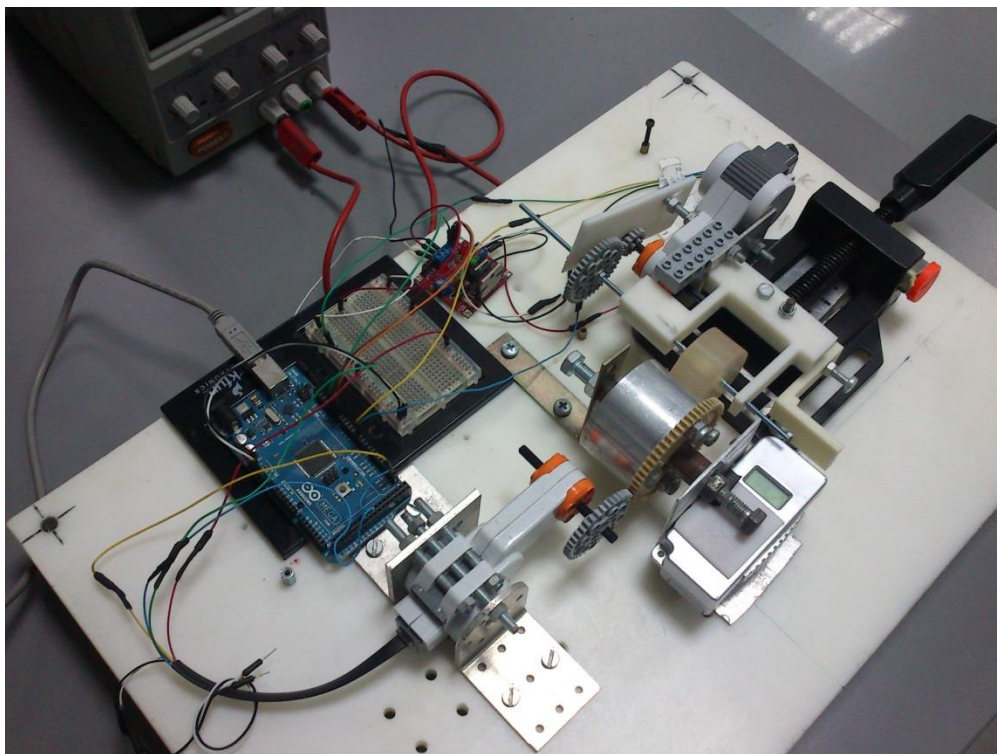




Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη διάταξης μετρήσεων για τη μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων



Σπουδαστής: Κοσμαδάκης Γεώργιος ΑΜ: 4575

Επιβλέπον Καθηγητής: Δρ. Φασουλάς Ι. Ιωάννης Επίκουρος Καθηγητής σχολής Σ.Τ.ΕΦ. τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Ηράκλειο 2013

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.2 ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΑ	5
1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΑΛΑΚΩΝ-ΣΚΛΗΡΩΝ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΩΝ	6
1.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΥΛΙΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΩΝ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΩΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ CHANG ΚΑΙ CUTKOSKY	7
1.5 ΚΙΝΗΣΗ ΚΥΛΙΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΥ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΟΥ	10
1.6 ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΥΛΙΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΥ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΝΩ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΗ ΑΚΑΜΠΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	11
1.7 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΓΙΑ ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΑΙ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΑ	14
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΓΙΑ ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΑ	15
2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΑ	16
2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΟΥ	17
2.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΟΥ	18
2.6 ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΩΝ	20
2.6.1 Υλικό καλουπιού σφαιρικών ακροδαχτύλων	20
2.6.2 Υλικό καλουπιού κυλινδρικών ακροδαχτύλων	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΩΝ	22
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	22
3.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΩΝ	23
3.2.1 Σιλικόνες Wacker	23
3.2.2 Σιλικόνη της εταιρίας AXSON, Essil 291	23
3.3 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΑΞΟΝΑ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΟ	25
3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΟΥ	26
3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΟΥ	28
3.6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΩΝ	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΥΛΙΣΗΣ	34
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	34
4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	35
4.3 ΜΕΡΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	36
4.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	39
4.5 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	42
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	42
5.2 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	42
5.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΩΝ	46
5.4 ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	47
5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	50
5.6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	54

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' -----	55 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β' -----	68 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ -----	70 -

Περίληψη

Ο χειρισμός αντικειμένων είναι σημαντικό μέρος της ρομποτικής όσο αναφορά την αυτοματοποίηση της παραγωγής στη βιομηχανία αλλά και την ασφαλή εκτέλεση επικίνδυνων εργασιών. Τα προηγούμενα χρόνια το αντικείμενο του χειρισμού αντικειμένων με ρομποτικά δάχτυλα είχε μελετηθεί ευρέως. Στις περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούνται μοντέλα άκαμπτων ακροδαχτύλων και αντικειμένων. Αυτά τα μοντέλα όμως σπανίως χρησιμεύουν στις πραγματικές συνθήκες χειρισμού αντικειμένων. Οι Dean C. Chang και Mark R. Cutkosky [1], έκαναν μια εργασία στην οποία εξέταζαν τα κινηματικά αποτελέσματα της κύλισης με μαλακά ακροδάχτυλα. Βάση αυτής της εργασίας και της διάταξης που προτείνει, κατασκευάστηκε η διάταξη της παρούσας εργασίας με σκοπό να εξεταστεί η κινηματική συμπεριφορά παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων διαφόρων μεγεθών, σχημάτων αλλά και υλικών κατασκευής μέσω πειραμάτων τα οποία περιλαμβάνουν την κύλιση των παραμορφώσιμων κυλινδρικών και σφαιρικών ακροδαχτύλων πάνω σε άκαμπτο κυλινδρικό αντικείμενο.

Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν καλούπια για την δημιουργία κυλινδρικών και σφαιρικών ακροδαχτύλων. Τα παραμορφώσιμα ακροδάχτυλα που κατασκευάστηκαν ήταν από σιλικόνες δύο συστατικών. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν σφαιρικά και κυλινδρικά ακροδάχτυλα ακτινών 10, 14, 16 και 20 χιλιοστών από τα παρακάτω υλικά : Σιλικόνη Wacker 4440, Σιλικόνη Wacker 4512, Σιλικόνη Wacker 4514, Σιλικόνη Wacker 4615, Σιλικόνη ESSIL 291 αναλογίας σκληρυντικού 10 προς 1, Σιλικόνη ESSIL 291 αναλογίας σκληρυντικού 5 προς 1, καθώς επίσης και δύο αφρώδη υλικά. Ακόμη υπήρχε επάνω στη διάταξη ένα άκαμπτο κυλινδρικό, μεταλλικό αντικείμενο ακτίνας 27,5 χιλιοστών.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παραμορφώσιμα ακροδάχτυλα πιέζονταν επάνω στο άκαμπτο αντικείμενο και εκτελούσαν μία περιστροφή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η απόσταση κύλισης του κάθε ακροδαχτύλου επάνω στο άκαμπτο αντικείμενο να αλλάζει. Ανάλογα με το σχήμα, το μέγεθος και το υλικό του κάθε παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου η απόσταση αυτή είχε διαφορετικές τιμές αύξησης ή ακόμη και μείωσης. Με τους κωδικοποιητές προσαύξησης τους οποίους είναι εφοδιασμένοι οι κινητήρες Lego nxt μετρήσαμε αυτή την αλλαγή της απόστασης κύλισης και με μια συσκευή μέτρησης της γραμμικής απόστασης την απόσταση του παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου από το άκαμπτο αντικείμενο. Χάρη στην συσκευή αυτή μπορούσαμε να αλλάζουμε με ακρίβεια την απόσταση ώστε να πάρουμε μετρήσεις για διάφορες αποστάσεις του παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου από το άκαμπτο αντικείμενο. Από τα δεδομένα αυτά δημιουργήθηκαν γραφικές παραστάσεις και υπολογίστηκε ένας αριθμός που

ονομάζεται σταθερά κύλισης α (παράγραφος 1.6) για κάθε υλικό, σχήμα και μέγεθος ακροδαχτύλου.



Ρομποτικά ακροδάχτυλα χειρίζονται αντικείμενο

Κεφάλαιο 1

Θεωρητικό μέρος

1.1 Εισαγωγή

Ακόμη και σήμερα τα ρομπότ χαρακτηρίζονται από αδεξιότητα όταν πρόκειται να χειριστούν αντικείμενα όπως κάνει ο άνθρωπος στην καθημερινή του ζωή. Προβλέπεται όμως μια ραγδαία εξέλιξη των ρομπότ στα επόμενα χρόνια χάρη στην οποία θα μπορούν να πραγματοποιήσουν αντίστοιχες εργασίες χειρισμού με αυτές που πραγματοποιεί ο άνθρωπος. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρονται τα θεωρητικά μέρη των τμημάτων της παρούσας εργασίας. Αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των παραμορφώσιμων και των άκαμπτων ακροδαχτύλων, παρουσιάζονται πληροφορίες όσο αναφορά την κύλιση παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων από την εργασία [1] και εξηγούνται τα αποτελέσματα της. Ακόμη καθορίζεται ο σκοπός και τα κίνητρα που οδήγησαν στη δημιουργία της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

1.2 Ρομποτικά ακροδάχτυλα

Ένα από τους πιο σημαντικούς τομείς της ρομποτικής αποτελεί η έρευνα του χειρισμού αντικειμένων ποικίλων σχημάτων και ιδιοτήτων από ρομποτικούς βραχίονες, μιμούμενοι την κίνηση των ανθρώπινων χεριών και δαχτύλων. Το ακροδάχτυλο είναι ένας μηχανισμός συγκράτησης που παρέχει προσωρινή επαφή με ένα αντικείμενο ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ο απαιτούμενος χειρισμός. Εξασφαλίζει ότι η θέση και η διεύθυνση του αντικειμένου είναι αρκετά περιορισμένες ώστε να μας δώσει τη δυνατότητα να εκτελέσουμε τις απαιτούμενες διαδικασίες. Συνήθως ανάλογα με την εργασία που χρειάζεται να γίνει υπάρχουν και οι κατάλληλες αρπάγες που έχουν το ρόλο του ακροδαχτύλου. Μόνιμη επιδίωξη του ανθρώπου όσο αναφορά τα ρομποτικά ακροδάχτυλα

αποτελεί η αντιγραφή των ανθρώπινων χαρακτηριστικών. Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά στο οποίο υστερούν τα ρομποτικά ακροδάχτυλα έναντι των ανθρώπινων είναι η αίσθηση της αφής.

Τα ρομποτικά ακροδάχτυλα αποτελούν το μέσο με το οποίο ένας ρομποτικός βραχίονας «αγγίζει» ένα αντικείμενο.

Μέχρι πρόσφατα, τα περισσότερα ρομποτικά δάχτυλα ήταν άτεχνα και έμοιαζαν με τανάλιες. Είχαν πολύ περιορισμένες δυνατότητες και μπορούσαν να χειριστούν μικρή ποικιλία αντικειμένων. Αυτή η αντίληψη οδήγησε στην έρευνα ρομποτικών χεριών με μαλακά ανθρωπόμορφα δάχτυλα. Με την ανάπτυξη του κλάδου της ρομποτικής φάνηκε η ανωτερότητα των εύκαμπτων ακροδαχτύλων και έχουν πλέον πλήρως αντικαταστήσει τα άκαμπτα. Τα ρομποτικά ακροδάχτυλα μπορεί να είναι κυλινδρικά, σφαιρικά, ή ελλειψοειδή.



Εικόνα 1.1: Ρομποτικό χέρι κατά τη διάρκεια συγκράτησης αντικειμένου.

1.3 Σύγκριση μαλακών-σκληρών ακροδαχτύλων

Τα άκαμπτα ακροδάχτυλα που χρησιμοποιούνταν τα προηγούμενα χρόνια ήταν άτεχνα και έκαναν δύσκολο τον χειρισμό των αντικειμένων διότι δεν εφάπτονται καλά με το αγγιζόμενο αντικείμενο. Εφαρμόζουν σημειακές δυνάμεις τριβής για αυτό το λόγο δεν παρέχεται αρκετή σταθερότητα. Επίσης, εφόσον δεν μπορούν να αλλάξουν σχήμα μπορούν να χειριστούν μόνο αντικείμενα που έχουν συγκεκριμένα σχήματα και επιφάνειες που να ταιριάζουν με αυτές των ακροδαχτύλων.

Η ικανότητα του να δημιουργηθεί μια σταθερή λαβή αντικειμένου αυξάνεται σημαντικά με τη χρήση μαλακών ακροδαχτύλων. Αυτό γίνεται διότι **τα μαλακά ακροδάχτυλα παραμορφώνονται κατά τη διάρκεια της επαφής έτσι αυξάνεται η επιφάνεια επαφής και κατά συνέπεια εφαρμόζουν δυνάμεις τριβής σε**

μεγαλύτερο μέρος του αγγιζόμενου αντικειμένου. Ακόμη τα παραμορφώσιμα ακροδάχτυλα είναι ικανά να εκτελέσουν διάφορες κινήσεις στρέψης ενός αντικειμένου ενώ το συγκρατούν. Η κατασκευή ρομποτικών ακροδαχτύλων με την ικανότητα προσαρμογής τους πάνω στην επιφάνεια επαφής του αντικειμένου εμπλουτίζει με επιδεξιότητα τους χειρισμούς του αντικειμένου αυξάνοντας το χώρο εργασίας και κάνει δυνατή την λαβή των αντικειμένων επιτρέποντας μικρότερες δυνάμεις συγκράτησης. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των μαλακών ακροδαχτύλων είναι το ότι λειτουργούν σαν «μαξιλαράκια» και δεν καταπονούν τις αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού καθώς προκαλούν μικρότερα κρουστικά φορτία.

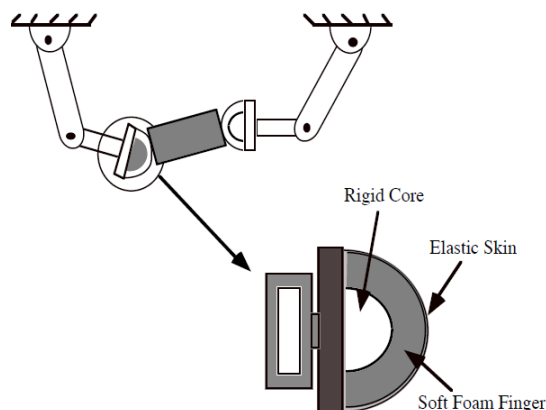
Όταν μιλάμε για επιδέξιο χειρισμό αντικειμένων τότε τα εύκαμπτα ακροδάχτυλα υπερτερούν των άκαμπτων κατά πολύ. Τα άκαμπτα περιορίζονται σε συγκεκριμένες διαδικασίες οι οποίες δεν απαιτούν επιδεξιότητα.

1.4 Μελέτη της κίνησης κύλισης παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων από τους Chang και Cutkosky

Σε προηγούμενες έρευνες αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν οι κινηματικές εξισώσεις κύλισης άκαμπτου σώματος που δεν λαμβάνουν υπ' όψη το φορτίο και τις παραμορφώσεις του ακροδαχτύλου ανάλογα με το αντικείμενο. Όταν χρησιμοποιούνται ακροδάχτυλα που φέρουν ελαστομερή υλικά ή υλικά όπως υγρά κάτω από μία μεμβράνη, είναι σημαντικό να λογαριαστούν οι ιδιότητες τους κατά τη διάρκεια του χειρισμού αντικειμένων.

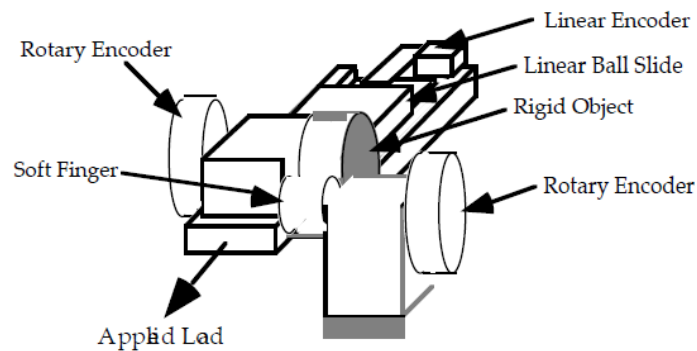
Για αυτό το λόγο οι Dean C. Chang και Mark R. Cutkosky στην εργασία [1] προσδιόρισαν τα κινηματικά αποτελέσματα των μαλακών ακροδαχτύλων κατά τη διάρκεια του χειρισμού που περιλαμβάνει κύλιση.

Μελετήθηκε το πρόβλημα της κινηματικής στην κύλιση με τους επιπλέον παράγοντες μιας δύναμης που ασκείται ανάμεσα στο δάχτυλο και το αντικείμενο και ότι το δάχτυλο είναι συμπίεστο. Απλοποιώντας την ανάλυση, περιορίστηκε η μελέτη μόνο στην κύλιση και όχι στην ολίσθηση σε δύο διαστάσεις.



Εικόνα 1.2 : Χειρισμός αντικειμένου με μαλακά (αφρώδη) ακροδάχτυλα

Τα πειράματα περιελάμβαναν ένα άκαμπτο κύλινδρο ακτίνας 25.4mm που αντιπροσώπευε το άκαμπτο αντικείμενο και μαλακά κυλινδρικά ακροδάχτυλα διάφορων ακτινών από 6.4 mm έως 25.4mm και διαφόρων υλικών. Τα ακροδάχτυλα ήταν τοποθετημένα σε άξονες με ρουλεμάν χαμηλής τριβής. Ο κύλινδρος ήταν τοποθετημένος σε ένα εξάρτημα γραμμικής ολίσθησης και κρατημένος απέναντι στα ακροδάχτυλα. Οπτικοί κωδικοποιητές ήταν τοποθετημένοι στους άξονες και μετρούσαν πόσο περιστρεφόταν ο κύλινδρος και τα μαλακά ακροδάχτυλα. Ένας τρίτος οπτικός κωδικοποιητής ήταν τοποθετημένος στο γραμμικό ολισθητή και μετρούσε την εκτροπή του μαλακού ακροδαχτύλου. Σε αυτά τα πειράματα τα μαλακά ακροδάχτυλα οδηγούσαν τον άκαμπτο κύλινδρο σε πολλαπλές περιστροφές. Οι περιστροφές του άκαμπτου κυλίνδρου καταγράφονταν μετά από κάθε περιστροφή του ακροδαχτύλου και υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο. Οι εκτροπές των μαλακών ακροδαχτύλων επίσης καταγράφονταν. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε μαλακό δάχτυλο μέσα από μια μεγάλη εμβέλεια από δυνάμεις: 0.10N, 0.20N, 0.34N, 0.49N, 0.74N, 0.98N, 1.47N, 1.96N, 2.94N, 4.91N, 6.87N, 9.81N.



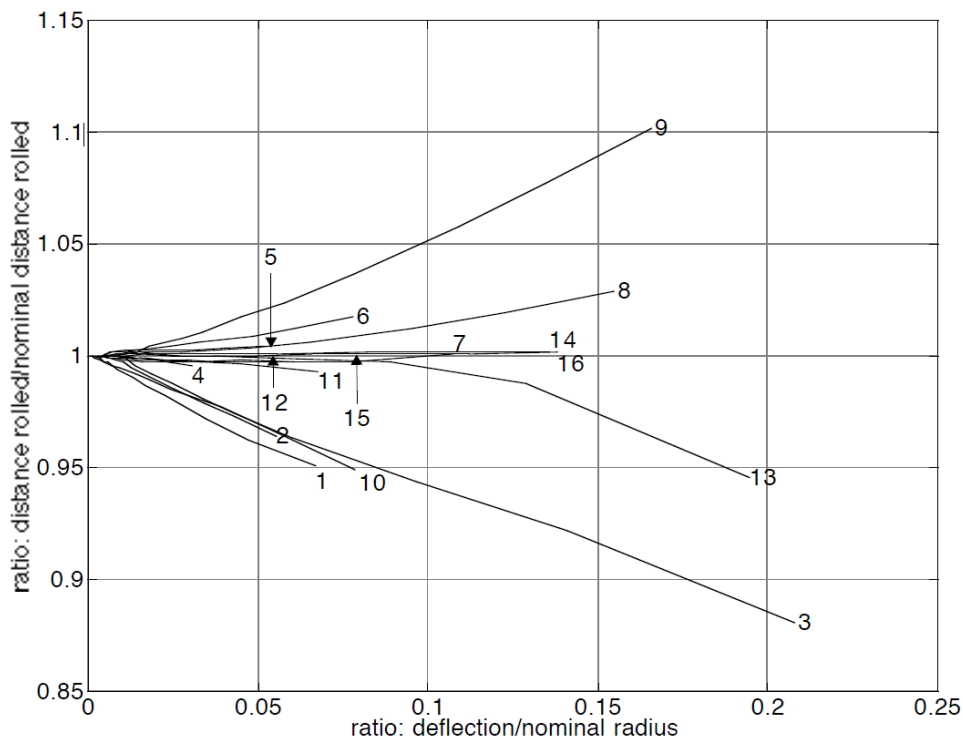
Εικόνα 1.3 : Διάταξη που προτείνεται στην εργασία [1]

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εργασία στην οποία αναφέρεται το κεφάλαιο 1.4.

Τα μαλακά ακροδάχτυλα διαιρούνται σε 3 γενικές ομάδες. Οι κύλινδροι από αφρώδη υλικά και αυτοί γεμάτοι αέρα έχουν φθίνουσα γραμμική σχέση μεταξύ της αναλογίας της απόστασης κύλισης και της αναλογίας της παραμόρφωσης. Η εικόνα 1.5 δείχνει ότι οι διαφορετικές ακτίνας μεμβράνες από καουτσούκ με αφρό και γεμάτες αέρα, έχουν σχεδόν όμοιες σχέσης απόστασης/απόκλισης. Για αυτό το λόγο η συμπεριφορά του κυλίνδρου με αφρό μοιάζει να είναι ανεξάρτητη από την ακτίνα του. Στο μεγαλύτερο φορτίο 9.81N αποκλίσεις ακτίνας 9-10% προκαλούν περίπου 5% μείωση στην απόσταση κύλισης. Ο κύλινδρος με αφρό ακτίνας 19.1mm δείχνει την ίδια σχέση, αλλά έχει μικρότερο άκαμπτο πυρήνα από ότι οι μεγαλύτεροι κύλινδροι με αφρό.

#	material	radius (mm)	core radius (mm)	E (N/m ²)	fric. coeff, μ
1	foam	25.4	12.7	5.9e5	0.2
2	foam	22.2	12.7	5.9e5	0.2
3	foam	19.1	9.5	5.9e5	0.2
4	silastic	25.4	3.2	1.19e6	0.5
5	silastic	12.7	3.2	1.19e6	0.5
6	silastic	6.4	3.2	1.19e6	0.5
7	dpr	25.4	3.2	2.5e5	0.5
8	dpr	12.7	3.2	2.5e5	0.5
9	dpr	6.4	3.2	2.5e5	0.5
10	air-filled	25.4	9.5	6.0e5	0.5
11	foam/tape	25.4	12.7	5.9e5	0.2
12	foam/tape	22.2	12.7	5.9e5	0.2
13	foam/tape	19.1	9.5	5.9e5	0.2
14	dpr/tape	12.7	3.2	2.5e5	0.5
15	silastic/tape	6.4	3.2	1.19e6	0.5
16	dpr/tape	6.4	3.2	2.5e5	0.5

Εικόνα 1.4: Ιδιότητες των κυλίνδρων που εξετάστηκαν



Εικόνα 1.5: Κανονικοποιημένη απόσταση κύλισης με τη συμπίεση του ακροδαχτύλου

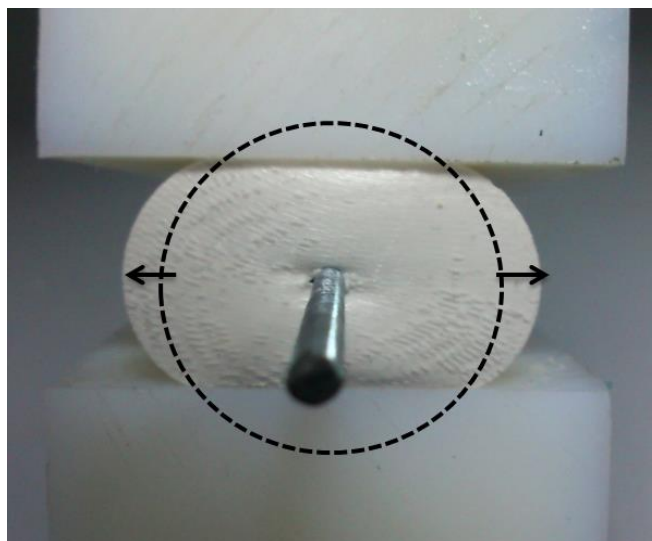
Ο μακροπρόθεσμος στόχος της εργασίας αυτής είναι να παράγει ένα μοντέλο κύλισης με μαλακά ακροδάχτυλα που θα μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα σύστημα ελέγχου πραγματικού χρόνου και θα παράγει τις καλύτερες δυνατές τρέχουσες εκτιμήσεις του σημείου επαφής και ταχύτητας όταν σχεδιάζεται ή εκτελείται κύλιση.

