



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΙΚΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΙΣΤΩΝ***

Παναγιωτόπουλος Δ. Ηλίας

**Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής
Λεωνίδας Αλεξόπουλος**

Αθήνα 2016



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΙΚΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΙΣΤΩΝ***

Παναγιωτόπουλος Δ. Ηλίας

**Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής
Λεωνίδας Αλεξόπουλος**

Εγκρίθηκε την 19^η Οκτωβρίου 2016 από την τριμελή επιτροπή:

.....
Αλεξόπουλος Λεωνίδας
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Προβατίδης Χριστόφορος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Τσαγγάρης Σωκράτης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2016

Copyright © Παναγιωτόπουλος Ηλίας, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό εκπαιδευτικής, ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Εμβιομηχανικής και Συστημικής Βιολογίας, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Λεωνίδα Αλεξόπουλου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αλεξόπουλο που δέχτηκε να πραγματοποιήσω τη διπλωματική μου εργασία στο εργαστήριό του. Ευχαριστώ για την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου έδωσε, καθώς και για όλα τα μέσα που μου προσφέρθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής μου. Μου δόθηκε η ευκαιρία να συμμετάσχω και να εργαστώ σε μια διεπιστημονική ομάδα με ανθρώπους πλήρως καταρτισμένους στο αντικείμενο τους. Οι, πολύτιμες για τη μελλοντική μου σταδιοδρομία, εμπειρίες και γνώσεις που απέκτησα στο εργαστήριο είναι πολύ περισσότερες από αυτές που μπορούν να αποτυπωθούν σε μια διπλωματική εργασία.

Θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον Δημήτριο Τζεράνη για τη καθοδήγηση και υποστήριξη που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Κανακάρη για την συμβολή του στο σχεδιασμό και στη κατασκευή των εξαρτημάτων της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα την Αναστασία Γκουσιούδη για την πολύτιμη βοήθεια της στα βιολογικά πειράματα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά κάθε ένα από τα μέλη του εργαστηρίου για το υπέροχο καθημερινό κλίμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη, την υπομονή και την αγάπη τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
1.Εισαγωγή	3
1.1.Αρθρικός Χόνδρος	3
1.1.1.Λειτουργία και Δομή	3
1.1.2.Μηχανικές Ιδιότητες	4
1.1.3.Φθορά και Εκφυλισμός του Χόνδρου	5
1.2.Μέθοδοι Πειραματικής Μελέτης των Μηχανικών Ιδιοτήτων του Χόνδρου	5
1.3.Διατάξεις Μελέτης Εμβιομηχανικής στο Χόνδρο	6
1.3.1.Διατάξεις Μέτρησης Ενός Δείγματος	6
1.3.2.Διατάξεις Μέτρησης Πολλαπλών Δειγμάτων	8
1.4.Σκοπός Διπλωματικής	14
2.Σχεδιασμός και Κατασκευή Διάταξης	15
2.1.Σύνοψη της Διάταξης	15
2.1.1.Κατασκευαστικές Προδιαγραφές	15
2.1.2.Εννοιολογικός Σχεδιασμός – Αρχή Λειτουργίας	16
2.1.3.Κατασκευαστική Υλοποίηση	16
2.2.Κατασκευαστική Υλοποίηση της Διάταξης	23
2.2.1.Βάση Έδρασης Δειγμάτων	23
2.2.2.Αισθητήρας Απόστασης	24
2.2.3.Σύστημα Κίνησης X-Y του Αισθητήρα Απόστασης	26
2.2.4.Βάση Έδρασης Συστήματος Κίνησης	29
2.3.Στοιχεία Ελέγχου της Διάταξης	30
2.3.1.Ηλεκτρονικά Στοιχεία Χαμηλού Επιπέδου (Low Level)	31
2.3.1.1.Έλεγχος Κίνησης X-Y μέσω Arduino	31
2.3.1.2.Επικοινωνίας Η/Υ με τον Αισθητήρα Απόστασης	35
2.3.2.Ηλεκτρονικά Στοιχεία Υψηλό Επίπεδο (High Level)	37
2.3.2.1.Λογισμικό χειρισμού του αισθητήρα	37
2.3.2.2.Γραφικό Περιβάλλον Επικοινωνίας Διάταξης-Χρήστη	38
3.Πειραματική Αξιολόγηση της Διάταξης	40
3.1.Θερμική Ευστάθεια Μετρήσεων	40
3.1.1.Θερμικά Σφάλματα κατά την Αλλαγή Θερμοκρασίας της Διάταξης	40
3.1.2.Έλεγχος Μετρήσεων σε Αλλαγή Θερμοκρασίας στη Βάση Έδρασης Δειγμάτων	41

