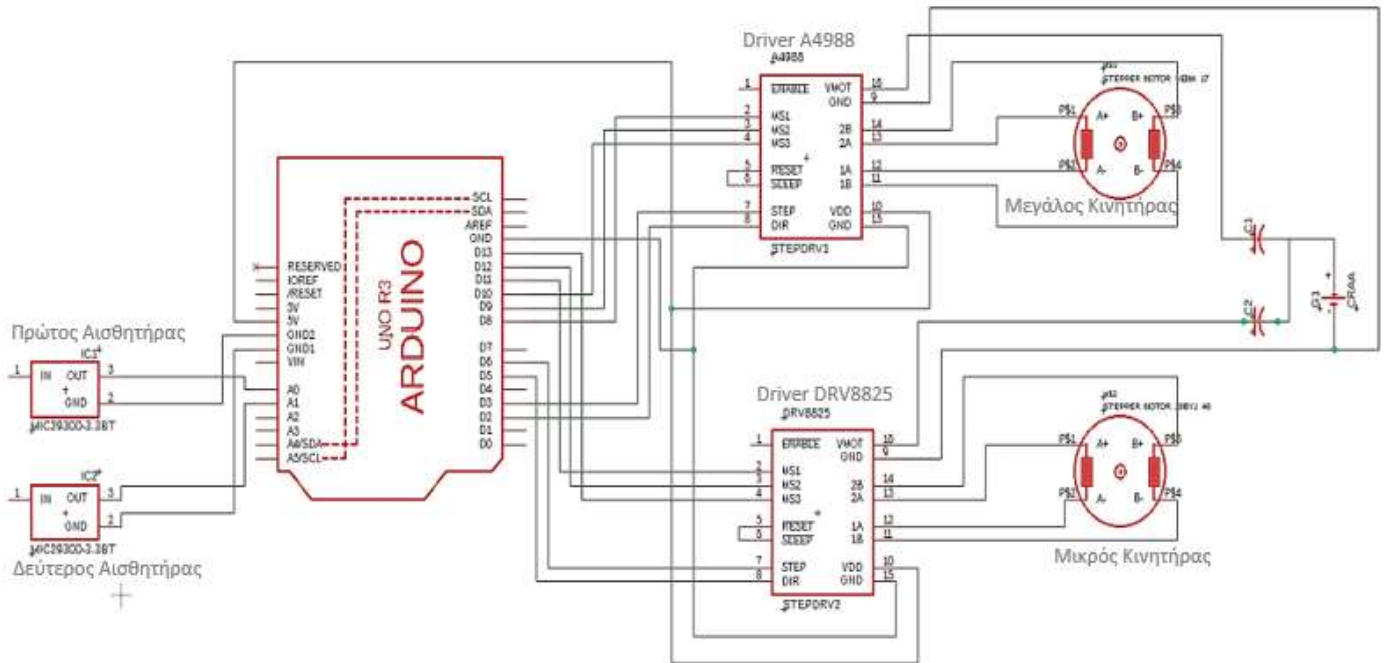
Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται από τους αισθητήρες μεταφέρονται στον μετασχηματιστή, ο οποίος με την σειρά του μετατρέπει την πληροφορία αυτή σε αναλογική τάση από 0 μέχρι 1 Volt, ανάλογα με την απόσταση που μέτρησε ο αισθητήρας. Το 0 Volt αντιστοιχεί σε απόσταση μεγαλύτερη των 2.5mm του αισθητήρα με τον μετρούμενο στόχο, ενώ το 1 Volt σε μηδενική απόσταση. Ο μετασχηματιστής έχει δύο καλώδια ως έξοδο για την αναλογική τάση, ένα που μεταφέρει την τάση αυτή και ένα που λειτουργεί σαν γείωση. Άρα η διαφορά των δύο αυτών τάσεων φανερώνει και τη μετρούμενη απόσταση του αισθητήρα. Η πλακέτα του Arduino έχει έξι θύρες-εισόδους για να δέχονται αναλογική τάση. Έτσι το καλώδιο του μετασχηματιστή που μεταφέρει την αναλογική τάση συνδέεται με μία από τις έξι αυτές θύρες της πλακέτας και το καλώδιο με τη γείωση συνδέεται με την αντίστοιχη θύρα γείωσης της πλακέτας. Με αυτόν τον τρόπο πλέον είναι σε θέση το πρόγραμμα του Arduino να αναγνωρίσει την τάση αυτή και με κατάλληλη επεξεργασία της πληροφορίας αυτής να την μετατρέψει σε απόσταση, μεταξύ του αισθητήρα και του μετρούμενου στόχου.

10.2.3 Συνδεσμολογία Μετρούμενου Ελάσματος-Γείωσης

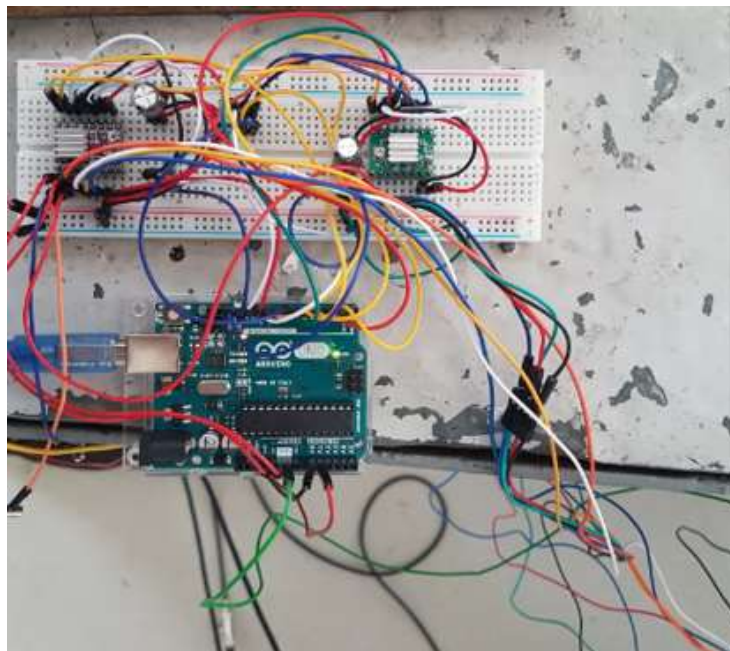
Από τις τεχνικές προδιαγραφές των χωρητικών αισθητήρων, είναι αναγκαίο το μετρούμενο μεταλλικό στοιχείο να γειώνεται, έτσι ώστε να αποφορτίζεται πλήρως. Όπως σχολιάστηκε και στην Ενότητα 8.2.4, τυχόν ηλεκτρικά φορτία δημιουργούν θόρυβο στους αισθητήρες και αυτοί με τη σειρά τους εκτιμούν λανθασμένα τις αποστάσεις. Η γείωση πραγματοποιείται

χρησιμοποιώντας ένα jumper καλώδιο του οποίου η μία πλευρά τοποθετείται πάνω στο μετρούμενο έλασμα και η άλλη σε μία από τις θύρες γείωσης της πλακέτας Arduino.

Παρακάτω φαίνεται λεπτομερέστερα η συνδεσμολογία όλων των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εφαρμογή.



Εικόνα 10.6: Σχηματικά Ολοκληρωμένο Κύκλωμα



Εικόνα 10.7: Πραγματικό Ολοκληρωμένο Κύκλωμα

11. Περιβάλλον Arduino

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί το προγραμματιστικό περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την κατάστροψη και τη συγγραφή του απαραίτητου αλγορίθμου. Αναλυτικότερα, θα εξηγηθούν οι διάφορες εντολές που χρησιμοποιήθηκαν και θα σχολιασθεί η λογική πάνω στην οποία βασίστηκε ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, δίνοντας κάποιες διευκρινήσεις σε κάποια σημεία του αλγορίθμου που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής.

11.1 Δομή προγράμματος Arduino

Ο προγραμματισμός σε Arduino βασίζεται σε δύο κύριες συναρτήσεις, την *setup()* και την *loop()*. Για τον σωστό προγραμματισμό στο περιβάλλον του Arduino και οι δύο συναρτήσεις είναι απαραίτητες.

11.1.1 Setup()

Η συγκεκριμένη συνάρτηση εκτελείται μόνο μία φορά από τη στιγμή που ενεργοποιηθεί η πλακέτα Arduino. Η πλακέτα ενεργοποιείται είτε αφού έχει συνδεθεί και μεταγλωττιστεί κάποιο πρόγραμμα και στη συνέχεια εκτελεστεί είτε όταν πατηθεί το πλήκτρο reset που βρίσκεται πάνω στην πλακέτα του Arduino. Στη συνάρτηση αυτή μπαίνουν συνήθων χαρακτηρισμοί εισόδων και εξόδων, αρχικοποιήσεις και ονοματολογία μεταβλητών, χρήσιμες πράξεις και γενικά ό,τι εντολή πρέπει να εκτελεστεί μονάχα μία φορά και στην αρχή του αλγορίθμου.

11.1.2 Loop()

Η συγκεκριμένη επαναληπτική διαδικασία εκτελείται και επαναλαμβάνεται συνεχώς και σε αυτή τη συνάρτηση γράφεται το κυρίως πρόγραμμα. Αν το απαιτεί ο αλγόριθμος υπάρχει η δυνατότητα με κατάλληλο τρόπο να τερματιστεί αυτή η επ' άπειρο εκτέλεση. Ο τρόπος αυτός έχει χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο αλγόριθμο και θα εξηγηθεί στην *Ενότητα 11.4.2*.

11.2 Επεξήγηση Εντολών Προγράμματος

Το περιβάλλον του Arduino δεν παρέχει πολλές δυνατότητες όσον αφορά τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων. Για αυτό το λόγο έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία *airspace* η βιβλιοθήκη *AccelStepper* [33], η οποία είναι μια πολύ αξιόλογη βιβλιοθήκη που παρέχει πολλές επιλογές για τον έλεγχο βηματικών κινητήρων. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη βρίσκεται ελεύθερα στο διαδίκτυο. Ένα από τα σπουδαία χαρακτηριστικά της είναι ο ταυτόχρονος έλεγχος δύο ή περισσότερων κινητήρων. Επίσης χρήσιμο χαρακτηριστικό της είναι ο έλεγχος επιτάχυνσης και επιβράδυνσης των κινητήρων. Παρακάτω γίνεται αναφορά στις λειτουργίες κάποιων βασικών εντολών, απαραίτητων για τον προγραμματισμό των δύο βηματικών κινητήρων.

➤ *include <AccelStepper.h>*

Η εντολή αυτή χρειάζεται για τη λήψη και χρησιμοποίηση της βιβλιοθήκης *'AccelStepper'* που παρέχει το πρόγραμμα του Arduino και η οποία χρησιμεύει στην οδήγηση των κινητήρων.

➤ *define stepper_pindir_big 2* *define stepper_pinsteps_big 3* *define stepper_pinsleep_big 4*

Οι εντολές αυτές αποσκοπούν στην επικοινωνία του βηματικού κινητήρα με την πλακέτα Arduino για τη φορά στρέψης, τα βήματα και την ενεργοποίησης/απενεργοποίηση του

κινητήρα αντίστοιχα. Τα νούμερα δίπλα από κάθε εντολή υποδηλώνουν τη θέση-θύρα πάνω στην πλακέτα Arduino η οποία πρέπει να συνδεθεί με την αντίστοιχη θέση του driver του κινητήρα μέσω καλωδίου jumper.

➤ ***define stepper_speed***
define stepper_acc

Οι εντολές αυτές καθορίζουν την ταχύτητα του βηματικού κινητήρα μετρούμενη σε βήματα ανά δευτερόλεπτο (steps/sec) και την επιτάχυνσή του μετρούμενη σε βήματα ανά δευτερόλεπτο στο τετράγωνο (steps/sec²).

➤ ***AccelStepper stepper_big(AccelStepper::DRIVER,stepper_pinsteps_big,stepper_pindir_big)***

Η εντολή αυτή προσδίδει την ονομασία του μεγάλου κινητήρα ως *stepper_big*. Έτσι κάθε φορά που μία εντολή περιέχει την ονομασία *stepper_big* αναφέρεται στον μεγάλο κινητήρα. Αντίστοιχα ονοματίζεται και ο μικρός κινητήρας.

➤ ***Serial.begin(9600)***

Σε αρκετά σημεία του αλγορίθμου χρειάζεται να προβληθούν πληροφορίες στην σειριακή θύρα επικοινωνίας του προγράμματος με τον χρήστη. Για να ενεργοποιηθεί αυτή η σειριακή θύρα χρησιμοποιείται η παραπάνω εντολή η οποία μάλιστα δηλώνει με τον αριθμό 9600 τον αριθμό των bits ανά δευτερόλεπτο που μεταφέρονται από το προγραμματιστικό περιβάλλον στην θύρα επικοινωνίας.

➤ ***pinMode(M0, OUTPUT)***
pinMode(M1, OUTPUT)
pinMode(M2, OUTPUT)
digitalWrite(M0, HIGH)
digitalWrite(M1, HIGH)
digitalWrite(M2, HIGH)

Οι εντολές αυτές ορίζουν τις θύρες M0, M1, M2 της πλακέτας του Arduino ως εξόδους δυαδικής μορφής και μάλιστα δηλώνουν την τιμή που θα πάρουν στο δυαδικό σύστημα 0,1 και στην προκειμένη περίπτωση με την εντολή HIGH δηλώνεται πως παίρνουν την τιμή 1, δηλαδή επιτρέπεται η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτές οι θύρες χρειάζονται για την ενεργοποίηση μια χρήσιμης λειτουργίας των βηματικών κινητήρων, αυτή του Μικροβηματισμού.

➤ ***stepper_small.setMaxSpeed()***
stepper_small.setAcceleration()
stepper_small.move()

Με τις εντολές αυτές δηλώνεται η μέγιστη ταχύτητα που πρέπει να αποκτήσει ο κινητήρας, η επιτάχυνση του και το σημείο που πρέπει να προσεγγίσει. Με τα τρία αυτά δεδομένα το πρόγραμμα του Arduino καθορίζει τον κατάλληλο τρόπο με τον οποίο θα επιταχυνθεί, αποκτήσει σταθερή ταχύτητα και τέλος επιβραδυνθεί ο κινητήρας, μέχρι να φτάσει στο σημείο που πρέπει.

➤ ***analogRead(A0)***

Με την εντολή αυτή αναγκάζεται ο αλγόριθμος να διαβάσει την αναλογική είσοδο που παρέχει ο αισθητήρας που έχει συνδεθεί στην θύρα A0 της πλακέτας του Arduino. Οι αναλογικές τιμές είναι με τη μορφή τάσης.

➤ **Serial.print()**

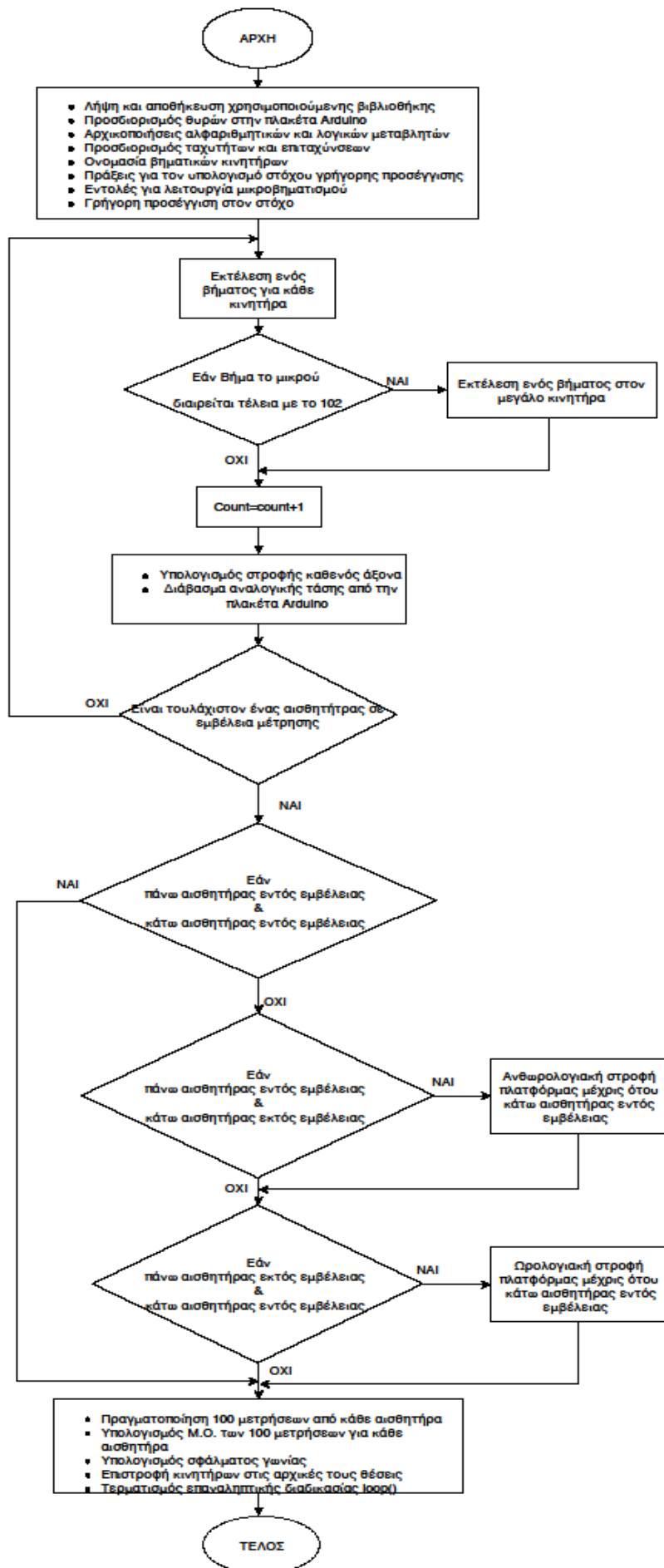
Η εντολή αυτή εκτυπώνει την τιμή της μεταβλητής που έχει μέσα στις παρενθέσεις στη σειριακή θύρα και με αυτό τον τρόπο μπορεί να τη διαβάσει ο χρήστης του αλγορίθμου.

➤ **delay(200)**

Η εντολή αυτή αποσκοπεί στην καθυστέρηση συνέχισης του αλγορίθμου κατά 200μs.

11.3 Επεξήγηση Λογικής Προγράμματος

Αρχικά δίνονται οι κατάλληλες εντολές για τη λήψη και αποθήκευση της χρησιμοποιούμενης βιβλιοθήκης που παρέχει το πρόγραμμα του Arduino. Γίνεται η αναγνώριση των κινητήρων και δίνονται οι κατάλληλες εντολές για την ενεργοποίηση της λειτουργίας του Microstepping. Έπειτα ορίζονται οι κατάλληλες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης για τους δύο κινητήρες. Στη συνέχεια, δηλώνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετρητικού οργάνου, δηλαδή το μήκος των δύο αξόνων καθώς και τις συντεταγμένες τοποθέτησής της βάσης του και η ιδανική γωνία κάμψης του ελάσματος και με βάση τα δεδομένα αυτά υπολογίζεται το σημείο που πρέπει να προσεγγίσουν οι αισθητήρες. Η προσέγγιση αυτή γίνεται με γρήγορο ρυθμό για να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος της μέτρησης αφού η απόσταση που πρέπει να διανύσουν οι αισθητήρες είναι σχετικά μεγάλη. Σε αυτό το στάδιο οι δύο βηματικοί κινητήρες μπορούν να κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους αρκεί όταν φτάσουν στο σημείο προσέγγισης η πλατφόρμα να έχει τη σωστή κλίση η οποία είναι η ιδανική γωνία κάμψης του ελάσματος. Έπειτα και αφού έχει ολοκληρωθεί το στάδιο αυτό, οι δύο κινητήρες κινούνται συντονισμένα. Στο σημείο αυτό απαιτείται ο συντονισμός αφού πλέον η κλίση-γωνία της πλατφόρμας πρέπει να παραμένει σταθερή καθ' όλη την κίνηση προσέγγισης των αισθητήρων κοντά στην πλευρά του ελάσματος. Αυτή η κίνηση πραγματοποιείται μέχρις ότου οι αισθητήρες εισέλθουν στην εμβέλεια μέτρησής τους, η οποία κυμαίνεται από 0 μέχρι 2.5 χιλιοστά. Όταν συμβεί αυτό δίνεται εντολή στους κινητήρες να σταματήσουν την κίνησή τους ώστε να παρθούν οι μετρήσεις. Ωστόσο, υπάρχει η περίπτωση οι δύο αισθητήρες να μην εισέλθουν ταυτόχρονα στην περιοχή εμβέλειας. Έτσι υπάρχει έλεγχος μέσα στον αλγόριθμο και στην περίπτωση όπου συμβεί αυτό αρχίζει να στρέφεται η πλατφόρμα με την κατάλληλη φορά ώστε να εισέλθει και ο άλλος αισθητήρας στην περιοχή εμβέλειας του. Αφού και οι δύο αισθητήρες βρεθούν σε εμβέλεια μέτρησης, τότε ο αλγόριθμος ζητά από τους αισθητήρες να πάρουν 100 μετρήσεις ο καθένας και αφού υπολογιστεί ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών υπολογίζεται η διαφορά στους δύο αυτούς μέσους όρους και έτσι βρίσκεται η γωνία σφάλματος του κατεργαζόμενου ελάσματος. Τέλος, οι κινητήρες επανέρχονται στην αρχική τους θέση και πλέον το μετρητικό όργανο είναι σε θέση ετοιμότητας για να επαναλάβει την ίδια διαδικασία. Η διαδικασία αυτή φαίνεται σε διάγραμμα ροής στην *Εικόνα 11.1*.