1.5 Κίνηση κύλισης παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου

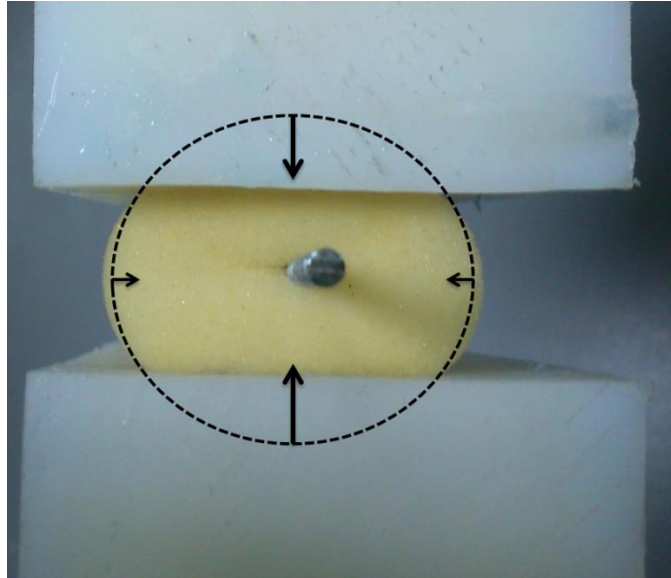
Το ακροδάχτυλο έχει τη δυνατότητα κύλισης πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου με την αλλαγή της κλίσης του τελευταίου συνδέσμου ως προς την επιφάνεια επαφής. Από την εργασία των Chang και Cutkosky [1] βρέθηκε ότι για παραμορφώσιμα ακροδάχτυλα η απόσταση κύλισης δύναται να είναι ίση, μικρότερη ή και μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στο άκαμπτο ακροδάχτυλο. Πιο συγκεκριμένα επισήμαναν στηριζόμενοι σε πειραματικά αποτελέσματα ότι:

«Στις περισσότερες περιπτώσεις ακόμα και μέτρια συμπίεση της τάξεως 10% της αρχικής ακτίνας του παραμορφώσιμου υλικού επιφέρει αλλαγή στην απόσταση κύλισης του ακροδαχτύλου πάνω στην επιφάνεια επαφής».

Ο κύριος λόγος που προκαλεί την αλλαγή στην απόσταση κύλισης είναι η περιφερειακή τάση που δημιουργείται από την παραμόρφωση στην εξωτερική επιφάνεια του ακροδαχτύλου, καθώς αυτό πιέζει το αντικείμενο. Ανάλογα με την συμπιεστότητα του υλικού που χρησιμοποιείται, είναι δυνατό να προκληθεί μείωση ή ακόμα και αύξηση της περιφέρειας του ακροδαχτύλου. Προκαλώντας έτσι αντίστοιχη μεταβολή στην απόσταση κύλισης. Η χρήση παραμορφώσιμων συμπιεστών υλικών, όπως αφρώδη πλαστικά, ελαστικά υλικά με αέρα σε πίεση, κ.α. έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής περιφέρειας του ακροδαχτύλου και κατά συνέπεια της απόστασης κύλισης. Ο συνολικός όγκος των παραπάνω υλικών μειώνεται κατά την διάρκεια της παραμόρφωσης σε σχέση με αυτόν που έχουν στην ελεύθερη τους κατάσταση. Υλικά παραμορφώσιμα, αλλά μη συμπιεστά, όπως καουτσούκ, σιλικόνη κ.α. έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής περιφέρειας του ακροδαχτύλου και κατά συνέπεια της απόστασης κύλισης και του αρχικού τους όγκου.



Εικόνα 1.6: Περιφερειακή τάση παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου για μη συμπιεστό υλικό.



Εικόνα 1.7: Περιφερειακή τάση παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου για συμπιεστό υλικό

Η κίνηση της κύλισης μοντελοποιείται θεωρώντας, ότι η μεταβολή της περιφέρειας του ακροδαχτύλου, λόγω της περιφερειακής τάσης που δημιουργείται, αντιστοιχεί σε αλλαγή της ακτίνας κύλισης. Έτσι, για τα παραμορφώσιμα συμπιεστά υλικά θεωρούμε ότι, το κεντρικό σημείο c_i της επιφάνειας επαφής κινείται στην φανταστική περιφέρεια του εσωτερικού κύκλου μεταβλητής ακτίνας $\bar{r}(t) = r - \Delta x_i(t) > 0$, ενώ για την περίπτωση των παραμορφώσιμων αλλά μη συμπιεστών υλικών σε κύκλο ακτίνας $\bar{r}(t) = r + \Delta x_i(t)$. Όπου r η ακτίνα του ακροδαχτύλου και Δx_i η μέγιστη συμπίεση του.

1.6 Μοντέλο για τον υπολογισμό της απόστασης κύλισης παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου κατά την κίνηση του πάνω σε επίπεδη άκαμπτη επιφάνεια

Έχει προταθεί στην εργασία [2] ένα γενικό μοντέλο για τον υπολογισμό της απόστασης κύλισης παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου πάνω σε επίπεδη επιφάνεια το οποίο εξαρτάται από μια σταθερά a . Σύμφωνα με την εργασία αυτή θεωρούμε ότι για οποιοδήποτε παραμορφώσιμο υλικό, η ακτίνα κύλισης του ακροδαχτύλου μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση

$$\tilde{r}(t) = r + a \Delta x_i(t) \quad (1)$$

όπου $a \in \mathcal{R}$ μια σταθερά, την οποία ονομάζουμε **σταθερά κύλισης** και Δx_i η μέγιστη συμπίεση του ακροδαχτύλου.

Επίσης, λαμβάνουμε:

$$\ell(t) = \int_0^t (r + \alpha \Delta x_i(t)) |\dot{\phi}_i(t)| dt \quad (2)$$

όπου r η ακτίνα του ακροδαχτύλου, α η σταθερά κύλισης η οποία εξαρτάται από το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται, Δx_i η μέγιστη συμπίεση του ακροδαχτύλου και ϕ_i η γωνία περιστροφής του ακροδαχτύλου με βάση τον αρχικό του προσανατολισμό. Το t είναι το πλαίσιο αναφοράς που βρίσκεται στο άκρο του τελευταίου συνδέσμου του ρομποτικού δαχτύλου.

Στην παρούσα εργασία έχουν καταγραφεί και εκφραστεί σε διαγράμματα τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν την απόσταση κύλισης κυλινδρικών και σφαιρικών ακροδαχτύλων κατασκευασμένα από διάφορα παραμορφώσιμα υλικά (Παράρτημα Α'). Τα διαγράμματα αυτά συνδέουν το ποσοστό συμπίεσης $\frac{\Delta x_i}{r}$ για σταθερά Δx_i με το ποσοστό μεταβολής της απόστασης $\frac{\ell(t)}{L(t)}$.

Η ποσότητα $L(t) = r[\phi_i(t) - \phi_i(0)]$ αποτελεί την απόσταση κύλισης που αντιστοιχεί στο άκαμπτο ακροδάχτυλο ακτίνας r . Για το μαθηματικό μοντέλο κύλισης η σχέση η οποία συνδέει την παραπάνω κανονικοποιημένη συμπίεση $\frac{\Delta x_i}{r}$ με αυτή της απόστασης κύλισης $\frac{\ell(t)}{L(t)}$, είναι γραμμική και δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\ell(t)}{L(t)} = 1 + \alpha \frac{\Delta x_i}{r} \quad (3)$$

1.7 Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να επαληθεύσει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη των Chank και Cutkosky όσο αναφορά την απόσταση κύλισης παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων που κυλούν σε άκαμπτη επιφάνεια και να εξετάσει επιπλέον ακροδάχτυλα διαφορετικού σχήματος, ακτίνας αλλά και υλικού. Πιο συγκεκριμένα η παρούσα εργασία επιχειρεί να επιβεβαιώσει τη φθίνουσα γραμμική σχέση μεταξύ αναλογίας της απόστασης κύλισης και της αναλογίας της παραμόρφωσης που παρατηρείται στα αφρώδη υλικά και την αντίστοιχη αύξουσα γραμμική σχέση που παρατηρείται στα σιλικονούχα υλικά.

Κατασκευάστηκε λοιπόν μία νέα διάταξη βάση της προτεινόμενης διάταξης της εργασίας [1] και χρησιμοποιήθηκαν νέα υλικά με διαφορετικές ακτίνες για τη λήψη δεδομένων. Υπολογίστηκε η απόσταση κύλισης των υλικών αυτών κατά την κίνηση τους σε άκαμπτη επιφάνεια και από τα αποτελέσματα δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα που συνδέουν το ποσοστό συμπίεσης $\frac{\Delta x_i}{r}$ για σταθερά Δx_i με το ποσοστό μεταβολής της απόστασης $\frac{l(t)}{L(t)}$. Τα διαγράμματα αυτά μελετήθηκαν και τα συμπεράσματα από την εργασία [11] φάνηκε να επαληθεύονται για τα αφρώδη και τα σιλικονούχα υλικά. Εκτός από τα κυλινδρικά ακροδάχτυλα όπως στην εργασία [1] δημιουργήθηκαν επιπλέον τα σφαιρικά ακροδάχτυλα για κάθε υλικό από τα οποία προήλθαν νέα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2

Σχεδιασμός και κατασκευή καλουπιών για σφαιρικά και κυλινδρικά ακροδάχτυλα

2.1 Εισαγωγή

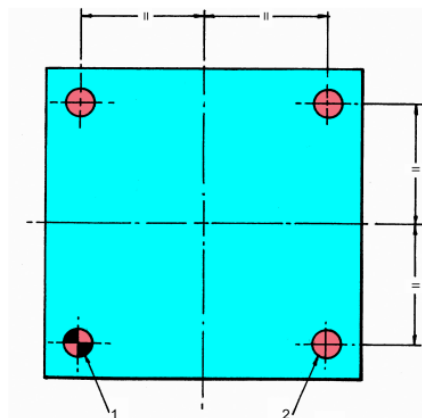
Για την κατασκευή των ακροδαχτύλων χρειάστηκε να δημιουργηθούν και να χρησιμοποιηθούν καλούπια. Τα καλούπια είναι εξαρτήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για να χυθούν μέσα σε αυτά ρευστά υλικά και να πήξουν εκεί ώστε να πάρουν το συγκεκριμένο σχήμα το οποίο σχεδιάστηκε το καλούπι να δώσει. Κόιλος χώρος ή χώρος πληρώσεως ονομάζεται ο χώρος στον οποίο μορφοποιείται το υλικό που βρίσκεται σε παχύρρευστη κατάσταση, ο χώρος δηλαδή που δίνει μορφή στο αντικείμενο. Για την κατασκευή των ακροδαχτύλων της εργασίας μας δημιουργήθηκε ένα καλούπι για σφαιρικά ακροδάχτυλα το οποίο περιείχε και τις τέσσερις διαφορετικές ακτίνες των σφαιρικών ακροδαχτύλων, και τέσσερα διαφορετικής διαμέτρου καλούπια για κυλινδρικά ακροδάχτυλα. Το καλούπια μπορεί να είναι είτε μιας χρήσης είτε πολλαπλών χρήσεων. Τα καλούπια της παρούσας εργασίας είναι καλούπια πολλαπλών χρήσεων και χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή όλων των ακροδαχτύλων. Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή των καλουπιών αυτών.

2.2 Σχεδιασμός καλούπιού για σφαιρικά ακροδάχτυλα

Το καλούπι των σφαιρικών ακροδαχτύλων σχεδιάστηκε σε περιβάλλον proEngineer και στη συνέχεια κατασκευάστηκε στην CNC μηχανή του εργαστηρίου (HAAS VF-2).

Το CREO Elements είναι ένα παραμετρικό πρόγραμμα σχεδίασης με ενσωματωμένα 3D CAD/CAM/CAE συστήματα που δημιουργήθηκε από την Parametric Technology Corporation (PTC). Προσφέρει πληθώρα εργαλείων τα οποία είναι ικανά να παράγουν μια πλήρη ψηφιακή αναπαράσταση του προϊόντος που σχεδιάζεται. Για την σχεδίαση του καλούπιού των σφαιρικών ακροδαχτύλων μας βοήθησε ένα επιμέρους πρόγραμμα σχεδιασμού του ProEngineer που λέγεται Pro/Moldesign το οποίο παρέχει στο χρήστη εργαλεία προσομοίωσης της διαδικασίας σχεδιασμού ενός καλούπιού, μέσω της γεωμετρίας των αντικειμένων του παραμετρικού CAD, CAM, CAE λογισμικού Pro/Engineer.

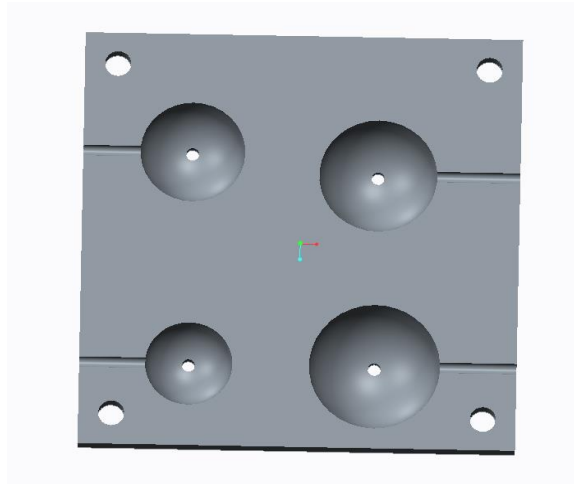
Σχεδιάστηκε καλούπι για σφαιρικά ακροδάχτυλα ακτινών 10, 14, 16 και 20 χιλιοστών. Το καλούπι αποτελούνταν από δυο τμήματα. Τα δύο αυτά επιμέρους τμήματα θα έπρεπε να ευθυγραμμίζονται απόλυτα για αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν οι τέσσερις τρύπες στις άκρες του κάθε κομματιού ώστε αργότερα να εισέλθουν εκεί τέσσερις κοχλίες στο ρόλο των στηλών οδηγήσεως (εικόνα 2.1) για να βοηθήσουν στην συναρμολόγηση και να ευθυγραμμίσουν τα δύο κομμάτια του καλούπιού. Οι διαστάσεις του καλούπιού είναι 100 x 100 χιλιοστά και για τα δύο κομμάτια και το πάχος του κάθε κομματιού είναι 50 χιλιοστά.



Εικόνα 2.1: Στύλοι οδηγήσεως του καλούπιού σφαιρικών ακροδαχτύλων

Ακόμη στο καλούπι υπάρχουν τα απαραίτητα «αυλάκια» τα οποία βοηθούν στην ελαχιστοποίηση των φυσαλίδων καθώς βοηθούν στην απαγωγή του αέρα από τον κοίλο χώρο του καλούπιού. Επίσης είναι απαραίτητα κατά τη διάρκεια της

χύτευσης διότι μας δείχνουν πότε γέμισε ο χώρος πλήρωσεως ώστε να διακόψουμε τη διαδικασία. Στην εικόνα φαίνεται ο τρόπος σχεδιασμού του καλούπιου ώστε να μπορεί να χυτευτεί η σιλικόνη και να φύγει ο αέρας από τις τρύπες. Ένα άλλο στοιχείο του καλούπιου είναι οι τρύπες στη μέση κάθε σφαίρας οι οποίες υπάρχουν ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί διαμέσου της σφαίρας ο άξονας που θα καθιστά δυνατό στο σφαιρικό ακροδάχτυλο να τοποθετείται στην διάταξη που παρουσιάζεται σε παρακάτω κεφάλαιο.

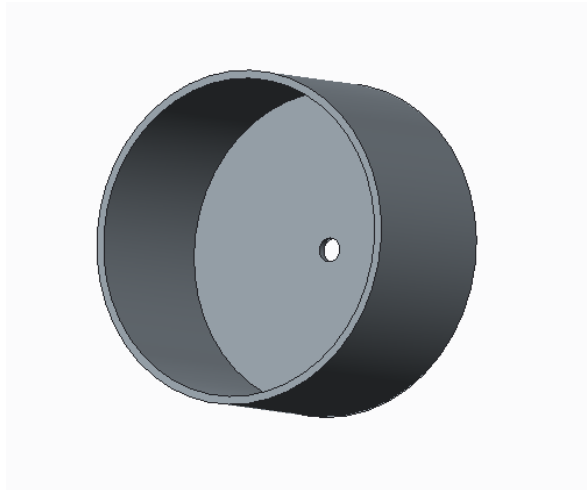


Εικόνα 2.2: Καλούπι σφαιρικών ακροδαχτύλων σε περιβάλλον pro Engineer 100x100x50 mm

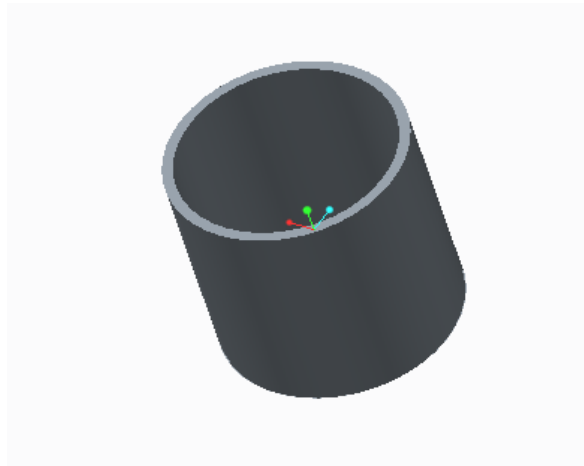
2.3 Σχεδιασμός καλούπιου για κυλινδρικά ακροδάχτυλα

Τα καλούπια για τα κυλινδρικά ακροδάχτυλα σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον proEngineer και εκτυπώθηκαν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου Dimension Elite με τη βοήθεια του λογισμικού CatalystEX Ver. 4.2.

Για τα καλούπια των κυλινδρικών ακροδαχτύλων ο σχεδιασμός ήταν πιο απλός διότι το σχήμα είναι πιο απλό και δεν είχαμε να αντιμετωπίσουμε το θέμα της απαγωγής του αέρα από το καλούπι μιας και το καλούπι δεν ήταν κλειστό αλλά αποτελούνταν από μόνο ένα κομμάτι. Όλα τα καλούπια ήταν σχεδιασμένα να έχουν μια τρύπα στη μέση ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί άξονας 3 χιλιοστών (ομοίως με τα καλούπια για τα σφαιρικά ακροδάχτυλα, για να τοποθετηθούν στη διάταξη). Σχεδιάστηκαν καλούπια για κυλινδρικά ακροδάχτυλα ακτίνας 10, 14, 16 και 20 χιλιοστών.



Εικόνα 2.3: Καλούπι κυλινδρικών ακροδαχτύλων ($r=20\text{mm}$) σε περιβάλλον proEngineer



Εικόνα 2.4: Καλούπι κυλινδρικών ακροδαχτύλων ($r=10\text{mm}$) σε περιβάλλον proEngineer

2.4 Κατασκευή καλουπιού σφαιρικού ακροδαχτύλου

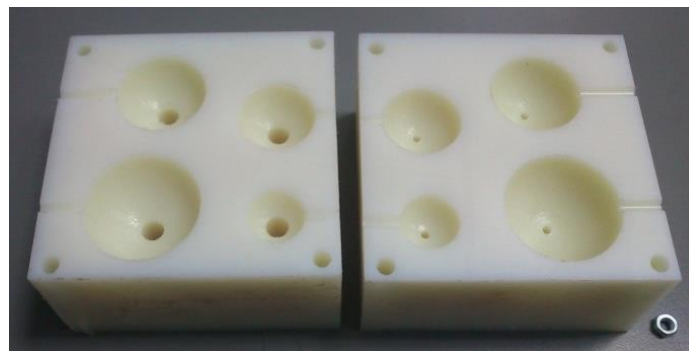
Το καλούπι για τα σφαιρικά ακροδάχτυλα κατασκευάστηκε από τη CNC μηχανή του εργαστηρίου ρομποτικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

Τα CNC (Computer Numerically Controlled Systems) του εργαστηρίου όπως και όλα τα CNC, χρησιμοποιούν έναν υπολογιστή μέσω του οποίου μεταβιβάζονται οι επιθυμητές εντολές στα μέσα κατεργασίας του μηχανήματος και εκτελούνται οι διάφορες εργασίες. Αυτός ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ελέγχει όλες τις κατεργασίες. Ο προγραμματισμός του CNC για την κατασκευή των καλουπιών μας έγινε στο μηχανολογικό σχέδιο του τεμαχίου όπου και δόθηκαν οι απαραίτητες πληροφορίες γεωμετρίας για να μπορέσει η μηχανή να το κατασκευάσει.



Εικόνα 2.5: CNC μηχανή HAAS VF-2 (εργαστήριο ρομποτικής Τ.Ε.Ι Κρήτης)

Στη συνέχεια το πρόγραμμα proEngineer έβγαλε τον κώδικα g τον οποίο διάβασε η μηχανή και κατασκεύασε το καλούπι μας. Χρησιμοποιήθηκε υλικό ertalon για τη δημιουργία του καλουπιού και ο χρόνος που έκανε η μηχανή να κατασκευάσει το καλούπι ήταν περίπου 50 λεπτά.



Εικόνα 2.6: Καλούπι δημιουργίας σφαιρικών ακροδαχτύλων 100x100x50 mm

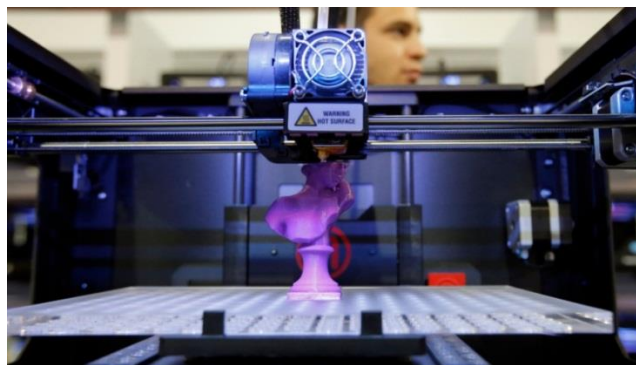
2.5 Κατασκευή καλουπιού κυλινδρικού ακροδαχτύλου

Τα καλούπια των κυλινδρικών ακροδαχτύλων εκτυπώθηκαν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή Dimension elite του εργαστηρίου ρομποτικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης.



Εικόνα 2.7: Εκτυπωτής Dimesion elite

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια διαδικασία κατασκευής κατά την οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές δημιουργούν σχεδόν οποιοδήποτε σχήμα ή γεωμετρικό χαρακτηριστικό όσο περίπλοκο κ αν είναι χρησιμοποιώντας ακριβώς όσο υλικό είναι αναγκαίο. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή πρωτοτύπων.



Εικόνα 2.8: Τρισδιάστατη εκτύπωση

Το σχέδιο μας μετατράπηκε σε μορφή .stl στάλθηκε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή μέσω του λογισμικού CatalystEX Ver. 4.2 και εκτυπώθηκε.



Εικόνα 2.9: Καλούπια κυλινδρικών ακροδαχτύλων εσωτερικής ακτίνας 10, 14, 16 και 20 χιλιοστων αντίστοιχα (απο αριστερα προς τα δεξιά)

Ο χρόνος της διαδικασίας εκτύπωσης ποίκιλε ανάλογα με το μέγεθος του καλουπιού από 15 έως 35 λεπτά.