3.2.Ακρίβεια και Επαναληψιμότητα Μετρήσεων	42
4.Πειραματική Εφαρμογή: Παρακολούθηση Εκφυλισμού Χόνδρου	48
4.1.Προετοιμασία δειγμάτων χόνδρου.....	48
4.2.Διαδικασία εισαγωγής δειγμάτων χόνδρου στην διάταξη.....	48
4.3.Πειραματικός Σχεδιασμός	50
4.4.Πειραματικά Αποτελέσματα	51
5.Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	53
6.Βιβλιογραφία	54
Παραρτήματα	55
Παράρτημα Α: Κατασκευαστικά Σχέδια	55
Παράρτημα Β: Κώδικας Λογισμικού.....	74
Β1. Κώδικας arduino.....	74
Β2. Κώδικας γραφικού περιβάλλοντος.....	77
Παράρτημα Γ: Εγχειρίδιο Χρήσης Διάταξης	80
Γ1.Οδηγίες χρήσεως συσκευής.....	80
Γ2. Λογισμικό χειρισμού του αισθητήρα.....	82

Περίληψη

Ο αρθρικός χόνδρος είναι ένας αναγγειακός ιστός, που παρεμβάλλεται ανάμεσα στα οστά των αρθρώσεων. Ο αρθρικός χόνδρος είναι υψίστης σημασίας καθώς κατανέμει τις δυνάμεις και μειώνει την τριβή μεταξύ των αρθρώσεων, βοηθώντας έτσι στην κίνηση. Λόγω της έλλειψης αγγείων σε αυτό, δεν μπορεί να γίνει ανάπλαση του ιστού σε περίπτωση φθοράς του χόνδρου είτε από ατύχημα είτε από τη πάροδο των χρόνων. Ο εκφυλισμός του χόνδρου έχει άμεση συνέπεια την επιδείνωση των μηχανικών του ιδιοτήτων, με αποτέλεσμα ασθενείς με προβλήματα στους χόνδρους να παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα στις κινήσεις του και να υποφέρουν από έντονους πόνους. Η σύγχρονη ιατρική δεν έχει καταφέρει ακόμα να ανακαλύψει κάποια συγκεκριμένη αγωγή για να αναστέλλει τη πορεία της εκφύλισης του αρθρικού χόνδρου. Για αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντική η πειραματική μελέτη του χόνδρου.

Στη παρούσα διπλωματική περιγράφεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή συσκευής που θα εκτελεί μηχανικές δοκιμές συμπίεσης σε δείγματα αρθρικού χόνδρου. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συσκευής είναι ότι θα δύναται να λάβει μετρήσεις παραμόρφωσης πολλαπλών δειγμάτων χόνδρου. Έχοντας ικανοποιητικό αριθμό δειγμάτων χόνδρου να καταπονούνται ταυτόχρονα γίνεται πιο εύκολη και πιο αποτελεσματική η σύγκριση της συμπεριφοράς τους, δεδομένου ότι κάθε δείγμα χόνδρου θα τροφοδοτείται με διαφορετικές πιθανές φαρμακευτικές παρεμβάσεις.

Εκτός από τις λεπτομέρειες σχεδιασμού και κατασκευής της συσκευής, στη διπλωματική εργασία παραθέτονται και αποτελέσματα πειραμάτων χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων της συσκευής. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παραμόρφωσης σε δοκιμή συμπίεσης τεσσάρων δειγμάτων αρθρικού χόνδρου.

Abstract

Articular cartilage is an avascular tissue, which is located between the bones of joints. Articular cartilage is of utmost importance because it allocates the forces and reduces the friction between the joints. Due to lack of vessels in the articular cartilage is impossible to achieve reconstruction of tissue in case of damage caused ether by accident or by extended life duration. The degeneration of the cartilage results in the deterioration of its mechanical properties. As a consequence, patients with cartilage issues, suffer from movement difficulties and acute pain. As of now there are not any scientific discoveries that prevent the deterioration of the articular cartilage. So it's really significant the experimental study of cartilage.

This thesis describes the design and the construction of a device that performs compression test at articular cartilage sample. The distinct attribute of this device is that it can take measurements and results of multiple cartilage samples (High-throughput). The ability to have multiple samples strained simultaneously assists in a more effective comparison of the cartilage reactions, given the fact that each sample will be induced with different pharmaceutical interventions.

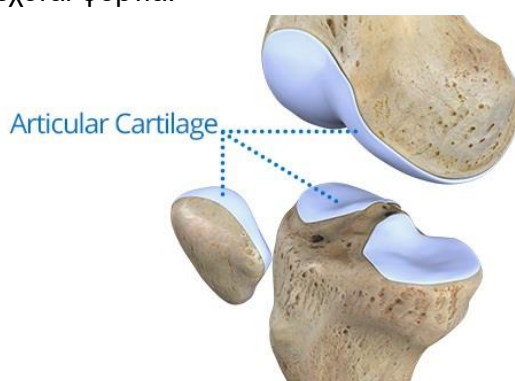
In addition to the details of the design and the construction of the device, there are also tests for the validation of the device included. Finally, this thesis includes the strain results of four compressed articular cartilage samples