11.4 Διευκρινήσεις

11.4.1 Συντονισμός Κινητήρων

Για τον συντονισμό των δύο κινητήρων ακολουθείται η εξής διαδικασία. Είναι γνωστά τα βήματα που χρειάζεται ο κάθε κινητήρας για να εκτελέσει μία περιστροφή με τη χρήση του μικροβηματισμού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο μικρός κινητήρας χρειάζεται 16416 βήματα για μία πλήρης περιστροφή (16416 steps/rev) και ο μεγάλος αντίστοιχα 16576 steps/rev. Σκοπός είναι κάθε χρονική στιγμή να έχουν περιστραφεί το ίδιο. Οι δύο αριθμοί είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, ωστόσο παρατηρείται για κάθε 102 βήματα του μικρού κινητήρα ο μεγάλος κινητήρας υπολείπεται 1 βήμα. Γι' αυτό τον λόγο κάθε φορά που ο μετρητής βήματος του μικρού κινητήρα διαιρείται ακριβώς με το 102, ο μεγάλος κινητήρας εκτελεί ένα βήμα παραπάνω. Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουν και οι δύο κινητήρες να έχουν τον ίδιο αριθμό βημάτων ανά περιστροφή. Βέβαια με αυτόν τον τρόπο θα υπάρξουν στιγμές όπου ο μεγάλος κινητήρας θα υπολείπεται μέχρι και ένα βήμα του μικρού, ωστόσο ένα βήμα του μεγάλου μεταφράζεται σε 0.02° τιμή που είναι επιτρεπτή για το συγκεκριμένο μετρητικό όργανο. Η μέθοδος αυτή σε μορφή προγράμματος φαίνεται παρακάτω:

```
while (count < countsperrev && telos == 1 ){

    small();
    big();
    i=i+1;
    j=j+1;

    if (count % 102==0){
        big();
        j=j+1;
    }

    count++;
```

Εικόνα 11.2: Εντολές Συντονισμού Βηματικών Κινητήρων³

11.4.2 Τερματισμός Επαναληπτικής Διαδικασίας loop()

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino το κύριο πρόγραμμα εκτελείται μέσα σε μια επαναληπτική διαδικασία τη loop(). Αυτή έχει την ιδιαιτερότητα ότι για όσο χρόνο η πλακέτα του Arduino είναι ενεργοποιημένη εκτελείται συνεχώς. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη εφαρμογή οι εντολές μέσα στη loop() πρέπει να τερματίζουν έπειτα από το πέρας των μετρήσεων, δηλαδή όλες οι εντολές πρέπει να εκτελεστούν μονάχα μία φορά. Για να επιτευχθεί αυτό ακολουθήθηκε η παρακάτω τακτική. Χρησιμοποιήθηκε μια λογική μεταβλητή, η *execute* η οποία αρχικοποιείται με την τιμή *HIGH* στη setup(). Η λογική αυτή μεταβλητή χρησιμοποιείται ως έλεγχος τερματισμού της κύριας επανάληψης η οποία βρίσκεται εμφωλευμένη μέσα στην loop(), δηλαδή όλες οι εντολές περικλείονται μέσα στην κύρια αυτή επανάληψη όπου σαν τελευταία εντολή υπάρχει η εντολή που μετατρέπει την μεταβλητή *execute* από *HIGH* σε *LOW*. Έτσι μόλις τελειώσει η πρώτη φορά εκτέλεσης του αλγορίθμου, θα επιστρέψει το πρόγραμμα στην συνθήκη ελέγχου της κύριας αυτής επανάληψης και επειδή η λογική τιμή *execute* δεν έχει πλέον την τιμή *HIGH* δεν θα μπει μέσα και στην ουσία θα γίνεται συνέχεια αυτός ο έλεγχος μέχρι να

³ Στο Παράρτημα Γ απεικονίζεται ολόκληρος ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος

απενεργοποιηθεί η πλακέτα Arduino και ποτέ δεν θα εισέλθει δεύτερη φορά μέσα στην επανάληψή. Η μέθοδος αυτή σε μορφή προγράμματος φαίνεται παρακάτω:

```
void setup() {
  while (execute==HIGH) {
    ... (εντολές αλγορίθμου)...
    execute= LOW;
  }
}
```

Εικόνα 11.3: Εντολές Για Να Τρέξει Μια Φορά Η Επαναληπτική Διαδικασία Loop()

11.4.3 Περαιτέρω Περιστροφή Πλατφόρμας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατά την προσέγγιση των αισθητήρων κοντά στην πλευρά του ελάσματος, υπάρχει το ενδεχόμενο μονάχα ο ένας από τους δύο αισθητήρες να εισέλθει στην εμβέλεια μέτρησης. Όμως, είναι αναγκαίο να εισέλθει στην εμβέλεια μέτρησης και ο δεύτερος αισθητήρας για να υπολογιστεί το σφάλμα της γωνίας. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να εμπλουτισθεί ο αλγόριθμος με τους εξής ελέγχους. Στην περίπτωση όπου ο πάνω αισθητήρας παίρνει μετρήσεις και ο κάτω όχι, θα πρέπει η πλατφόρμα πάνω στην οποία σταθεροποιούνται οι αισθητήρες να στραφεί αντίθετα με τη φορά του ρολογιού, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 11.5*. Με αυτόν τον τρόπο αρχίζει ο κάτω αισθητήρας να πλησιάζει την πλευρά του ελάσματος εις βάρος όμως του πάνω αισθητήρα, ο οποίος αρχίζει να απομακρύνεται από την πλευρά του ελάσματος. Γι' αυτόν τον λόγο μόλις είναι σε θέση και οι δύο αισθητήρες να πάρουν μετρήσεις, σταματά να περιστρέφεται η πλατφόρμα και μένει ακίνητη για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες μετρήσεις. Με αντίστοιχο τρόπο όταν ο κάτω αισθητήρας είναι στην εμβέλεια μέτρησης ενώ ο πάνω δεν είναι τότε η πλατφόρμα αρχίζει να στρέφεται ωρολογιακά μέχρις ότου και οι δύο αισθητήρες να παίρνουν μετρήσεις. (*Εικόνα 11.6*).

Από την πλευρά του ο αλγόριθμος αναγνωρίζει τότε κάποιος αισθητήρας βρίσκεται στην εμβέλεια μέτρησής του από την αναλογική τάση που δέχεται από την αναλογική θύρα της πλακέτας Arduino. Αν η τάση αυτή είναι μηδενική σημαίνει πως ο αισθητήρας είναι εκτός εμβέλειας μέτρησης. Όταν όμως η τάση αυτή γίνει μεγαλύτερη από μηδέν τότε καταλαβαίνει ότι ο αισθητήρας αυτός βρίσκεται εντός εμβέλειας. Οι δύο αυτοί έλεγχοι μέσα στον αλγόριθμο απεικονίζονται στην *Εικόνα 11.4*:

```
if (voltage1 >= 0.5 && voltage2 <= 0.01){
  for (int j=0; j<10000; j++) {

    sensorValue1 = analogRead(A0);
    voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);

    sensorValue2 = analogRead(A1);
    voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);

    ...
    if (voltage1 >= 0.3 && voltage2 >= 0.3){
      break;
    }
  }
}

if (voltage2 >= 0.5 && voltage1 <= 0.01){
  for (int j=0; j<10000; j++) {

    sensorValue1 = analogRead(A0);
    voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);

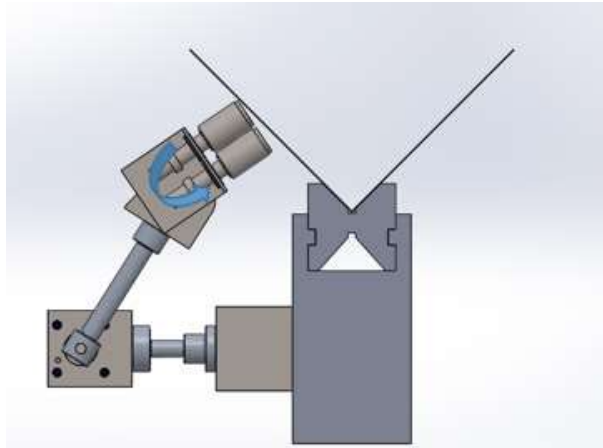
    sensorValue2 = analogRead(A1);
    voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);

    ...
    if (voltage1 >= 0.3 && voltage2 >= 0.3){
      break;
    }
  }
}
```

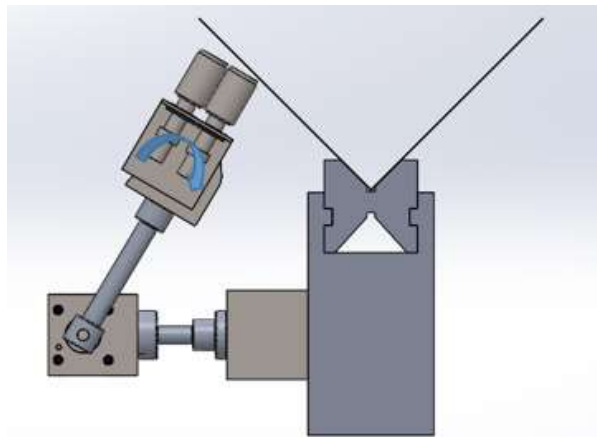
Εικόνα 11.4: Εντολές Για Την Επιπλέον Κίνηση Της Πλατφόρμας

Καθ' όλη τη συγχρονισμένη κίνηση των δύο κινητήρων η πλατφόρμα παρέμενε σταθερή σε κλίση-γωνία ως προς το σημείο αναφοράς που είναι η πλευρά του μετρούμενου ελάσματος. Με βάση αυτή την ιδανική κλίση και τις μετρήσεις των αισθητήρων υπολογίζεται το σφάλμα της γωνίας κάμψης, με τη μέθοδο που έχει αναφερθεί στην *Εικόνα 4.4*. Όμως, στη

συγκεκριμένη περίπτωση, όπου υπάρχει αναγκαστική περιστροφή της πλατφόρμας για να εισέλθουν και οι δύο αισθητήρες στην εμβέλεια μέτρησης η ιδανική κλίση-γωνία που είχε η πλατφόρμα χάνεται. Γι' αυτό τον λόγο, κατά τη διάρκεια της περαιτέρω αυτής κίνησης της πλατφόρμας θα πρέπει να αποθηκεύεται ο αριθμός των επιπλέον βημάτων που πραγματοποιήθηκαν και μετατρέποντάς τα σε μονάδες μετρούμενης γωνίας να προστίθενται στην τελική γωνία σφάλματος. Τονίζεται ότι για να υπάρξει το ενδεχόμενο της περαιτέρω κίνησης της πλατφόρμας θα πρέπει η γωνία σφάλματος να είναι μεγαλύτερη από 5.5° γιατί σε αντίθετη περίπτωση και οι δύο αισθητήρες θα είναι σε θέση να πάρουν μετρήσεις, όπως έχει αναλυθεί στην *Ενότητα 4.6*.



Εικόνα 11.5: Περίπτωση Περαιτέρω Ανθρωπολογιακής Κίνησης Πλατφόρμας



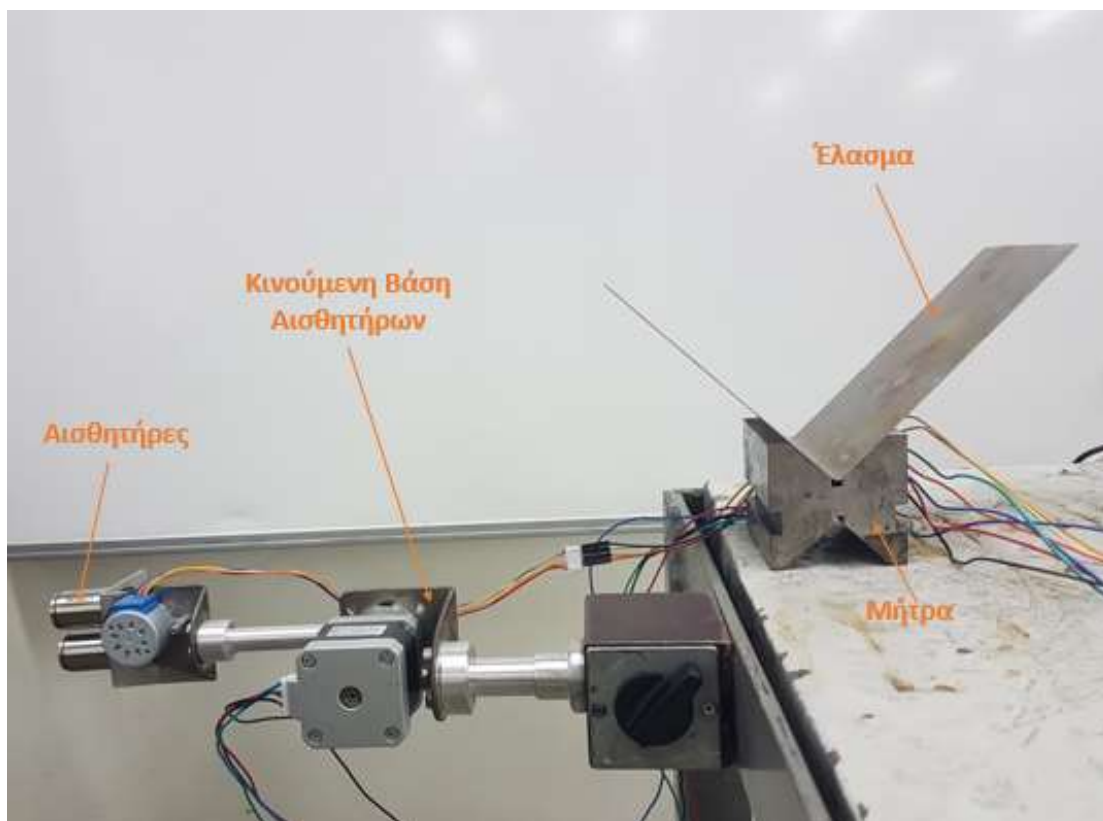
Εικόνα 11.6: Περίπτωση Περαιτέρω Ωρολογιακής Κίνησης Πλατφόρμας

12. Μετρήσεις Και Αποτελέσματα

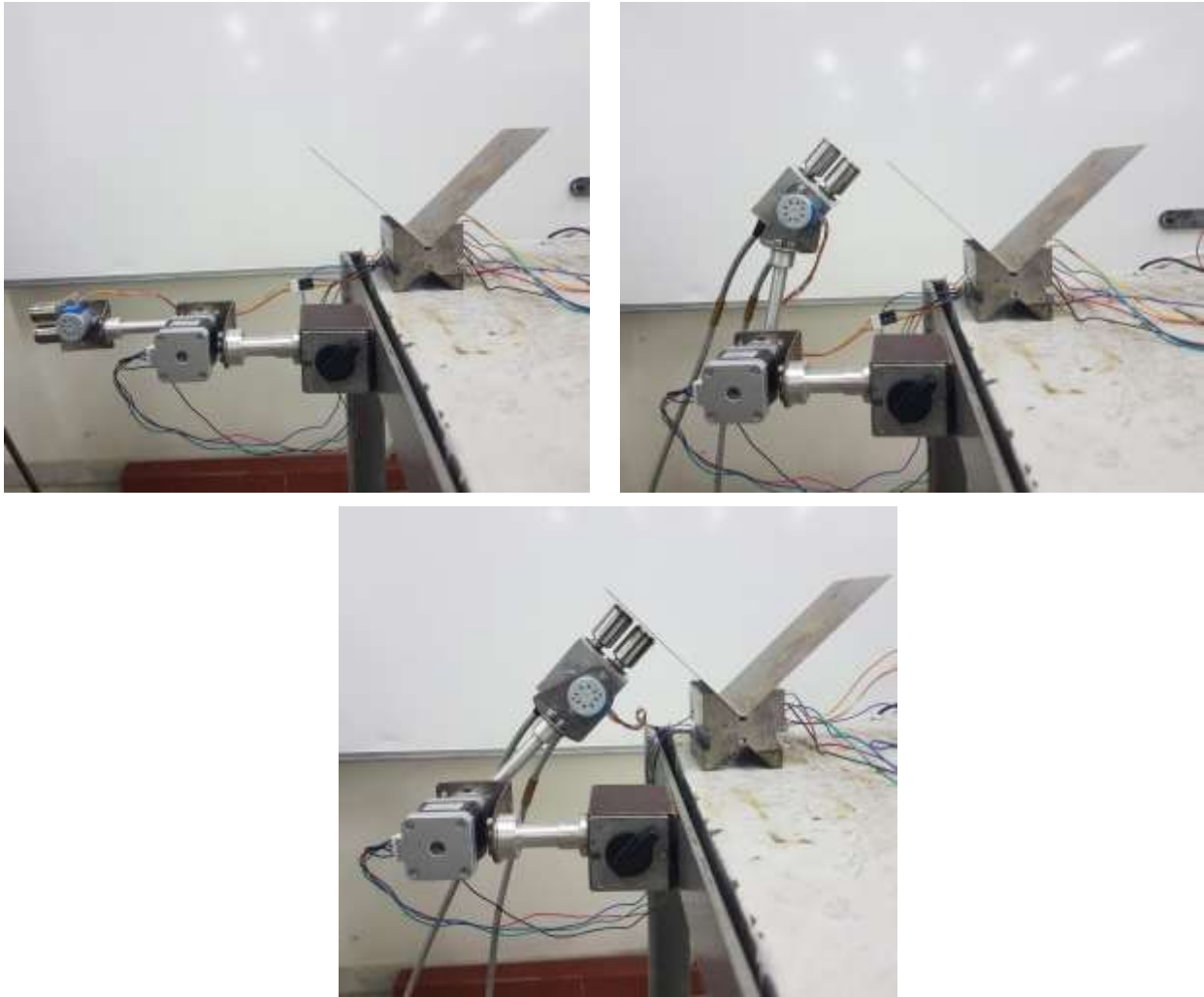
Αφού πλέον έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του μετρητικού οργάνου, έχει γίνει η απαραίτητη συνδεσμολογία μεταξύ πλακέτας Arduino με drivers κινητήρων και αισθητήρων και έχει πραγματοποιηθεί η συγγραφή του αλγορίθμου στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino, έχει φτάσει το σημείο των δοκιμών και των μετρήσεων του οργάνου. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι η λειτουργία του μετρητικού οργάνου υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή πάνω σε στράντζα είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί καθώς τέτοια εργαλειομηχανή δεν υπάρχει εύκαιρη στις εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου. Γι' αυτό τον λόγο θα γίνει προσπάθεια να φτιαχτεί ένα μέρος εργασίας του οργάνου που να προσομοιώνει όσο το δυνατόν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες.