2.6 Υλικά καλουπιών ακροδαχτύλων

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των σφαιρικών ακροδαχτύλων ήταν διαφορετικό από εκείνο των κυλινδρικών διότι τα σφαιρικά ως πιο πολύπλοκα και αποτελούμενα από δύο μέρη δημιουργήθηκαν σε CNC μηχανή, ενώ τα κυλινδρικά εκτυπώθηκαν στον 3D printer.

2.6.1 Υλικό καλουπιού σφαιρικών ακροδαχτύλων

Αρχική επιλογή για την δημιουργία του καλουπιού ήταν η χρησιμοποίηση του αφρώδες υλικού dow (εξηλασμένο πολυστυρένιο). Μετα από τα πρώτα πειράματα όμως η ιδέα εγκαταλείφθηκε λόγω της κακής εξωτερικής επιφάνειας που έδινε το dow στο τελικό ακροδάχτυλο.

Τελικά χρησιμοποιήθηκε το υλικό ertalon λόγω της καλής και εύκολης μηχανικής του κατεργασίας. Το ertalon είναι ένα είδος άκαμπτου πλαστικού το οποίο είναι γνωστό για τη μακροζωία του. Οι βασικές ιδιότητές του είναι οι εξής:

- α) Υψηλό επίπεδο αντίστασης ερπυσμού
- β) Μεγάλη αντίσταση ενάντια στο φαινόμενο της κόπωσης
- γ) Εξαιρετική αντοχή κατά της φθοράς
- δ) Υψηλά επίπεδα μηχανικής αντοχής

Το ertalon είναι διαθέσιμο σε μεγάλη ποικιλία από μορφές, κυρίως ράβδοι και φύλλα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Εμείς χρησιμοποιήσαμε ertalon σε μορφή κύβου.

2.6.2 Υλικό καλουπιού κυλινδρικών ακροδαχτύλων

Για τα κυλινδρικά ακροδάχτυλα μιας και η κατασκευή τους ήταν πιο απλή διότι βγήκαν από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή χρησιμοποιήθηκε το υλικό με το οποίο τυπώνει ο εκτυπωτής Dimension elite. Το υλικό αυτό είναι ένα κοινό

θερμοπλαστικό τύπου ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) και είναι διαθέσιμο σε πολλά χρώματα. Το ABS μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταξύ $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ και οι μηχανικές του ιδιότητες ποικίλουν ανάλογα με την θερμοκρασία. Έχει λαμπερή επιφάνεια και η αναλογίες του μπορεί να ποικίλουν. Οι αναλογίες που συνήθως συναντάμε το ABS είναι: 15%-35% ακρυλονιτρίλιο, 5%-30% βουταδιένιο, 40%-60% στυρόλιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΚΡΟΔΑΧΤΥΛΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζεται η δημιουργία των ακροδαχτύλων η οποία περιλαμβάνει τα υλικά απο τα οποία είναι κατασκευασμένα και τις ιδιότητές τους καθώς επίσης και την ακριβή διαδικασία κατασκευής τους. Απο τη χύτευσή τους δηλαδή μέσα στα καλούπια έως και την προσαρμογή τους στην διάταξη.

Στα πειράματα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα κυλινδρικά και τέσσερα σφαιρικά ακροδάχτυλα για καθένα απο τα από έξι διαφορετικά σιλικονούχα υλικά και δύο κυλινδρικά ακροδάχτυλα από αφρολέξ. Είχαμε δηλαδή ένα σύνολο πενήντα ακροδαχτύλων. Τόσο τα κυλινδρικά όσο και τα σφαιρικά ακροδάχτυλα ήταν ακτινών 10, 14, 16 και 20 χιλιοστών. Τα ακροδάχτυλα από αφρολέξ ήταν ακτίνας 17,5 χιλιοστών. Η σκληρότητα των επιλεγμένων υλικών ποίκιλε από πάρα πολύ μαλακά έως και πολύ σκληρά για να έχουμε ένα εύρη φάσμα δεδομένων. Υπήρχαν κυλινδρικά και σφαιρικά ακροδάχτυλα από σιλικόνες Wacker, σιλικόνες Essil 291 καθώς επίσης και δύο κυλινδρικά ακροδάχτυλα από αφρολέξ.

3.2 Υλικά κατασκευής ακροδαχτύλων

Επιλέχθηκαν υλικά με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε μεγάλη ποικιλία όσο αναφορά τη σκληρότητα των ακροδαχτύλων. Χρησιμοποιήθηκαν πολύ σκληρά υλικά, μέτριας σκληρότητας αλλά και πολύ μαλακά και αφρώδη. Οι σημαντικότερες ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται παρακάτω.

3.2.1 Σιλικόνες Wacker

Διατίθενται κυρίως σε υγρή παχύρρευστη μορφή αλλά και πλαθούμενου ή αλειφομένου τύπου, τα οποία με την προσθήκη του κατάλληλου καταλύτη υγρής μορφής ή πάστας βουλκανίζονται (στερεοποιούνται) σε συγκεκριμένο χρόνο ανάλογα τον τύπο της σιλικόνης, διατηρώντας ωστόσο την ελαστικότητά τους.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής σιλικόνες Wacker

- M-4512 Αρκετά μαλακή και με εξαιρετικές μηχανικές και χημικές ιδιότητες.
- M-4440 Μεγάλης σκληρότητας και σχετικά μικρής ελαστικότητας.
- M-4514 Μεσαίας σκληρότητας με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και μεγάλη αντοχή και διάρκεια ζωής υπό τη μακροχρόνια χρήση.
- M-4615 Πάρα πολύ μαλακή και με πολύ υψηλό συντελεστή ελαστικότητας (700%).



Εικόνα 3.1: Σιλικόνη Wacker

3.2.2 Σιλικόνη της εταιρίας AXSON, Essil 291

Η σιλικόνη αυτή έχει υψηλή διαφάνεια και καλή χημική αντίσταση προς πολυουρεθάνες. Αναμιγνύεται εύκολα και έχει πολύ χαμηλή συρρίκνωση κατά τη

σκλήρυνση της σε θερμοκρασία δωματίου. Ακόμη η σιλικόνη αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη χύτευση ρητινών.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ ESSIL 291

			Essil291/Essil292
Σκληρότητα	ISO 868:2003	Shore A1	38
αντοχή σε εφελκυσμό	ASTM D412C:1997	MPa	5
Επιμήκυνση στο όριο θραύσης	ASTM D412:1997	%	350
αντοχή στο σχίσιμο	ASTM D624B:1992	KN/m	24
Συντελεστής γραμμικής διαστολής	-	$10^{-4} K^{-1}$	3
γραμμική συρρίκνωση	-	%	<0.1
Γραμμική συρρίκνωση μετά από σκλήρυνση στους 70 ° C	-	%	<0.7

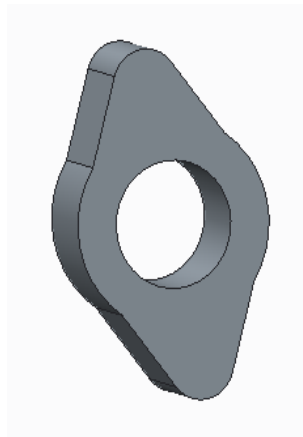
Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες σιλικόνης Essil 291



Εικόνα 3.3: Σιλικόνη ESSIL 291

3.3 Προσαρμογή άξονα μέσα στο ακροδάχτυλο

Για να μπορέσουν να προσαρμοστούν τα ακροδάχτυλα στη διάταξη χρειαζόταν ένας άξονας ο οποίος έπρεπε να περνάει από το κέντρο του κάθε ακροδαχτύλου. Ο άξονας αυτός τοποθετούνταν στο καλούπι πριν τη χύτευση. Θα έπρεπε ο άξονας αυτός να είναι σε θέση να στρέψει το ακροδάχτυλο χωρίς να γλιστράει και να γυρίζει ελεύθερα μέσα του. Έπρεπε δηλαδή με κάποιο τρόπο να πακτωθεί ο άξονας μέσα στο ακροδάχτυλο. Η λύση στου προβλήματος αυτού περιελάμβανε την εκτύπωση ενός εξαρτήματος στον τρισδιάστατο εκτυπωτή και την κόλληση του επάνω στον άξονα. Το εξάρτημα αυτό θα βρισκόταν στο κέντρο του κάθε ακροδαχτύλου. Είχε μια τρύπα 3 χιλιοστών στη μέση για να τοποθετείται ο άξονας και εξείχαν δύο μικρά «πτερύγια» από τις άκρες του για να συγκρατεί το εύπλαστο ακροδάχτυλο και να το αποτρέπει από το να κινηθεί χωρίς να παρασύρει τον άξονα.



Εικόνα 3.4: Εξάρτημα συγκράτησης ακροδαχτύλου στον άξονα



Εικόνα 3.5: Άξονας με προσαρμοσμένο το εκτυπωμένο εξάρτημα συγκράτησης του ακροδαχτύλου



Εικόνα 3.6: Άξονας με προσαρμοσμένο το εκτυπωμένο εξάρτημα συγκράτησης του ακροδαχτύλου

3.4 Διαδικασία δημιουργίας σφαιρικού ακροδαχτύλου

Για τα σφαιρικά ακροδάχτυλα εφόσον η διαδικασία δημιουργίας του καλουπιού είχε ολοκληρωθεί, τοποθετήθηκαν και στερεώθηκαν στο κέντρο του θαλάμου πληρώσεως για το κάθε ακροδάχτυλο οι άξονες (3 mm) οι οποίοι θα καθιστούσαν δυνατό να προσαρμοστεί η τελική μορφή των ακροδαχτύλων πάνω στην διάταξη.

Επόμενο βήμα ήταν η παρασκευή του μείγματος της σιλικόνης και σκληρυντικού σε αρκετή ποσότητα ώστε να γεμίσει το καλούπι. Κατά την ανάδευση του μείγματος ώστε να ομοιογενοποιηθούν τα δύο συστατικά της σιλικόνης στο μείγμα δημιουργήθηκαν φυσαλίδες αέρα. Για να απαλλαγούμε από τις φυσαλίδες αυτές τοποθετήσαμε το μείγμα στο θάλαμο κενού για 20 περίπου λεπτά.

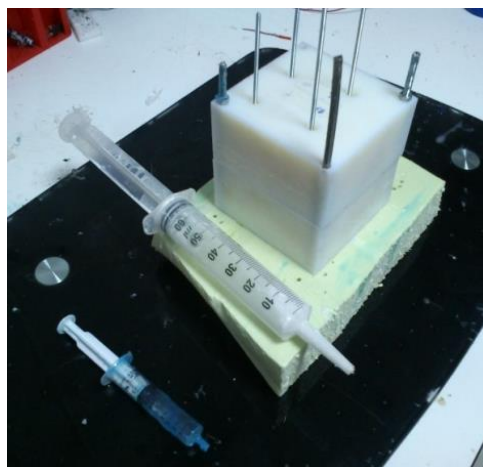


Εικόνα 3.7: Θάλαμος κενού

Ένας θάλαμος κενού είναι ένα άκαμπτο περίβλημα από το οποίο ο αέρας και τα άλλα αέρια απομακρύνονται με μία αντλία κενού. Αυτό οδηγεί σε ένα περιβάλλον χαμηλής πίεσεως εντός του θαλάμου το οποίο συνήθως αναφέρεται ως ένα κενό. Κατά τη διαδικασία της απαγωγής του αέρα στα μείγματά μας ο όγκος τους αυξανόταν 4-5 φορές και το υλικό έμοιαζε να είναι αφρώδες για αυτό το λόγο το δοχείο ανάμιξης ήταν αρκετά μεγαλύτερο από τον αρχικό όγκο του μείγματος.

Κάποια στιγμή μετά από αρκετά λεπτά το υλικό επέστρεψε στην αρχική του μορφή, σταμάτησε να είναι αφρώδες και ο όγκος του πήρε την αρχική του τιμή. Τότε είχε ολοκληρωθεί η απαγωγή του αέρα και το μείγμα ήταν πια έτοιμο για χύτευση στο καλούπι.

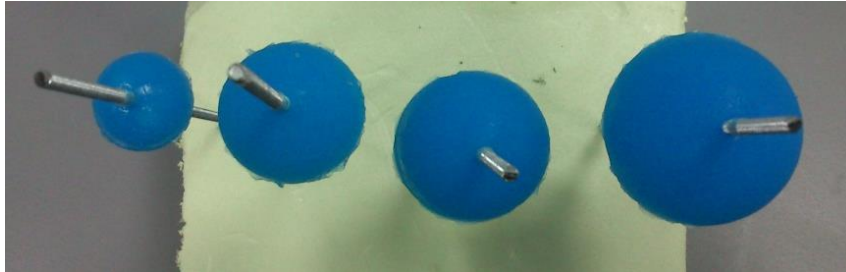
Για τη διαδικασία της χύτευσης χρησιμοποιήθηκε μια σύριγγα 100ml με την οποία το υλικό μας μπήκε στο καλούπι από τις τρύπες που υπήρχαν στο επάνω μέρος. Αφού γέμισε το καλούπι τοποθετήθηκε ξανά στο θάλαμο κενού για να απαλλαγούμε από τυχόν φυσαλίδες αέρα που δημιουργήθηκαν κατά τη διαδικασία της χύτευσης όπου και αφέθηκε για 10 ακόμη λεπτά.



Εικόνα 3.8: Χύτευση σιλικόνης σε καλούπι για σφαιρικά ακροδάχτυλα

Τέλος, για να επιταχυνθεί η διαδικασία πήξης του μείγματος το καλούπι τοποθετήθηκε στο φούρνο για περίπου 20 λεπτά και στους 85 βαθμούς Κελσίου.

Αφού είχε στεγνώσει ήταν έτοιμο πια για άνοιγμα και απομάκρυνση του χυτού από το καλούπι. Αφαιρέθηκαν οι κοχλίες οι οποίοι συγκρατούσαν τα δύο τμήματα του καλουπιού ενωμένα και σιγά σιγά το καλούπι ανοίχθηκε αποκαλύπτοντας τα σφαιρικά ακροδάχτυλα.



Εικόνα 2.9: Σφαιρικά ακροδάχτυλα Wacker 4615 ακτίνας 10, 14, 16 και 20 χιλιοστών αντίστοιχα (από αριστερά προς τα δεξιά)

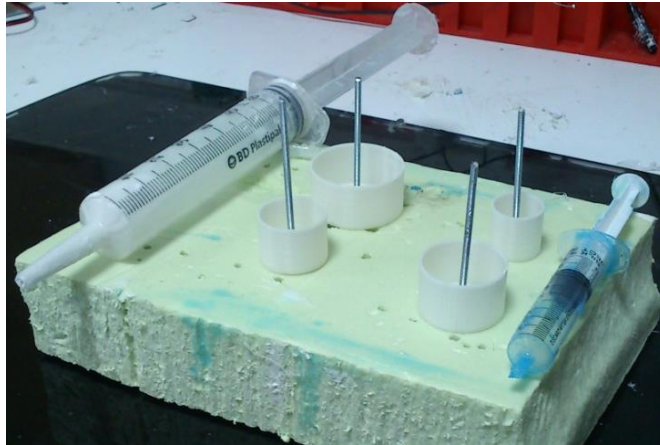
3.5 Διαδικασία δημιουργίας κυλινδρικού ακροδαχτύλου

Το καλούπι για τα κυλινδρικά ακροδάχτυλα είχε εκτυπωθεί από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή και ήταν έτοιμο για χρήση. Η διαδικασία ήταν παρόμοια με τα σφαιρικά ακροδάχτυλα.

Αρχικά τοποθετήθηκαν στις τρύπες στο κέντρο του κάθε καλουπιού οι άξονες 3 χιλιοστών με τους οποίους θα προσαρμοστούν τα ακροδάχτυλα στην διάταξη.

Στη συνέχεια παρασκευάστηκε το μείγμα σιλικόνης αρκετό ώστε να γεμίσουν τα καλούπια και τοποθετήθηκε στο θάλαμο κενού (ομοίως με το μείγμα για τα σφαιρικά ακροδάχτυλα) για να απομακρυνθούν από το μείγμα μας οι εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα (20 λεπτά).

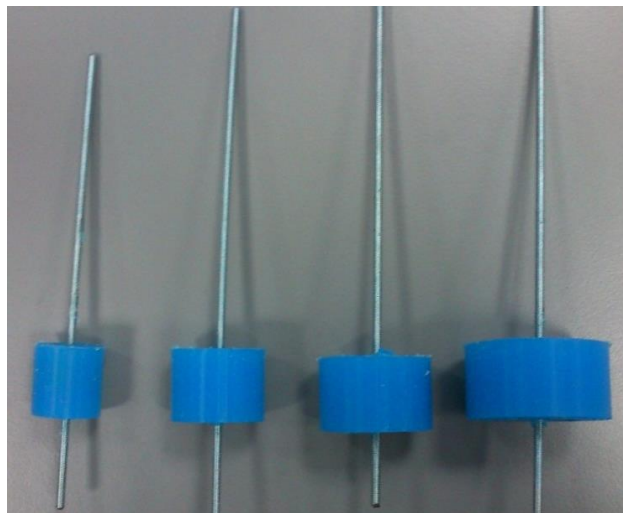
Όπως με τα σφαιρικά ακροδάχτυλα έτσι και στα κυλινδρικά κατά την χύτευση χρησιμοποιήθηκε σύριγγα 100ml και αφού τα καλούπια είχαν γεμίσει τοποθετήθηκαν ξανά στο θάλαμο κενού (10 λεπτά) για να αποφύγουμε τις φυσαλίδες αέρα που ίσως είχαν δημιουργηθεί από τη χύτευση.



Εικόνα 3.10: Χύτευση σιλικόνης σε καλούπι κυλινδρικών ακροδαχτύλων

Λόγο του ότι το καλούπι αποτελούνταν από ένα μόνο κομμάτι και ήταν ανοιχτό από τη μία μεριά θα έπρεπε να προσαρμόσουμε ένα επίπεδο (συνήθως φύλλα πλαστικού) το οποίο θα έκλεινε το καλούπι και θα εξασφάλιζε την καλή ποιότητα επιφάνειας του πάνω μέρους των ακροδαχτύλων. Επίσης με το επίπεδο αυτό δεν επιτρέπεται στο υλικό να ξεχειλίσει και να χαλάσει την ομοιομορφία του ακροδαχτύλου. Όπως και για τα κυλινδρικά ακροδάχτυλα, ο τρόπος επιτάχυνσης της πήξης του υλικού που επιλέχθηκε είναι η τοποθέτησή τους στο φούρνο όπου και παρέμειναν 20 λεπτά στους 85 βαθμούς Κελσίου.

Τα κυλινδρικά ακροδάχτυλα ήταν πια έτοιμα. Αφαιρέθηκε το επίπεδο κομμάτι και προσεκτικά να μην καταστραφεί το καλούπι βγήκαν τα ακροδάχτυλα.



Εικόνα 3.11: Κυλινδρικά ακροδάχτυλα Wacker 4615 ακτίνας 10, 14, 16 και 20 χιλιοστών αντίστοιχα (από αριστερά προς τα δεξιά)

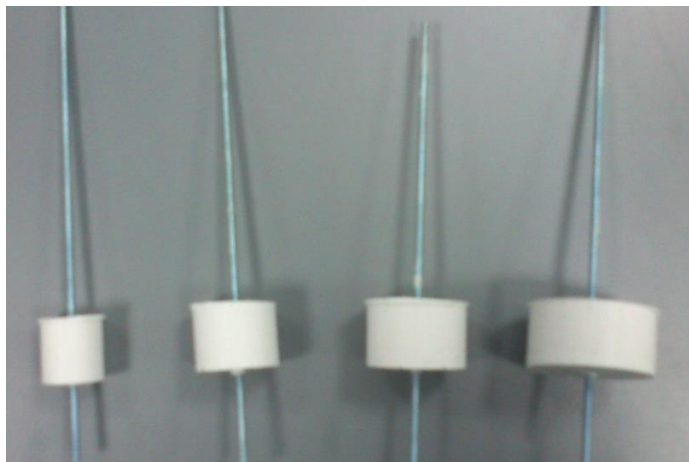
3.6 Παρουσίαση κατασκευασμένων ακροδαχτύλων

Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζεται το σύνολο των ακροδαχτύλων που κατασκευάστηκαν και είχαμε στη διάθεσή μας για την διεξαγωγή των μετρήσεων. Τόσο τα

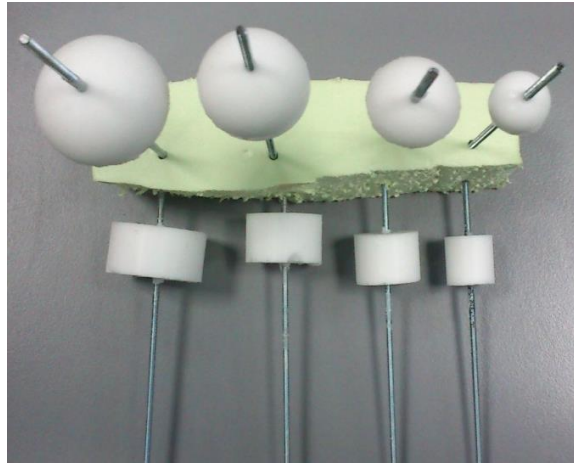
κυλινδρικά όσο και τα σφαιρικά σιλικονούχα ακροδάχτυλα είναι ακτίνων 10, 14, 16 και 20 χιλιοστών. Τα αφρώδη είναι ακτίνας 17.5 χιλιοστών ενώ δημιουργήθηκε και ένα κυλινδρικό σιλικονούχο ακτίνας 17.5 χιλιοστών



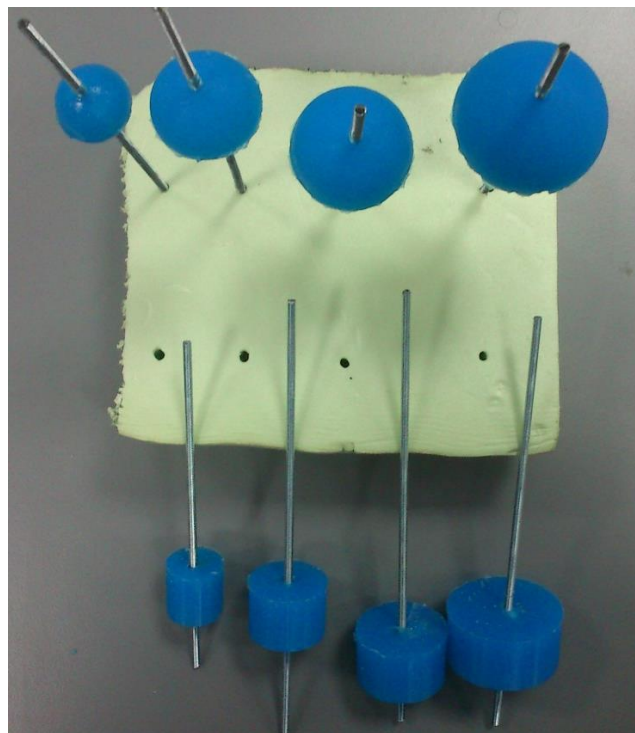
Εικόνα 3.12: Κυλινδρικά και σφαιρικά ακροδάχτυλα Wacker 4512



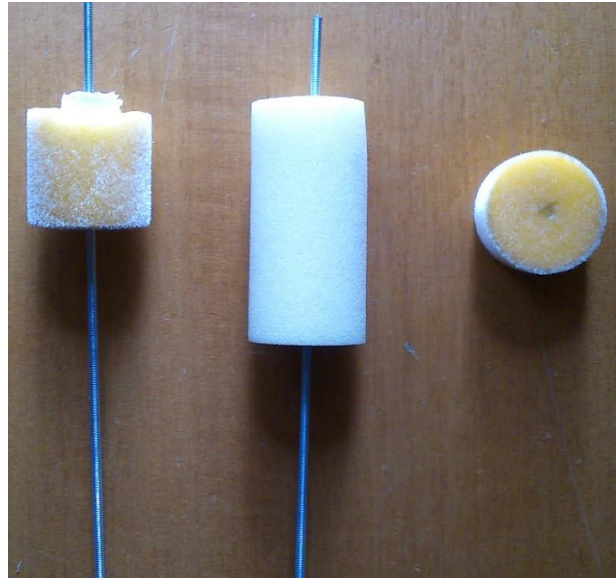
Εικόνα 3.13: Κυλινδρικά ακροδάχτυλα Wacker 4514