1. Εισαγωγή

1.1. Αρθρικός Χόνδρος

1.1.1. Λειτουργία και Δομή

Ο σκελετός του ανθρώπινου σώματος είναι υπεύθυνος για την στήριξη του σώματος και των μυών έναντι της βαρύτητας. Δηλαδή, φέρει όλα τα φορτία τα οποία δέχεται το σώμα. Οι αρθρώσεις συνδέουν τα διάφορα οστά μεταξύ τους. Τα οστά όμως δεν είναι δυνατόν να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, καθώς οι δυνάμεις τριβής που θα αναπτύσσονταν θα προκαλούσαν φθορά στα οστά, όπως θα συνέβαινε κατά την έμφορτη επαφή μεταλλικών αντικειμένων χωρίς λίπανση. Για αυτό το λόγο ενδιάμεσα από τα οστά παρεμβάλλεται ο αρθρικός χόνδρος. Στην άκρη κάθε οστού της άρθρωσης υπάρχει ένα λεπτό στρώμα χόνδρου, έτσι ώστε η επαφή να είναι χόνδρος με χόνδρο. Ο αρθρικός χόνδρος, λοιπόν, είναι ένας λεπτός συνδετικός ιστός, ο οποίος καλύπτει τα άκρα των διαρθρωτικών οστών αποτρέποντας την επαφή μεταξύ τους. Είναι ένας ιστός χαμηλής τριβής, ικανός να δέχεται φορτία.

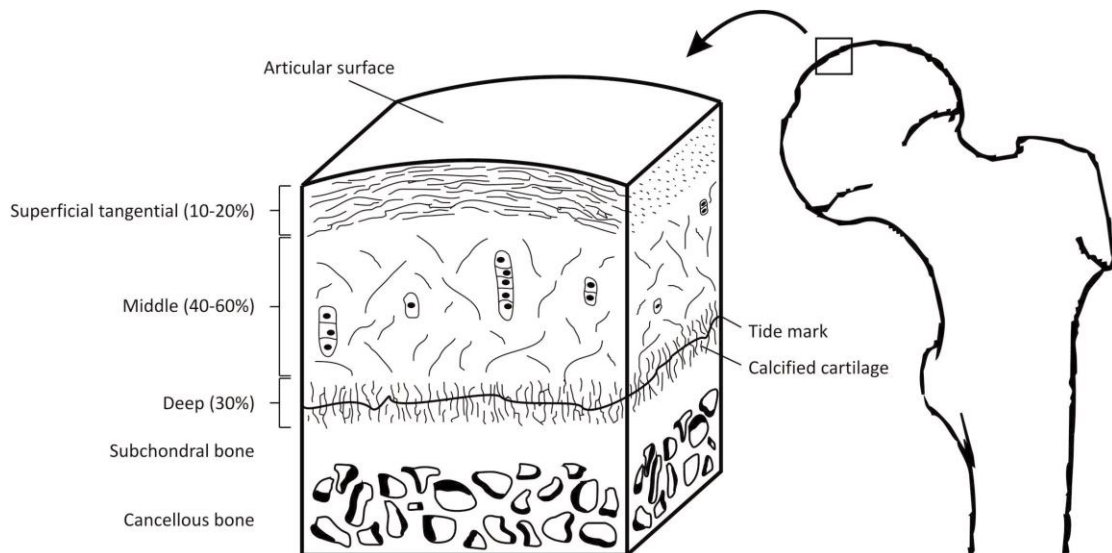


Εικόνα 1.1: Αρθρικός χόνδρος γονάτου.[17]

Ο χόνδρος είναι ένας αδιαφανής, ελαστικός, αναγγειακός ιστός, ο οποίος αποτελείται από ένα είδος κυττάρων, τα χονδροκύτταρα, τα οποία περιβάλλονται από μια εξωκυττάρια μήτρα. Στις περισσότερες αρθρώσεις το πάχος του κυμαίνεται από 1,5mm έως 3mm και έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει δυνάμεις της τάξεως 1-4MPa περίπου δύο εκατομμύρια φορές το χρόνο. Η εξωκυττάρια μήτρα του αποτελείται κυρίως από νερό (65%-85%) και το υπόλοιπο μέρος του ιστού αποτελείται από ένα πυκνό δίκτυο ινών κολλαγόνου ενσωματωμένα σε ένα διάλυμα από πρωτεογλυκάνες. Το κολλαγόνο και οι πρωτεογλυκάνες είναι αυτές που επιτρέπουν στον ιστό να λειτουργήσει σε μεγάλης εντάσεως μηχανικές καταπονήσεις στις αρθρώσεις του γονάτου, ισχίου και ώμου.

Ο αρθρικός χόνδρος έχει μια εξαιρετικά οργανωμένη ιεραρχική δομή που χωρίζεται σε 4 ζώνες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.2.:

Η επιφανειακή Ζώνη (*superficial zone*) αποτελεί το 10-20% του συνολικού πάχους του αρθρικού χόνδρου και περιέχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα κολλαγόνου. Τα χονδροκύτταρα παράγουν κυρίως κολλαγόνο τύπου II κατανεμημένο σε παράλληλη διάταξη με την επιφάνεια του ιστού. Η εξωκυττάρια μήτρα έχει μικρότερη περιεκτικότητα σε πρωτεογλυκάνες σε αντίθεση με τις άλλες ζώνες. Η *μεσαία ζώνη (middle zone)* χαρακτηρίζεται από τυχαία προσανατολισμένες ίνες κολλαγόνου και μεγάλη περιεκτικότητα σε πρωτεογλυκάνες. Η *βαθιά ζώνη (deep zone)* βρίσκεται μεταξύ χόνδρου και οστού και οι ίνες κολλαγόνου ευθυγραμμίζονται κάθετα προς την επιφάνεια, με σκοπό να ενδυναμώσουν το δεσμό μεταξύ χόνδρου και οστού. Τα χονδροκύτταρα είναι οργανωμένα σε στήλες παράλληλες με τις ίνες κολλαγόνου. Η *ασβεστοποιημένη ζώνη (calcified zone)* χωρίζει τον αρθρικό χόνδρο και το οστό και περιέχει λίγα χονδροκύτταρα τα οποία είναι εγκλωβισμένα μέσα σε ασβεστοποιημένη εξωκυττάρια μήτρα [10,12].