Οι πρώτες μετρήσεις πάρθηκαν με τη διάταξη του μετρητικού οργάνου και του ελάσματος όπως φαίνεται στην

Εικόνα 12.1. Το εικονιζόμενο έλασμα έχει καμφθεί υπό γωνία 90 μοιρών σε υδραυλική στράντζα με μήτρα αυτή που φαίνεται στην εικόνα να το συγκρατεί. Το μετρητικό όργανο είναι τοποθετημένο κάθετα σε έναν μεταλλικό πάγκο και πάνω στον πάγκο είναι τοποθετημένο το έλασμα σε απόσταση τέτοια ώστε να μπορούν οι αισθητήρες να πάρουν μετρήσεις αφού έχουν πλησιάσει ικανοποιητικά στην πλευρά του. Η διαδικασία κίνησης της βάσης και των αισθητήρων κατά τη μέτρηση φαίνεται στην *Εικόνα 12.2.*



Εικόνα 12.1: Προσομοίωση Μετρητικού Οργάνου Σε Καταστάσεις Στράντζας



Εικόνα 12.2: Στάδια Μέτρησης Γωνίας Κάμψης

12.1 Επαναληψιμότητα Οργάνου

Οι μετρήσεις που θα γίνουν στην πρώτη σειρά μετρήσεων αποσκοπούν στον υπολογισμό της ακρίβειας της επαναληψιμότητας των μετρήσεων του οργάνου. Δηλαδή, με σταθερό το έλασμα και τη μήτρα, πραγματοποιούνται 15 μετρήσεις από το όργανο για να διαπιστωθεί αν όλες οι μετρήσεις είναι οι ίδιες και κατά πόσο αποκλίνει η μία μέτρηση από την άλλη. Θα υπολογιστεί η μέση τιμή των 15 αυτών μετρήσεων για να βρεθεί η μέση τιμή του σφάλματος της γωνίας καθώς επίσης και η τυπική απόκλιση από τη μέση αυτή τιμή. Για να υπάρξει μία πλήρης εικόνα όλων των λειτουργιών του μετρητικού οργάνου πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές μετρήσεων. Στην πρώτη κατά τη συντονισμένη κίνηση των κινητήρων και οι δύο αισθητήρες εισέρχονται σε εμβέλεια μέτρησης, δηλαδή δεν χρειάζεται να στραφεί περαιτέρω η πλατφόρμα. Στη δεύτερη και τρίτη σειρά μετρήσεων τοποθετείται το έλασμα με τέτοια γωνία ώστε να αναγκάσει την πλατφόρμα να κινηθεί ανθρωρολογιακά και ωρολογιακά αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Αριθμός Μετρήσεων	Απόσταση Πάνω Αισθητήρα (mm)	Απόσταση Κάτω Αισθητήρα (mm)	Σφάλμα Γωνίας (Μοίρες)
1	1.40	0.84	1.34
2	1.55	0.98	1.35
3	1.41	0.83	1.39
4	1.35	0.70	1.56
5	1.28	0.73	1.29
6	1.56	0.98	1.38
7	1.21	0.63	1.38
8	1.16	0.65	1.22
9	1.32	0.80	1.24
10	1.70	1.17	1.27
11	1.39	0.89	1.20
12	1.61	1.06	1.32
13	1.34	0.75	1.40
14	1.42	0.88	1.30
15	1.36	0.78	1.37

Πίνακας 8: Μετρήσεις Γωνίας Κάμψης Περίπτωσης Χωρίς Περιστροφή

Αριθμός Μετρήσεων	Απόσταση Πάνω Αισθητήρα (mm)	Απόσταση Κάτω Αισθητήρα (mm)	Επιπλέον Βήματα Πλατφόρμας	Σφάλμα Γωνίας (Μοίρες)
1	0.70	1.73	148	5.71
2	0.74	1.66	140	5.25
3	0.73	1.63	132	5.00
4	0.75	1.63	132	5.10
5	0.78	1.60	128	4.75
6	0.83	1.67	116	4.55
7	0.86	1.59	120	4.38
8	0.79	1.75	116	4.84
9	0.78	1.67	108	4.50
10	0.76	1.64	104	4.38
11	0.75	1.65	104	4.43
12	0.77	1.77	92	4.42
13	0.75	1.69	92	4.25
14	0.64	1.77	88	4.61
15	0.80	1.64	92	4.05

Πίνακας 9: Μετρήσεις Γωνίας Κάμψης Περίπτωσης Με Ανθρωπολογική Περιστροφή

Αριθμός Μετρήσεων	Απόσταση Πάνω Αισθητήρα (mm)	Απόσταση Κάτω Αισθητήρα (mm)	Επιπλέον Βήματα Πλατφόρμας	Σφάλμα Γωνίας (Μοίρες)
1	1.46	0.13	156	6.90
2	1.77	0.15	140	7.29
3	1.02	0.18	168	6.11
4	1.10	0.08	168	6.30
5	2.15	0.03	144	8.28
6	2.21	0.05	128	8.06

7	1.69	0.09	168	7.71
8	2.33	0.07	120	8.17
9	1.47	0.02	168	7.83
10	2.28	0.11	100	7.62
11	2.00	0.13	140	7.84
12	2.46	0.24	80	7.60
13	1.91	0.06	136	7.63
14	1.92	0.05	144	7.73
15	1.70	0.06	144	7.19

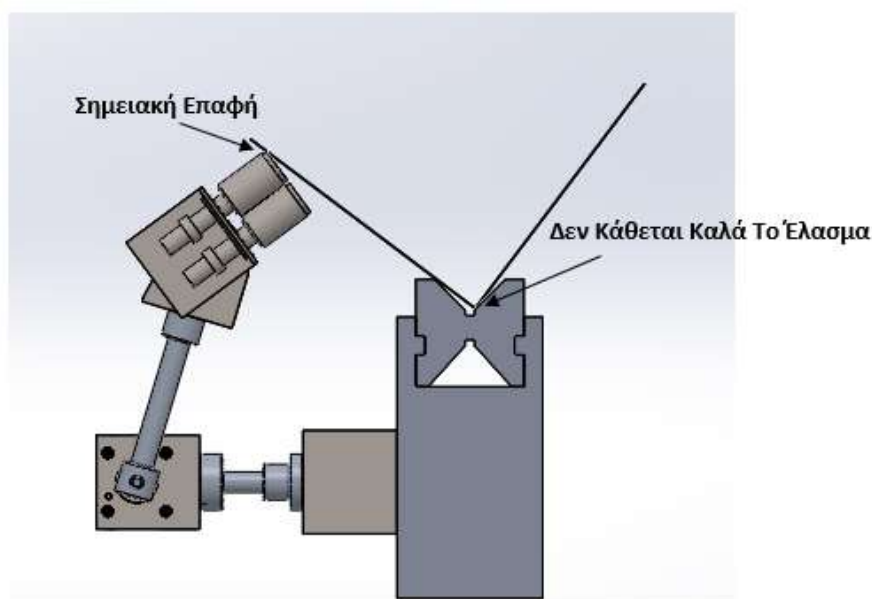
Πίνακας 10: Μετρήσεις Γωνίας Κάμψης Περίπτωσης Με Ωρολογιακή Περιστροφή

Από τον πίνακα 11 σύμφωνα με τις μετρήσεις προκύπτει ως η μέση τιμή της μετρούμενης γωνίας ίση με $\chi=1.33^\circ$ και με τυπική απόκλιση $\sigma_\chi=0.08^\circ$. Αντίστοιχα για τις άλλες δύο περιπτώσεις προκύπτει ότι $\chi=4.67^\circ$, $\sigma_\chi=0.41^\circ$ και $\chi=7.52^\circ$, $\sigma_\chi=0.52^\circ$. Συνοπτικά τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 11:

Περίπτωση	Μέσο Σφάλμα Γωνίας	Τυπική Απόκλιση
1	1.33	0.08
2	4.67	0.41
3	7.52	0.52

Πίνακας 11: Αποτελέσματα Μετρήσεων Για Κάθε Περίπτωση

Δυστυχώς στο συγκεκριμένο πείραμα δεν δίνεται η δυνατότητα να συγκριθεί η τιμή του σφάλματος που βρέθηκε με το πραγματικό σφάλμα της γωνίας του ελάσματος καθώς δεν διατίθενται τα απαραίτητα μετρητικά όργανα για τον υπολογισμό της γωνίας του ελάσματος σε κλίμακα ενός δέκατου της μοίρας. Όσον αφορά την τυπική απόκλιση παρατηρείται ότι για την πρώτη περίπτωση, στην οποία δεν χρειάστηκε περαιτέρω περιστροφή της πλατφόρμας, είναι αρκετά ικανοποιητική σε κλίμακα λίγο μικρότερη από ένα δέκατο της μοίρας. Ωστόσο, στις άλλες δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται να αποκλίνουν σχετικά αρκετά από την υπολογιζόμενη μέση τιμή, αφού κυμαίνονται κοντά στη μισή μοίρα. Σε αυτό το σημείο υπογραμμίζεται ότι στις περισσότερες μετρήσεις όπου έπρεπε να στραφεί η πλατφόρμα, η γωνία της πλευράς του ελάσματος ήταν τέτοια ώστε ο ένας από τους δύο αισθητήρες ερχόταν σε σημειακή επαφή με το έλασμα, μετακινώντας το λίγο, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 12.3*. Αυτή η μετακίνηση παρέμενε και στις επόμενες μετρήσεις αφού το έλασμα δεν πειράχτηκε καθόλου εξωτερικά κατά την διάρκεια των 15 μετρήσεων. Ειδικά στη δεύτερη περίπτωση όπου ο πάνω αισθητήρας χτυπούσε το έλασμα, το μετακινούσε από τη βάση του με αποτέλεσμα να μικραίνει η κλίση της πλευρά του και κατ' επέκταση η γωνία που αντιλαμβάνονταν το μετρητικό όργανο. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο στον δεύτερο πίνακα παρατηρείται μια φθίνουσα τάση του σφάλματος της γωνίας. Δηλαδή, ένας λόγος για τον οποίο δεν υπήρχε καλή τιμή της τυπικής απόκλισης είναι ο τρόπος εκτέλεσης του πειράματος.



Εικόνα 12.3: Σημειακή Επαφή Αισθητήρα Με Έλασμα

12.2 Ακρίβεια Μέτρησης Οργάνου

Στη συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε η διάταξη τόσο του μετρητικού οργάνου όσο και του ελάσματος και της μήτρας είναι η ίδια με αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 12.1. Σε αυτήν τη σειρά μετρήσεων έγινε προσπάθεια να υπολογιστεί η ακρίβεια μέτρησης του οργάνου. Ωστόσο, κάτι τέτοιο είναι σχετικά δύσκολο αφού όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως, κατάλληλη στράντζα για να δοκιμαστεί το μετρητικό όργανο δεν υπάρχει. Επομένως έγιναν όσο το δυνατόν καλύτερες προσομοιώσεις του πραγματικού χώρου λειτουργίας του οργάνου και η γωνία του ελάσματος υπολογίστηκε, με εμπειρικούς μεν τρόπους, αλλά όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η διαδικασία των πρώτων μετρήσεων ήταν η εξής. Αρχικά το μετρούμενο έλασμα πειράχτηκε με την έννοια ότι κάμφθηκε υπό διάφορες γωνίες κοντά όμως στην αρχική του κάμψη που ήταν 90 μοίρες. Έπειτα τοποθετήθηκε στη μήτρα. Επόμενο βήμα ήταν να μετρηθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα η γωνία αυτή. Για τη μέτρηση αυτή χρησιμοποιήθηκε φωτογραφική μηχανή, η οποία αποθανάτιζε τη μορφή του ελάσματος πάνω στη μήτρα και έπειτα με κατάλληλη επεξεργασία σε κατάλληλο πρόγραμμα μπορούσε να υπολογισθεί η γωνία του ελάσματος. Στη συνέχεια, ερχόταν η σειρά του μετρητικού οργάνου να πάρει τις μετρήσεις του και να υπολογίσει την γωνία σφάλματος. Τέλος, συγκρίνονται αυτές οι δύο τιμές και υπολογίζεται η διαφορά της μέτρησης του οργάνου από την πραγματική τιμή της γωνίας του ελάσματος. Έγιναν πέντε τέτοιες μετρήσεις οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός Μέτρησης	Μετρούμενο Σφάλμα Γωνία Μέσω Φωτογραφίας	Μετρούμενο Σφάλμα Γωνία Οργάνου	Διαφορά Δύο Μετρήσεων
1	3.0	2.71	0.29
2	0.3	0.43	0.13
3	2.6	2.30	0.30
4	3.7	3.07	0.63
5	3.5	3.35	0.17

Πίνακας 12: Σύγκριση Μετρήσεων Μεταξύ Δύο Τρόπων Μέτρησης Γωνίας Κάμψης

Από τον παραπάνω πίνακα και τη στήλη της διαφοράς των δύο μετρήσεων παρατηρείται ότι οι τιμές είναι σχετικά καλές με μέση τιμή διαφοράς $0.3^{\circ} \pm 0.2^{\circ}$. Ωστόσο στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι για τη μέτρηση του σφάλματος της γωνίας θεωρήθηκε ότι το σφάλμα αυτό είναι συμμετρικό ως προς τις δύο πλευρές του ελάσματος. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει με ακρίβεια καθώς όσο αποκλίνει η γωνία κάμψης του ελάσματος με τη γωνία της μήτρας τόσο το έλασμα δεν «κάθεται» καλά πάνω στα τοιχώματα της μήτρας (Εικόνα 12.3), με αποτέλεσμα η γωνία σφάλματος να μην είναι συμμετρική. Για τον υπολογισμό της συνολικής γωνίας σφάλματος έπρεπε να τοποθετηθεί ένα όμοιο μετρητικό όργανο και από την άλλη πλευρά της στράντζας και το άθροισμα των δύο αυτών γωνιακών σφαλμάτων να προστίθεται. Ωστόσο, δεν υπήρχε η δυνατότητα για άμεση κατασκευή ενός δεύτερου όμοιου μετρητικού οργάνου. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μη συμμετρίας έγινε μια άλλη σειρά μετρήσεων.

Στις μετρήσεις αυτές το μετρούμενο έλασμα είχε υποστεί τέλεια κάμψη στις 90 μοίρες με αποτέλεσμα να «κάθεται» τέλεια στις πλευρές της μήτρας και αυτό που άλλαζε από μέτρηση σε μέτρηση ήταν η κλίση του επιπέδου πάνω στο οποίο ήταν τοποθετημένη η μήτρα μαζί με το έλασμα. Αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε εκμεταλλευόμενοι τον τρόπο που με τον οποίο το μετρητικό όργανο παίρνει μετρήσεις, αφού πρακτικά μετράει την κλίση της πλευρά του ελάσματος σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο. Έτσι αντί να μεταβάλλεται η γωνία του ελάσματος μεταβάλλεται η κλίση της μήτρας με αποτέλεσμα να αλλάζει και η κλίση του ελάσματος και το μετρητικό όργανο αντιλαμβάνεται την αλλαγή αυτή στην κλίση ανεξαρτήτως από το πώς προήλθε. Παρακάτω φαίνονται οι μετρήσεις αυτές για τρεις περιπτώσεις για κλίση επιπέδου 0, 1.6 και 2.6 μοίρες. Οι κλίσεις αυτές μετρήθηκαν με τη χρήση ψηφιακού αλφαδιού.

Αριθμός Μέτρησης	Μετρούμενη Γωνία	Απόκλιση
1	0.07	0.07
2	0.14	0.14
3	0.06	0.06
4	0.14	0.14
5	0.08	0.08
6	0.10	0.10
7	0.05	0.05
8	0.07	0.07
9	0.13	0.13
10	0.12	0.12
11	0.03	0.03
12	0.10	0.10
13	0.02	0.02
14	0.07	0.07
15	0.10	0.10

Πίνακας 13: Μετρήσεις Για Την Περίπτωση Όπου Το Σφάλμα Της Γωνίας Κάμψης Είναι 0°

Αριθμός Μέτρησης	Μετρούμενη Γωνία	Απόκλιση
1	1.26	0.34
2	1.50	0.10
3	1.45	0.15
4	1.36	0.24
5	1.45	0.15

6	1.44	0.16
7	1.46	0.14
8	1.43	0.17
9	1.48	0.12
10	1.42	0.18
11	1.44	0.16
12	1.42	0.18
13	1.48	0.12
14	1.44	0.16
15	1.41	0.19

Πίνακας 14: Μετρήσεις Για Την Περίπτωση Όπου Το Σφάλμα Της Γωνίας Κάμψης Είναι 1.6°

Αριθμός Μέτρησης	Μετρούμενη Γωνία	Απόκλιση
1	2.46	0.14
2	2.37	0.23
3	2.36	0.24
4	2.37	0.23
5	2.32	0.28
6	2.31	0.29
7	2.30	0.30
8	2.38	0.22
9	2.36	0.24
10	2.40	0.20
11	2.44	0.16
12	2.35	0.25
13	2.49	0.11
14	2.32	0.28
15	2.37	0.23

Πίνακας 15: Μετρήσεις Για Την Περίπτωση Όπου Το Σφάλμα Της Γωνίας Κάμψης Είναι 2.6°

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα όσον αφορά την μέση τιμή σφάλματος και την τυπική του απόκλιση.

Πραγματική Γωνία Σφάλματος	Μετρούμενη Γωνία Σφάλματος	Απόκλιση
0	0.08	0.08
1.6	1.43	0.17
2.6	2.37	0.23

Πίνακας 16: Αποτελέσματα Παραπάνω Περιπτώσεων

Τα αποτελέσματα σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα είναι αρκετά ικανοποιητικά αφού κατά κύριο λόγο το σφάλμα των μετρήσεων κυμαίνονται στο ένα δέκατο της μοίρας για τις μικρές αποκλίσεις γωνιών. Για αποκλίσεις γωνιών άνω των 1.5 μοιρών η ακρίβεια μειώνεται λίγο. Φαίνεται λοιπόν το μετρητικό όργανο έχει ακρίβεια μέτρησης λίγο πάνω από το ένα δέκατο της μοίρας και με κάποιες βελτιώσεις που προτείνονται παρακάτω στη διπλωματική εργασία (Ενότητα 13) μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω η ακρίβεια αυτή.

12.3 Επαναληψιμότητα Χωρητικών Αισθητήρων

Σε αυτό το στάδιο έγινε απόπειρα να υπολογιστεί η τιμή της επαναληψιμότητας των χωρητικών αισθητήρων. Ο τρόπος με τον οποίο έγινε αυτό είναι ο εξής. Αρχικά η διάταξη εκτελεί τη διαδικασία για τη μέτρηση μιας γωνίας. Μόλις υπολογίσει το σφάλμα της γωνίας τότε οι κινητήρες παραμένουν ακίνητοι στο σημείο της μέτρησης έτσι ώστε οι αισθητήρες να παραμείνουν στη θέση από την οποία πήραν την πρώτη μέτρηση. Έπειτα εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ο οποίος αναγκάζει τους αισθητήρες να πάρουν μια σειρά 15 μετρήσεων, πάντα με τους αισθητήρες ακίνητους στο σημείο όπου πάρθηκε η πρώτη μέτρηση. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφονται τα σφάλματα από τους κινητήρες και τη διάταξη και το μοναδικό σφάλμα που εμφανίζεται στις μετρήσεις αυτές είναι αυτό των αισθητήρων. Τονίζεται ότι καθ' όλη την εκτέλεση των μετρήσεων αυτών η διάταξη και το μετρούμενο έλασμα παραμέναν ακίνητα. Παρακάτω φαίνονται οι μετρήσεις αυτές για δύο σειρές μετρήσεων.