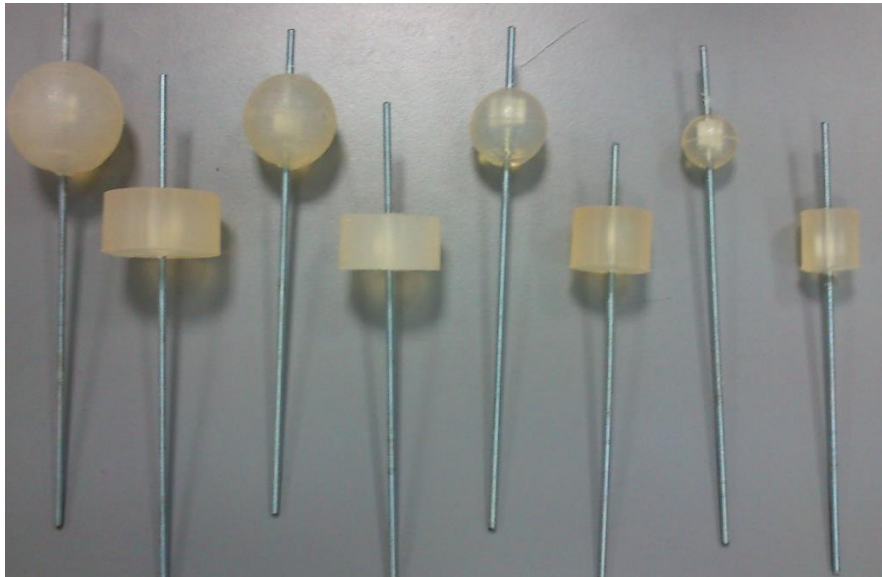
Εικόνα 3.14: Κυλινδρικά και σφαιρικά ακροδάχτυλα Wacker 4440



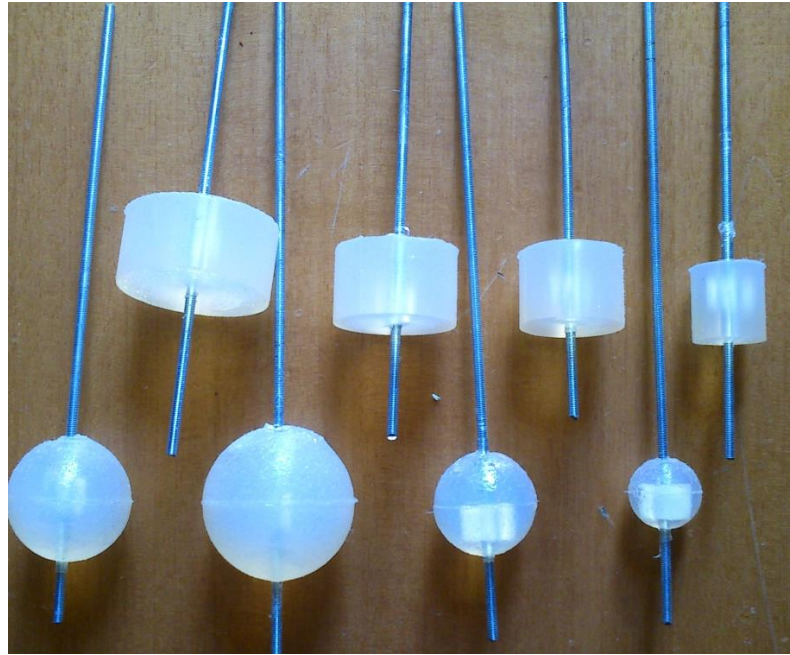
Εικόνα 3.15: Κυλινδρικά και σφαιρικά ακροδάχτυλα Wacker 4615



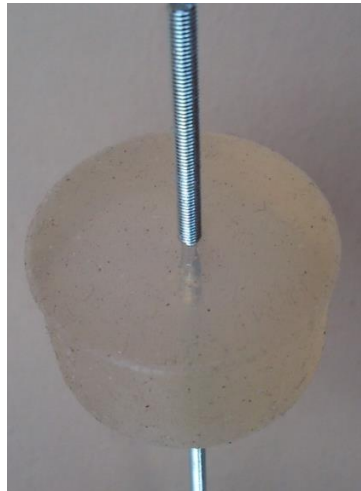
Εικόνα 3.16: Αφρώδη ακροδάχτυλα



Εικόνα 3.17: Κυλινδρικά και σφαιρικά ακροδάχτυλα ESSIL 291 αναλογίας 10 προς 1



Εικόνα 3.18: Κυλινδρικά και σφαιρικά ακροδάχτυλα ESSIL 291 αναλογίας 5 προς 1



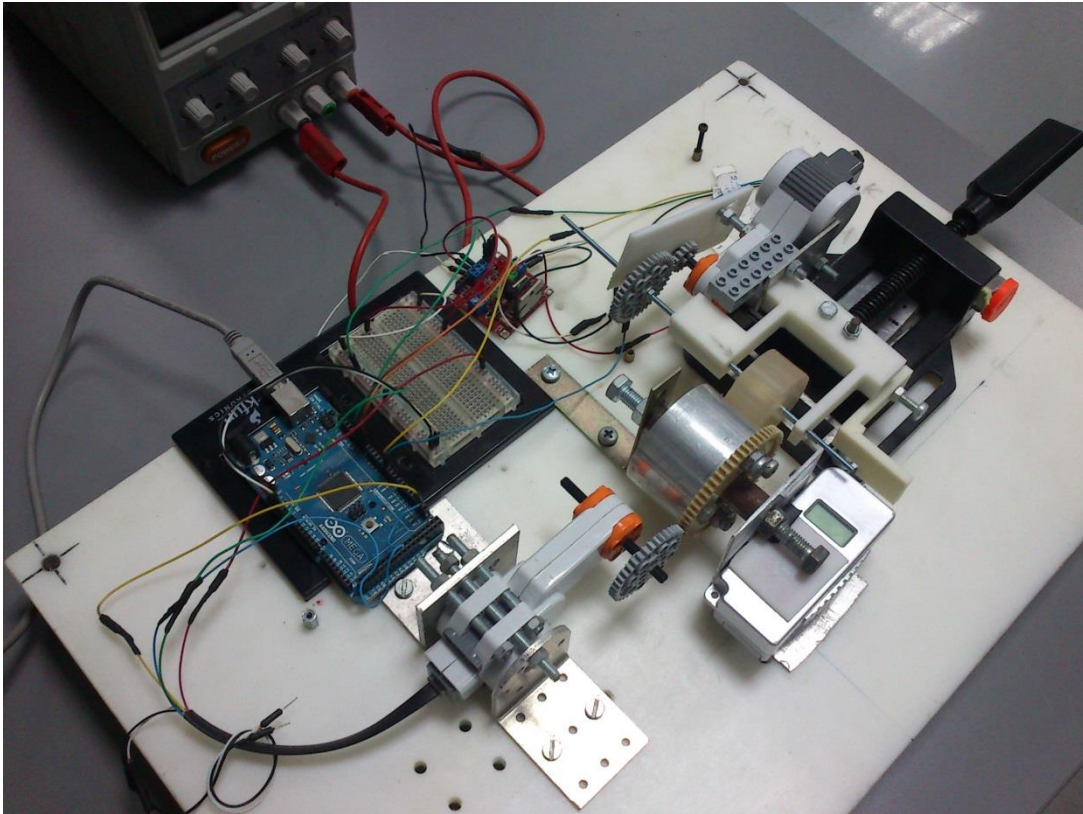
Εικόνα 3.19: Ακροδάχτυλο ESSIL 291 ακτίνας 17.5mm

Κεφάλαιο 4

Σχεδίαση και κατασκευή διάταξης μέτρησης της απόστασης κύλισης

4.1 Εισαγωγή

Όσο αναφορά την εκτέλεση των πειραμάτων σκοπός ήταν η κατασκευή μιάς διάταξης με την οποία θα ήταν δυνατό να μελετηθεί η συμπεριφορά παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων, ενώ πιέζονται και κυλούν πάνω σε άκαμπτη επιφάνεια. Η διάταξη είναι κατασκευασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί επάνω της να προσαρμοστεί εύκολα οποιοδήποτε ακροδάχτυλο και εξίσου εύκολα να αντικαθίσταται από κάποιου άλλου είδους ακροδάχτυλο. Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζεται η έμπνευση της αρχιτεκτονικής της διάταξης, τα επιμέρους κομμάτια της και η αρχή λειτουργίας της. Ακόμη εξηγούνται η συνδεσμολογία της και ο προγραμματισμός της για να μπορέσει να γίνει ευκολότερη η μελέτη κύλισης μαλακών ακροδαχτύλων.



Εικόνα 4.1: Διάταξη μέτρησης της απόστασης κύλισης

4.2 Σχεδιασμός κατασκευής

Η σχεδίαση της κατασκευής βασίζεται στη διάταξη που προτείνεται στην εργασία [1] προσαρμοσμένη στις δικές μας δυνατότητες ανάλογα με τα υλικά κατασκευής που είχαμε στη διάθεσή μας. Το μεγαλύτερο μέρος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν πάρθηκαν από το εργαστήριο ρομποτικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Η βάση της κατασκευής είναι από υλικό ertalon με 4 λαστιχένια στηρίγματα στην οποία επάνω τοποθετήθηκαν όλα τα επιμέρους εξαρτήματα. Τα στηρίγματα των σταθερών μερών που χρησιμοποιήθηκαν είναι μεταλλικά και πακτώθηκαν με διάφορους κοχλίες έτσι ώστε να επιτευχθεί η στιβαρότητα της κατασκευής.

Στη βάση επάνω προσαρμόσαμε μια μεταλλική μέγγενη της οποίας το κινητό μέρος φέρει επάνω του τη βάση στήριξης του εύκαμπτου ακροδαχτύλου. Η μέγγενη μας βοηθάει στο να πραγματοποιήσουμε αλλά και να μετρήσουμε τη γραμμική μετατόπιση του παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου προς το άκαμπτο αντικείμενο της κατασκευής.

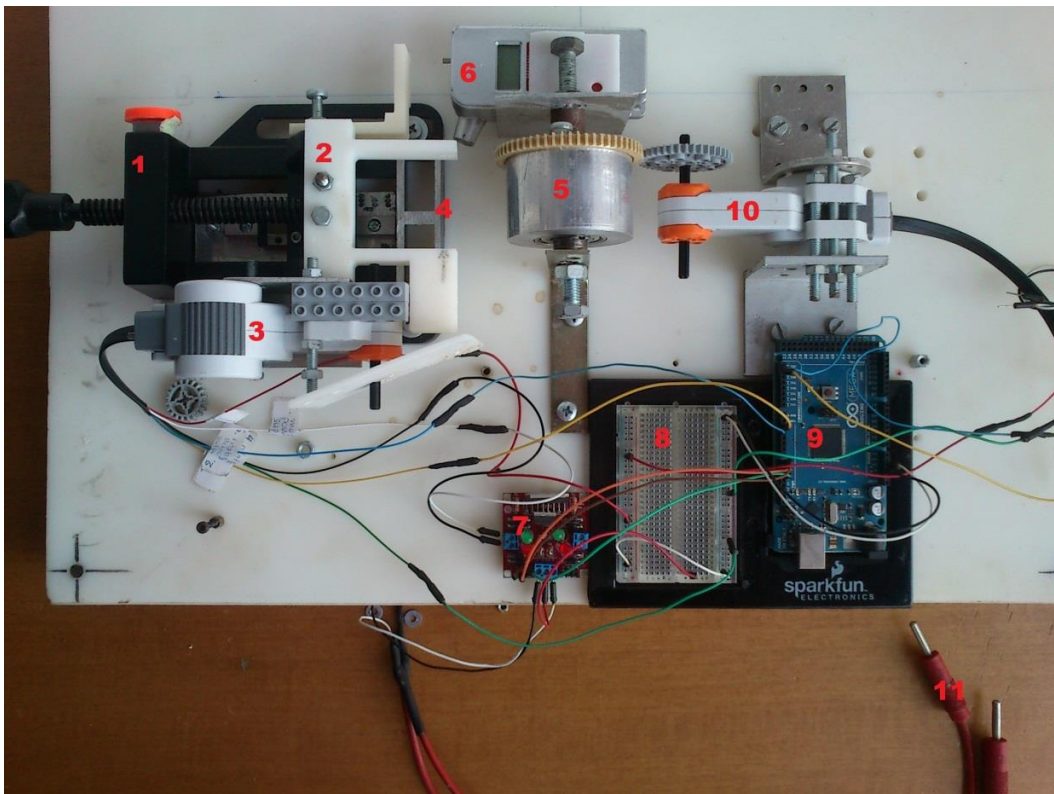
Στο κινητό μέρος της μέγγενης αυτής προσαρμόστηκε ένα εξάρτημα που τυπώσαμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή και πάνω σε αυτό μπορεί να τοποθετηθεί

ο άξονας του κάθε ακροδαχτύλου. Στα πλάγια του κινητού μέρους της μέγγενης έχει προσαρμοστεί ο κινητήρας lego ο οποίος δίνει την κίνηση στο παραμορφώσιμο ακροδάχτυλο και επίσης μπορεί να μετρήσει την περιστροφή που κάνει. Ως άκαμπτο ακροδάχτυλο τοποθετήσαμε ένα μεταλλικό κύλινδρο ο οποίος κινούνται ελεύθερα σε ένα άξονα με ρουλεμάν ενώ ο άξονας αυτός είναι πακτωμένος στην βάση της κατασκευής. Επίσης έχουμε και τον κινητήρα ο οποίος δεν δίνει κίνηση αλλά χρησιμοποιείται για να μετράει την περιστροφή του άκαμπτου αντικειμένου χάρη στον κωδικοποιητή προσαύξησης που έχει ενσωματωμένο (κινητήρας Lego). Αυτός είναι βιδωμένος στην βάση πίσω ακριβώς από το άκαμπτο ακροδάχτυλο και είναι συνδεδεμένος με το ακροδάχτυλο αυτό με γρανάζι. Ακόμη στην διάταξη υπάρχει και ο μικροελεγκτής Arduino και μια H-bridge.

Αναλυτικά τα μέρη της κατασκευής εξετάζονται παρακάτω.

4.3 Μέρη κατασκευής

Άκολουθεί μια φωτογραφία με αριθμημένα τα μέρη της διάταξης και παρακάτω η επεξήγηση του κάθε μέρους.



Εικόνα 4.2: Διάταξη μέτρησης της απόστασης κύλισης με αριθμημένο το κάθε μέρος της

1.Μεταλλική μέγγενη

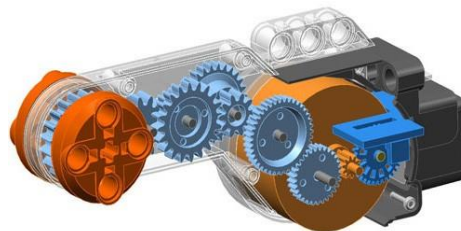
Η μέγγενη αυτή τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να μπορεί να εξυπηρετεί τις ανάγκες της εργασίας. Μετακινείται γραμμικά όπως μια κανονική μέγγενη αλλά έχει αφαιρεθεί το σταθερό σκέλος της και στη θέση του έχει τοποθετηθεί το άκαμπτο αντικείμενο έτσι ώστε όταν βιδώνουμε την μέγγενη το κινητό της σκέλος κινείται γραμμικά προς το άκαμπτο αντικείμενο.

2.Βάση παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου

Η βάση αυτή σχεδιάστηκε σε περιβάλλον proEngineer, εκτυπώθηκε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου και έχει προσαρμοστεί στο κινητό σκέλος της μέγγενης. Έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να φέρει πάνω της τους άξονες 3 χιλιοστών που περνάνε μέσα από τα παραμορφώσιμα ακροδάχτυλα.

3.Κινητήρας lego NXT (αλληλεπιδραστικός σερβοκινητήρας)

Ο σερβοκινητήρας αυτός είναι επίσης τοποθετημένος πάνω στο κινητό σκέλος της μέγγενης μαζί με τη βάση στήριξης του παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου. Δίνει την κίνηση στο παραμορφώσιμο ακροδάχτυλο και χάρη στον ενσωματωμένο κωδικοποιητή προσαύξησης υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της περιστροφής του ακροδαχτύλου ώστε να μπορεί να μελετηθεί η κύλισή του. Με κινητήρες σαν αυτόν μπορούμε να κάνουμε ακριβή βήματα και να έχουμε τον πλήρη έλεγχο. Οι Interactive Servomotors (αλληλεπιδραστικοί σερβοκινητήρες) λειτουργούν στα 9V και έχουν ενσωματωμένο κωδικοποιητή προσαύξησης ο οποίος μας επιτρέπει να ελέγχουμε τις κινήσεις τους με μεγάλη ακρίβεια χάρη στην περιστροφική ανατροφοδότηση (feedback). Ο ενσωματωμένος κωδικοποιητής μετρά τις στροφές του κινητήρα με ακρίβεια + / - μία μοίρα.



Εικόνα 4.3: Αλληλεπιδραστικός σερβοκινητήρας LEGO

4.Θέση παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου

Σε αυτή τη θέση τοποθετείται το εκάστοτε ακροδάχτυλο το οποίο θέλουμε να μελετήσουμε.

5.Άκαμπτο ακροδάχτυλο

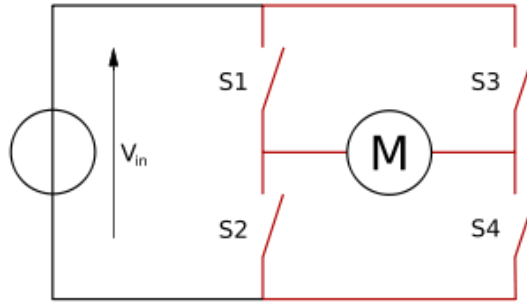
Το άκαμπτο μεταλλικό ακροδάχτυλο έχει τοποθετηθεί στο τερματικό σημείο που μπορεί να φτάσει το κινητό σκέλος της μέγγενης αντί του σταθερού της μέρους έτσι ώστε να μπορούμε να πιέσουμε πάνω του οποιασδήποτε διαμέτρου παραμορφώσιμα ακροδάχτυλα. Τον άξονα του ακροδαχτύλου συγκρατούν δύο μεταλλικά στηρίγματα τα οποία παρέχουν την απαιτούμενη στιβαρότητα σε τυχόν μεγάλες πιέσεις, ενώ αυτό περιστρέφεται ελεύθερα λόγω του ρουλεμάν.

6.Γραμμικός αισθητήρας

Για τη σωστή λειτουργία της διάταξης χρειάζεται η μέτρηση της γραμμικής μετατόπισης του ενός ακροδαχτύλου προς το άλλο. Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκε μια συσκευή μέτρησης γραμμικής απόστασης δίπλα από το άκαμπτο ακροδάχτυλο. Η συσκευή αυτή μετράει με την βοήθεια μιας μεταλλικής ακίδας στην άκρη της η οποία κινείται γραμμικά. Το κινητό μέρος της μέγγενης έχει προσαρμοσμένο επάνω ένα εξάρτημα από θερμοπλαστικό ABS το οποίο κατά την κίνηση του προς το άκαμπτο ακροδάχτυλο παρασέρνει την ακίδα της συσκευής και έτσι επιτυγχάνεται η μέτρηση της γραμμικής μετατόπισης (ως σημείο μηδέν λαμβάνεται το σημείο στο οποίο το εκάστωτε εύπλαστο ακροδάχτυλο εφάπτεται του άκαμπτου).

7.H Bridge

Για τον έλεγχο των κινητήρων χρειάστηκε μια H-bridge. Η H-bridge είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που επιτρέπει μια τάση να εφαρμοστεί σε ένα φορτίο με οποιαδήποτε κατεύθυνση. Κυκλώματα όπως η H-bridge χρησιμοποιούνται συχνά στη ρομποτική συνήθως για να επιτρέπουν σε DC κινητήρες να περιστραφούν εμπρός και πίσω. Οι περισσότεροι DC-AC μετατροπείς και πολλά άλλα είδη ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιούν H-bridge. Το όνομα του κυκλώματος αυτού προέρχεται από την τυπική γραφική αναπαράσταση του. Είναι κατασκευασμένο με τέσσερις διακόπτες. Σύμφωνα με την εικόνα 4.4 όταν οι διακόπτες S1 και S4 είναι κλειστοί και οι S2 και S3 ανοικτοί μια θετική τάση θα εφαρμοστεί στον κινητήρα. Ανοίγοντας τους S1 και S4 και κλείνοντας τους S2 και S3 η τάση αντιστρέφεται επιτρέποντας αντίστροφη λειτουργία του κινητήρα.



Εικόνα 4.4: Ηλεκτρική διάταξη H-Bridge

8. Πλακέτα breadboard

Η πλακέτα αυτή είναι μια πλαστική βάση για την προτυποποίηση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Έχει οπές στις οποίες μπορούν να συνδεθούν καλώδια, πυκνωτές, αντιστάσεις και άλλα μέρη ενός κυκλώματος για μπορεί αυτό να ολοκληρωθεί.

9. Arduino MEGA 2560

Η υπολογιστική πλατφόρμα Arduino. Έχει τοποθετηθεί δίπλα στο breadboard και έχουν χρησιμοποιηθεί τα pins 2 και 3 για τα interrupts 0 και 1, τα pin 8 και 9 για τα interrupts 2 και 3, το pin 10 για τον pwm, το pin της γείωσης (GND) και το pin των 5 Volt. Τα pin των interrupt 0,1,2,3 είναι συνδεδεμένα στους σερβοκινητήρες ενώ το pin 10 είναι συνδεδεμένο στην H Bridge. Ακόμη τα 5V του Arduino είναι συνδεδεμένα στους κινητήρες για την τροφοδοσία του κωδικοποιητή προσαύξησης που περιέχουν.

10. Κινητήρας lego NXT (αλληλεπιδραστικός σερβοκινητήρας) 2

Ο δεύτερος σερβοκινητήρας ο οποίος είναι συνδεδεμένος με γρανάζια στον άξονα του άκαμπτου ακροδαχτύλου. Ο κινητήρας αυτός δεν χρειάζεται να δίνει κίνηση απλά χρησιμοποιείται λόγω του ενσωματωμένου κωδικοποιητή προσαύξησης με τον οποίο υπολογίζεται η περιστροφή του άκαμπτου αντικειμένου ώστε να μπορούμε να την συγκρίνουμε με αυτήν του παραμορφώσιμου.

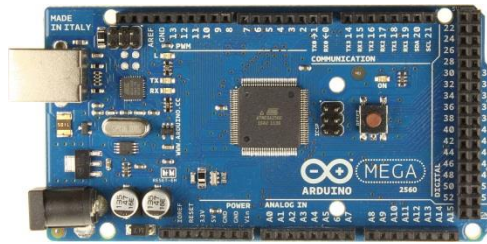
11. Καλώδια σύνδεσης με τροφοδοτικό

Τα καλώδια αυτά είναι συνδεδεμένα σε μια εξωτερική πηγή για να τροφοδοτήσουν την H-Bridge με τάση 9 Volt που χρειάζονται οι κινητήρες.

4.4 Προγραμματισμός διάταξης

Το Arduino που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξή μας είναι μια δωρεάν υπολογιστική πλατφόρμα βασισμένη σε λογισμικό και εύκολο στη χρήση υλικό. Το

είδος της πλατφόρμας Arduino που χρησιμοποιήθηκε ήταν το MEGA 2560, η πιο ισχυρή και πιο πρόσφατη υπολογιστική πλατφόρμα Arduino.