Εικόνα 1.2: Ζώνες αρθρικού χόνδρου.[14]

Η εξωκυττάρια μήτρα (extracellular matrix, ECM) είναι ο εξωκυττάριος χώρος μιας πολυκυτταρικής δομής, ο οποίος προσφέρει δομική και βιοχημική υποστήριξη στα κύτταρα. Η μοναδική σύνθεση και πολύπλοκη δομή της παρέχει αξιόλογες μηχανικές ιδιότητες που επιτρέπουν στο χόνδρο να δέχεται μεγάλα φορτία. Ως εκ τούτου, κάθε ένα από τα δομικά συστατικά συμβάλλει σημαντικά στην ικανότητα του ιστού να αντέχει δυνάμεις συμπίεσης, εφελκυσμού και διάτμησης. Τα συστατικά αυτά είναι τα εξής:

Το *κολλαγόνο* είναι το κυρίαρχο δομικό μακρομόριο του χόνδρου. Υπάρχουν 29 διαφορετικοί τύποι κολλαγόνου, όμως στο χόνδρο η πλειοψηφία είναι κολλαγόνο τύπου II. Οι *γλυκοζαμινογλυκάνες* (GAGs) αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες μονάδες ενός δισακχαρίτη που αποτελείται από μια ακετυλιωμένη ή μια θειωμένη εξοζαμίνη μαζί με είτε ουρονικό οξύ ή γαλακτόζη. Οι *πρωτεογλυκάνες* είναι πρωτεΐνες στις οποίες πλευρικά συνδέονται μια ή περισσότερες αλυσίδες γλυκοζαμινογλυκανών. Οι πρωτεογλυκάνες δημιουργούν ένα δίκτυο, το οποίο είναι πεπλεγμένο με το οργανωμένο δίκτυο των κολλαγόνων. Η *φιμπρονεκτίνη* είναι μια πολυλειτουργική γλυκοπρωτεΐνη, η οποία βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα στην εξωκυττάρια μήτρα του φυσιολογικού χόνδρου. Ρόλος της είναι η σύνδεση κυττάρων και εξωκυττάριας μήτρας. Το *αρθρικό υγρό* αποτελείται από νερό και ανόργανα άλατα νατρίου, ασβεστίου, χλωρίου και καλίου. Η πλειονότητα του νερού του ιστού περιέχεται στους πόρους της εξωκυττάριας μήτρας αλλά διαχέεται σε όλο τον όγκο του ιστού. Έτσι ο χόνδρος λαμβάνει όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά και κατά τη μηχανική καταπόνηση του ιστού, το υγρό διαχέεται έξω από τον ιστό ώστε ο ιστός να μην καταστρέφεται. Τα *χονδροκύτταρα* είναι το μόνο είδος κυττάρων που συναντάται στον αρθρικό χόνδρο και αποτελούν λιγότερο από το 5-10% του συνολικού όγκου του ιστού [10,12].

1.1.2. Μηχανικές Ιδιότητες

Ο αρθρικός χόνδρος αποτελεί ένα αποτελεσματικό όργανο των μηχανικών πιέσεων στις οποίες υπόκεινται πολλές αρθρώσεις. Τα μόρια πρωτεογλυκάνης που βρίσκονται είτε μεμονωμένα είτε σε ομάδες περιέχουν μεγάλη ποσότητα νερού. Αυτά τα συστατικά της θεμέλιας ουσίας λειτουργούν σαν μηχανικά βιοελατήρια. Όταν εφαρμόζεται πίεση, το νερό εκρέει από τη θεμέλια ουσία του χόνδρου προς το αρθρικό υγρό. Όταν εκδιώκεται το νερό, τότε ένας άλλος μηχανισμός μπαίνει στο παιχνίδι προκειμένου να διατηρηθεί η ελαστικότητα του χόνδρου. Πρόκειται για την αμοιβαία ηλεκτροστατική απώθηση των φορτισμένων αρνητικά καρβοξυλίων και των θειικών ομάδων των μορίων της γλυκοζαμινογλυκάνης. Αυτά τα ηλεκτρικά φορτία είναι επίσης υπεύθυνα για τον διαχωρισμό των μονάδων της γλυκοζαμινογλυκάνης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται χώροι που γεμίζουν νερό. Όταν η πίεση χαλαρώνει, το νερό έλκεται

πάλι προς τα μεσοδιαστήματα των κλάδων της γλυκοζαμινογλυκάνης. Αυτές οι κινήσεις του υγρού εκδηλώνονται όταν χρησιμοποιείται η άρθρωση [13].