Αριθμός Μετρήσεων	Απόσταση Πάνω Αισθητήρα (mm)	Απόσταση Κάτω Αισθητήρα (mm)	Σφάλμα Γωνίας (Μοιρες)
1	0.577	0.508	0.17
2	0.585	0.499	0.21
3	0.384	0.320	0.15
4	0.390	0.361	0.20
5	0.391	0.314	0.19
6	0.399	0.322	0.19
7	0.400	0.315	0.21
8	0.384	0.317	0.16
9	0.396	0.303	0.23
10	0.393	0.310	0.20
11	0.413	0.323	0.22
12	0.380	0.313	0.16
13	0.419	0.326	0.23
14	0.381	0.315	0.16
15	0.391	0.314	0.19

Πίνακας 17: Πρώτη Σειρά Μετρήσεων Ακρίβειας Αισθητήρων

Αριθμός Μετρήσεων	Απόσταση Πάνω Αισθητήρα (mm)	Απόσταση Κάτω Αισθητήρα (mm)	Σφάλμα Γωνίας (Μοιρες)
1	2.06	0.54	3.69
2	1.88	0.34	3.74
3	1.87	0.34	3.75
4	1.88	0.35	3.72
5	1.85	0.33	3.70
6	1.84	0.33	3.69
7	1.87	0.34	3.72
8	1.87	0.34	3.73
9	1.86	0.33	3.70
10	1.85	0.33	3.70
11	1.86	0.32	3.73
12	1.85	0.32	3.72
13	1.85	0.32	3.72
14	1.87	0.33	3.74

15	1.86	0.33	3.72
----	------	------	------

Πίνακας 18: Δεύτερη Σειρά Μετρήσεων Ακρίβεια Αισθητήρων

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα όσον αφορά την μέση τιμή σφάλματος των αισθητήρων και την τυπική τους απόκλιση.

Αριθμός Μέτρησης	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Πρώτη	0.02	0.020
Δεύτερη	3.72	0.017

Πίνακας 19: Αποτελέσματα Παραπάνω Περιπτώσεων

Από τα αποτελέσματα του Πίνακας 19 παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση των μετρήσεων των χωρητικών αισθητήρων κυμαίνεται σε κλίμακα εκατοστού της μοίρας, πράγμα που είναι αρκετά ικανοποιητικό για τη συγκεκριμένη μετρητική διάταξη. Ωστόσο για τη μέση τιμή που μέτρησαν οι αισθητήρες δεν γίνεται να υπάρξει μια πλήρης εικόνα για το αν είναι σωστή γιατί δεν γίνεται να μετρηθεί με ακρίβεια η πραγματική γωνία του ελάσματος τη στιγμή που έγιναν οι μετρήσεις. Επομένως δεν υπάρχει σαφής ένδειξη για την ακρίβεια της μέτρησης των αισθητήρων μονάχα για τις αποκλίσεις των αισθητήρων γύρω από τη μέση μετρούμενη γωνία.

13. Πρόταση Για Βελτιώσεις

Η μελέτη της συγκεκριμένης μετρητικής διάταξης πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν ότι θα κατασκευαστεί στα χρονικά πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Η άμεση αυτή κατασκευή της διάταξης εισήγαγε κάποιους περιορισμούς ως προς την επιλογή των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων και των βηματικών κινητήρων καθώς και τον τρόπο κατασκευής των εξαρτημάτων που απαρτίζουν τη βάση των αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες της εργασίας οι επιλογές των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων όπως και των κινητήρων ήταν αρκετά περιοριστικές, όπως επίσης η κατασκευή της βάσης έγινε σε συμβατικές εργαλειομηχανές. Όλα αυτά επηρεάζουν έως κάποιο βαθμό την ακρίβεια του μετρητικού οργάνου και με κατάλληλες βελτιώσεις κάποιων από των στοιχείων της μετρητικής διάταξης μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη αξιοπιστία του μετρητικού οργάνου. Κάποιες από τις βελτιώσεις που επιδέχεται η συγκεκριμένη μετρητική διάταξη αναλύονται παρακάτω.

13.1 Προτεινόμενος Μικρός Βηματικός Κινητήρας

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη κατασκευή σε γενικές γραμμές ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις απαιτήσεις του μετρητικού οργάνου, αλλά όχι σε άριστο βαθμό. Κάποιες φορές δυσκολεύεται να σηκώσει το απαιτούμενο βάρος και ο άξονάς του μετά από κάποια χρήση αρχίζει να χαλαρώνει και να τρεμοπαίζει. Οι αιτίες για τις οποίες συμβαίνουν αυτά είναι οι εξής. Αρχικά η ροπή που μπορεί να προσφέρει ο κινητήρας στο σύστημα σε σύγκριση με αυτή που απαιτεί το σύστημα είναι πολύ οριακή. Η μελέτη στο σχεδιαστικό πρόγραμμα είχε γίνει για τα στοιχεία που έπρεπε να σηκώνει αυτός ο κινητήρας τα οποία είναι η πλατφόρμα και οι δύο αισθητήρες. Ωστόσο, είχαν παραληφθεί τα βαριά και άκαμπτα καλώδια των χωρητικών αισθητήρων, τα οποία δυσχεραίνουν ακόμα περισσότερο τον κινητήρα, ειδικά όταν η πλατφόρμα χρειαστεί να περιστραφεί αρκετές μοίρες. Βεβαίως, υπάρχει τρόπος να διορθωθεί αυτό, για βραχυπρόθεσμη περίοδο, αυξάνοντας την ένταση του ρεύματος λίγο πάνω από την ονομαστική τιμή του κινητήρα. Με αυτόν τον τρόπο να μην θα αυξηθεί λίγο η ροπή του κινητήρα αλλά αυτός ο τρόπος μπορεί να υπερθερμάνει και εν τέλει να τον κάψει αν λειτουργεί για αρκετή ώρα.

Επίσης, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί αυτός ο κινητήρας γιατί ήταν εύκολα προσβάσιμος για αγορά από Ελληνική αντιπροσωπία. Αν επιλεγόταν να χρησιμοποιηθεί κινητήρας με καλύτερα χαρακτηριστικά έπρεπε να γίνει παραγγελία από το εξωτερικό και συμπεριλαμβανομένης της γραφειοκρατίας που θα υπήρξε, ο χρόνος παράδοσής του θα ήταν σχετικά μεγάλος. Τέλος, ο συγκεκριμένος κινητήρας ήταν ο πρωταρχικός κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τις πρώτες δοκιμές, και μέχρι να υπάρξει εξοικείωση με τον τρόπο προγραμματισμού και καθοδήγησής του υπήρχε ο κίνδυνος να καεί και να αχρηστευτεί. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε ένας αρκετά οικονομικός κινητήρας ο οποίος και να χάλαιγε δεν θα επέφερε σχεδόν καμία οικονομική επιβάρυνση στην συγκεκριμένη εργασία.

Στο σημείο αυτό προτείνεται ένας πιο κατάλληλος βηματικός κινητήρας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η ονομασία του συγκεκριμένου κινητήρα είναι Round Nema 14 Bipolar 0.9deg 7Ncm 0.5A 8.5V Φ36x12mm 4 Wires [34] και τα χαρακτηριστικά του φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 13.1: Προτεινόμενος Κινητήρας

Electrical Specification

Manufacturer Part Number: 14HR05-0504S
Motor Type: Bipolar Stepper
Step Angle: 0.9 deg
Holding Torque: 7Ncm (9.91oz.in)
Rated Current/phase: 0.5A
Voltage: 8.5V
Phase Resistance: 17ohms
Inductance : 6.5mH \pm 20%(1KHz)

Physical Specification

Frame Size: Φ 36mm
Body Length: 12.5mm
Shaft Diameter: Φ 5mm
Shaft Length: 10.5mm
D-cut Length: 5mm
Number of Leads: 4
Lead Length: 300mm
Weight: 50g

Εικόνα 13.2: Χαρακτηριστικά Προτεινόμενου Κινητήρα [34]

Ο κινητήρας αυτός μπορεί να προσδώσει ροπή 7Ncm, σχεδόν τη διπλάσια από αυτή που μπορεί να δώσει ο χρησιμοποιούμενος κινητήρας. Όσον αφορά τις διαστάσεις είναι σχεδόν ίδιες με αυτές του χρησιμοποιούμενου κινητήρα και το βάρος του είναι λίγο μεγαλύτερο. Άρα σε γενικές γραμμές φαίνεται ο προτεινόμενος κινητήρας να είναι ικανότερος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή του μετρητικού οργάνου. Τονίζεται, βέβαια πως για να τοποθετηθεί αυτός ο κινητήρας θα πρέπει να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις στα κατασκευαστικά σχέδια κυρίως σε αυτό της βάσης που θα το συγκρατεί.

13.2 Προτεινόμενοι Χωρητικοί Αισθητήρες

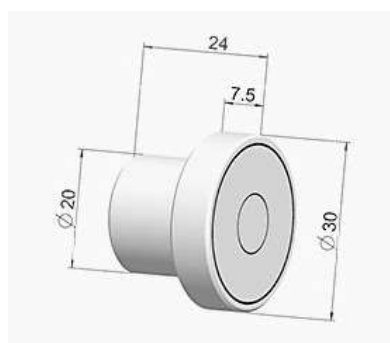
Παρόμοια λογική με την παραπάνω ακολουθήθηκε και στη χρησιμοποίηση χωρητικών αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες που εφαρμόστηκαν στο μετρητικό όργανο καθώς και οι μετασχηματιστές τους είναι όργανα τα οποία υπήρχαν εύκαιρα στο εργαστήριο του Πολυτεχνείου και ως έναν βαθμό ανταποκρίθηκαν αρκετά καλά, αφού οι μετρήσεις τους ήταν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Ωστόσο οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι κάποιων ετών και κυρίως έχουν κάποια μειονεκτήματα, τα οποία οι πιο σύγχρονοι αισθητήρες έχουν βελτιώσει. Κάποια από αυτά είναι το γεγονός πως έχουν εμβέλεια μέτρησης μόνο 2.5 χιλιοστά, το οποίο δημιουργεί κάποια θέματα όταν το σφάλμα της γωνίας του ελάσματος είναι αρκετά μεγάλο, ενδέχεται κάποιος από τους αισθητήρες να τρακάρει με το έλασμα με αποτέλεσμα να το μετατοπίσει και να αλλοιώσει τη μέτρηση. Κάτι τέτοιο δεν θα συνέβαινε αν το εύρος μέτρησης ήταν μεγαλύτερο. Στην συνέχεια, για τους δύο αυτούς αισθητήρες χρειάζονται δύο μετασχηματιστές ένας για το κάθε αισθητήρα, αφού ο κάθε μετασχηματιστής μπορεί να δέχεται μετρήσεις μονάχα για έναν αισθητήρα. Πλέον υπάρχουν μετασχηματιστές μικρότερου μεγέθους, οι οποίοι συνδυάζουν δύο ή περισσότερους αισθητήρες με μικρότερα σφάλματα μετρήσεων.

Οι αισθητήρες οι οποίοι προτείνονται για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι οι εξής: capaNCDT CS3 [35], της εταιρίας *micro-epsilon*.

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου χωρητικού αισθητήρα είναι τα εξής:

Εύρος λειτουργίας	από 1.5mm μέχρι 6mm, ιδανικό 3mm
Ακρίβεια	0.03% του εύρους λειτουργίας
Επαναληψιμότητα	0.0003% του εύρους λειτουργίας
Διακριτική ικανότητα	2.25nm
Ευαισθησία	καλύτερη από 0.5% του εύρους λειτουργίας
Υστέρηση	απειροελάχιστη
Θόρυβος	επηρεάζεται από ηλεκτρικό πεδίο
Γραμμικότητα	$\leq \pm 0.03 \% \text{ FSO}$ ή $\leq \pm 0.9\mu\text{m}$

Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά Προτεινόμενου Χωρητικού Αισθητήρα



Εικόνα 13.3: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Προτεινόμενου Χωρητικού Αισθητήρα

Συγκρίνοντας τον πίνακα αυτόν με τον αντίστοιχο των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων (Πίνακας 6) παρατηρείται ότι οι συγκεκριμένοι αισθητήρες έχουν πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά τόσο σε ακρίβεια, ευαισθησία όσο και σε πιο αξιοποιήσιμο εύρος λειτουργίας. Το μόνο αρνητικό χαρακτηριστικό είναι το γεγονός πως έχουν σχετικά μεγάλες διαστάσεις και αυτό θα επηρεάσει την κατασκευή του μετρητικού οργάνου, κυρίως την πλατφόρμα που τα εδράζει καθώς θα πρέπει να αυξηθεί σε διαστάσεις για να χωρέσει δύο τέτοιους αισθητήρες. Οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες έχουν 20 χιλιοστά διάμετρο ενώ οι συγκεκριμένοι 30 χιλιοστά όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 13.3*.

Όσον αφορά τον μετασχηματιστή ένας αρκετά καλός που ικανοποιεί τις ανάγκες της εφαρμογής είναι ο παρακάτω:

Modular multi-channel system capaNCDT 6200 [36]



Εικόνα 13.4: Προτεινόμενος Μετασχηματιστής [36]

13.3 Προτεινόμενες Κατασκευαστικές Βελτιώσεις

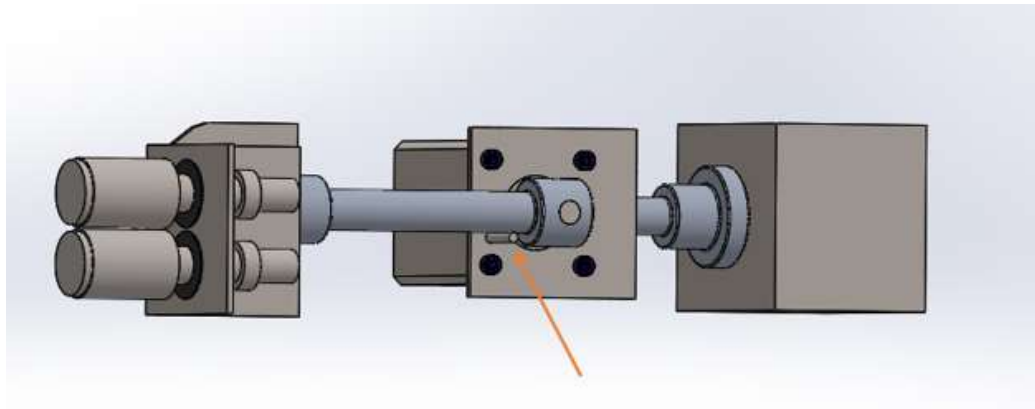
Επιπρόσθετα, η μετρητική διάταξη επιδέχεται βελτιώσεις και στον τρόπο κατασκευής της βάσης. Πιο συγκεκριμένα, τόσο οι άξονες αλλά κυρίως οι βάσεις με την πλατφόρμα θα μπορούσαν να κατασκευαστούν σε μηχανές CNC οι οποίες προσδίδουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ακρίβεια αυτή σε κάποια σημεία της κατασκευής είναι πολύ σημαντική όπως οι

θέσεις των οπών της πλατφόρμας και η καθετότητά τους. Όσο μικραίνουν τα σφάλματα αυτά τόσο πιο σωστά τοποθετούνται οι αισθητήρες και τόσο πιο αξιόπιστες θα είναι οι μετρήσεις τους. Συγκεκριμένα για την πλατφόρμα θα μπορούσε να εκτυπωθεί σε 3D Printer. Οι λόγοι που θα βελτίωνε την ποιότητα της πλατφόρμας είναι τρεις. Πρώτον, ο 3D Printer κατασκευάζει εξαρτήματα με πολύ καλή ακρίβεια, και στην συγκεκριμένη περίπτωση οι οπές θα ήταν ακριβώς εκεί που είχαν σχεδιαστεί και η κάμψη της πλατφόρμας θα ήταν ακριβώς κάθετη. Δεύτερον, γιατί το υλικό του printer είναι συνθετικό πλαστικό και αυτό θα έδινε τη δυνατότητα να τοποθετηθούν οι αισθητήρες απευθείας μέσα στις οπές χωρίς τη χρήση μονωτικών δακτυλιδιών που χρειάζονται όταν η πλατφόρμα είναι κατασκευασμένη από αγωγίμο υλικό. Τρίτον, το πλαστικό σαν υλικό είναι πιο ελαφρύ από το αλουμίνιο με αποτέλεσμα να διευκολύνει τον βηματικό κινητήρα, αφού η ροπή που θα πρέπει να προσδώσει ο κινητήρας θα ήταν μικρότερη.

13.4 Βάση Για Την Σωστή Θέση Εκκίνησης Των Βηματικών Κινητήρων.

Οι βηματικοί κινητήρες έχουν αρκετά θετικά χαρακτηριστικά, όπως ευκολία χρήσης, ακρίβεια οδήγησης, γρήγορες επιταχύνσεις/επιβραδύνσεις και άλλα, ωστόσο ένα από τα σημαντικά ελαττώματά τους είναι ότι δεν έχουν μετρητή θέσης και κατά συνέπεια δεν γνωρίζουν τη θέση στην οποία βρίσκονται. Αυτό που κάνουν είναι να εκτελούν βηματικές κινήσεις χωρίς να έχουν κλειστό κύκλωμα ελέγχου. Αυτό το ελάττωμα στο μετρητικό όργανο μεταφράζεται ως αδυναμία των κινητήρων να ξεκινούν από την κατάλληλη θέση. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη τοποθέτηση στην κατάλληλη γωνία των δύο αξόνων των κινητήρων γίνεται από τον χρήστη και υπάρχει το ενδεχόμενο να μην είναι σωστή η θέση εκκίνησής τους. Θεωρητικά πρέπει ο άξονας που συγκρατείται από τον μεγάλο κινητήρα να είναι οριζόντιος ως προς το δάπεδο ή με άλλα λόγια κάθετος στην πλάγια πλευρά της μήτρα της στράντζας. Αν γίνει λάθος στην θέση εκκίνησής του τότε οι μετρήσεις δεν θα αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται στη δεύτερη βάση να τοποθετηθεί κάποιο πειράκι σε τέτοια θέση ώστε πάνω του να ακουμπήσει ο δεύτερος άξονας. Με αυτόν τον τρόπο θα περιορίζει την κίνηση του άξονα και η θέση αυτή θα είναι η θέση αφετηρίας του άξονα. Αυτή η βελτίωση φαίνεται σχηματικά στην *Εικόνα 13.5*. Κάτι αντίστοιχο πρέπει να σχεδιαστεί και για την αρχική θέση της πλατφόρμας, όπου και εκεί ο μικρός κινητήρας δεν γνωρίζει ποια είναι η θέση αφετηρίας του. Και εδώ πρέπει η πλατφόρμα να έχει αρχική κλίση τέτοια ώστε τα πρόσωπα των δύο αισθητήρων να είναι κάθετα στην πλευρά της μήτρας.

Ένας άλλος τρόπος για να επιτευχθεί η σωστή θέση εκκίνησης των δύο βηματικών κινητήρων είναι να τοποθετηθεί encoder μέσα στους κινητήρες ή κάποιο γυροσκόπιο πάνω στη δεύτερη βάση και την πλατφόρμα. Με αυτόν τον τρόπο θα γνωρίζει ανά πάσα στιγμή ο αλγόριθμος τη θέση των αξόνων των δύο κινητήρων και με κατάλληλες εντολές θα τους τοποθετεί στην κατάλληλη θέση εκκίνησης.



Εικόνα 13.5: Βελτίωση Οργάνου Με Την Κατάλληλη Τοποθέτηση Πειράκι

13.5 Σχεδιασμός Και Εκτύπωση Ηλεκτρονικής Πλακέτας

Όπως γίνεται αντιληπτό από την *Εικόνα 10.7*, το ηλεκτρικό κύκλωμα που δημιουργήθηκε ώστε να καλύψει τις ανάγκες των διαφόρων εξαρτημάτων της μετρητικής διάταξης για επικοινωνία, είναι αρκετά μεγάλο και σύνθετο. Χρησιμοποιούνται αρκετά καλώδια jumpers τα οποία περιπλέκουν τη μετρητική διάταξη και υπάρχει ο κίνδυνος για βραχυκύκλωση του κυκλώματος με καταστροφικές συνέπειες για τη διάταξη. Γι' αυτό τον λόγο κρίνεται αναγκαίο να σχεδιαστεί και στη συνέχεια να εκτυπωθεί ηλεκτρονική πλακέτα στην οποία όλες οι απαραίτητες συνδεσμολογίες θα πραγματοποιούνται μέσα στην πλακέτα με αποτέλεσμα τα να μειωθεί αρκετά ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων καλωδίων και κατ' επέκταση να μειωθεί ο κίνδυνος για εμφάνιση προβλήματος στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Επίσης, η πλακέτα αυτή θα επιφέρει και καλύτερο αισθητικό και πρακτικό αποτέλεσμα.