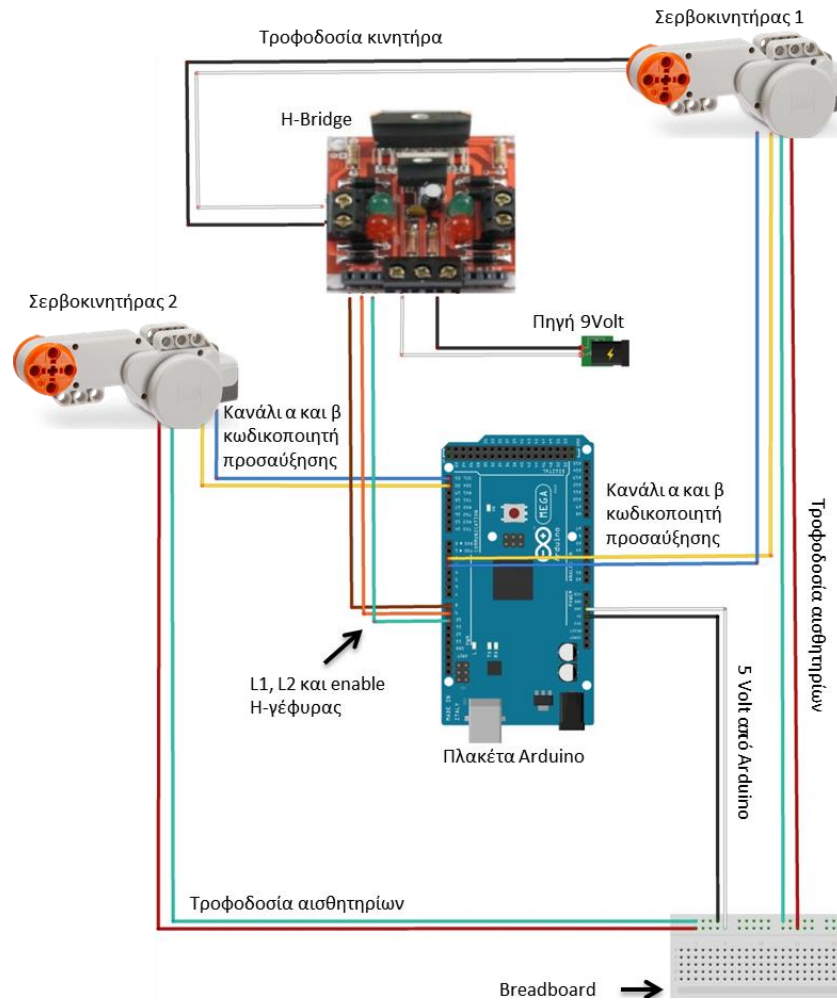
Εικόνα 4.5: Πλακέτα Arduino mega 2560

Έχει υποδοχή σύνδεσης με USB καλώδιο και προγραμματίστηκε απο ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια του δωρεάν (open source) λογισμικού Arduino.

Τοποθετήθηκε το εύπλαστο ακροδάχτυλο στην επιθυμητή θέση σε σχέση με το άκαμπτο ακροδάχτυλο (καθορίστηκε δηλαδή το Δx_i για την κάθε μέτρηση) και στη συνέχεια πατώντας το κουμπί reset της πλακέτας Arduino το παραμορφώσιμο ακροδάχτυλο ήταν προγραμματισμένο να κάνει μια ολόκληρη περιστροφή παρασέρνοντας μαζί του το άκαμπτο αντικείμενο. Ο μικροελεγκτής Arduino ήταν προγραμματισμένος να διαβάζει τις περιστροφές και των δύο ακροδαχτύλων (ευκάμπτου-άκαμπτου) και να τις τυπώνει στο serial board του λογισμικού. Διαβάζοντας εμείς το serial board για κάθε μέτρηση πήραμε το σύνολο των δεδομένων που θέλαμε. Στο παράρτημα Β' βρίσκεται ολόκληρος ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C++.

4.5 Συνδεσμολογία

Όσο αναφορά τη συνδεσμολογία της διάταξης χρειάστηκε ένα τροφοδοτικό ώστε να μπορεί να παρέχει τα 9 Volt τα οποία χρειάζεται ο κινητήρας NXT. Για αυτό το λόγο τοποθετήθηκε η H-Bridge και συνδέθηκε επάνω της το εξωτερικό τροφοδοτικό και ο ένας κινητήρας. Ο ένας μόνο κινητήρας έδινε κίνηση, ο άλλος απλά μετρούσε την περιστροφή.



Εικόνα 4.6: Συνδεσμολογία διάταξης μέτρησης απόστασης κύλισης ακροδαχτύλων

Κεφάλαιο 5

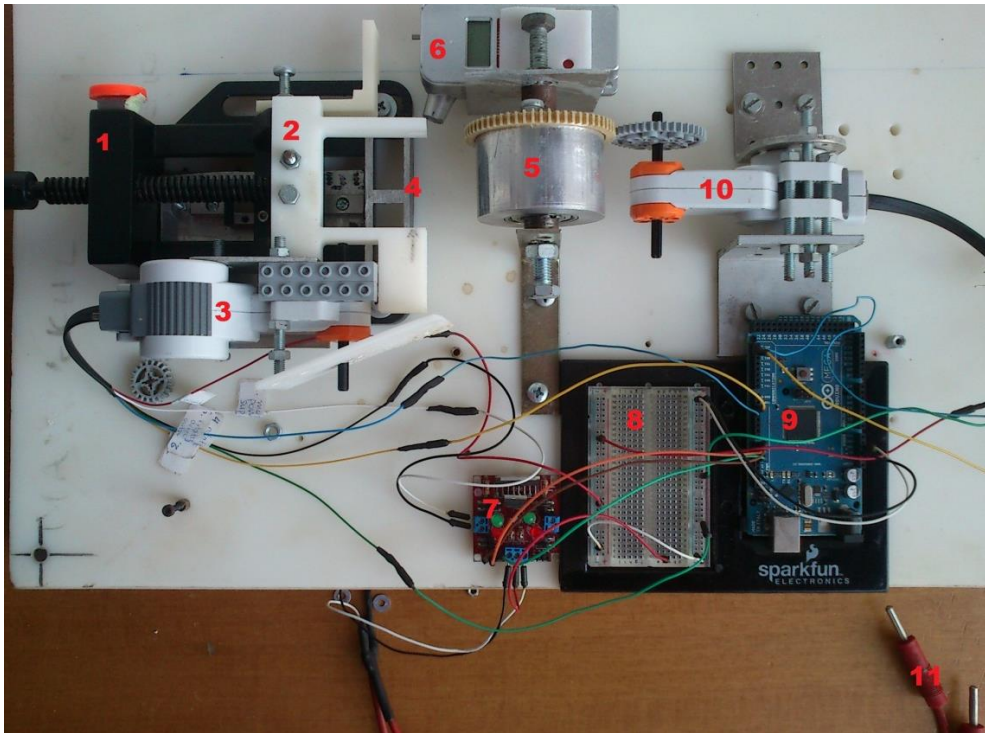
Διαδικασία πειραμάτων και αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο παρακάτω κεφάλαιο εξηγείται το πρωτόκολλο λήψης δεδομένων κύλισης των παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων που εφαρμόστηκε στη διάταξη. Παρουσιάζονται τα δεδομένα των γραφικών παραστάσεων που δημιουργήθηκαν από τις μετρήσεις αυτές και δίνεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των 50 ακροδαχτύλων που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων και γίνονται αξιοσημείωτες παρατηρήσεις όσο αναφορά την κύλιση ακροδαχτύλων διαφορετικού σχήματος και ακτίνας. Ακόμη γίνεται λόγος για τα πιθανά μελλοντικά πεδία έρευνας.

5.2 Πρωτόκολλο λήψης μετρήσεων

Για την καλύτερη επεξήγηση της μεθοδολογίας λήψης δεδομένων θα χρησιμοποιηθεί η εικόνα 5.1 η οποία περιλαμβάνει αριθμημένα τα μέρη της διάταξης.



Εικόνα 5.1: Διάταξη μέτρησης της απόστασης κύλισης

Αρχικά το arduino board (9) πρέπει να είναι συνδεδεμένο με έναν υπολογιστή και να έχουμε στον υπολογιστή ανοιχτό arduino software. Ακόμη θα πρέπει να έχουμε συνδέσει την H-bridge (7) με εξωτερική τάση 9Volt (11).

Το πρωτόκολλο των μετρήσεων περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

Ο άξονας με το ακροδάχτυλο τοποθετούνται επάνω στο κινητό μέρος της μέγγενης (2) και ένα γρανάζι το οποίο ήταν προσαρμοσμένο πάνω στον άξονα κουμπώνει με το γρανάζι του κινητήρα (3) ο οποίος είναι επίσης τοποθετημένος στο κινητό μέρος.

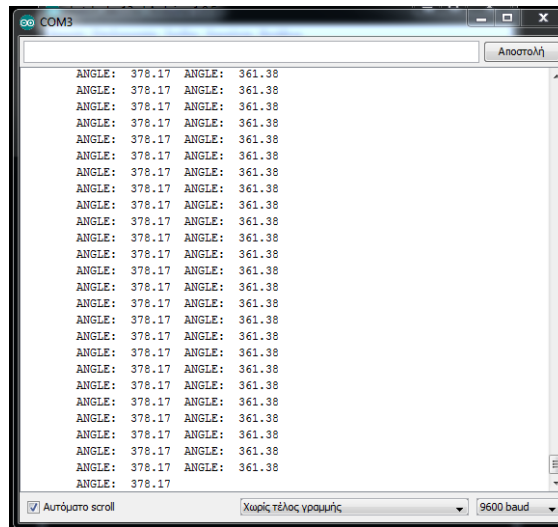
Στη συνέχεια ανοίγουμε τη συσκευή μέτρησης της οριζόντιας μετατόπισης (6) και βιδώνουμε τη μέγγενη (1) μέχρι το εύκαμπτο ακροδάχτυλο να εφάπτεται στο άκαμπτο (5). Διαβάζουμε τη μέτρηση της συσκευής και αυτό είναι το σημείο μηδέν μας.

Βιδώνουμε τώρα τη μέγγενη μας ώστε από το σημείο μηδέν να πάμε στην επιθυμητή μετατόπιση και να πάρουμε την μέτρηση που θέλουμε (η πρώτη μέτρηση αντιστοιχεί σε συμπίεση του ακροδαχτύλου ίση με 1mm).

Αφού έχουμε φτάσει στη κατάλληλη μετατόπιση κάνουμε reset τον μικροελεγκτή arduino ώστε να αρχίσει το πρόγραμμα που του έχουμε φορτώσει μέσω του λογισμικού Arduino από την αρχή και να ξεκινήσει η διαδικασία μέτρησης.

Το εύκαμπτο ακροδάχτυλο περιστρέφεται μια ολόκληρη περιστροφή (360 μοίρες) και παρασέρνει το άκαμπτο ακροδάχτυλο. Με το Arduino software και

εφόσον έχουμε και τους δύο κινητήρες Lego συνδεδεμένους, μπορούμε να διαβάσουμε στον υπολογιστή την ακριβή μετατόπιση των δύο ακροδαχτύλων (εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: serial board του λογισμικού Arduino

Αυτή η μέτρηση μαζί με την κανονικοποιημένη συμπίεση του ακροδαχτύλου αποτελούν το πρώτο σημείο της γραφικής παράστασης. Στη συνέχεια επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία βιδώνοντας παραπάνω την μέγγενη (αλλάζοντας δηλαδή το Δx) ώστε να πάμε στην επιθυμητή μετατόπιση για το δεύτερο σημείο της γραφικής παράστασης και ούτω καθεξής.

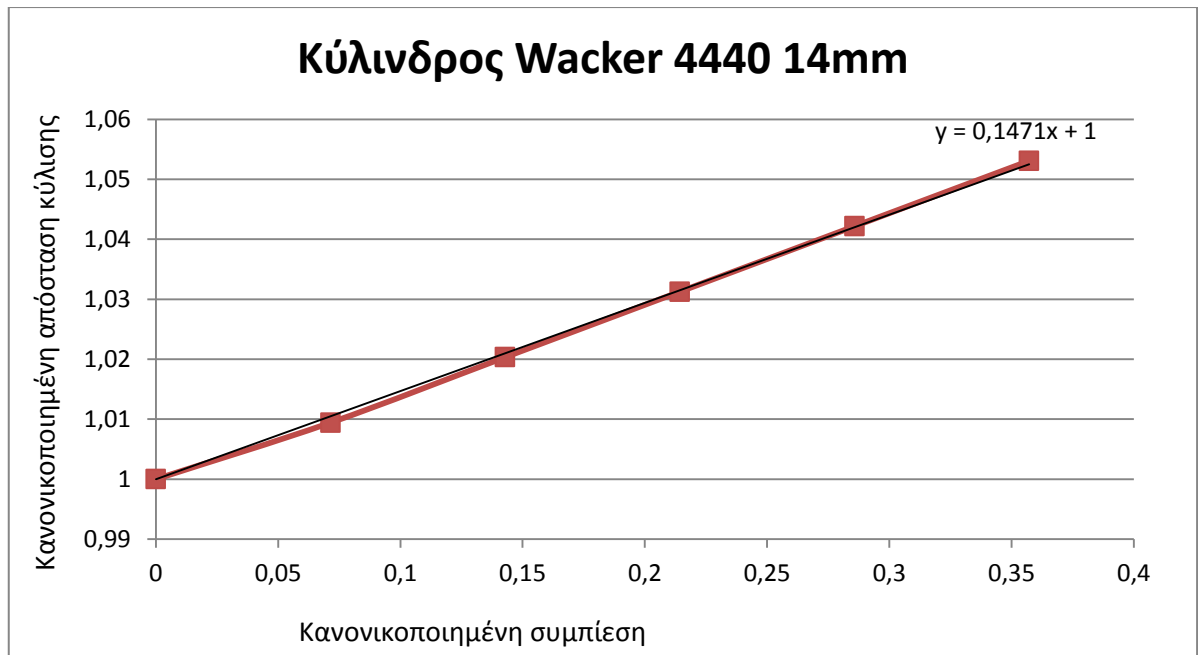
Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για το σύνολο των ακροδαχτύλων που δημιουργήσαμε. Για κάθε ακροδάχτυλο πήραμε 5 μετρήσεις για διαφορετικά Δx εκτός από τα ακροδάχτυλα των 10 χιλιοστών στα οποία δεν ήταν δυνατόν να παρθούν 5 μετρήσεις λόγω του μικρού τους μεγέθους. Συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα και με τη βοήθεια του Microsoft Excell δημιουργήθηκαν οι γραφικές παραστάσεις με άξονες

$$\text{Άξονας } x : \frac{\Delta x}{r} \quad \text{κανονικοποιημένη συμπίεση ακροδαχτύλου}$$

$$\text{Άξονας } y : \frac{\ell}{L} \quad \text{κανονικοποιημένη απόσταση κύλισης}$$

Όπου: (r) η ακτίνα του παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου, (ℓ) η απόσταση κύλισης του παραμορφώσιμου και (Δx) το ποσοστό συμπίεσης του, (L) η απόσταση κύλισης που θα έκανε το παραμορφώσιμο εάν ήταν άκαμπτο και (R) η ακτίνα του άκαμπτου.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η γραφική παράσταση (εικόνα 5.3) για το κυλινδρικό ακροδάχτυλο υλικού Wacker 4440 και δίνεται ο πίνακας των μετρήσεων (Πίνακας 2).



Εικόνα 5.3: Γραφική παράσταση κυλινδρικού ακροδαχτύλου 14mm από υλικό Wacker 4440

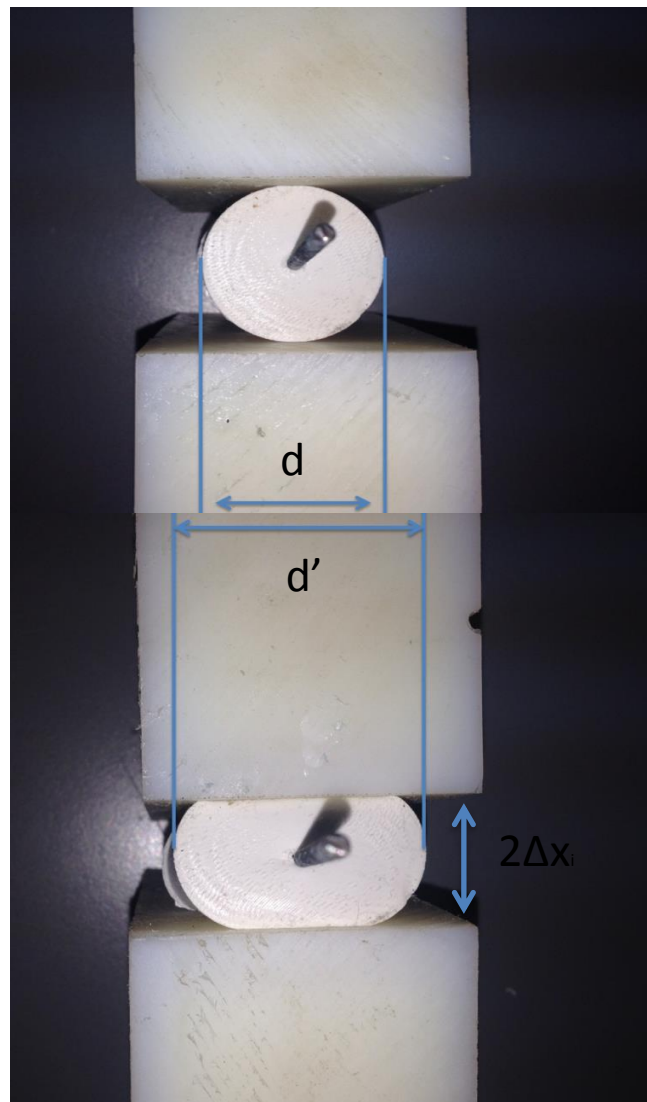
Σιλικόνη Wacker4440-Κύλινδρος		
AKTINA		
14		
Συμπίεσεις	Δχι/γ	I/L
Συμπίεση 0	0	1
Συμπίεση 1mm	0.071428571	1.009425
Συμπίεση 2mm	0.142857143	1.020337
Συμπίεση 3mm	0.214285714	1.03125
Συμπίεση 4mm	0.285714286	1.042163
Συμπίεση 5mm	0.357142857	1.053075

Πίνακας 2: Πίνακας δεδομένων υλικού Wacker4440

Στη γραφική παράσταση της εικόνας 5.3 βλέπουμε τη γραφική παράσταση για κυλινδρικό ακροδάχτυλο Wacker 4440 όπου φαίνονται τα σημεία τα οποία είναι αποτελέσματα των μετρήσεων και δείχνουν **αύξηση της κανονικοποιημένης απόστασης κύλισης που συνδέεται γραμμικά με την κανονικοποιημένη συμπίεση του υλικού**. Αυτό συμβαίνει διότι το υλικό Wacker 4440 είναι μη συμπιεστό και κατά συνέπεια όταν παραμορφώνεται αυξάνεται η κυλινδρική του επιφάνεια και διανύει μεγαλύτερη απόσταση κύλισης. Με τη βοήθεια του προγράμματος Microsoft excel υπολογίστηκε η γραμμική κλίση της ευθείας με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Δημιουργήθηκαν τέτοιες γραφικές παραστάσεις για όλα τα υλικά που είχαμε στη διάθεσή μας καθώς επίσης και κάποιες συνδυαστικές για να έχουμε τη δυνατότητα σύγκρισης ανάμεσα σε μεγέθη υλικά και σχήματα. Η ακρίβεια των πειραμάτων αυτών είναι ± 2 μοίρες. Οι κινητήρες Lego nxt έχουν 1 μοίρα απόκλιση και ίσως έχουμε άλλη μία μοίρα από ατέλειες της κατασκευής.

5.3 Παραμόρφωση ακροδαχτύλων

Στις εικόνες φαίνεται ένα ακροδάχτυλο σιλικόνης καθώς πιέζεται σε άκαμπτη επιφάνεια. Παρατηρώντας την παραμόρφωση είναι προφανές ότι η αρχική περίμετρο του ακροδαχτύλου d έχει διαφορά από την περίμετρο του μετά την εφαρμογή της δύναμης. Η d' είναι εμφανώς μεγαλύτερη. Αυτό παρατηρείται διότι όπως έδειξαν και τα πειραματικά δεδομένα τα παραμορφώσιμα μη συμπιεστά υλικά όταν πιέζονται σε άκαμπτη επιφάνεια η περίμετρος τους αυξάνεται.



Εικόνα 5.4: Σύγκριση περιφερειακής τάσης παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου για μη συμπιεστό υλικό

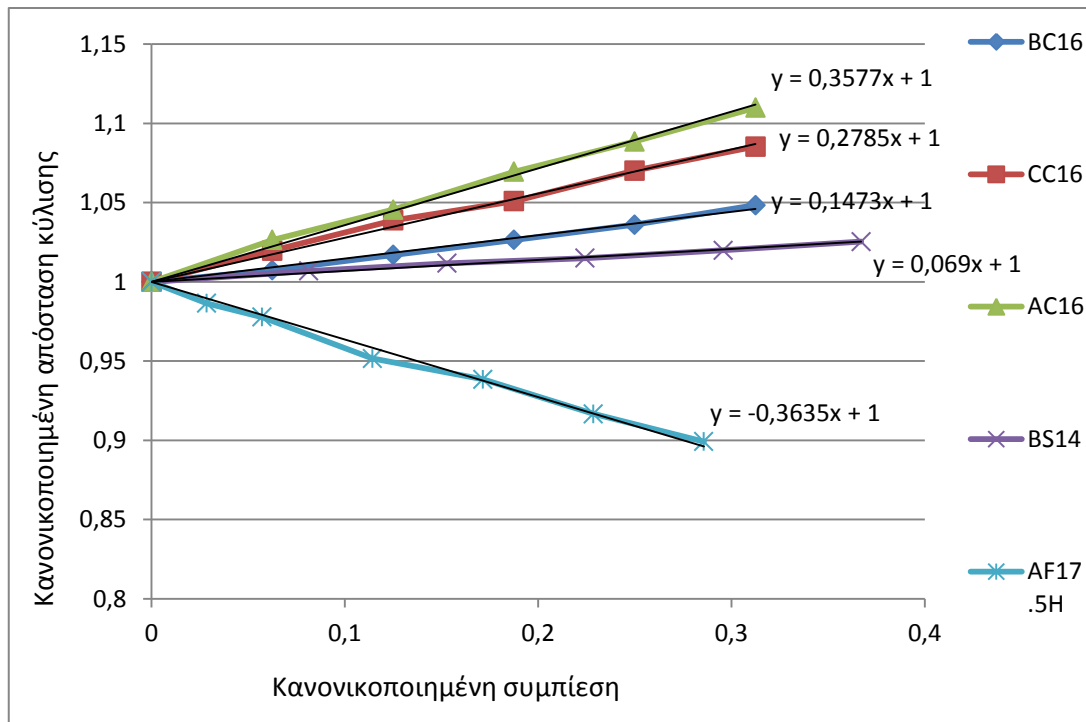
5.4 Πίνακας υλικών που χρησιμοποιήθηκαν

Ακολουθεί ένας πίνακας που συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά του κάθε υλικού (πίνακας 3). Στην πρώτη στήλη υπάρχει η κωδική ονομασία του κάθε υλικού. Η κωδική ονομασία αυτή αποτελείται από 4 ψηφία. Το πρώτο ψηφίο καθορίζει το είδος του υλικού, το δεύτερο δείχνει αν το ακροδάχτυλο είναι κυλινδρικό ή σφαιρικό (C ή S αντίστοιχα) και τα επόμενα δύο αφορούν την ακτίνα του ακροδαχτύλου. Στην περίπτωση των αφρώδη υλικών τα είδος του υλικού καθορίζεται από 2 ψηφία. Στη δεύτερη στήλη του πίνακα εμφανίζεται η εμπορική ονομασία του κάθε υλικού, στην τρίτη η ακτίνα του κάθε ακροδαχτύλου, στη τέταρτη η αναλογία του σκληρυντικού που υπάρχει στο κάθε υλικό, στην πέμπτη ο τύπος καταλύτη, στην έκτη τα χαρακτηριστικά της σκληρότητάς του και στην έβδομη η σταθερά κύλισης που προέκυψε πειραματικά για το κάθε ακροδάχτυλο. Το σύνολο των δειγμάτων ήταν 50 διαφορετικά ακροδάχτυλα.

ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ						
ID	όνομα υλικού	ακτίνα mm	αναλογία καταλύτη	τύπος καταλύτη	χαρακτηριστικά	σταθερά κύλισης α
AC10	Wacker 4615A	10	15%	4615B	πάρα πολύ μαλακή	~0.2441
AC14	Wacker 4615A	14	15%	4615B	πάρα πολύ μαλακή	0.3846
AC16	Wacker 4615A	16	15%	4615B	πάρα πολύ μαλακή	0.3577
AC20	Wacker 4615A	20	15%	4615B	πάρα πολύ μαλακή	0.369
BC10	Wacker 4440	10	2-3%	T40	πάρα πολύ σκληρή	~ 0,08
BC14	Wacker 4440	14	2-3%	T40	πάρα πολύ σκληρή	0.1471
BC16	Wacker 4440	16	2-3%	T40	πάρα πολύ σκληρή	0.1468
BC20	Wacker 4440	20	2-3%	T40	πάρα πολύ σκληρή	0.1473
CC10	Wacker 4512	10	5%	T51	μαλακή	0.1558
CC14	Wacker 4512	14	5%	T51	μαλακή	0.2652
CC16	Wacker 4512	16	5%	T51	μαλακή	0.2785
CC20	Wacker 4512	20	5%	T51	μαλακή	0.2656
DC10	Wacker 4514	10	5%	T51	μεσαίας σκληρότητας	~ 0,076
DC14	Wacker 4514	14	5%	T51	μεσαίας σκληρότητας	0.2027
DC16	Wacker 4514	16	5%	T51	μεσαίας σκληρότητας	0.1993
DC20	Wacker 4514	20	5%	T51	μεσαίας σκληρότητας	0.2138
EC10	ESSIL 291	10	10%	essil catalyser	μαλακή	0.15
EC14	ESSIL 291	14	10%	essil catalyser	μαλακή	0.299
EC16	ESSIL 291	16	10%	essil catalyser	μαλακή	0.334
EC20	ESSIL 291	20	10%	essil catalyser	μαλακή	0.272
FC10	ESSIL 291	10	20%	essil catalyser	σκληρή	0.03
FC14	ESSIL 291	14	20%	essil catalyser	σκληρή	0.129
FC16	ESSIL 291	16	20%	essil catalyser	σκληρή	0.1392
FC20	ESSIL 291	20	20%	essil catalyser	σκληρή	0.1249
AF17,5H	αφρολέξ	17.5	-	-	αφρώδες	-0.3635
AF17,5S	αφρολέξ	17.5	-	-	αφρώδες	-0.3753
ΣΦΑΙΡΕΣ						
AS10	Wacker 4615A	10	15%	4615B	πάρα πολύ μαλακή	~0.233
AS14	Wacker 4615A	14	15%	4615B	πάρα πολύ μαλακή	0.297
AS16	Wacker 4615A	16	15%	4615B	πάρα πολύ μαλακή	0.2838
AS20	Wacker 4615A	20	15%	4615B	πάρα πολύ μαλακή	0.2622
BS10	Wacker 4440	10	2-3%	T40	πάρα πολύ σκληρή	~0.07
BS14	Wacker 4440	14	2-3%	T40	πάρα πολύ σκληρή	0.069
BS16	Wacker 4440	16	2-3%	T40	πάρα πολύ σκληρή	0.0743
BS20	Wacker 4440	20	2-3%	T40	πάρα πολύ σκληρή	0.0802
CS10	Wacker 4512	10	5%	T51	μαλακή	~0.187
CS14	Wacker 4512	14	5%	T51	μαλακή	0.2317
CS16	Wacker 4512	16	5%	T51	μαλακή	0.24
CS20	Wacker 4512	20	5%	T51	μαλακή	0.2038
DS10	Wacker 4514	10	5%	T51	μεσαίας σκληρότητας	~0.1089
DS14	Wacker 4514	14	5%	T51	μεσαίας σκληρότητας	0.0347
DS16	Wacker 4514	16	5%	T51	μεσαίας σκληρότητας	0.1211
DS20	Wacker 4514	20	5%	T51	μεσαίας σκληρότητας	0.096
DS10	ESSIL 291	10	10%	essil catalyser	μαλακή	~0.3
ES14	ESSIL 291	14	10%	essil catalyser	μαλακή	0.244
ES16	ESSIL 291	16	10%	essil catalyser	μαλακή	0.245
ES20	ESSIL 291	20	10%	essil catalyser	μαλακή	0.267
FS10	ESSIL 291	10	20%	essil catalyser	σκληρή	-
FS14	ESSIL 291	14	20%	essil catalyser	σκληρή	0.1328
FS16	ESSIL 291	16	20%	essil catalyser	σκληρή	0.1197
FS20	ESSIL 291	20	20%	essil catalyser	σκληρή	0.1343

Πίνακας 3: Συγκεντρωτικός πίνακας υλικών

Όπως φαίνεται από τον πίνακα υπάρχει ένα εύρος τιμών για τη σταθερά κύλισης. Για το διάγραμμα της εικόνας 5.5 επιλέχθηκαν υλικά με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνεται αυτό το εύρος των τιμών του α . Υπάρχουν τρεις κύλινδροι ακτίνας 16 χιλιοστών μια σφαίρα ακτίνας 14 χιλιοστών και ένα αφρώδες υλικό ακτίνας 17,5. Το διάγραμμα δείχνει τη γραμμικότητα της σχέσης (3) (κεφάλαιο 1) για ποσοστά συμπίεσης μέχρι και περίπου 37% και για διάφορες τιμές της σταθεράς κύλισης.



Εικόνα 5.5: Κανονικοποιημένη συμπίεση ακροδαχτύλου

Σε αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση των αφρώδη συμπίεστων υλικών, παρατηρείται μείωση της κανονικοποιημένης απόστασης κύλισης, η οποία συνδέεται γραμμικά με την κανονικοποιημένη συμπίεση του υλικού. Έτσι, χρησιμοποιώντας το μαθηματικό μοντέλο κύλισης (2), μπορούμε να προσεγγίσουμε πολύ ικανοποιητικά την απόσταση κύλισης του ακροδαχτύλου επιλέγοντας κατάλληλη τιμή για το α . Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται αφρώδες υλικό, τα πειραματικά αποτελέσματα ταυτίζονται με το μοντέλο κύλισης για $\alpha = -0.37$. Τα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση των παραμορφώσιμων αλλά μη συμπίεστων υλικών εμφανίζουν αύξηση της σφαιρικής επιφάνειας του ακροδαχτύλου. Στις περιπτώσεις των παραπάνω υλικών η τιμή του α είναι θετική και εξαρτάται από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το ακροδάχτυλο. Συνοψίζοντας, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής όρια για τη σταθερά κύλισης α και τα υλικά που εξετάστηκαν :

1. $\alpha \in [0,13 \ 0,36]$: Για την περίπτωση κυλινδρικών ακροδαχτύλων κατασκευασμένα από σιλικόνη δύο συστατικών.

2. $\alpha \in [0,07 \ 0,27]$: Για την περίπτωση σφαιρικών ακροδαχτύλων κατασκευασμένα από σιλικόνη δύο συστατικών.

3. $\alpha \in [-0,36 \ -0,37]$: Για την περίπτωση ακροδαχτύλων από αφρώδη υλικά.

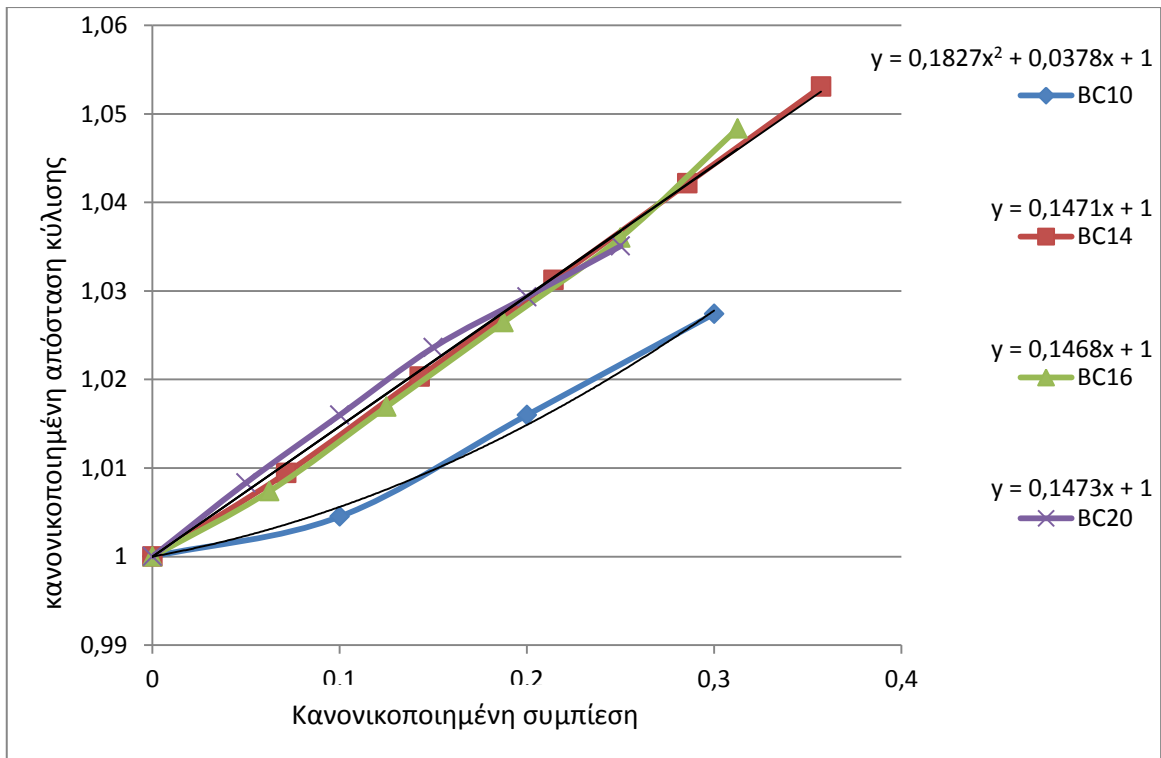
Σε τυχόν ειδική περίπτωση όπου $\alpha = 0$ το παραμορφώσιμο ακροδάχτυλο συμπεριφέρεται ακριβώς όπως και στην περίπτωση του άκαμπτου ακροδαχτύλου όσον αφορά την απόσταση κύλισης που διανύεται. Μπορούμε να ερμηνεύσουμε φυσικά τη σταθερά κύλισης α που ορίσαμε σε αυτήν την παράγραφο βασιζόμενοι στην ύπαρξη της περιφερειακής τάσης που δημιουργείται κατά την πίεση του ακροδαχτύλου. Η περιφερειακή τάση είναι δυνατόν να μεταβάλλει την συνολική περιφέρεια του ακροδαχτύλου η οποία με την σειρά της επιδρά στην απόσταση κύλισης.

Στο Παράρτημα Α της παρούσας εργασίας υπάρχει το σύνολο των μετρήσεων για όλα τα ακροδάχτυλα που εξετάστηκαν.

5.5 Συμπεράσματα μετρήσεων

Το κύριο χαρακτηριστικό των μαλακών ακροδαχτύλων είναι η παραμόρφωση τους κατά τη διάρκεια της επιβολής δύναμης. Η παραμόρφωση που προκαλείται επηρεάζει τον τρόπο κύλισης των δαχτύλων πάνω στην επιφάνεια επαφής. Στην εργασία αυτή μελετήθηκε πειραματικά η τροχιά κύλισης μαλακών ακροδαχτύλων. Πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός από πειράματα τα οποία διαφέρουν ως προς το μαλακό υλικό και τις διαμέτρους του ακροδαχτύλου.

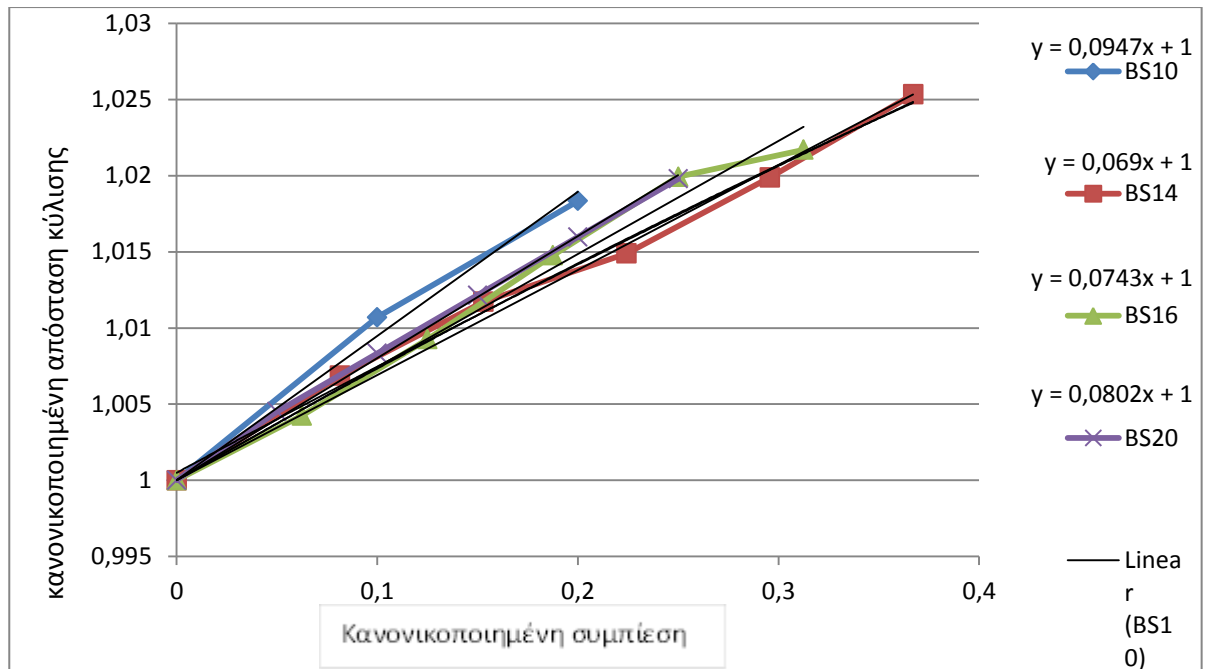
- Λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις για κυλίνδρους και σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων για κάθε υλικό παρατηρούμε ότι η σταθερά κύλισης είναι διαφορετική για κάθε υλικό για το οποίο πήραμε μετρήσεις αλλά ανεξάρτητη της διαμέτρου του ακροδαχτύλου. **Δηλαδή ακροδάχτυλα κατασκευασμένα από ίδιο υλικό έχουν ίδια περίπου σταθερά κύλισης και ως έχουν διαφορετική ακτίνα.**



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα κυλινδρικών ακροδαχτύλων υλικού Wacker 4440 ακτίνων 10,14,16,20 χιλιοστών

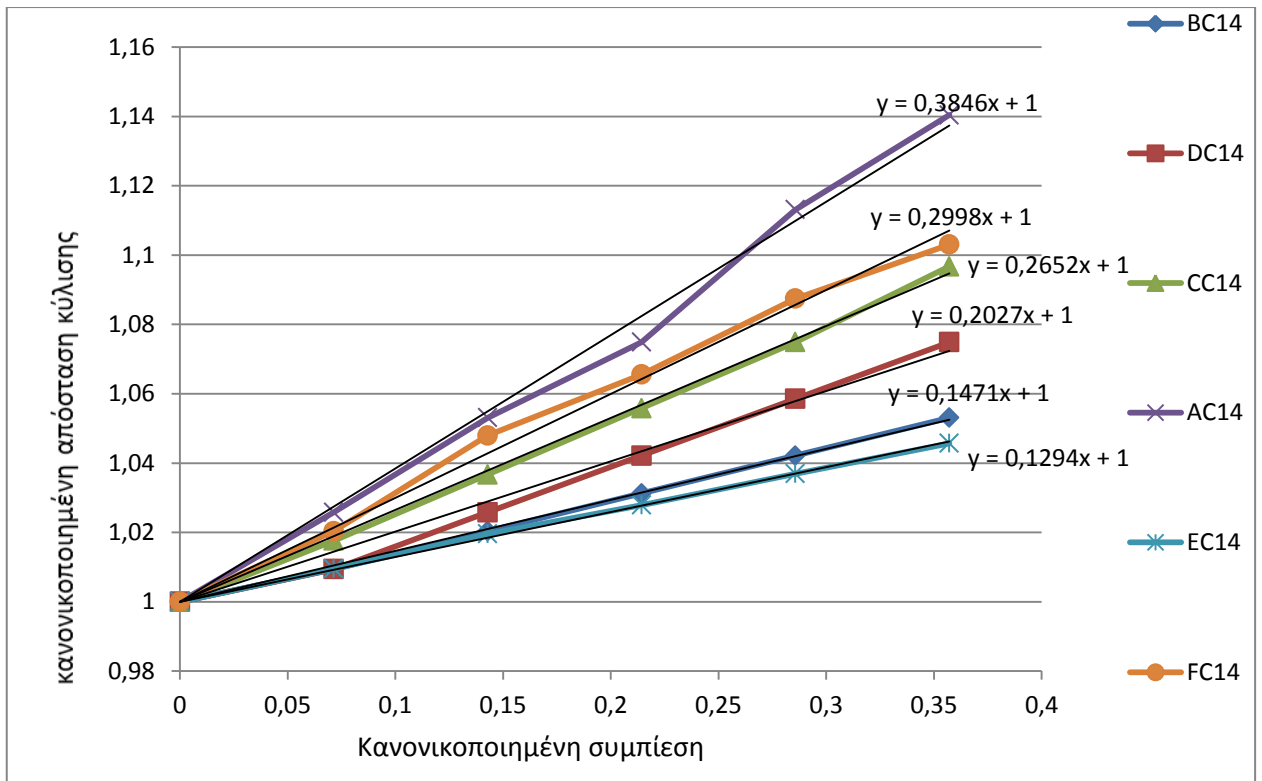
Στο διάγραμμα της εικόνας 5.6 βλέπουμε ότι για τις ακτίνες 14mm, 16mm και 20mm η σταθερά κύλισης είναι σχεδόν ίδια για κυλινδρικά ακροδάχτυλα. Όταν όμως η ακτίνα του ακροδαχτύλου μικρύνει σημαντικά (όπως το υλικό BC10 του διαγράμματος της εικόνας 5.6) τότε το φαινόμενο γίνεται μη γραμμικό και εκφράζεται με δευτέρας τάξης πολυώνυμο. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στα υπόλοιπα είδη ακροδαχτύλων για την ακτίνα των 10 χιλιοστών.

- Το διάγραμμα της εικόνας 5.6 εκφράζει τη συμπεριφορά κυλινδρικών ακροδαχτύλων και το διάγραμμα της εικόνας 5.7 σφαιρικών ακροδαχτύλων κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό. Συγκρίνοντας λοιπόν ακροδάχτυλα κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό αλλά διαφορετικού σχήματος παρατηρούμε ότι και τα σφαιρικά ακροδάχτυλα όπως και τα κυλινδρικά κατά την επιβολή της δύναμης στο άκαμπτο σώμα αυξάνουν την απόσταση κύλισης τους. Η αύξηση όμως αυτή για τα σφαιρικά ακροδάχτυλα είναι μικρότερη από αυτήν που παρατηρείται στα κυλινδρικά. Η σταθερά κύλισης ενώ δεν αλλάζει με την αλλαγή της ακτίνας παρατηρούμε ότι αλλάζει με την αλλαγή του σχήματος. **Οι σφαίρες παραμορφώνονται ελαφρός πιο δύσκολα από τους κυλίνδρους και έτσι έχουν μικρότερη σταθερά κύλισης.**



Εικόνα 5.7: Διάγραμμα σφαιρικών ακροδαχτύλων υλικού Wacker 4440 ακτίνων 10,14,16 και 20 χιλιοστών

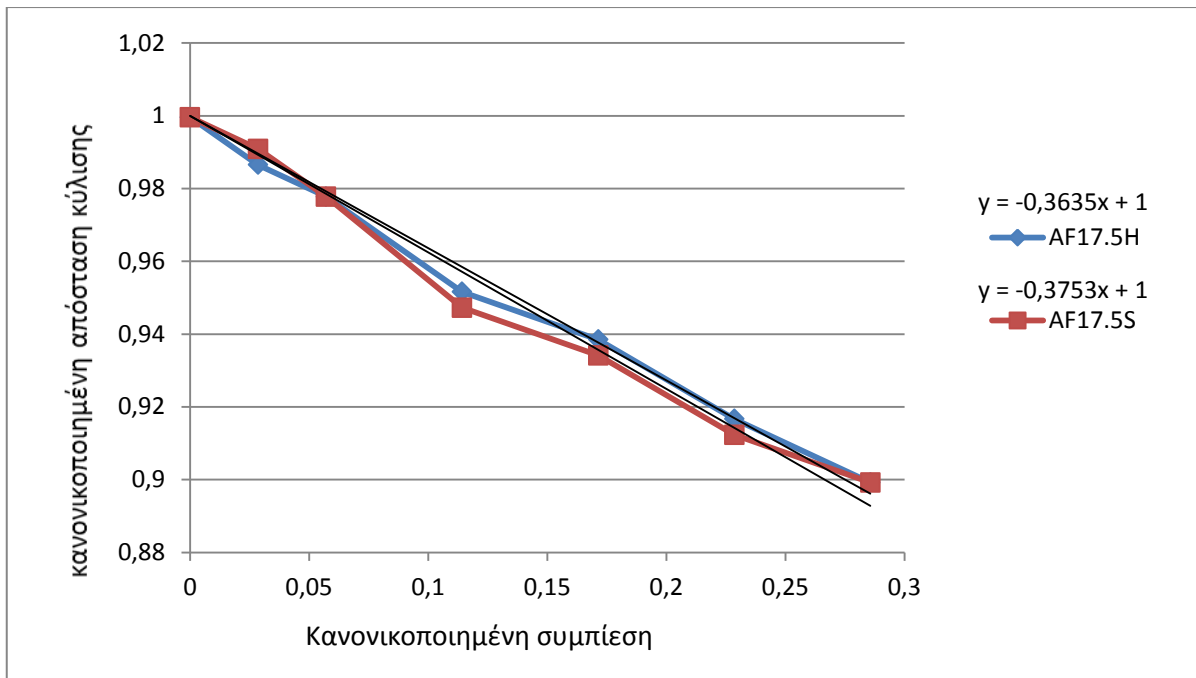
- Όπως το υλικό που παρουσιάστηκε στις εικόνες 5.6, 5.7 (Wacker 4440) έτσι και στα υπόλοιπα υλικά οι κύλινδροι σε σύγκριση με τις σφαίρες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Για το κάθε υλικό παρατηρούμε, μια σταθερά κύλισης για τους κυλίνδρους ανεξάρτητη από την ακτίνα του κάθε κυλίνδρου και για της σφαίρες μια άλλη σταθερά κύλισης ελαφρώς μικρότερη από αυτήν των κυλίνδρων και επίσης ανεξάρτητη από την ακτίνα της κάθε σφαίρας. Το πόσο μικρότερος είναι ο μέσος όρος της σταθεράς κύλισης των σφαιρικών ακροδαχτύλων από τα αντίστοιχα κυλινδρικά όσο αναφορά ένα υλικό εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό αυτό. Σε κάποια υλικά παρατηρήθηκε μια μείωση της τάξης του 20% (ενώ σε άλλα έφτανε ακόμη και το 50%
- Στο επόμενο διάγραμμα της εικόνας 5.8 συγκρίνονται όλα τα κυλινδρικά ακροδαχτύλα από σιλικονούχα υλικά, ακτίνας 14mm. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η συμπίεση του ακροδαχτύλου, ακόμη και μικρή της τάξεως δηλαδή 10% της αρχικής του ακτίνας, επιφέρει αλλαγή στην απόσταση κύλισης του ακροδαχτύλου επάνω στην επιφάνεια του άκαμπτου σώματος. Η μεταβολή στην απόσταση κύλισης, αν και μικρή, είναι αξιοσημείωτη και σχετίζεται άμεσα με το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του ακροδαχτύλου. Η τροχιά κύλισης είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα πραγματοποιούσε εάν ήταν άκαμπτο και το ποσοστό της αύξησης αυτής εξαρτάται από τις ιδιότητες του εκάστοτε υλικού. **Όσο πιο μαλακό είναι το υλικό του ακροδαχτύλου, τόσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά κύλισης και κατα συνέπεια η απόσταση που καλύπτει σε κάθε κίνηση. (εικόνα 5.8).**



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα σιλικονούχων κυλινδρικών ακροδαχτύλων ακτίνας 14 mm

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και σε σφαιρικού σχήματος ακροδάχτυλα αλλά με μικρότερες σταθερές κύλισης όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

- Στο διάγραμμα της εικόνας 5.9 έχουμε τα αφρώδη υλικά. Τα υλικά αυτά έχουν μεγάλη συμπιεστότητα και **καλύπτουν μικρότερη απόσταση κύλισης πάνω στην επιφάνεια επαφής** από ότι ένα ίδιο ακροδάχτυλο κατασκευασμένο από άκαμπτο υλικό. Παρατηρούμε δηλαδή ότι η σταθερά κύλισης τους είναι αρνητικός αριθμός ($\alpha = -0,3635$ και $\alpha = -0,3753$).