1.1.3. Φθορά και Εκφυλισμός του Χόνδρου

Το μεγάλο μειονέκτημα του χόνδρου είναι η απουσία αγγείων σε αυτό. Αυτό το στοιχείο λειτουργεί αρνητικά, γιατί μειώνει την ικανότητα αναγέννησης και ανάπλασης του χόνδρου. Έτσι όταν τραυματισθεί έχει εξαιρετικά μειωμένη ικανότητα αυτοεπιδιόρθωσης. Φθορές στο χόνδρο προκαλούνται κυρίως από έντονη αθλητική δραστηριότητα.

Εκτός από φθορές λόγω τραυματισμού, ο χόνδρος εκφυλίζεται με τα χρόνια. Λόγω της αύξησης του μέσου όρου ζωής όλο και περισσότεροι άνθρωποι πάσχουν από εκφυλιστικές νόσους του χόνδρου. Η οστεοαρθρίτιδα είναι η κυριότερη εκφυλιστική νόσος των αρθρώσεων. Χαρακτηρίζεται πάντοτε από την εκφύλιση του αρθρικού χόνδρου.

Η οστεοαρθρίτιδα συνοδεύεται από σημαντικές αλλοιώσεις τόσο στη σύνθεση όσο και στις μηχανικές ιδιότητες των χόνδρων. Στα αρχικά στάδια της νόσου, ο εκφυλισμένος χόνδρος περιέχει σε σύγκριση με τον υγιή, αυξημένη ποσότητα νερού και μειωμένη ποσότητα πρωτεογλυκάνης. Επιπρόσθετα φαίνεται να υπάρχει μια εξασθένηση του δικτύου των ινών κολλαγόνου. Αυτές οι αλλοιώσεις τείνουν να μειώσουν την ανθεκτικότητα και την ελαστικότητα του χόνδρου. Ως απάντηση σε αυτές τις αλλοιώσεις, τα χονδροκύτταρα αναπαράγονται και προσπαθούν να επιδιορθώσουν την βλάβη παράγοντας νέο κολλαγόνο και πρωτεογλυκάνες. Αρχικά, οι επιδιορθωτικές δραστηριότητες είναι ικανές να εξισορροπούν την συνεχώς επιδεινούμενη κατάσταση. Τελικά όμως τα χονδροκύτταρα εξασθενούν και δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στην αυξημένη καταλυτική διαδικασία στην οποία βρίσκεται ο χόνδρος.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [], η οικογένεια των μεταλλοπρωτεασών (Matrix Metalloproteases-MMP's) έχουν σημαντικό ρόλο στον εκφυλισμό του χόνδρου. Από αυτή την οικογένεια τρία μέλη έχουν βρεθεί σε αυξημένα επίπεδα στην οστεοαρθρίτιδα, οι κολλαγενάσες (collagenases), οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αποδόμηση του κολλαγόνου, οι στρωμελυσίνες (stromelysins), οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αποδόμηση των πρωτεογλυκανών και οι ζελατινάσες (gelatinases), οι οποίες αποδομούν το κολλαγόνο τύπου II.[13]

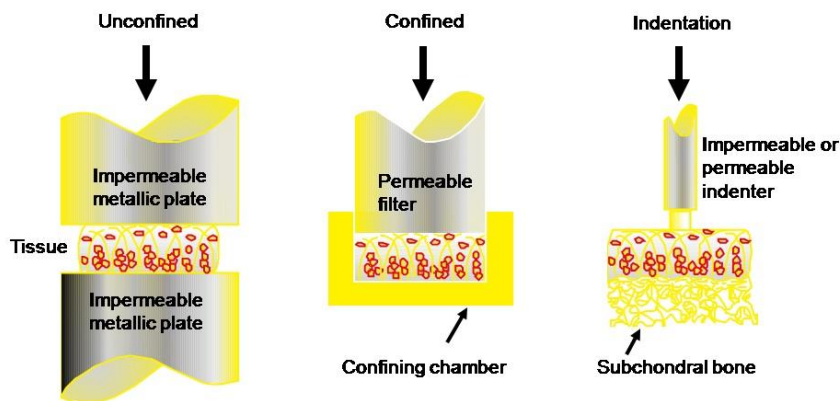
1.2. Μέθοδοι Πειραματικής Μελέτης των Μηχανικών Ιδιοτήτων του Χόνδρου

Τρεις είναι οι, κοινώς αποδεκτοί, μέθοδοι πειραματικής μελέτης που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του χόνδρου[10]:

Ανεμπόδιστη συμπίεση (unconfined compression). Σε αυτή τη δοκιμή ο ιστός τοποθετείται μεταξύ δυο πλακών και η τάση ή η παραμόρφωση ασκείται κάθετα στην συμπίεση επιφάνεια. Με αυτή τη δοκιμή ο ιστός διαστέλλεται ακτινικά, ενώ υπάρχει και ροή υγρού του ιστού έξω από τον ιστό σε πλευρική κατεύθυνση.