14. Κοστολόγηση Κατασκευής

Σε γενικές γραμμές το κόστος του συγκεκριμένου μετρητικού οργάνου κρατήθηκε σε χαμηλές τιμές. Άλλωστε αυτός ήταν και ο βασικός στόχος της συγκεκριμένης εργασίας. Παρακάτω φαίνεται αναλυτικά το κόστος κάθε εξαρτήματος της κατασκευής καθώς και το συνολικό κόστος την μετρητικής διάταξης.

Είδος	Ποσότητα	Κόστος
Βηματικός κινητήρας NEMA 17	x1	40€
Βηματικός κινητήρας 28BYJ-48	x1	2.5€
Πλακέτα Arduino	x1	25€
Πλακέτα Breadboard	x1	4€
Driver A4988	x1	3.2€
Driver drv8825	x1	3.8€
Πυκνωτής	x2	0.4€
Τροφοδοτικό	x1	10€
Καλώδιο for Arduino	x1	1€
Καλώδια Jumper	x60	12€
Χωρητικοί Αισθητήρες	x2	160€
Μετασχηματιστές	x2	700€
Συνολικά		970€

Πίνακας 21: Κόστος Καθενός Εξαρτήματος Μετρητικού Οργάνου

15. Συμπεράσματα

Σε γενικές γραμμές το αποτέλεσμα του μετρητικού οργάνου που προέκυψε είναι αρκετά ικανοποιητικό. Αυτό γιατί επιτεύχθηκε ο πρωταρχικός στόχος ο οποίος ήταν να κρατηθεί το κόστος του οργάνου αυτού σε χαμηλές τιμές χωρίς ωστόσο να μειωθεί αρκετά η ακρίβεια των μετρήσεων. Από τα πειράματα φαίνεται πως η ακρίβεια του μετρητικού οργάνου κυμαίνεται λίγο πάνω από το ένα δέκατο της μοίρας και με κάποιες βελτιώσεις-αναβαθμίσεις που αναφέρθηκαν στην *Ενότητα 13* μπορεί η τιμή της ακρίβειας να βελτιωθεί περαιτέρω. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι δοκιμή του μετρητικού οργάνου υπό πραγματικές συνθήκες δεν έγινε, αφού οι εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου δεν διαθέτουν κάποια υδραυλική στράντζα.

Γενικά ο σχεδιασμός και εν τέλει η κατασκευή αυτού του μετρητικού οργάνου ήταν μια αρκετά δύσκολη διαδικασία αλλά με κατάλληλη υποστήριξη από τα μέλη του εργαστηρίου του τομέα των Κατεργασιών του Πολυτεχνείου επιτεύχθηκε ένα καλό αποτέλεσμα και ο μηχανισμός της βάσης δεν δημιούργησε κάποιο σοβαρό πρόβλημα στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Επίσης, η αγορά των ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων όπως πλακέτας Arduino, κατάλληλα drivers και καλώδια Jumpers αλλά κυρίως η συνδεσμολογία τους ήταν ένα επίπονο και χρονοβόρο στάδιο της διπλωματικής εργασίας, καθώς δεν υπήρχε ιδιαίτερη γνώση και εμπειρία στην κατάστρωση κυκλωμάτων με τη χρήση πλακέτας Arduino. Ωστόσο με αρκετή διαδικτυακή και βιβλιογραφική αναζήτηση και με τη βοήθεια των μελών του εργαστηρίου στις Εργαστηριακές Εγκαταστάσεις του Τομέα Κατεργασιών επιτεύχθηκε η κατάστρωση και η συνδεσμολογία όλων των εξαρτημάτων της μετρητικής διάταξης.

Τονίζεται επίσης ότι κατά τη διάρκεια του πειραματισμού με τους διάφορους βηματικούς κινητήρες και τα drivers δεν έλειψαν και οι καταστροφές κάποιων από αυτών των στοιχείων, ειδικά των drivers που λόγω υψηλών τάσεων που εσφαλμένα δέχτηκαν κάηκαν και αχρήστευαν. Ευτυχώς όμως σε γενικές γραμμές είναι αρκετά οικονομικά όλα αυτά και δεν επιβάρυναν σημαντικά το κόστος την μετρητικής διάταξης.

Συμπερασματικά, η μετρητική διάταξη εκπλήρωσε αρκετές από τις αρχικές προδιαγραφές που τέθηκαν στην εισαγωγή της εργασίας αυτής (*Ενότητα 1.2*). Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την ακρίβεια μέτρησης το μετρητικό όργανο ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά στην προδιαγραφή αν και δεν μπορεί να παρθεί σίγουρο αποτέλεσμα αφού δοκιμή σε πραγματικές συνθήκες και με γνωστή την ακριβής γωνία κάμψης των πειραματικών ελασμάτων δεν έγινε. Στη συνέχεια το κόστος αγοράς των διαφόρων εξαρτημάτων για το ηλεκτρολογικό κύκλωμα όπως και οι βηματικοί κινητήρες και οι χωρητικοί αισθητήρες με τους αντίστοιχους μετασχηματιστές τους δεν ξεπέρασε την αρχική προδιαγραφή τιμής, πράγμα που είναι πολύ σημαντικό αφού αυτός ήταν και ο βασικός στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας. Έπειτα, το μετρητικό όργανο μπορεί αρκετά εύκολα και γρήγορα να τοποθετείται πάνω στη στράντζα χωρίς ιδιαίτερη βαθμονόμηση. Ωστόσο, η μετρητική αυτή διάταξη είναι αρκετά ογκώδης κυρίως λόγω των δύο μετασχηματιστών και δεν μετακινείται εύκολα. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η μετρητική αυτή διάταξη επιδέχεται αρκετές βελτιώσεις, οι οποίες μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία της διάταξης αυτής, ωστόσο στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό το σημείο που έφτασε το μετρητικό όργανο καθώς εκπληρώνει αρκετές από τις προδιαγραφές που είχαν τεθεί στην αρχή της διπλωματικής

αυτής. Στον παρακάτω πίνακα φανερώνονται ποιες από τις αρχικές προδιαγραφές που τέθηκαν εκπληρώθηκαν και ποιες όχι.

Αριθμός Προδιαγραφής	Μέτρο	Σημασία	Μονάδες	Οριακή Τιμή	Ιδανική Τιμή	Αποτέλεσμα
1	Ακρίβεια Μέτρησης	5	Μοίρες	0.3	0.1	ΝΑΙ
2	Κόστος	4	Ευρώ	1000	<1000	ΝΑΙ
3	Συμβατότητα	3		Συμβατό Σε Στράντζες CNC	Σε Όλες Τις Στράντζες	ΕΝ ΜΕΡΗ
4	Calibration	3	Λεπτά	5	<3	ΕΝ ΜΕΡΗ
5	Χρόνος Μέτρησης	3	Δευτερόλεπτα	60	<30	ΝΑΙ
6	Τάση Λειτουργίας	2	Volts	20	12	ΝΑΙ
7	Ευαισθησία-Αντοχή	2		Στιβαρή Κατασκευή	Προστατευτικό Κάλυμμα	ΌΧΙ
8	Τοποθέτηση	2	Λεπτά	10	<5	ΝΑΙ
9	Συνολική Μάζα	1	Κιλά	2	<2	ΟΧΙ
10	Ανταλλακτικά	1		Εύκολα Κατασκευάσιμα	Διαθέσιμα Στο Εμπόριο	ΕΝ ΜΕΡΗ

Πίνακας 22: Αποτελέσματα Αρχικών Προδιαγραφών⁴

⁴ Στην λίστα των αποτελεσμάτων η λέξη ΝΑΙ σημαίνει ότι επιτεύχθηκε η ιδανική τιμή της προδιαγραφής, η φράση ΕΝ ΜΕΡΗ ότι το αποτέλεσμα κυμαίνεται ανάμεσα στην ιδανική και την οριακή τιμή και η λέξη ΟΧΙ στο ότι δεν επιτεύχθηκε η προδιαγραφή αυτή.

16. Βιβλιογραφία

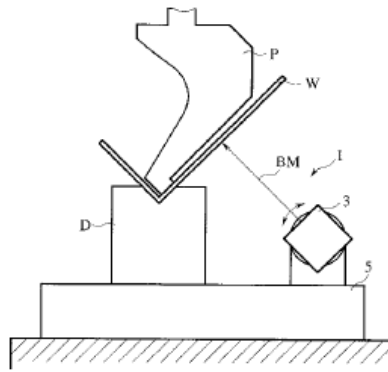
- [1] U. Karl and E. Steven, *Σχεδιασμός Και Ανάπτυξη Προϊόντων*, 5η Έκδοση. Αθήνα: Τζιόλα, 2015.
- [2] B. Gerben and H. Mitsuo, "Angle Detection Method For Bending Machine," US 2001/0026363 A1, 2001.
- [3] H. Kouno, Y. Niwa, A. Sengoku, and T. Aoki, "Device And Method For Measuring Angles Of A Work," 5.329.597, 1994.
- [4] F. Sartorio and B. Nicoletta, "Method And Device For Detecting Folding Angles Of A Metal Sheet During Folding," 5.099.666, 1992.
- [5] H. Jorg and H. Jarosklav, "Method And An Apparatus For Determing The Bending Angle Of A Work Piece To Be Bend," US 6.553.803 B1, 2003.
- [6] W. Dieperink and A. Vrugink, "Sheet-Bending Press Incorporating A Device For Continuous Monitoring Of The Bnding Angle," 4.640.113, 1987.
- [7] S. Wim, "Adaprtive Folding," 5.829.288, 1998.
- [8] R. J.Graf, "Press Brake Having Spring Back Compensation Stroke Reversal Control," 4.511.976, 1985.
- [9] M. Takada, "Bending Angle Correction Method And Press Brake," US 6.189.364 B1, 2001.
- [10] G. Luciano, "Metal Sheet Press-Bending Machine," US 6.266.984 B1, 2001.
- [11] G. Gerritsen, "Measuring Device For The Bend Angle Of Sheet-Metal," 5.375.340, 1994.
- [12] T. Hongo, "Sheet Material Bnding Angle Detector, And Operation Of Press Machine Using The Detector," 5.603.236, 1997.
- [13] F. Sartorio, "Device For Measuring An Angle In A Workpiece," 5.584.199, 1996.
- [14] Hess Johann, "Device For Measuring The Hold Angle In A Sheet Metal Bending Press," 4.489.586, 1984.
- [15] T. Welo, "Sheet metal forming," *Adv. Mater. Form.*, pp. 175–191, 2007.
- [16] Μ. Βασιλείου and Κ. Βασιλείος, "Συντήρηση και Ανακατασκευή Χειροστράντζας Μηχανολογικού Εργαστηρίου," Α.Ε.Ι. Πειραιά, 2017.
- [17] Δ.Μανωλάκος, *Κατεργασίες Ι*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010.
- [18] "Κάμψη Σε Μεταλλικά Φύλλα." [Online]. Available: https://eclass.gunet.gr/modules/document/file.php/LABGU121/Κεφάλαιο_5ο_Κάμψη_σε_μεταλλικά_φύλλα.pdf.
- [19] Παντής Γρηγόριος, "Βηματικοι Κινητηρες Κατασκευη Και Μεθοδολογια Ελεγχου," Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος, 2017.
- [20] Σ. Πασαλόπουλος, "Βελτίωση του συστήματος απόθεσης και συμπίεσης κόνεως πρωτότυπης μηχανής SLS / SLM," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2019.
- [21] "Stepper motor driver - explanation - PoBlog™." [Online]. Available: <https://blog.poscope.com/stepper-motor-driver/>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [22] "How Accurate Is Microstepping Really? | Hackaday." [Online]. Available: <https://hackaday.com/2016/08/29/how-accurate-is-microstepping-really/>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [23] "Μηχανολογικά :: Κινητήρες :: Οδηγοί Κινητήρων :: DRV8825 Stepper Motor Driver." [Online]. Available: <https://grobotronics.com/drv8825-stepper-motor-driver.html>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [24] "In-Depth: Interface DRV8825 Stepper Motor Driver Module with Arduino."

- [Online]. Available: <https://lastminuteengineers.com/drv8825-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [25] “Οδηγός για Βηματικό Κινητήρα A4988.” [Online]. Available: <https://grobotronics.com/a4988.html>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [26] “Βηματικός Κινητήρας με Μειωτήρα 18.6kg.cm (1036 steps/rev) 42BYGHW615AG5,18-X.” [Online]. Available: <https://grobotronics.com/stepper-motor-planetary-18.6kg.cm-1036-steps-rev-42byghw615ag5.18-x.html>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [27] “Βηματικός Κινητήρας 0.35kg.cm 12V.” [Online]. Available: <https://grobotronics.com/stepper-motor-0.35kg.cm-12v.html>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [28] “Ηλεκτρονικοί Αισθητήρες.” [Online]. Available: <http://old-2017.metal.ntua.gr/uploads/4701/1180/chap7.pdf>.
- [29] “How capacitive sensors work.” [Online]. Available: <https://www.sensorland.com/HowPage070.html>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [30] X. Li and G. C. M. Meijer, *Capacitive Sensors*. 2008, pp. 225–248.
- [31] “NEMA17 Stepper with 10:1 Gear Head | 3D CAD Model Library | GrabCAD.” [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/nema17-stepper-with-10-1-gear-head-1>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [32] “The Stepper Motor.” [Online]. Available: <https://donalomui086.wordpress.com/2015/10/18/the-stepper-motor/>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [33] “AccelStepper: AccelStepper Class Reference.” [Online]. Available: <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/classAccelStepper.html>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [34] “Round Nema 14 Bipolar 0.9deg 5Ncm (7.08oz.in) 0.5A 8.5V Φ36x12mm ...” [Online]. Available: <https://www.omc-stepperonline.com/round-nema-14-bipolar-09deg-5ncm-708ozin-05a-85v-φ36x12mm-4-wires-14hr05-0504s.html>. [Accessed: 19-Sep-2019].
- [35] Micro-Epsilon, “More Precision.,” 2010. [Online]. Available: <https://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--capaNCDT--en.pdf>.
- [36] “Modular multi-channel measurement system for highest precision.” [Online]. Available: https://www.micro-epsilon.com/displacement-position-sensors/capacitive-sensor/capaNCDT_6200/. [Accessed: 19-Sep-2019].
- [37] S. Wim, “Method And Device For Measuring A Folding Angle Of A Sheet In A Folding Machine,” US 6.727.986 B1, 2004.
- [38] K. Hans and H. Armin, “Method And Toolong Machine For Bending Workpieces,” 5.842.366, 1998.
- [39] Μ. Σφαντζικόπουλος, *Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών Ι*. Αθήνα: Σημειώσεις ΕΜΠ, 2005.

17. Παράρτημα Α: Υπόλοιπες Επιλογές Διατάξεων

Στο σημείο αυτό αναφέρονται συνοπτικά όλες οι επιλογές οι οποίες συγκρίθηκαν αλλά κρίθηκαν μειονεκτικότερες από την επιλεγμένη που αναλύθηκε λεπτομερέστερα στο κυρίως μέρος της εργασίας (Ενότητα 4).

17.1 Δεύτερη Επιλογή



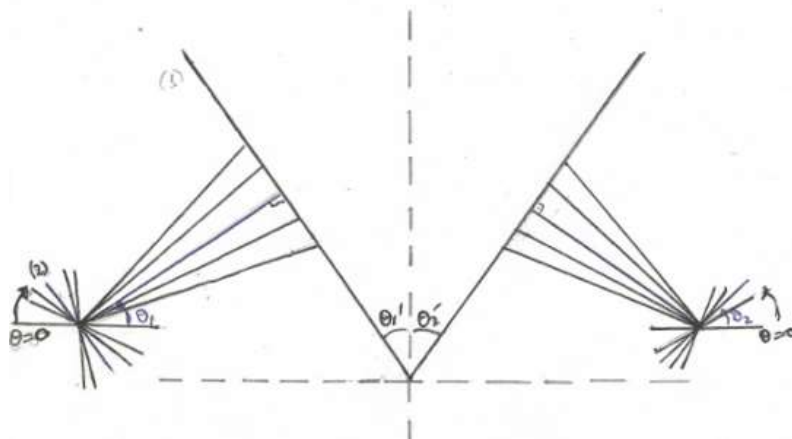
Εικόνα 17.1: Σχηματική Αναπαράσταση Μετρητικού Οργάνου [2]

Περιγραφή

Η διάταξη αποτελείται από μια κινητή πλατφόρμα, η οποία μπορεί να περιστρέφεται και ένα λείζερ απόστασης. Η διάταξη τοποθετείται πάνω στην εργαλειομηχανή όπως φαίνεται στην Εικόνα 17.1. Σκοπός είναι η πλατφόρμα να έρθει σε παράλληλη θέση με την πλευρά του ελάσματος, έτσι ώστε η γωνία κάμψης να είναι πλέον γνωστή.

Διαδικασία

Καταρχάς, με την τοποθέτηση της συσκευής πάνω στην εργαλειομηχανή και πριν την έναρξη της κατεργασίας απαιτείται βαθμονόμηση, ώστε να βρεθεί το οριζόντιο επίπεδο από το οποίο θα ξεκινάει την περιστροφή της η πλατφόρμα. Έπειτα, αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της κάμψης του ελάσματος, η πλατφόρμα με το λείζερ αρχίζει να περιστρέφεται. Ταυτόχρονα, το μετρητικό όργανο μετράει τις αποστάσεις για κάθε κλίση της γωνίας της πλατφόρμας και τις αποθηκεύει. Αφού κάνει ένα «πέρασμα» συγκρίνει τις αποστάσεις αυτές και βρίσκει την μικρότερη απόσταση του λείζερ από το έλασμα. Στην κλίση-γωνία της πλατφόρμας που εντοπίστηκε η ελάχιστη απόσταση είναι και η γωνία που έχει το έλασμα εκείνη τη χρονική στιγμή.



Εικόνα 17.2: Γεωμετρική Απόδειξη Δεύτερης Επιλογής

Γεωμετρική Απόδειξη

Όπως είναι γνωστό από ένα σημείο ενός επιπέδου διέρχονται άπειρα ευθύγραμμο τμήματα που τέμνουν μία ευθεία γραμμή (1). Από αυτά τα ευθύγραμμο τμήματα υπάρχει ένα το οποίο έχει το μικρότερο μήκος. Αυτό το ευθύγραμμο τμήμα τέμνει κάθετα την ευθεία αυτή. Αν το ευθύγραμμο αυτό τμήμα τέμνεται κάθετα στην αρχή του από μια άλλη ευθεία (2) τότε οι δύο αυτές ευθείες είναι παράλληλες, $(1) \parallel (2)$. Επίσης, οι γωνίες που θ_1 και θ_1' είναι ίσες ως γωνίες με κάθετες πλευρές. Αντίστοιχα και για την συμμετρική πλευρά της διάταξης ισχύει $\theta_2 = \theta_2'$. Επομένως, η ζητούμενη γωνία $\theta = \theta_1 + \theta_2$ μπορεί να μετρηθεί.