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα αφρώδη υλικών ακτίνας 17,5 mm.

5.6 Μελλοντική έρευνα

Στην εργασία αυτή επιβεβαιώσαμε το μαθηματικό μοντέλο της εργασίας (2) για την περιγραφή της κίνησης κύλισης παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων πάνω στην επιφάνεια ενός άκαμπτου αντικειμένου και βρήκαμε τις σταθερές κύλισης των υλικών που χρησιμοποιήσαμε. Χρησιμοποιήθηκαν ακροδάχτυλα κατασκευασμένα από διάφορα είδη παραμορφώσιμων υλικών και σε διάφορα μεγέθη και σχήματα. Στο μέλλον θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακροδάχτυλα κατασκευασμένα από ακόμη μεγαλύτερη ποικιλία υλικών, σχημάτων και μεγεθών έτσι ώστε να έχουμε ευρύτερο φάσμα δεδομένων. Ακόμη θα μπορούσαν να κατασκευαστούν ακροδάχτυλα τα οποία θα έχουν ένα άκαμπτο πυρήνα. Τα πειραματικά δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση της επαφής μεταξύ παραμορφώσιμου ακροδαχτύλου και άκαμπτης επιφάνειας. Το μοντέλο αυτό μπορεί να ενσωματωθεί σε συστήματα που σχετίζονται με τον έλεγχο παραμορφώσιμων ακροδαχτύλων.

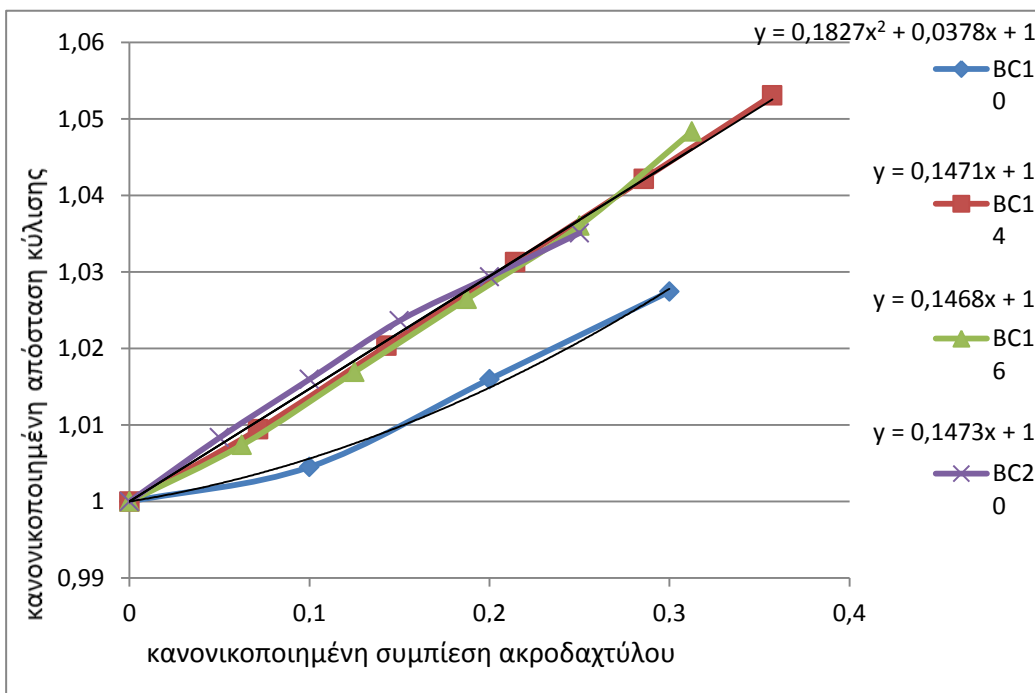
Παράρτημα Α'

Σε αυτό το παράρτημα δίνεται αναλυτικά το σύνολο των δεδομένων και οι γραφικές παραστάσεις για όλα τα μεγέθη, σχήματα και υλικά των μετρήσεων..

Κυλινδρικά ακροδάχτυλα Wacker 4440

BCXX (Wacker4440)-Cylinder - πάρα πολύ σκληρή							
ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ		ΑΚΤΙΝΑ		ΑΚΤΙΝΑ	
10		14		16		20	
Δχι/r	l/L	Δχι/r	l/L	Δχι/r	l/L	Δχι/r	l/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,004514	0,071428571	1,009425	0,0625	1,007378	0,05	1,008333
0,2	1,015972	0,142857143	1,020337	0,125	1,016927	0,1	1,015972
0,3	1,027431	0,214285714	1,03125	0,1875	1,026476	0,15	1,023611
		0,285714286	1,042163	0,25	1,036024	0,2	1,02934
		0,357142857	1,053075	0,3125	1,048347	0,25	1,035069

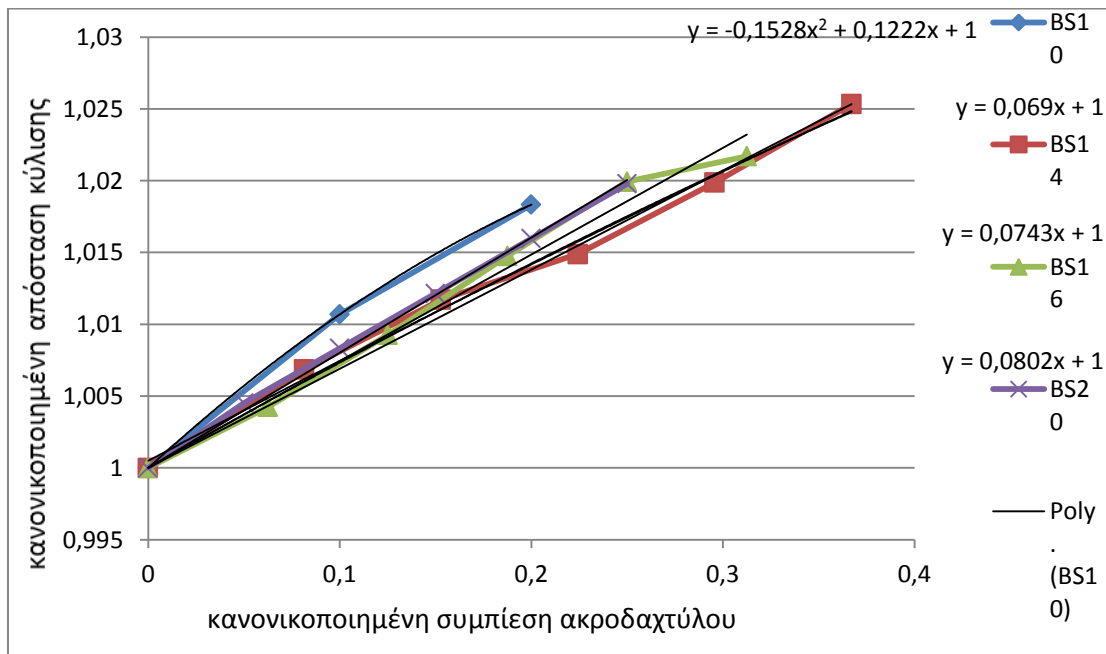
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης α= 0,1458



Σφαιρικά ακροδάχτυλα Wacker 4440

BSXX (Wacker4440)-SPHERE - πάρα πολύ σκληρή							
AKTINA (mm)		AKTINA		AKTINA		AKTINA	
10		14		16		20	
Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,010694	0,081429	1,006864	0,0625	1,00425	0,05	1,004514
0,2	1,018333	0,152857	1,011717	0,125	1,009264	0,1	1,008333
		0,224286	1,014893	0,1875	1,014766	0,15	1,012153
		0,295714	1,019881	0,25	1,019927	0,2	1,015972
		0,367143	1,025337	0,3125	1,021701	0,25	1,019792

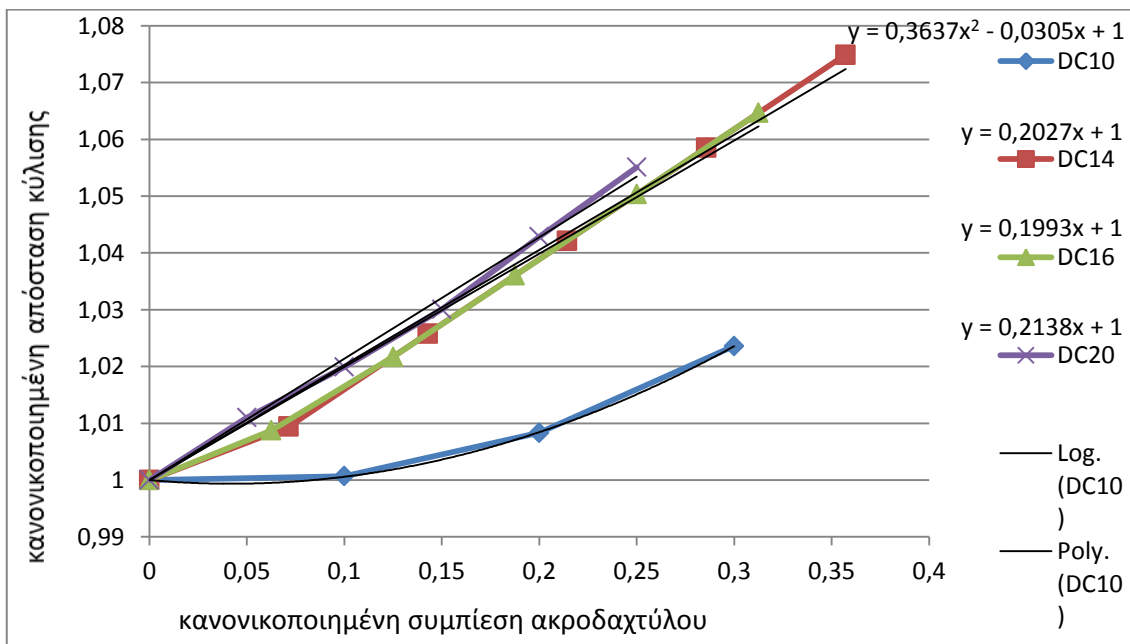
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης α= 0,0745



Κυλινδρικά ακροδάχτυλα Wacker 4514

DCXX(Wacker4514) - μεσαίας σκληρότητας							
AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)	
10		14		16		20	
$\Delta x_i/r$	l/L	$\Delta x_i/r$	l/L	$\Delta x_i/r$	l/L	$\Delta x_i/r$	l/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,000694	0,071428571	1,009425	0,0625	1,008738	0,05	1,011015
0,2	1,008333	0,142857143	1,025794	0,125	1,021701	0,1	1,019911
0,3	1,023611	0,214285714	1,042163	0,1875	1,036024	0,15	1,030069
		0,285714286	1,058532	0,25	1,050347	0,2	1,042853
		0,357142857	1,074901	0,3125	1,06467	0,25	1,055076

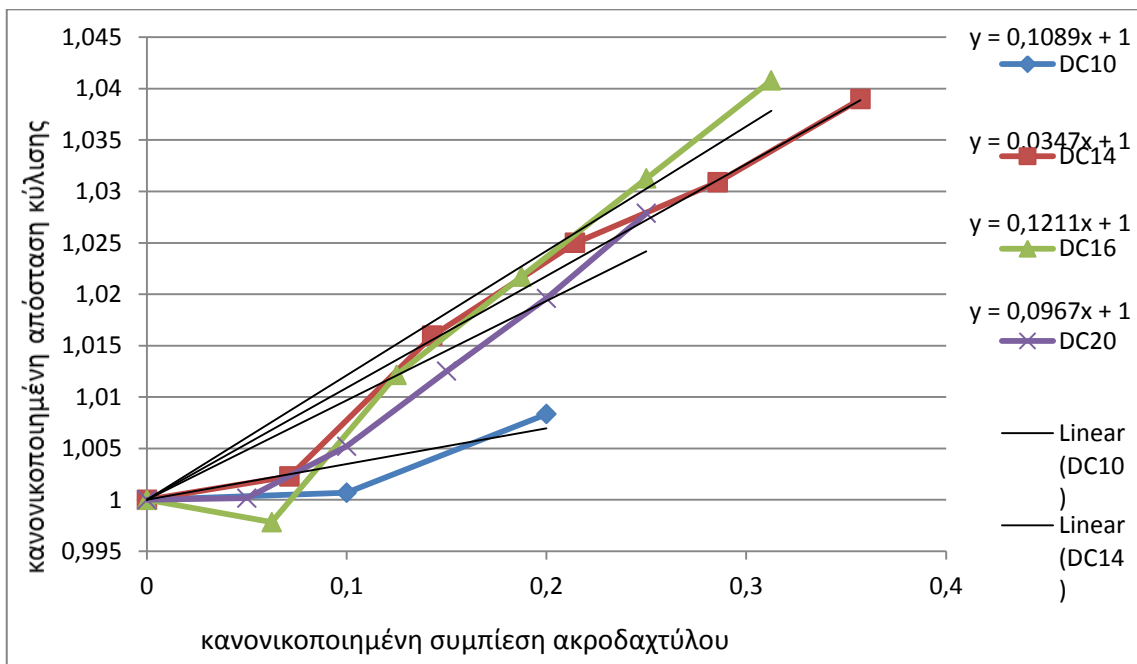
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης $\alpha = 0,2037$



Σφαιρικά ακροδάχτυλα Wacker 4514

DSXX(Wacker4514) - μεσαίας σκληρότητας							
ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)	
10		14		16		20	
Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,000694	0,071429	1,002286	0,0625	0,99783	0,05	1,000157
0,2	1,008333	0,142857	1,015968	0,125	1,012153	0,1	1,005198
		0,214286	1,024988	0,1875	1,021701	0,15	1,012514
		0,285714	1,030899	0,25	1,03125	0,2	1,019597
		0,357143	1,038971	0,3125	1,040799	0,25	1,027861

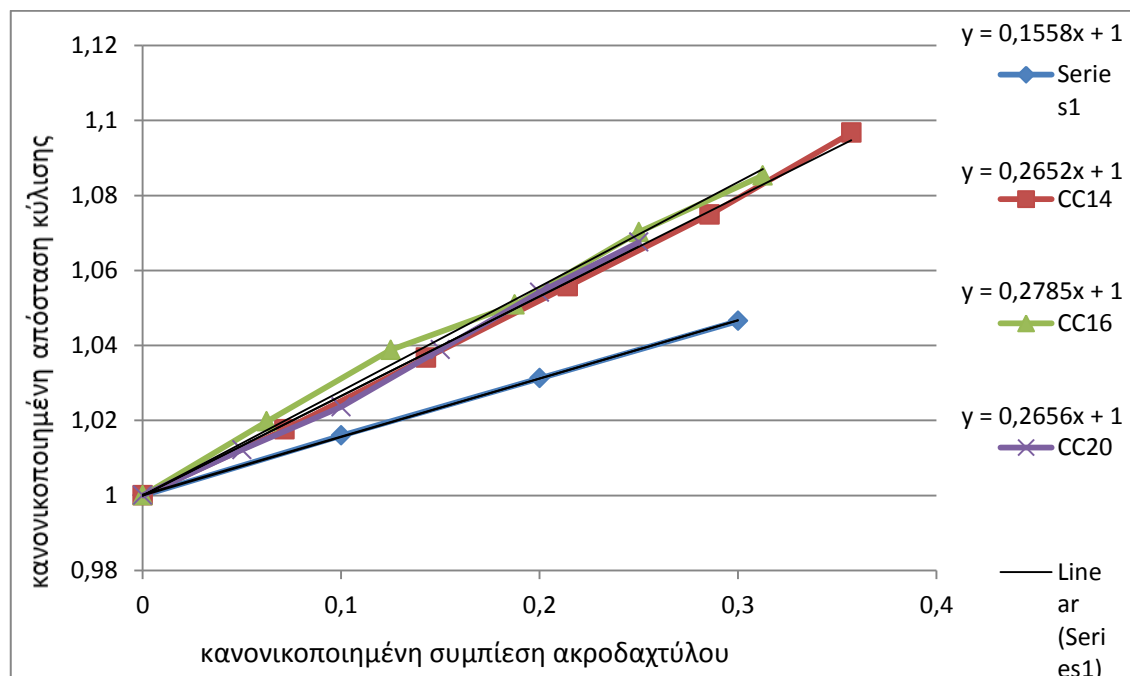
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης $\alpha = 0,1061$



Κυλινδρικά ακροδάχτυλα Wacker 4512

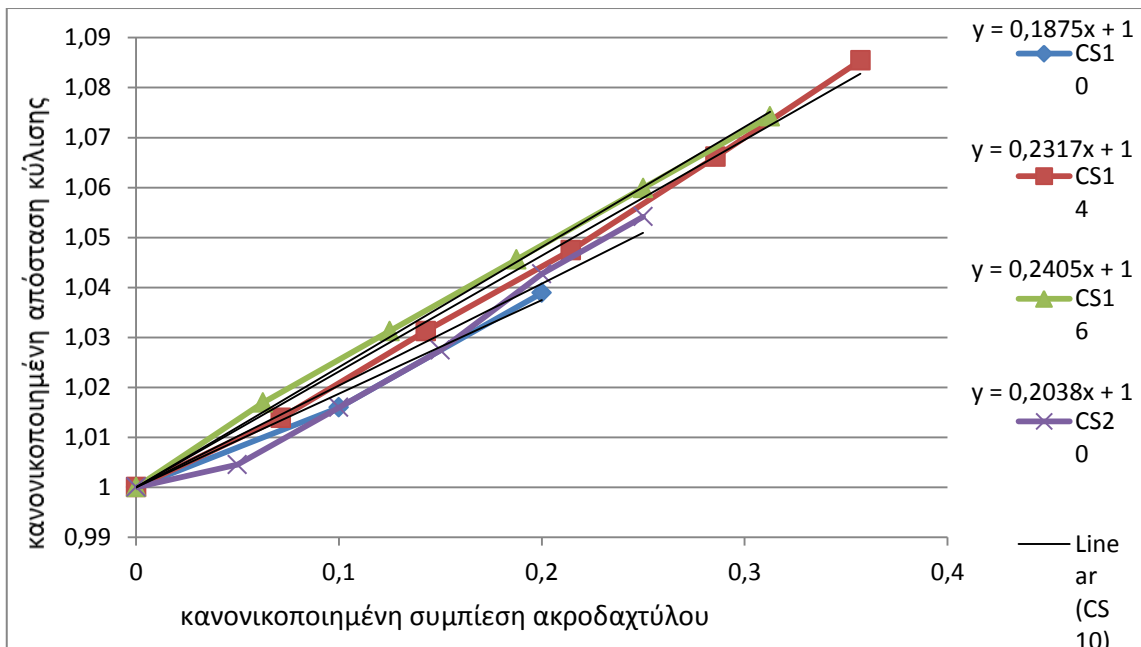
CCXX(Wacker4512) - μεσαίας σκληρότητας							
AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)	
10		14		16		20	
Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,015972	0,071428571	1,017609	0,0625	1,019701	0,05	1,012153
0,2	1,03125	0,142857143	1,036706	0,125	1,038799	0,1	1,023611
0,3	1,046528	0,214285714	1,055804	0,1875	1,050896	0,15	1,038889
		0,285714286	1,074901	0,25	1,070219	0,2	1,054167
		0,357142857	1,096726	0,3125	1,085316	0,25	1,067535

Μέσος όρος σταθεράς κύλισης $\alpha = 0,2679$



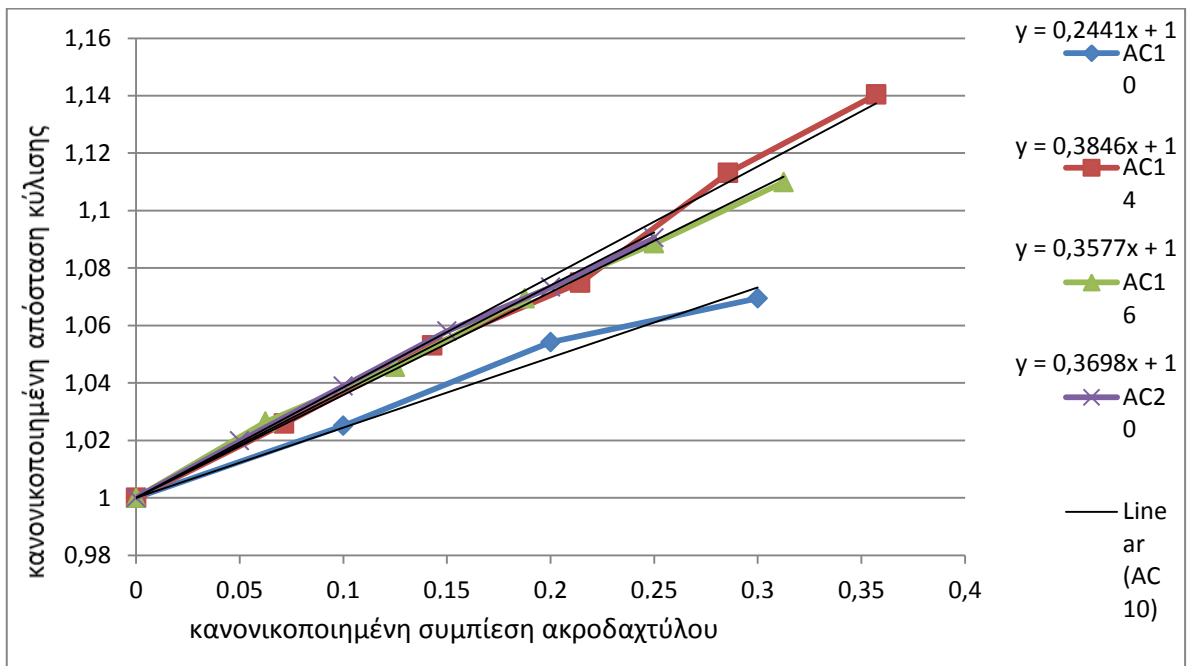
Σφαιρικά ακροδάχτυλα Wacker 4512

CSXX(Wacker4512) - μεσαίας σκληρότητας							
AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)	
10		14		16		20	
Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,015972	0,071429	1,013881	0,0625	1,016927	0,05	1,004514
0,2	1,038889	0,142857	1,03125	0,125	1,03125	0,1	1,015972
		0,214286	1,047418	0,1875	1,045573	0,15	1,027431
		0,285714	1,066155	0,25	1,059896	0,2	1,042708
		0,357143	1,085421	0,3125	1,074219	0,25	1,054167
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης α= 0,2297							