Περιορισμένη συμπίεση (confined compression). Σε αυτή τη δοκιμή ο χόνδρος τοποθετείται σε ένα σφραγισμένο θάλαμο με αδιαπέραστα τοιχώματα και συμπιέζεται από μια πορώδες επιφάνεια. Έτσι, περιορίζεται η διαστολή του ιστού κατά την ακτινική κατεύθυνση και το υγρό του ιστού ρέει μόνο μέσα στην πορώδες επιφάνεια

Δοκιμή αυλάκωσης (indentation test). Σε αυτή τη δοκιμή, ένα δείγμα χόνδρου συμπιέζεται από ένα κυλινδρικό συμπίεστη, ο οποίος μπορεί να έχει επίπεδη ή σφαιρική επιφάνεια επαφής με τον ιστό. Η ροή του ρευστού του ιστού πραγματοποιείται και σε αξονική και σε ακτινική κατεύθυνση, αφού επιφάνειες του ιστού δεν συγκρατούνται.



Εικόνα 1.3: Μέθοδοι πειραματικής μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων του χόνδρου.[15]

1.3. Διατάξεις Μελέτης Εμβιομηχανικής στο Χόνδρο

Οι μηχανικές δοκιμές σε δείγματα αρθρικού χόνδρου δίνουν την ικανότητα αξιολόγησης της ικανότητας τους να αντέχουν μηχανική φόρτιση. Για αυτό το λόγο, στο παρελθόν, έχουν αναπτυχθεί αρκετές διαφορετικές διατάξεις, κάποιες από τις οποίες περιγράφονται στη συνέχεια. Τα περισσότερα από τα μηχανήματα που θα παρουσιαστούν έχουν δημοσιευτεί σε περιοδικά από διάφορα εργαστήρια ανά το κόσμο και παρουσιάζονται με το πρότυπο τίτλο της δημοσίευσής τους.

1.3.1. Διατάξεις Μέτρησης Ενός Δείγματος

Σε αυτό το μέρος του κεφαλαίου, περιγράφονται διατάξεις για μηχανικές δοκιμές σε ένα δείγμα χόνδρου κάθε φορά.

BOSE Electroforce 3100 [10]

Η Electroforce 3100 είναι μια εμπορική μηχανή δοκιμής υλικών της εταιρίας BOSE, η οποία χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του χόνδρου. Έχει την ικανότητα να αποθηκεύει σημαντικές πληροφορίες για τον χαρακτηρισμό των υλικών, σε ένα ελαφρύ (18kg) και σχετικά μικρό σε διαστάσεις μηχανικό σύστημα. Η μηχανή αποτελείται από ένα γραμμικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ο οποίος προσφέρει μια εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές κινήσεις και στον έλεγχο της δύναμης που ασκεί λόγω του σχεδιασμού κινούμενου μαγνήτη που διαθέτει. Διαθέτει, επίσης, ένα συμπιεστή που συνδέεται γραμμικά με ένα γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή (linear variable differential transformer, LVDT) και τον γραμμικό κινητήρα. Ακόμη, περιέχει ένα μεταλλικό έλασμα το οποίο είναι τοποθετημένο σε μια δυναμοκυψέλη. Ο συμπιεστής της μηχανής ελέγχεται μέσω ενός λογισμικού που παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα εφαρμογής συμπίεσης τόσο με στατικό όσο και με δυναμικό φορτίο. Παρέχει μέγιστη δυναμική ή στατική δύναμη 22N με επιταχύνσεις που φτάνουν τα 20G και απόκριση συχνότητας έως 100Hz.



Εικόνα 1.4: Μηχανή δοκιμής υλικών BOSE Electroforce 3100 του εργαστηρίου Εμβιομηχανικής και Συστημικής Βιολογίας.

A simple measuring device for laboratory indentation test on cartilage (2008)[5]

Αυτή η συσκευή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για εργαστηριακές δοκιμές αυλακώσεως σε δείγματα χόνδρου. Η συσκευή αποτελείται από έναν οπτικό μετατροπέα μετατόπισης με ένα έμβολο, ο οποίος χρησιμεύει σαν οδηγός για το σφαιρικό άκρο της συσκευής. Δημιουργήθηκαν δυο σφαιρικά άκρα με διαφορετικές διαμέτρους από ασάλι. Το μικρό άκρο (1,5mm διάμετρος) χρησιμοποιείται σε δοκιμές σκληρών ιστών ενώ το μεγαλύτερο (3mm διάμετρος) για δοκιμές σε μαλακότερους ιστούς. Η δύναμη που ασκείται στο δείγμα προέρχεται από τη βαρύτητα του εμβόλου και από ένα εγγενές ελατήριο το οποίο μετακινεί το έμβολο στην θέση μέτρησης. Η δύναμη αυτή ισούται με 0,765N. Για δοκιμές σε πολύ μαλακούς ιστούς, μπορεί να αφαιρεθεί το εσωτερικό ελατήριο και η ασκούμενη δύναμη να πέσει στα 0,170N. Η μετατόπιση που ασκεί μπορεί να μετρηθεί σε ακρίβεια 1 μ m και αποθηκεύεται σε ένα σύστημα μέτρησης ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο οπτικός μετατροπέας μετατόπισης είναι στερεωμένος σε ένα άκαμπτο πλαίσιο μέσω μιας δυναμοκυψέλης. Η δυναμοκυψέλη αυτή έχει εύρος μέτρησης 50N με ακρίβεια 0,002N. Με αυτή την ακρίβεια στη μέτρηση θέσης και δύναμης γίνεται επιτρεπτή η ανίχνευση της αρχικής επαφής του σφαιρικού άκρου με το δείγμα, και ως εκ τούτου εξασφαλίζονται σχεδόν ίδιες αρχικές συνθήκες για τις διαφορετικές δοκιμές.