Απαραίτητος Εξοπλισμός

- Κινητήρας για να περιστρέφει την πλατφόρμα
- Αισθητήρας απόστασης: laser (point) ή ultrasonic
- Αισθητήρας περιστροφής: γυροσκόπιο
- Επίπεδη βάση για να τοποθετηθούν οι παραπάνω αισθητήρες
- Αποθηκευτική μνήμη και επεξεργαστής
- Μηχανισμός βάσης για να στερεώνεται σταθερά πάνω στην στράντζα

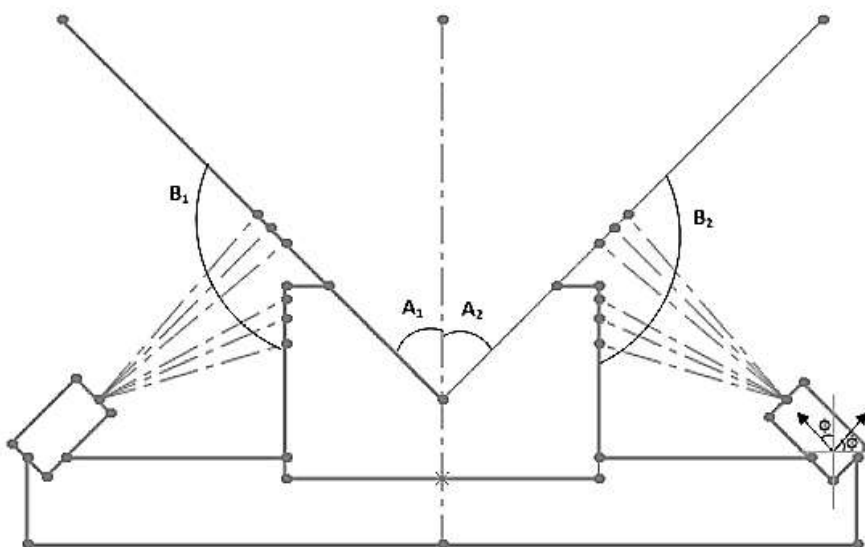
Πλεονεκτήματα

- Σχετικά απλή κατασκευή
- Ακριβής μέτρηση
- Μεγάλο εύρος γωνιών
- Συμβατή με διάφορες στράντζες
- Μέτρηση εξ αποστάσεως

Μειονεκτήματα

- Καλή βαθμονόμηση
- Μικρές ανοχές κατά την κατασκευή, ακριβή κατασκευή
- Προϋποθέτει το έλασμα να είναι ενιαίο και λείο
- Όχι real-time μέτρηση με την επεξεργασία, μόνο να γίνεται πολύ γρήγορα

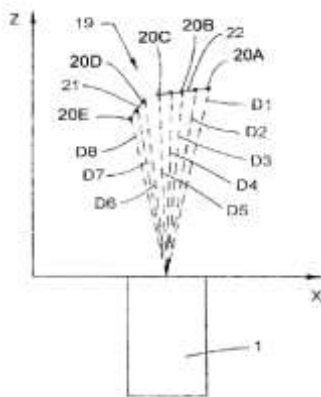
17.2 Τρίτη Επιλογή



Εικόνα 17.3: Γεωμετρική Απόδειξη Τρίτης Επιλογής

Περιγραφή

Η διάταξη αποτελείται από μια σταθερή πλατφόρμα, η οποία είναι σταθερά στερεωμένη πάνω στη στράντζα και περιέχει ένα μετρητικό όργανο laser. Η διάταξη τοποθετείται πάνω στην εργαλειομηχανή όπως φαίνεται στο σχήμα. Το laser πρέπει να είναι multi-spot έτσι ώστε να μπορεί να παίρνει μετρήσεις τόσο από την πλευρά της μήτρας όσο και από την πλευρά του ελάσματος. Στην ουσία το λέιζερ παίρνει μετρήσεις για διάφορα σημεία στις δύο αυτές περιοχές ενδιαφέροντος και μετά από επεξεργασία υπολογίζει τη γωνία των δύο αυτών ευθειών, η οποία είναι και η ζητούμενη γωνία του ελάσματος.



Εικόνα 17.4: Τρόπος Μέτρησης Σημείων Από Το Λέιζερ [37]

Διαδικασία

Στη διάταξη αυτή μπορεί να αποφευχθεί η βαθμονόμηση, αν το μετρητικό όργανο τοποθετηθεί κάθετα στο μήκος του ελάσματος. Η διαδικασία της μέτρησης είναι η εξής. Αρχικά, το multi-spot λέιζερ παίρνει μετρήσεις από μια περιοχή του ελάσματος και από μια περιοχή της μήτρας. Στη συνέχεια, μέσω αριθμητικής ανάλυσης, σχηματίζονται δύο ευθείες γραμμές, μία για το έλασμα και μία για την πλευρά της μήτρας. Τέλος, υπολογίζεται η γωνία που σχηματίζουν οι δύο αυτές ευθείες και η οποία είναι και η ζητούμενη γωνία του ελάσματος. Με ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η συμμετρική γωνία του ελάσματος. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία $A=A1+A2$ ισούται με $A=360^\circ-B1-B2$, όπου B1 και B2 οι γωνίες που υπολογίστηκαν από τα αντίστοιχα μετρητικά όργανα.

Απαραίτητος Εξοπλισμός

- Αισθητήρας απόστασης laser (multi-spot)
- Βάση για να τοποθετηθούν οι παραπάνω αισθητήρες
- Αποθηκευτική μνήμη
- Επεξεργαστής
- Μηχανισμός βάσης για να στερεώνεται σταθερά πάνω στην στράντζα

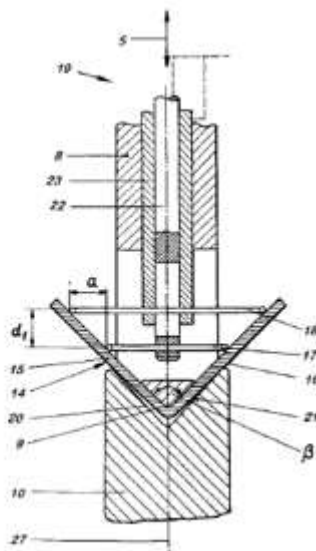
Πλεονεκτήματα

- Απλή κατασκευή
- Ακριβής μέτρηση
- Συμβατή με διάφορες στράντζες
- Μέτρηση εξ αποστάσεως
- Real-time μέτρηση με την επεξεργασία

Μειονεκτήματα

- Μικρό εύρος γωνιών
- Μικρές ανοχές κατά την κατασκευή, ακριβή κατασκευή
- Προϋποθέτει το έλασμα να είναι ενιαίο και λείο και η εξωτερική πλευρά της μήτρας να είναι κάθετη.

17.3 Τέταρτη Επιλογή



Εικόνα 17.5: Διάταξη Μετρητικού Οργάνου [38]

Περιγραφή

Το μετρητικό αυτό όργανο αποτελείται από δύο κύκλους με διαφορετικές διαμέτρους. Αυτοί οι δύο κύκλοι εφάπτονται στην εσωτερική πλευρά του ελάσματος που κάμπτεται και ανάλογα με τη γωνία κάμψης οι κύκλοι μετατοπίζονται. Μέσω της σχετικής μετατόπισης των κέντρων των δύο κύκλων υπολογίζεται η ζητούμενη γωνία κάμψης.

Διαδικασία

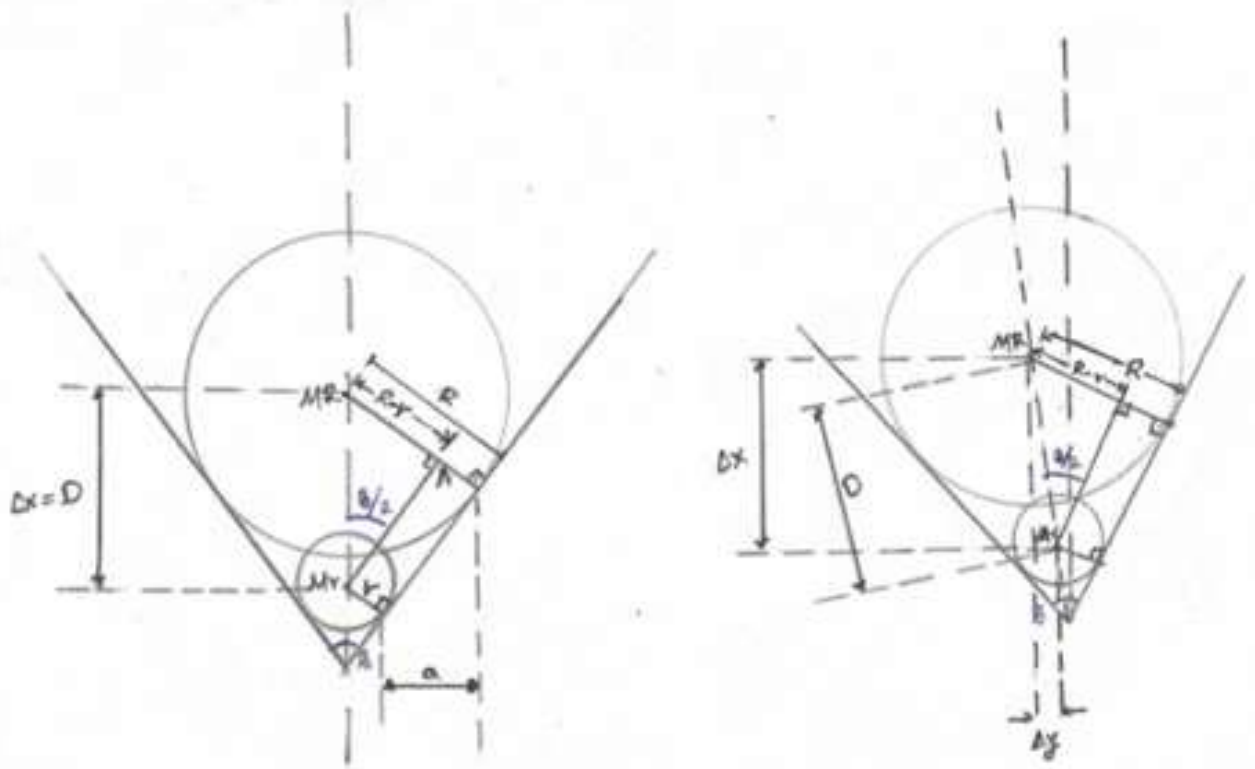
Το μετρητικό όργανο τοποθετείται πάνω στο έμβολο ή σε κάποιο άλλο εσωτερικό σημείο της μήτρας, με την προϋπόθεση το μετρητικό όργανο να είναι σε επαφή με την εσωτερική πλευρά του ελάσματος. Καθώς αρχίζει η στράντζα να κάμπτεται το έλασμα, αρχίζει αυτό να αποκτά μια γωνία τη λεγόμενη γωνία κάμψης. Ταυτόχρονα οι δύο πλευρές του ελάσματος αρχίζουν να μετατοπίζονται. Μετά από κάποια μετατόπιση έρχονται σε επαφή με τους δύο κύκλους, πρώτα με το μικρότερο και μετά με το μεγαλύτερο. Από το σημείο αυτό αρχίζουν οι δύο κύκλοι να μετατοπίζονται κατακόρυφα για όσο χρονικό διάστημα το έλασμα κάμπτεται είναι σε θέση το μετρητικό όργανο να δείχνει τη στιγμιαία γωνία. Όταν ολοκληρωθεί η κάμψη, το έμβολο απελευθερώνει το έλασμα και αυτό λόγω κάποιας ελαστικής παραμόρφωσης εκτονώνεται, με αποτέλεσμα να μεγαλώσει η γωνία. Ακόμα και τότε το μετρητικό όργανο μπορεί να μετρήσει τη στιγμιαία γωνία αρκεί το έμβολο να μην έχει απομακρυνθεί αρκετά από το έλασμα έτσι ώστε οι δύο κύκλοι να είναι ακόμα σε επαφή με το έλασμα. Η συνεχής αυτή σχετική μετατόπιση των δύο κύκλων με τη βοήθεια της γεωμετρίας υποδεικνύει τη γωνία κάμψης.

Γεωμετρική Απόδειξη

Τα κέντρα των δύο κύκλων είναι πάνω στην κοινή κατακόρυφη ευθεία. Ο μεγάλος κύκλος έχει κέντρο το σημείο MR ακτίνα R και ο μικρό κύκλος έχει κέντρο το M_r και ακτίνα r. Καθ' όλη την διαδικασία μέτρησης τα κέντρα των δύο κύκλων παραμένουν στην κοινή τους κατακόρυφο (Εικόνα 17.6). Επίσης, η οριζόντια απόσταση α μεταξύ των εφαπτόμενων σημείων των δύο κύκλων με την πλευρά του ελάσματος παραμένει σταθερή και ίση με α. Πλέον αρκεί να βρεθεί η γωνία β/2 που απεικονίζεται πάνω στο σχήμα για να βρεθεί η ζητούμενη γωνία β. Για το ορθογώνιο τρίγωνο (MR ^ M_r) ισχύει:

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{R-r}{D} \Leftrightarrow \beta = 2 \arcsin \frac{R-r}{D} \quad 17-1$$

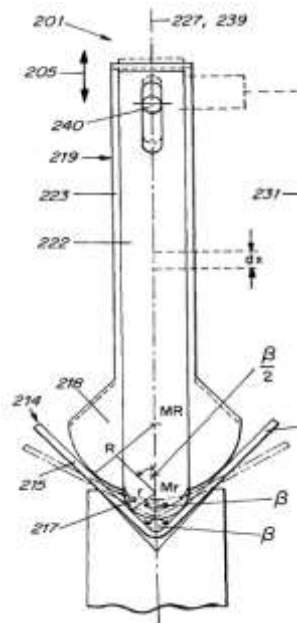
Γνωστές είναι οι ακτίνες των κύκλων R και r και η σχετική μετατόπιση των δύο κύκλων μετριέται με ένα μετρητικό όργανο (π.χ. λείζερ). Επομένως, η ζητούμενη γωνία β είναι γνωστή.



Εικόνα 17.6: Γεωμετρική Απόδειξη Τέταρτης Επιλογής Με Καθετότητα Και Χωρίς

Απαραίτητος Εξοπλισμός

- Ειδική κατασκευή των δύο κύκλων όπως φαίνεται στην Εικόνα 17.5
- Μετρητικό όργανο για να μετράει την σχετική μετατόπιση των δύο κύκλων
- Βάση για να προσδένεται πάνω στο έμβολο
- Επεξεργαστής για να υλοποιεί τις γεωμετρικές πράξεις



Εικόνα 17.7: Τρόπος Υπολογισμού Γωνιών [38]

Πλεονεκτήματα

- Ακριβής μέτρηση
- Εύκολη προσαρμογή
- Οικονομικά μετρητικά όργανα
- Real-time μέτρηση με την επεξεργασία του ελάσματος

Μειονεκτήματα

- Μικρό εύρος γωνιών
- Εσωτερικά της εργαλειομηχανής, δύσκολη τοποθέτηση
- Μικρές ανοχές κατά την κατασκευή, ακριβή κατασκευή
- Μικρό εύρος γωνιών
- Προϋποθέτει το έλασμα να είναι ενιαίο και λείο

17.4 Σύγκριση Επιλογών

Παραπάνω έγινε αναφορά στις σε τρεις υποψήφιες λύσεις και στην *Ενότητα 4* αναλύθηκε η επιλογή η οποία κρίθηκε η πιο κατάλληλη. Στο σημείο αυτό φανερόνεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η σύγκριση των υποψήφιων αυτών επιλογών και πως τελικά προέκυψε η καλύτερη επιλογή. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ακολουθήθηκε σύμφωνα με μία παρόμοια του βιβλίου «*Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών*» του κ.Σφαντζικόπουλου [39]. Στον παρακάτω πίνακα έγινε απόπειρα να βρεθεί ένας συντελεστής βαρύτητας για το κάθε κριτήριο ανάλογα με την κρισιμότητά του. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν ανά δύο όλα τα κριτήρια με τη σειρά και το κριτήριο το οποίο υπερτερούσε ανάμεσα στο ζεύγος έπαιρνε την τιμή 1 ενώ το άλλο την τιμή 0. Έπειτα, αθροίστηκαν οι μονέδες κάθε κριτηρίου, όπως φαίνεται στη στήλη θετικών αποφάσεων, και διαιρώντας τον συνολικό αυτό αριθμό κάθε κριτηρίου με το σύνολο των θετικών αποφάσεων υπολογίζεται ο συντελεστής βαρύτητας για κάθε κριτήριο.

Κριτήρια	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Θετικές Αποφάσεις	Συντ. Βαρύτητας
Επαφή/Εξ Απόστασεως	1	-	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0.056
Ακρίβεια	2	1	-	1	1	1	1	1	1	0	7	0.194
Συμβατότητα	3	1	0	-	1	1	0	1	0	1	5	0.139
Real-time Μετρήσεις	4	0	0	0	-	1	1	1	0	0	3	0.083
Εύρος Γωνιών	5	1	0	0	0	-	1	1	0	0	3	0.083
Πολυπλοκότητα Κατασκευής	6	0	0	1	0	0	-	0	0	0	1	0.028
Ευκολία Τοποθέτησης	7	1	0	0	0	0	1	-	0	0	2	0.055
Προϋποθέσεις Μετάλλου	8	1	0	1	1	1	1	1	-	1	7	0.194
Κόστος	9	1	1	0	1	1	1	1	0	-	6	0.167
										Σύνολο	36	1

Πίνακας 23: Υπολογισμός Συντελεστών Βαρύτητας Κριτηρίων

Αφού βρέθηκε ο συντελεστής βαρύτητας κάθε κριτηρίου επόμενο βήμα ήταν η αξιολόγηση την κάθε επιλογής για τον βαθμό εκπλήρωσης των κριτηρίων αυτών. Η κάθε επιλογή αξιολογήθηκε για κάθε κριτήριο από το 1 μέχρι το 5 και πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με τον συντελεστή βαρύτητας του κριτηρίου προκύπτει μία τιμή της επιλογής αυτής για το συγκεκριμένο κριτήριο. Αθροίζοντας για κάθε επιλογή ξεχωριστά τις τιμές όλων των κριτηρίων που συγκέντρωσαν προκύπτει ένας αριθμός ο οποίος δηλώνει την αξιολόγησή της. Η υποψήφια επιλογή με τον μεγαλύτερο άθροισμα είναι και η καταλληλότερη για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Η διαδικασία αυτή εκτελέστηκε για τις τέσσερις υποψήφιες επιλογές και φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Η 1^η επιλογή η οποία είναι και αυτή που επικράτησε της σύγκρισης είναι αυτή που αναλύεται στην *Ενότητα 4* της εργασίας, ενώ οι υπόλοιπες επιλογές αναφέρθηκαν στο Παράρτημα αυτό.