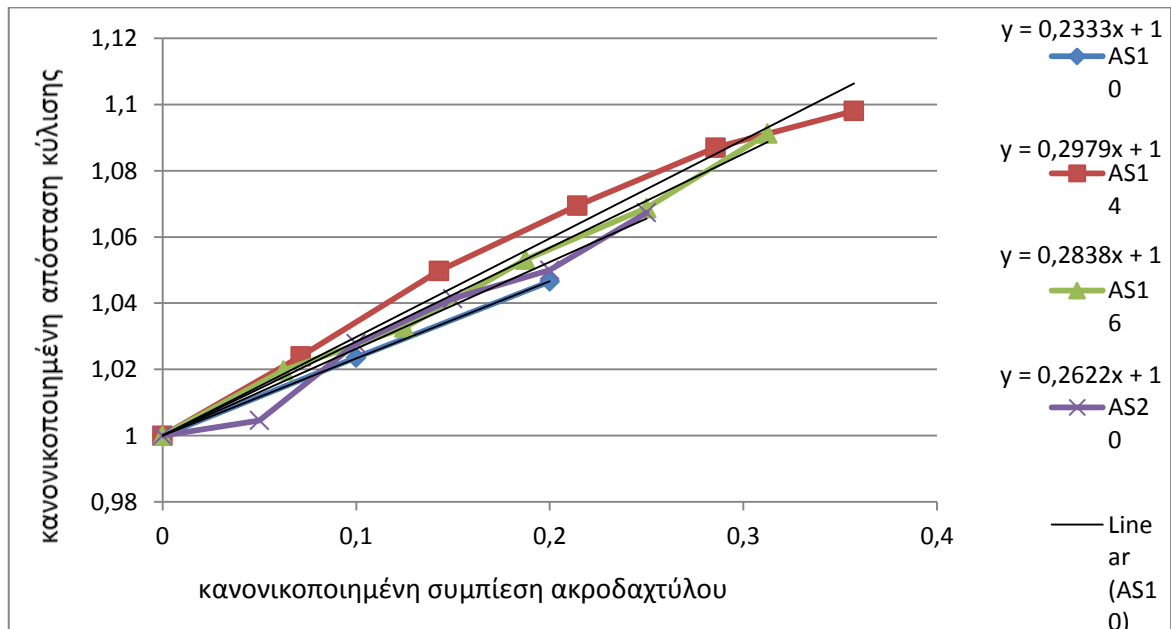
Κυλινδρικά ακροδάχτυλα Wacker 4615

ACXX(Wacker4615) - πάρα πολύ μαλακή							
ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)	
10		14		16		20	
Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,025069	0,071428571	1,025794	0,0625	1,026476	0,05	1,019792
0,2	1,054167	0,142857143	1,053075	0,125	1,045573	0,1	1,038889
0,3	1,069444	0,214285714	1,074901	0,1875	1,069444	0,15	1,057986
		0,285714286	1,113095	0,25	1,088542	0,2	1,073264
		0,357142857	1,140377	0,3125	1,109903	0,25	1,090451
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης α= 0,3693							



Σφαιρικά ακροδάχτυλα Wacker 4615

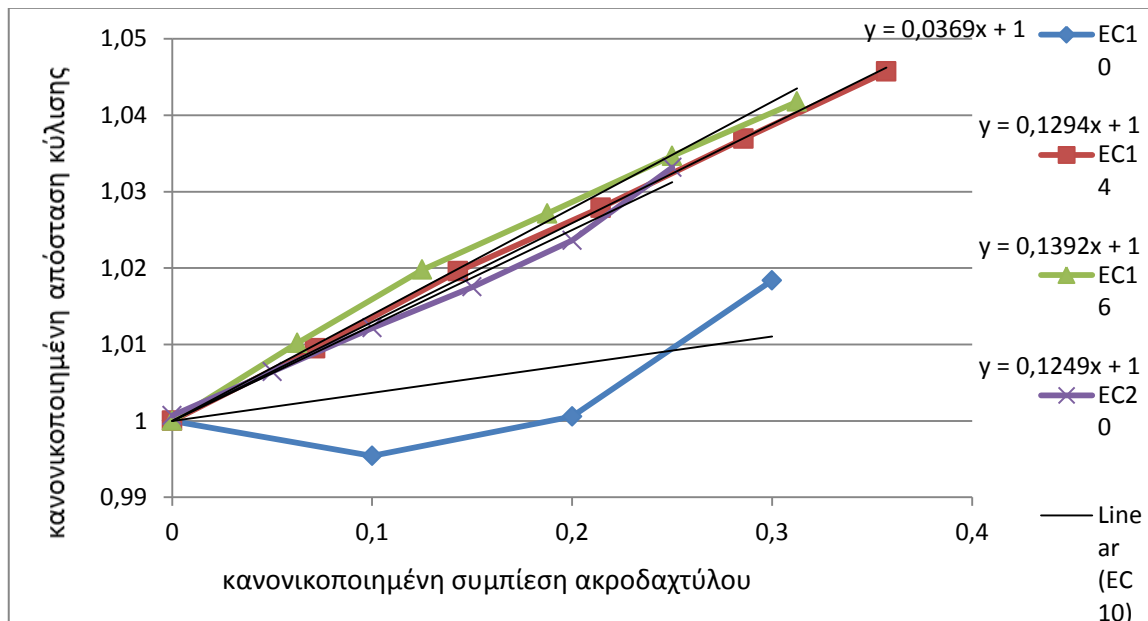
ASXX(Wacker4615) - πάρα πολύ μαλακή							
AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)	
10		14		16		20	
Δχι/r	I/L	Δχι/r	I/L	Δχι/r	I/L	Δχι/r	I/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,023611	0,071429	1,023968	0,0625	1,019738	0,05	1,004597
0,2	1,046528	0,142857	1,049794	0,125	1,032648	0,1	1,027848
		0,214286	1,069503	0,1875	1,053186	0,15	1,041388
		0,285714	1,086988	0,25	1,068751	0,2	1,049979
		0,357143	1,098085	0,3125	1,091219	0,25	1,067347
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης α= 0,2778							



Κυλινδρικά ακροδάχτυλα Essil 291 5 προς 1

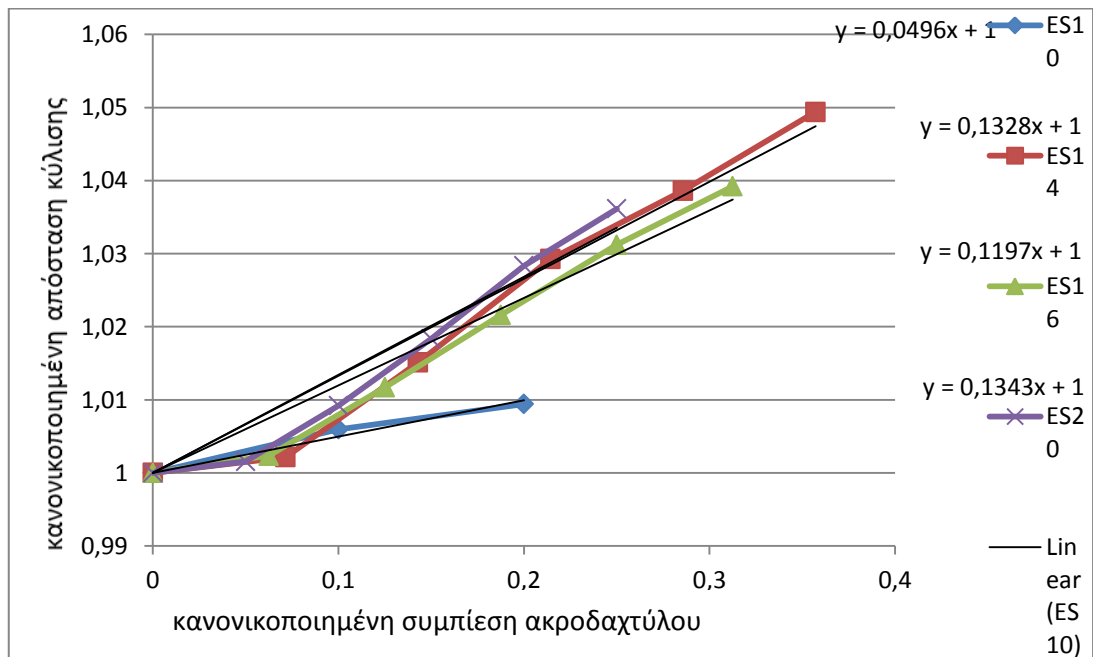
ECXX(ESSIL 291) - 5 προς 1 σκληρή							
ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)	
10		14		16		20	
Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L
0	1	0	1	0	1	0	1,000694
0,1	0,995417	0,071428571	1,009488	0,0625	1,01017	0,05	1,006424
0,2	1,000569	0,142857143	1,019567	0,125	1,01978	0,1	1,012153
0,3	1,018361	0,214285714	1,027881	0,1875	1,027123	0,15	1,0175
		0,285714286	1,036934	0,25	1,03467	0,2	1,023611
		0,357142857	1,045706	0,3125	1,041767	0,25	1,03316

Μέσος όρος σταθεράς κύλισης $\alpha = 0,13$



Σφαιρικά ακροδάχτυλα Essil 291 5 προς 1

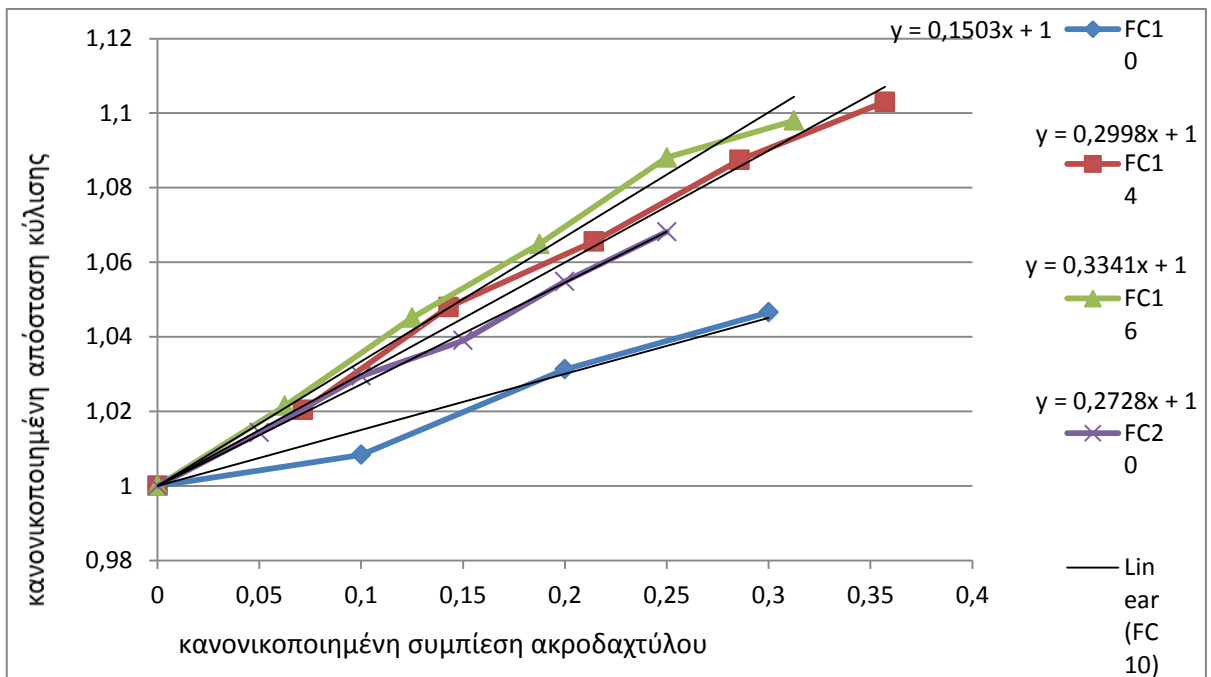
ESXX(ESSIL 291) - 5 προς 1 σκληρή							
AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)	
10		14		16		20	
Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L	Δxi/r	l/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,005972	0,071429	1,002158	0,0625	1,00235	0,05	1,001558
0,2	1,009417	0,142857	1,015114	0,125	1,011701	0,1	1,009215
		0,214286	1,029279	0,1875	1,021602	0,15	1,018361
		0,285714	1,038619	0,25	1,031215	0,2	1,028347
		0,357143	1,049399	0,3125	1,039219	0,25	1,036156
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης α= 0,1258							



Κυλινδρικά ακροδάχτυλα Essil 291 10 προς 1

FCXX(ESSIL 291) - 10 προς 1 μαλακή							
AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)	
10		14		16		20	
Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L
0	1	0	1	0	1	0	1
0,1	1,008333	0,071428571	1,020337	0,0625	1,021476	0,05	1,014246
0,2	1,03125	0,142857143	1,047979	0,125	1,045122	0,1	1,029451
0,3	1,046528	0,214285714	1,065562	0,1875	1,064867	0,15	1,038992
		0,285714286	1,087444	0,25	1,08809	0,2	1,054843
		0,357142857	1,103036	0,3125	1,097988	0,25	1,068125

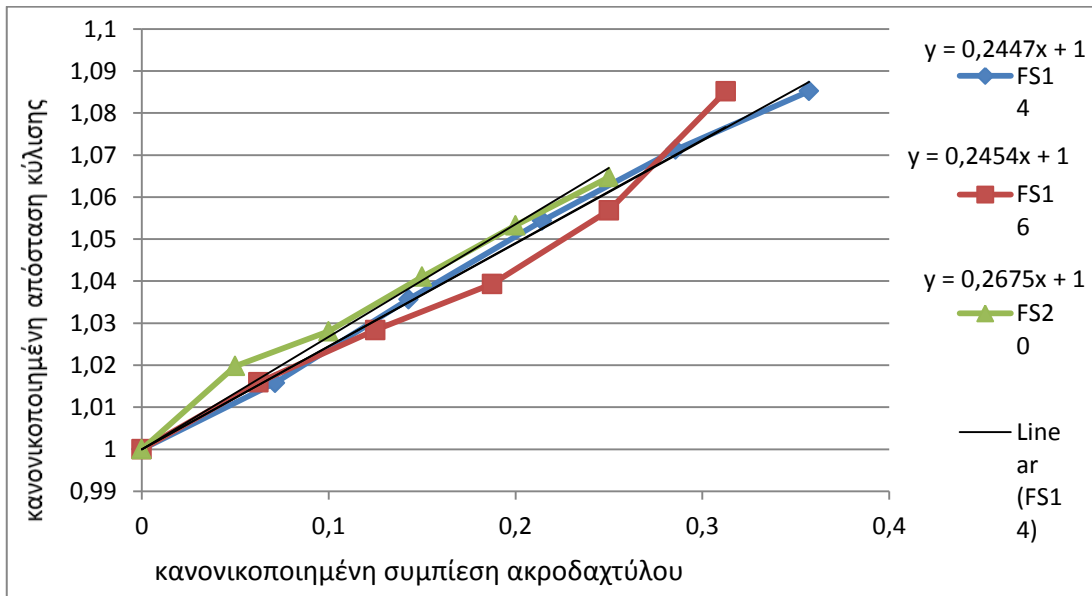
Μέσος όρος σταθεράς κύλισης α= 0,30



Σφαιρικά ακροδάχτυλα Essil 291 10 προς 1

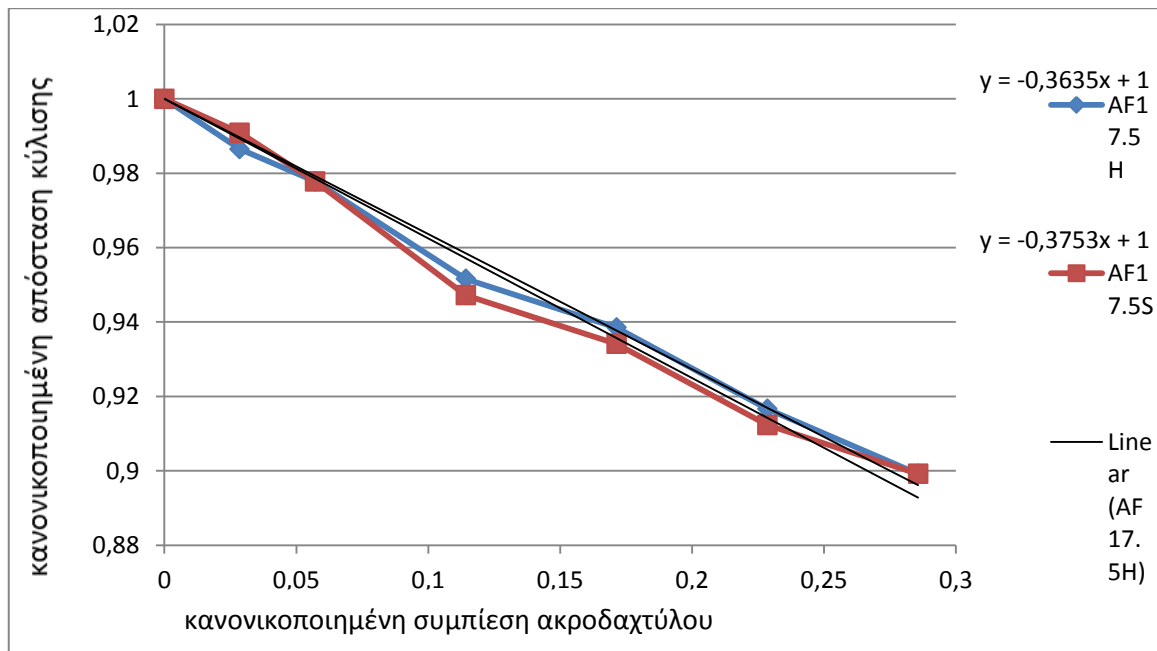
FSXX(ESSIL 291) - 10 προς 1 μαλακή							
AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)		AKTINA (mm)	
10		14		16		20	
Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L	Δxi/r	I/L
		0	1	0	1	0	1
		0,071429	1,015794	0,0625	1,015927	0,05	1,019792
		0,142857	1,035688	0,125	1,028347	0,1	1,028069
		0,214286	1,054357	0,1875	1,039316	0,15	1,041035
		0,285714	1,07127	0,25	1,056809	0,2	1,053264
		0,357143	1,085218	0,3125	1,085151	0,25	1,064722

Μέσος όρος σταθεράς κύλισης α= 0,246



Αφρώδες ακροδάχτυλα

AF17,5H (ΑΦΡΩΔΕΣ)		AF17,5S(ΑΦΡΩΔΕΣ)	
ΑΚΤΙΝΑ (mm)		ΑΚΤΙΝΑ (mm)	
17,5		17,5	
$\Delta xi/r$	I/L	$\Delta xi/r$	I/L
0	1	0	1
0,028571	0,986507937	0,028571	0,990873
0,057143	0,977777778	0,057143	0,977778
0,114286	0,951587302	0,114286	0,947222
0,171429	0,938492063	0,171429	0,934127
0,228571	0,916666667	0,228571	0,912302
0,285714	0,899206349	0,285714	0,899206
$\alpha = -0,3635$		$\alpha = -0,3753$	



Παράρτημα Β'

Στο παράρτημα Β' παρουσιάζεται ο κώδικας προγραμματισμού σε γλώσσα C++ που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό Arduino για τη λειτουργία της διάταξης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο συνθήκες if οι οποίες παρέπεμπαν σε τέσσερα εξωτερικά interrupt. Παρακάτω ο κώδικας στον οποίο δίπλα από κάθε εντολή υπάρχει επεξήγηση:

```
#define encoder0PinA 2 // Δήλωση της θύρας για το πρώτο interrupt
#define encoder0PinB 3 // Δήλωση της θύρας για το δεύτερο interrupt
#define encoder1PinA 20 // Δήλωση της θύρας για το τρίτο interrupt
#define encoder1PinB 21 // Δήλωση της θύρας για το τέταρτο interrupt
volatile unsigned int encoder0Pos = 32767.5; // Δήλωση της μεταβλητής
encoder0Pos ως 32767,5
volatile unsigned int encoder1Pos = 32767.5; // Δήλωση της μεταβλητής
encoder1Pos ως 32767,5

unsigned int Aold = 0; // Δήλωση της μεταβλητής Aold
unsigned int Bnew = 0; // Δήλωση της μεταβλητής Bnew
unsigned int Aold2 = 0; // Δήλωση της μεταβλητής Aold2
unsigned int Bnew2 = 0; // Δήλωση της μεταβλητής Bnew2
int pwmPin = 10; // Δήλωση της μεταβλητής pwmPin στη θύρα 10
int motorPin0 = 8; // Δήλωση του 12 της γέφυρας στη θύρα 8
int motorPin1 = 9; // Δήλωση του 11 γέφυρας στη θύρα 9
volatile float angle = 0; // Δήλωση της μεταβλητής angle
volatile float angle2 = // Δήλωση της μεταβλητής angle2

void setup()
{
  pinMode(motorPin0, OUTPUT); // Δήλωση του motorPin0 ως έξοδο
  pinMode(motorPin1, OUTPUT); // Δήλωση του motorPin1 ως έξοδο
  pinMode(pwmPin, OUTPUT); // Δήλωση του pwmPin ως έξοδο
  pinMode(encoder0PinA, INPUT); // Δήλωση του encoder0PinA ως είσοδο
  pinMode(encoder0PinB, INPUT); // Δήλωση του encoder0PinB ως είσοδο
  pinMode(encoder1PinA, INPUT); // Δήλωση του encoder1PinA ως είσοδο
  pinMode(encoder1PinB, INPUT); // Δήλωση του encoder1PinB ως είσοδο
  attachInterrupt(0, doEncoderA, CHANGE); // Δήλωση συνάρτησης
του interrupt 0 (pin3)
  attachInterrupt(1, doEncoderB, CHANGE); // Δήλωση συνάρτησης
του interrupt 1 (pin 2)
  attachInterrupt(3, doEncoderA1, CHANGE); // Δήλωση συνάρτησης
του interrupt 3 (pin 20)
  attachInterrupt(2, doEncoderB1, CHANGE); // Δήλωση συνάρτησης
του interrupt 2 (pin 21)
  Serial.begin (9600);
}

void loop() // Εκτέλεση βρόγχου
{
  if (angle < 360) { // Συνθήκη if
    analogWrite(pwmPin,70); // Δήλωση στον pwmPin την
τιμή 70
    digitalWrite(motorPin0,HIGH); // Δήλωση του motorPin0
ως HIGH
    digitalWrite(motorPin1,LOW); // Δήλωση του motorPin1
ως LOW
  }
  if (angle > 360) {
    analogWrite(pwmPin,0); // Δήλωση στον pwmPin
την τιμή 70
  }
}
```

```

digitalWrite(motorPin0,LOW); // Δήλωση του motorPin0
                               ως LOW
digitalWrite(motorPin1,HIGH); // Δήλωση του motorPin1
                               ως HIGH
    }
    Serial.print("ANGLE: "); // Συνθήκη print
    Serial.println(angle); // Εκτύπωση της τιμής
                            της μεταβλητής angle
                            στην σειριακή οθόνη

    Serial.print("\t");
    Serial.print("ANGLE: ");
    Serial.print(angle2); // Εκτύπωση της τιμής
                            της μεταβλητής angle2
                            στην σειριακή οθόνη

    Serial.print("\t");
}

void doEncoderA(){ //Ονομασία της συνάρτησης interrupt 0
    Bnew^Aold ? encoder0Pos++:encoder0Pos--; // Συνάρτηση του
                                                int0

    Aold=digitalRead(encoder0PinA);
    angle=encoder0Pos*0.5-16383.75;
}

void doEncoderB(){ // Ονομασία της συνάρτησης interrupt 1
    Bnew=digitalRead(encoder0PinB); // Συνάρτηση του int1
    Bnew^Aold ? encoder0Pos++:encoder0Pos--;
    angle=encoder0Pos*0.5-16383.75;
}

// Για τον δεύτερο κινητήρα
void doEncoderA1(){ //Ονομασία της συνάρτησης interrupt 2
    Bnew^Aold2 ? encoder1Pos++:encoder1Pos--; // Συνάρτηση του
                                                int2

    Aold2=digitalRead(encoder1PinA);
    angle2=encoder1Pos*0.5-16383.75;
}

void doEncoderB1(){ //Ονομασία της συνάρτησης interrupt 3
    Bnew2=digitalRead(encoder1PinB); // Συνάρτηση του int3
    Bnew2^Aold2 ? encoder1Pos++:encoder1Pos--;
    angle2=encoder1Pos*0.5-16383.75;
}

```

Βιβλιογραφία

[1] Chang D. C & Cutkosky M. R.: “Rolling with Deformable Fingertips”, Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems, Pittsburgh, PA, pp. 194-199, August (1995)

[2] Διδακτορική διατριβή: Ευσταθής λαβή και χειρισμός αντικειμένου από ρομποτικά δάκτυλα με παραμορφώσιμα άκρα και δυνατότητα κύλισης στον δισδιάστατο χώρο, Πολυτεχνική σχολή τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών τομέας Ηλεκτρονικής & Υπολογιστών εργαστήριο Αυτοματοποίησης & Ρομποτικής, Α. Π. Θ., Θεσσαλονίκη 2004
Δρ.Φασουλός Ιωάννης [u](#)