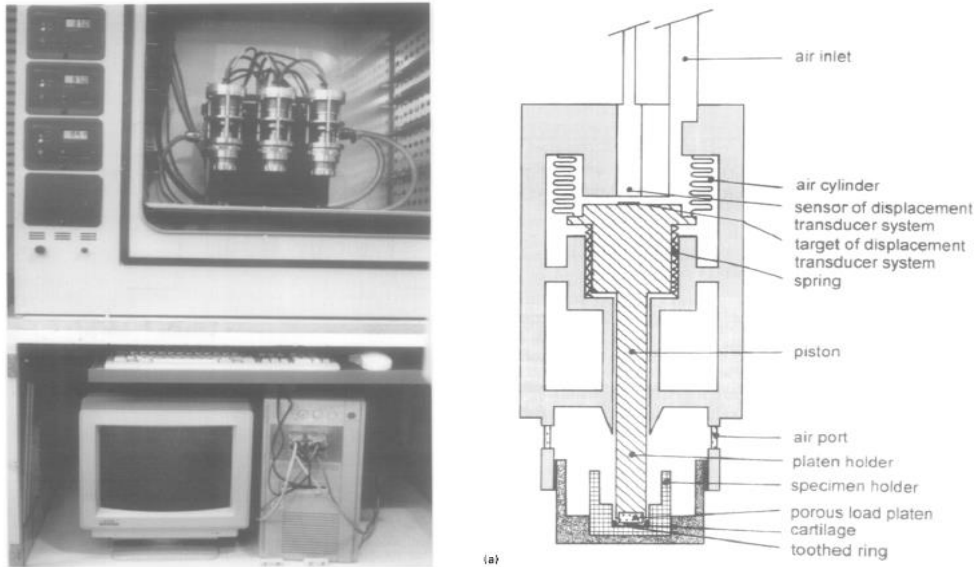
Εικόνα 1.5: Απλή συσκευή μέτρησης για εργαστηριακές δοκιμές αυλακώσεως σε χόνδρο.[5]

1.3.2. Διατάξεις Μέτρησης Πολλαπλών Δειγμάτων

Σε αυτό το εδάφιο γίνεται αναφορά διατάξεων που έχουν την ικανότητα να ασκούν μηχανικές δοκιμές σε πολλά δείγματα ιστού ταυτόχρονα.

A Computer-Controlled Mechanical Culture System (1997) [1]

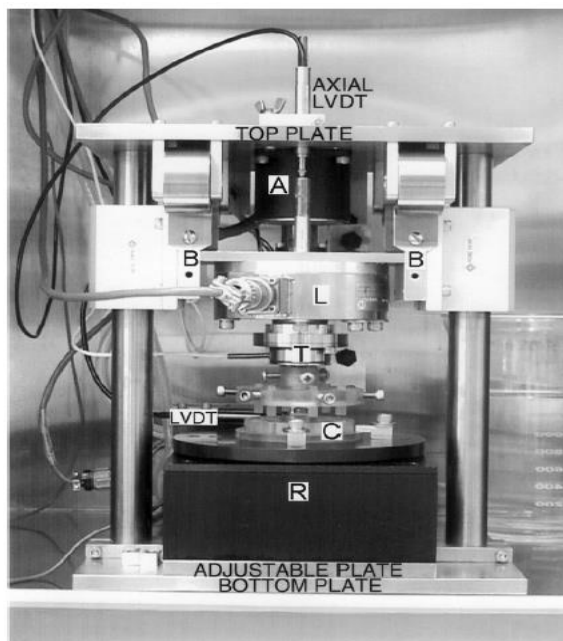
Αυτή η διάταξη είναι ένα μηχανικό σύστημα καλλιέργειας που μπορεί να τοποθετηθεί και να λειτουργήσει μέσα σένα πρότυπο επωαστήριο CO₂, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.6. Η διάταξη αποτελείται από 6 θαλάμους, όπου στο κάθε ένα πραγματοποιείται και από μια μηχανική δοκιμή σε δείγμα χόνδρου. Για την εξασφάλιση της βιοσυμβατότητας και προς αποφυγήν μόλυνσης το εξωτερικό κέλυφος της διάταξης είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ασάλι. Στο κατώτερο τμήμα κάθε θαλάμου υπάρχει μια θύρα (διαμέτρου 10mm) που επιτρέπει την ανταλλαγή με τον αέρα του επωαστήρα χρησιμοποιώντας ένα πορώδες γυάλινο φίλτρο. Στο κατώτερο μέρος του θαλάμου, στεγάζεται μια αποσπώμενη πλάκα συγκράτησης δειγμάτων, κατασκευασμένη από τιτάνιο, η οποία μπορεί να δεχτεί έως 8ml περιβάλλοντος υγρού. Μέσω μιας βαλβίδας αέρα, αέρας εισέρχεται μέσα σε ένα κυλινδρικό θάλαμο, ο οποίος προκαλεί κάθετη μετατόπιση σε ένα έμβολο ώστε να συμπιεστεί το δείγμα χόνδρου. Στη κάτω επιφάνεια του εμβόλου, δηλαδή την επιφάνεια που ασκεί πίεση στο δείγμα χόνδρου, είναι τοποθετημένο ένα πορώδες φίλτρο φτιαγμένο από γυαλί (διαμέτρου 10mm). Ο κάθε θάλαμος μπορεί να εφαρμόσει δυνάμεις μέχρι 500N με ανάλυση 0,19N. τα φορτία μπορούν να εφαρμοστούν σε συχνότητες από 0,001HZ έως 5Hz, χρησιμοποιώντας μια μεγάλη ποικιλία κυματομορφών. Η διάταξη ελέγχεται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή που βρίσκεται εκτός επωαστήρα.