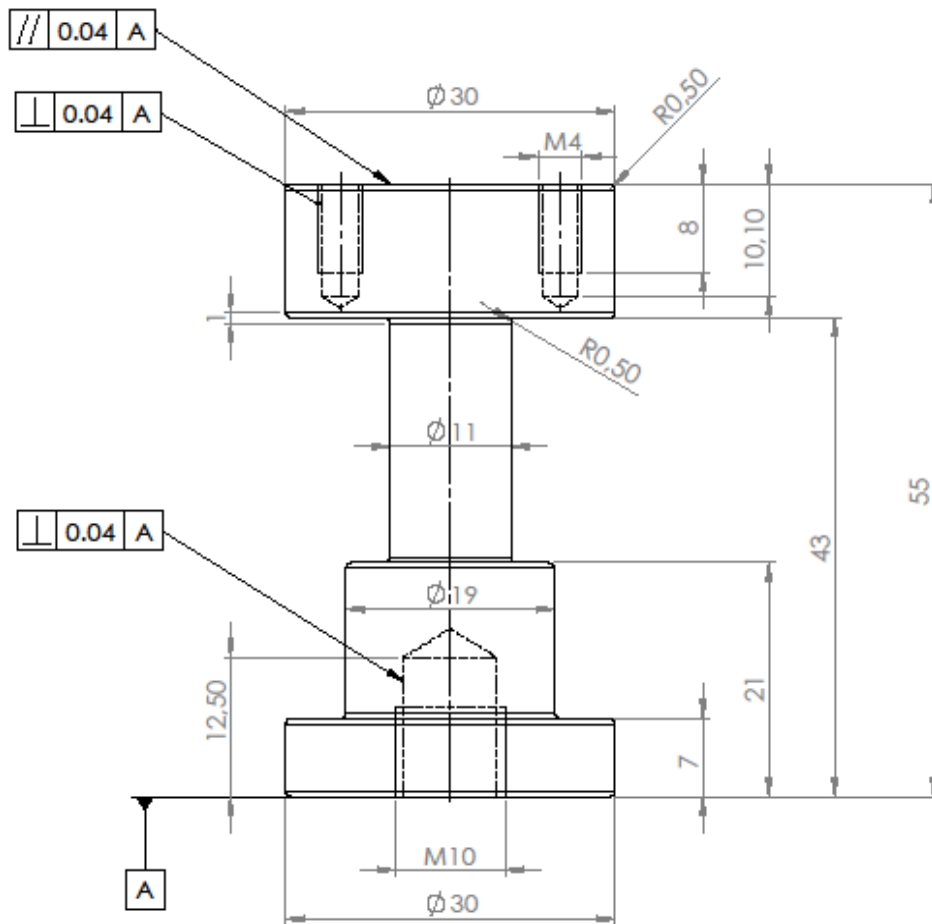
α/α	Κριτήρια	Βαρύτητα	1η	2η	3η	4η	1 ^η επιλογή	2 ^η επιλογή	3 ^η επιλογή	4 ^η επιλογή
1	Επαφή/Εξ Απόστασεως	0.056	2	3	4	1	0.111	0.222	0.167	0.055
2	Ακρίβεια	0.194	4	4	3	3	0.778	0.583	0.778	0.583
3	Συμβατότητα	0.139	3	3	4	1	0.417	0.556	0.417	0.139
4	Real-time Μετρήσεις	0.083	1	3	2	3	0.083	0.16	0.250	0.250
5	Εύρος Γωνιών	0.083	2	3	4	2	0.167	0.333	0.250	0.167
6	Πολυπλοκότητα Κατασκευής	0.028	2	2	2	1	0.055	0.0556	0.056	0.028
7	Ευκολία Τοποθέτησης	0.055	2	2	3	1	0.111	0.16	0.111	0.056
8	Προϋποθέσεις Μετάλλου	0.194	4	2	3	4	0.778	0.583	0.389	0.778
9	Κόστος	0.167	4	2	2	3	0.667	0.333	0.333	0.500
						Σύνολο	3.167	3.00	2.75	2.556

Πίνακας 24: Σύγκριση Υποψήφιων Επιλογών.

Επομένως η πλέον κατάλληλη επιλογή είναι αυτή με τους κινούμενους πάνω σε βάση χωρητικούς αισθητήρες. Έπειτα ακολουθεί η μετρητική διάταξη με το περιστρεφόμενο λέιζερ, μετά αυτή με το λέιζερ πολλών σημείων (multi-spot) λέιζερ και τέλος αυτή με τους δύο κύκλους.

18. Παράρτημα Β: Κατασκευαστικά Σχέδια

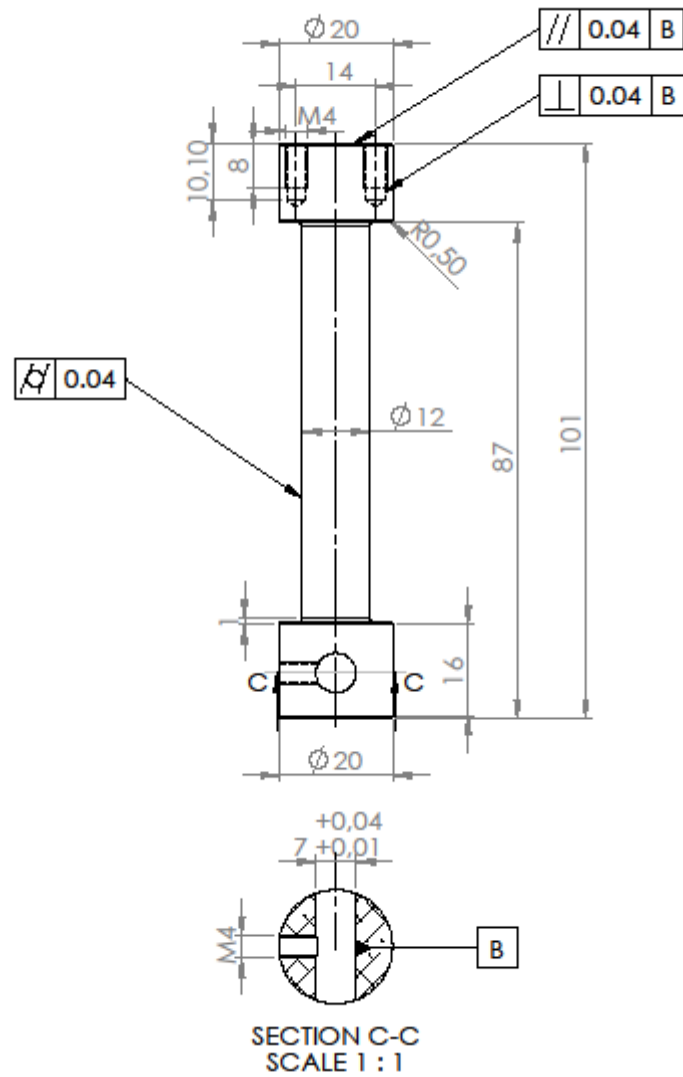
18.1 Πρώτος Άξονας



ΕΜΠ-ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:	ΥΛΙΚΟ:	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
	23/09/2019	ALUMINUM	ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	ΚΛΙΜΑΚΑ:	ΒΑΡΟΣ:	ΤΙΤΛΟΣ:
	2:1	49 gr A/A: 1/8	

Εικόνα 18.1: Κατασκευαστικό Σχέδιο Πρώτου Άξονα

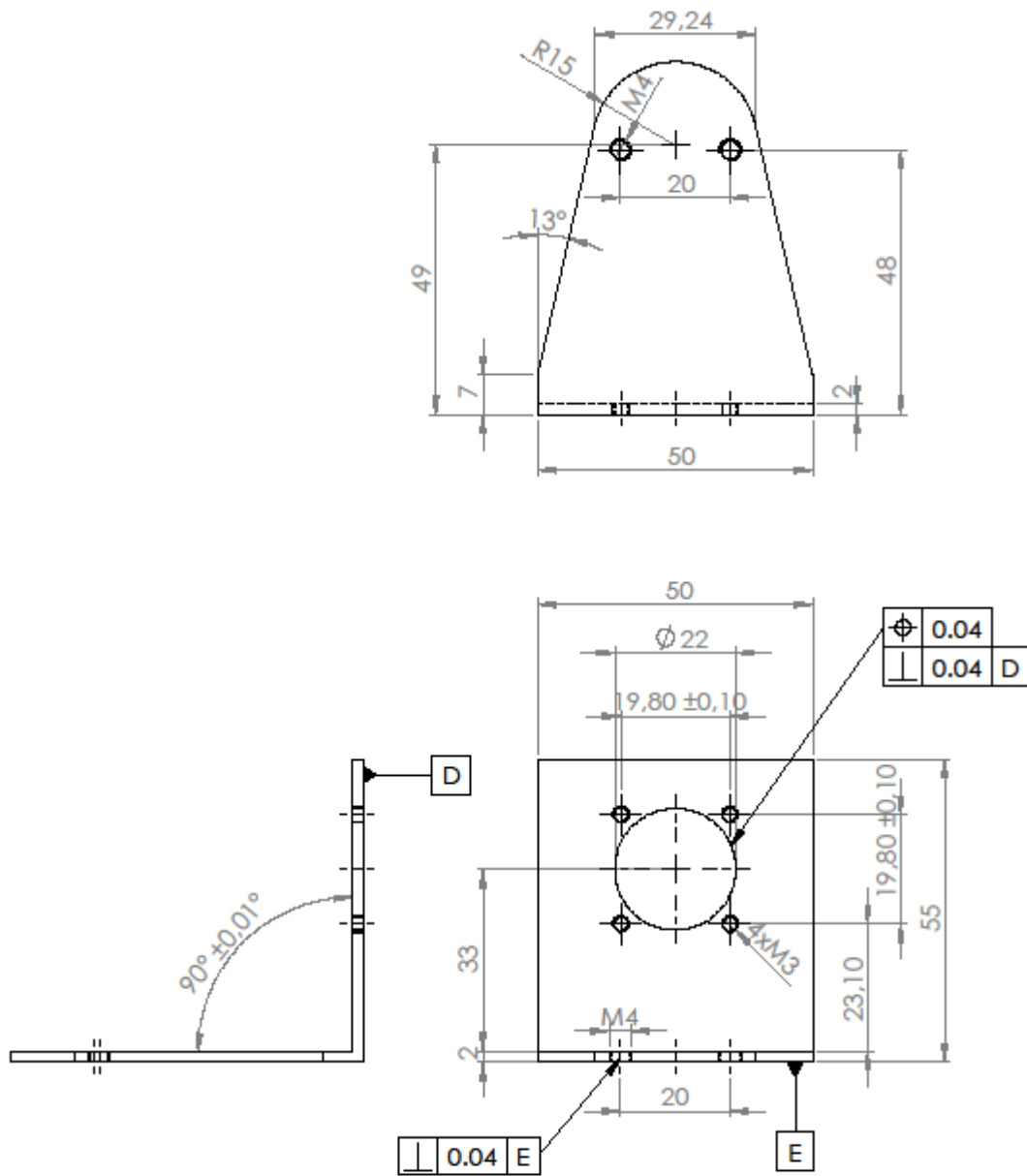
18.2 Δεύτερος Άξονας



ΕΜΠ-ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:	ΥΛΙΚΟ:	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
	23/09/2019	ALUMINUM	ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	ΚΛΙΜΑΚΑ:	ΒΑΡΟΣ:	ΤΙΤΛΟΣ:
	1:1	46 gr A/A: 2/8	

Εικόνα 18.2: Κατασκευαστικό Σχέδιο Δεύτερου Άξονα

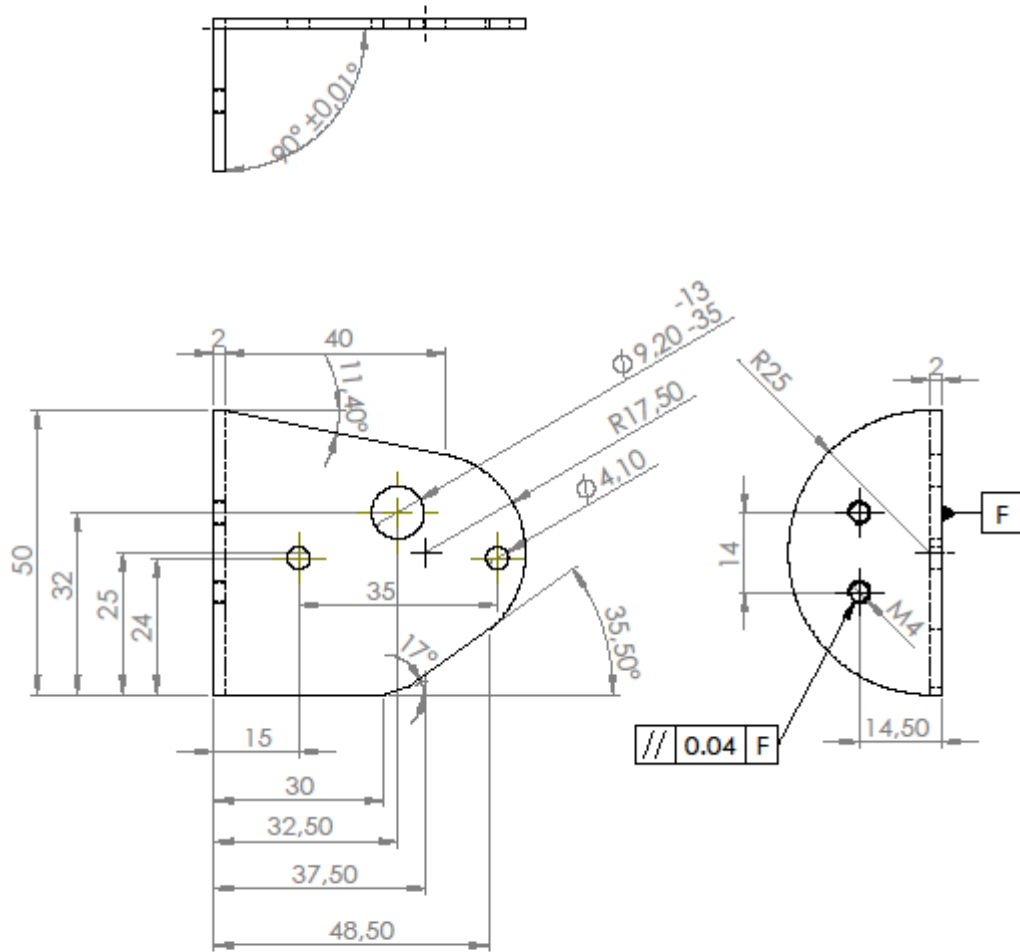
18.3 Πρώτη Βάση



ΕΜΠ-ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:	ΥΛΙΚΟ:	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
	12-3-2018	STEEL	ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	ΚΛΙΜΑΚΑ:	ΒΑΡΟΣ:	ΤΙΤΛΟΣ:
	1:1	71 gr A/A: 3/8	ΠΡΩΤΗ ΒΑΣΗ

Εικόνα 18.3: Κατασκευαστικό Σχέδιο Πρώτης Βάσης

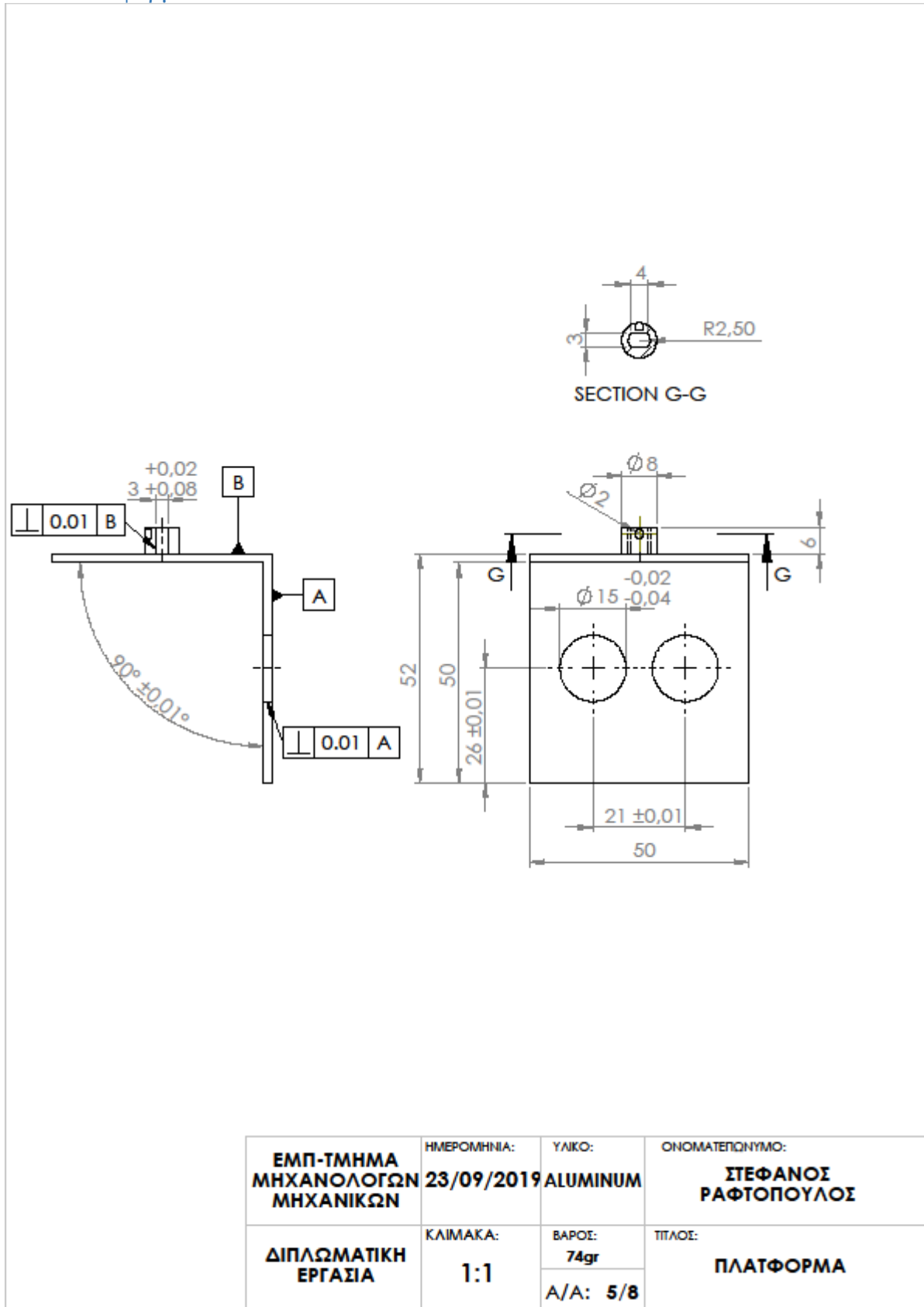
18.4 Δεύτερη Βάση



ΕΜΠ-ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:	ΥΛΙΚΟ:	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
	23/09/2019	STEEL	ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	ΚΛΙΜΑΚΑ:	ΒΑΡΟΣ:	ΤΙΤΛΟΣ:
	1:1	49 gr A/A: 4/8	ΔΕΥΤΕΡΗ ΒΑΣΗ

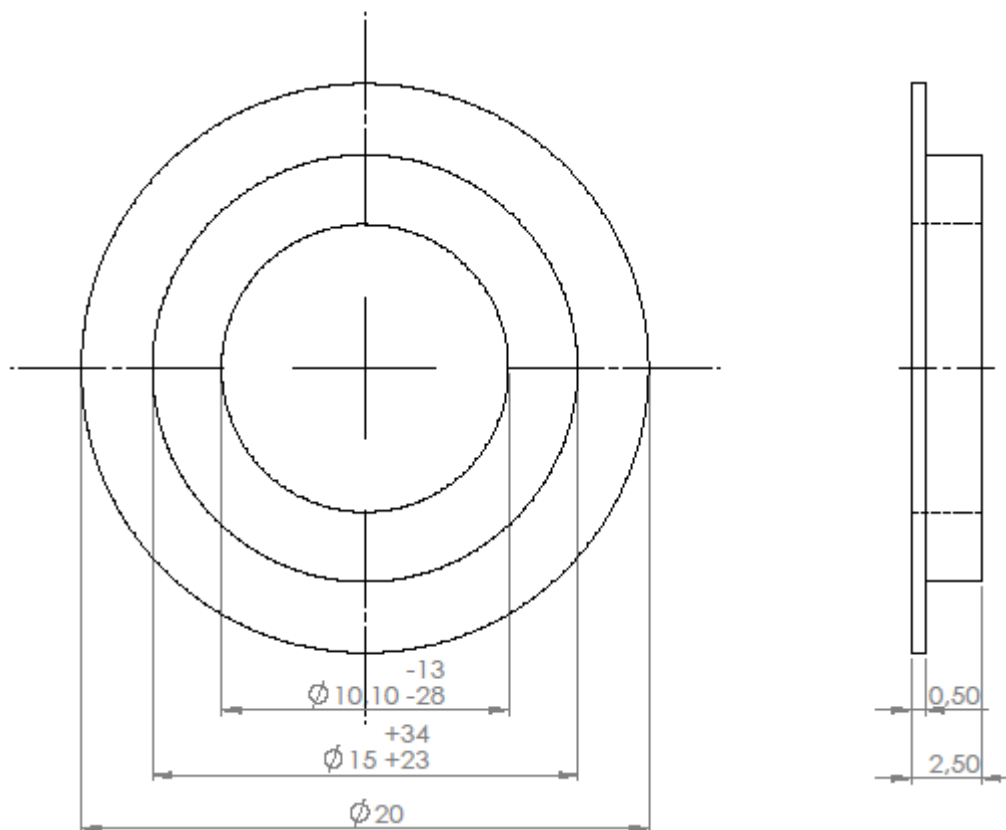
Εικόνα 18.4: Κατασκευαστικό Σχέδιο Δεύτερης Βάσης

18.5 Πλατφόρμα



Εικόνα 18.5: Κατασκευαστικό Σχέδιο Πλατφόρμας

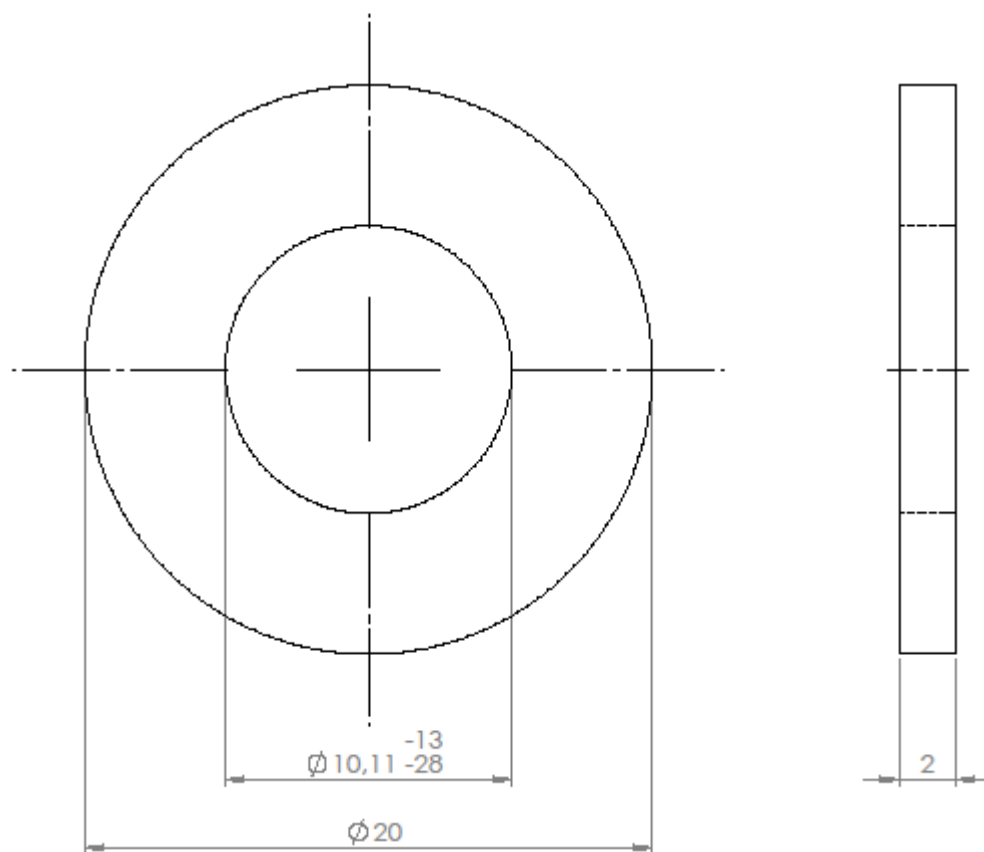
18.6 Πρώτος Μονωτής



ΕΜΠ-ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:	ΥΛΙΚΟ:	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
	23/09/2019	RUBBER	ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	ΚΛΙΜΑΚΑ:	ΒΑΡΟΣ:	ΤΙΤΛΟΣ:
	5:1	1 gr A/A: 6/8	ΠΡΩΤΟΣ ΜΟΝΩΤΗΣ

Εικόνα 18.6: Κατασκευαστικό Σχέδιο Πρώτου Μονωτή

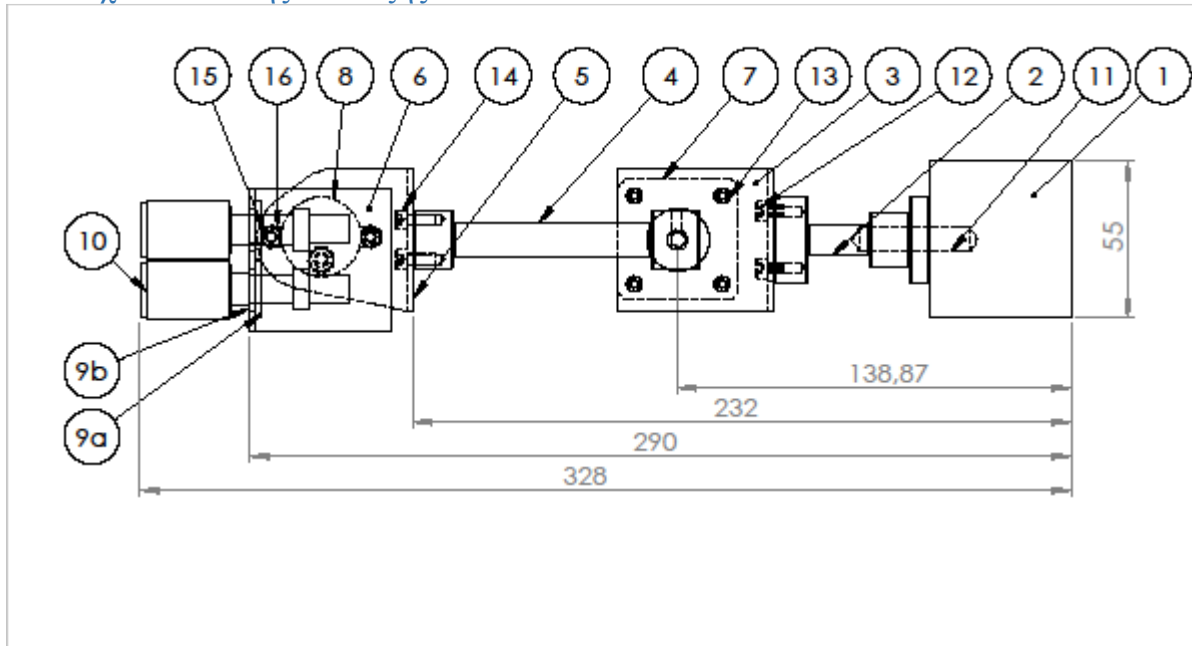
18.7 Δεύτερος Μονωτής



ΕΜΠ-ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:	ΥΛΙΚΟ:	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
	23/09/2019	RUBBER	ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	ΚΛΙΜΑΚΑ:	ΒΑΡΟΣ:	ΠΛΟΣ:
	5:1	0,5 gr	
		A/A: 7/8	

Εικόνα 18.7: Κατασκευαστικό Σχέδιο Δεύτερου Μονωτή

18.8 Σχέδιο Γενικής Διάταξης



α/α	ΠΟΣΟΤ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	ΥΛΙΚΟ	ΒΑΡΟΣ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1	1	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΒΑΣΗ	ΧΑΛΥΒΑΣ	1.33kg	ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ
2	1	ΠΡΩΤΟΣ ΑΞΟΝΑΣ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	49gr	ΠΡΩΤΑ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΑΝΟΙΓΜΑ ΟΠΩΝ
3	1	ΠΡΩΤΗ ΒΑΣΗ	ΧΑΛΥΒΑΣ	71gr	-
4	1	ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΑΞΟΝΑΣ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	46gr	ΠΡΩΤΑ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΑΞΟΝΑ ΜΟΤΕΡ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΑΝΟΙΓΜΑ ΟΠΩΝ
5	1	ΔΕΥΤΕΡΗ ΒΑΣΗ	ΧΑΛΥΒΑΣ	49gr	-
6	1	ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	74gr	ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΘΕΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΠΩΝ
7	1	ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	-	0.5kg	NEMA 17
8	1	ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	-	37gr	28BYJ-48
9α	2	ΜΟΝΟΤΗΣ	ΠΛΑΣΤΙΚΟ	1gr	-
9β	2	ΜΟΝΟΤΗΣ	ΠΛΑΣΤΙΚΟ	0.5gr	-
10	2	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	-	71gr	DIMEQ TE100 MKII, MEI
11	1	DOUBLE END STUDS M10	ΧΑΛΥΒΑΣ	-	-
12	2	SOCKET HEAD CAP SCREW M4 x 6	ΧΑΛΥΒΑΣ	-	-
13	4	SOCKET HEAD CAP SCREW M4 x 8	ΧΑΛΥΒΑΣ	-	-
14	2	SOCKET HEAD CAP SCREW M4 x 10	ΧΑΛΥΒΑΣ	-	-
15	2	HEX SCREW M4 x10	ΧΑΛΥΒΑΣ	-	-
16	2	HEX NUT STYLE M4	ΧΑΛΥΒΑΣ	-	-
			ΚΛΙΜΑΚΑ 2:1	ΟΝΟΜΑΣΙΑ: ΣΧΕΔΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	
			ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 23/09/2019	Α/Α: 8/8	

Εικόνα 18.8: Σχέδιο Γενικής Διάταξης

19. Παράρτημα Γ: Χρησιμοποιούμενος Αλγόριθμος

```
//Ανάκληση κατάλληλης βιβλιοθήκη και δήλωση χρησιμοποιούμενων Pins της
πλακέτας Arduino//

#include <AccelStepper.h>
#define stepper_pindir_big      2
#define stepper_pinsteps_big    3
#define stepper_pinsleep_big    4
#define stepper_pindir_small    5
#define stepper_pinsteps_small  6
#define stepper_pinsleep_small  7

#define M0 8
#define M1 9
#define M2 10

#define M3 11
#define M4 12
#define M5 13

#define stepper_speed 3000000
#define stepper_acc 2000000

#define stepper_speed1 500
#define stepper_acc1 400

//Αρχικοποιήσεις διαφόρων αριθμητικών-λογικών χρήσιμων μεταβλητών για την
ομαλή λειτουργία του αλγορίθμου//

void setup() {

int execute = HIGH;
int count = 0;
int i = 0;
int j = 0;
int telos = 1;
int u = 180;
long countsperrev = u * 32 * 2052L / 360;
int telos1 = 1;
int telos2 = 1;
int vimata = 0;

float sum_voltage1 = 0;
float sum_voltage2 = 0;

//Εντολές για την ταύτιση καθενός κινητήρα με την αντίστοιχη ονομασία του
μέσα στον αλγόριθμο//

AccelStepper stepper_big(AccelStepper::DRIVER, stepper_pinsteps_big,
stepper_pindir_big);
AccelStepper stepper_small(AccelStepper::DRIVER, stepper_pinsteps_small,
stepper_pindir_small);

Serial.begin(9600);

//Υπολογισμός σημείου ταχείας προσέγγισης//

float xb= -18.5; //
```

```

float yb= -1; //1
float L= 16; //6
float angle= 60;
float f= 3.14/180*angle;
float a= tan(3.14/2-f);
float C= (a*a)*(xb*xb) - 2*yb*a*xb + yb*yb-L*L;
float B= 2*a*(yb-a*xb);
float A= a*a+1;
float d= B*B-4*A*C;
float x1= (-B+sqrt(d))/(2*A);
float x2= (-B-sqrt(d))/(2*A);
Serial.println(x1);

float angle_rad=acos(x1/L);

float angle_deg=angle_rad*180/3.14;
Serial.println(angle_deg);

float target_big_arxika= (90)*16*1036L/360;

float target_big= angle_deg*16*1036L/360;
float target_small=(90+angle-angle_deg)*32*2052L/360;
Serial.println(90+angle-angle_deg);

//Εντολές που δηλώνουν την υποδιαίρεση κάθε βήματος σε επιμέρους
μικρότερα βήματα με την λειτουργία microstepping//

pinMode(M0, OUTPUT);
pinMode(M1, OUTPUT);
pinMode(M2, OUTPUT);
digitalWrite(M0, HIGH);
digitalWrite(M1, HIGH);
digitalWrite(M2, HIGH);

pinMode(M3, OUTPUT);
pinMode(M4, OUTPUT);
pinMode(M5, OUTPUT);
digitalWrite(M3, HIGH);
digitalWrite(M4, HIGH);
digitalWrite(M5, HIGH);

//Εντολές για την ενεργοποίηση και κίνηση των βηματικών κινητήρων στο
σημείο προσέγγισης με γρήγορο ρυθμό//

stepper_big.setMaxSpeed(stepper_speed1);
stepper_big.setAcceleration(stepper_acc1);
stepper_big.setEnablePin(stepper_pinsleep_big);
stepper_big.enableOutputs();
stepper_big.move(target_big_arxika);
stepper_big.runToPosition();

delay(2000);

stepper_small.setMaxSpeed(stepper_speed);
stepper_small.setAcceleration(stepper_acc);
stepper_small.setEnablePin(stepper_pinsleep_small);
stepper_small.enableOutputs();
stepper_small.move(target_small);
stepper_small.runToPosition();

stepper_big.setSpeed(stepper_speed);

```

```

stepper_big.setAcceleration(stepper_acc);
stepper_small.setSpeed(stepper_speed);
stepper_small.setAcceleration(stepper_acc);
}

//Έναρξη επαναληπτικής διαδικασίας του προγράμματος//

void loop() {

digitalWrite(M0, HIGH);
digitalWrite(M1, HIGH);
digitalWrite(M2, HIGH);
digitalWrite(M4, HIGH);
digitalWrite(M4, HIGH);
digitalWrite(M5, HIGH);

while (execute == HIGH) {
  while (count < countsperrev && telos == 1 ) {
    small();
    big();
    i = i + 1;
    j = j + 1;

    if (count % 102 == 0) {
      big();
      j = j + 1;
    }
    count++;

//Μετατροπή των ολοκληρωμένων βημάτων κάθε κινητήρα σε περιστροφή του
κινητήρα μετρούμενη σε μοίρες//

float angle_big = 0.021718 * j;
float angle_small = 0.0219298 * i;
int sensorValue1 = analogRead(A0);
float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);

int sensorValue2 = analogRead(A2);
float voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);

float distance1 = 250 * (1 - voltage1);
float distance2 = 250 * (1 - voltage2);

//Εκτύπωση χρήσιμων μεγεθών στη σειριακή θύρα για την ανάγνωση τους από
τον χρήστη//

Serial.print("\t");
Serial.print(i);
Serial.print("\t");
Serial.print(j);
Serial.print("\t");
Serial.print(voltage1);
Serial.print("\t");
Serial.print(voltage2);
Serial.print("\t");
Serial.print(angle_big);
Serial.print("\t");
Serial.print(angle_small);
Serial.print("\t");
Serial.print(distance1);

```

```

Serial.print("\t");
Serial.print(distance2);
Serial.println();

//Έλεγχος για τον τερματισμό της κίνησης των δύο κινητήρων//

if (voltage1 > 0.8 || voltage2 > 0.8) {
  telos = 2;

  execute = LOW;

//Έλεγχος για την περίπτωση όπου μονάχα ο ένας από τους δύο αισθητήρες
βρίσκονται στην μετρούμενη περιοχή και κατάλληλη στρέψη των αισθητήρων σε
τέτοια περίπτωση//

if (voltage1 >= 0.5 && voltage2 <= 0.01) {
  for (int j = 0; j < 10000; j++ ) {

    sensorValue1 = analogRead(A0);
    voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);

    sensorValue2 = analogRead(A2);
    voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);

    small_rev();
    small_rev();
    small_rev();
    small_rev();
    small_rev();
    big();
    int k = k + 1;
    int g = g + 5;
    angle_big = 0.021718 * k;
    angle_small = 0.0219298 * g;

//Μετατροπή αναλογικής τάσης αισθητήρων σε απόσταση αισθητήρων με
μετρούμενο έλασμα//

    distance1 = 250 * voltage1;
    distance2 = 250 * voltage2;
    distance1 = 250 * (1 - voltage1);
    distance2 = 250 * (1 - voltage2);

    vimata = vimata + 4;

Serial.print("c1");
Serial.print("\t");
Serial.print(k);
Serial.print("\t");
Serial.print(g);
Serial.print("\t");
Serial.print(voltage1);
Serial.print("\t");
Serial.print(voltage2);
Serial.print("\t");
Serial.print(angle_big);
Serial.print("\t");
Serial.print(angle_small);
Serial.print("\t");
Serial.print(distance1);
Serial.print("\t");

```

```

Serial.print(distance2);
Serial.println();

delay(200);

//Έλεγχος για την περίπτωση όπου μονάχα ο ένας από τους δύο αισθητήρες
βρίσκονται στην μετρούμενη περιοχή και κατάλληλη στρέψη των αισθητήρων σε
τέτοια περίπτωση//

    if (voltage1 >= 0.3 && voltage2 >= 0.3) {
        break;
    }
}
}

if (voltage2 >= 0.5 && voltage1 <= 0.01) {
for (int j = 0; j < 10000; j++ ) {

int sensorValue1 = analogRead(A0);
float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);

int sensorValue2 = analogRead(A2);
float voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);

small2();
small2();
small2();
small2();
small2();
big();
int k = k + 1;
int g = g + 5;
angle_big = 0.021718 * k;
angle_small = 0.0219298 * g;

distance1 = 2.50 * (100 - voltage1);
distance2 = 2.50 * (100 - voltage2);

vimata = vimata + 4;

Serial.print("an");
Serial.print("\t");
Serial.print(k);
Serial.print("\t");
Serial.print(g);
Serial.print("\t");
Serial.print(voltage1);
Serial.print("\t");
Serial.print(voltage2);
Serial.print("\t");
Serial.print(angle_big);
Serial.print("\t");
Serial.print(angle_small);
Serial.print("\t");
Serial.print(distance1);
Serial.print("\t");
Serial.print(distance2);
Serial.println();

delay(200);

```

```

        if (voltage1 >= 0.3 && voltage2 >= 0.3) {
            break;
        }
    }
}

```

//Διάβασμα αρκετών ίδιων μετρήσεων από κάθε αισθητήρα και εύρεση των μετρούμενων αποστάσεων και στη συνέχεια υπολογισμό της γωνίας σφάλματος//

```

for (int i = 0; i < 100; i++ ) {
    float sensorValue1 = analogRead(A0);
    float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);
    Serial.println(voltage1);
    sum_voltage1 = sum_voltage1 + voltage1;
}
Serial.println("end");
for (int j = 0; j < 100; j++ ) {
    float sensorValue2 = analogRead(A2);
    float voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);
    Serial.println(voltage2);
    sum_voltage2 = sum_voltage2 + voltage2;
}
float avg_voltage1 = sum_voltage1 / 100;
float avg_voltage2 = sum_voltage2 / 100;
float avg_distance1 = (1 - avg_voltage1) * 250;
float avg_distance2 = (1 - avg_voltage2) * 250;

if (avg_distance1 < 0) {
    avg_distance1 = 0;
}

if (avg_distance2 < 0) {
    avg_distance2 = 0;
}

Serial.println(avg_voltage1);
Serial.println(avg_voltage2);
Serial.print("\t");
Serial.println(avg_distance1);
Serial.print("\t");
Serial.println(avg_distance2);
Serial.println();
float error_angle = (avg_distance1 - avg_distance2) / 2350;

Serial.println(error_angle * 100);
Serial.println(vimata);
Serial.println(atan (error_angle) *180 / 3.14159+vimata *0.0219);

delay(8000);
returnbig();
returnsmall();
}
}
}
}

```

//Ανακαλούμενες από το κυρίως αλγόριθμο υπορουτίνες κίνησης καθ' ενός κινητήρα κατά ένα βήμα//

```

void big() {

```

```

    stepper_big.setSpeed(stepper_speed);
    stepper_big.move(1);
    stepper_big.runToPosition();
}

void small() {
    stepper_small.setSpeed(stepper_speed);
    stepper_small.move(-4);
    stepper_small.runToPosition();
}

void small2() {
    stepper_small.setSpeed(stepper_speed);
    stepper_small.move(-4);
    stepper_small.runToPosition();
}

void small_rev() {
    stepper_small.setSpeed(stepper_speed);
    stepper_small.move(4);
    stepper_small.runToPosition();
}

void returnsmall() {
    stepper_small.setMaxSpeed(stepper_speed);
    stepper_small.setAcceleration(stepper_acc);
    stepper_small.setEnablePin(stepper_pinsleep_small);
    stepper_small.enableOutputs();
    stepper_small.setSpeed(stepper_speed);
    stepper_small.moveTo(0);
    stepper_small.runToPosition();
}

void returnbig() {
    stepper_big.setMaxSpeed(1000);
    stepper_big.setAcceleration(800);
    stepper_big.setEnablePin(stepper_pinsleep_small);
    stepper_big.enableOutputs();
    stepper_big.setSpeed(stepper_speed);
    stepper_big.moveTo(0);
    stepper_big.runToPosition();
}

```