Εικόνα 1.6: Μηχανικό σύστημα καλλιέργειας ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αριστερά: Η διάταξη μέσα σε επωαστήριο. Δεξιά: Σχέδιο ενός θαλάμου.[1]

A Versatile Shear and Compression apparatus for mechanical stimulation of Tissue culture explants (2000) [2]

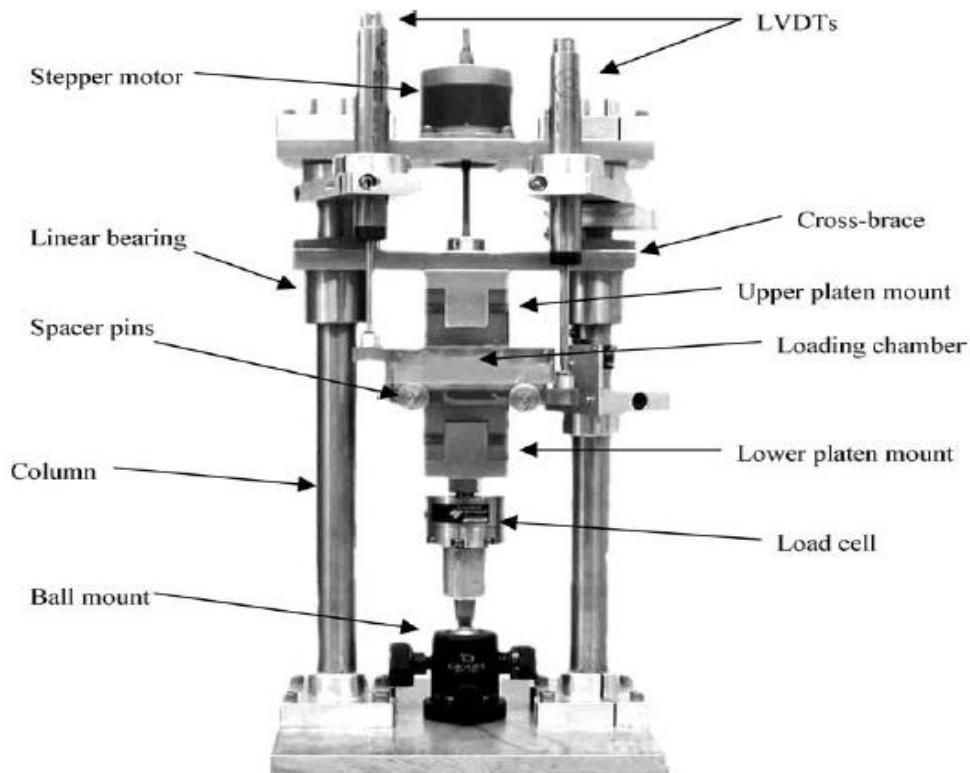
Η συσκευή αυτή, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για χρήση της μέσα σε ένα πρότυπο επωαστήριο CO₂. Αποτελείται από δυο πλάκες, την άνω και την κάτω, κατασκευασμένες από ανοξείδωτο ασάλι βιδωμένες σε τρεις ράβδους στήριξης. Στη πάνω πλάκα εδράζεται ένας γραμμικός βηματικός κινητήρας, ο οποίος κινεί στη κατακόρυφα μια κοχλιωτή ράβδο που είναι συνδεδεμένη με μια πλάκα η οποία ασκεί φορτία σε δείγματα χόνδρου. Ο αξονικός κινητήρας είναι σε θέση να εφαρμόσει δύναμη θλίψεως έως 400N. Επίσης, η συσκευή έχει τη δυνατότητα να ασκεί στα δείγματα χόνδρου και μηχανικές δοκιμές σε διατμητική καταπόνηση. Αυτό επιτυγχάνεται περιστρέφοντας το τραπέζι στο οποίο εδράζονται τα δείγματα χόνδρου, από ένα βηματικό κινητήρα. Η γωνιακή και αξονική μετατόπιση μετριέται με ένα γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή. Η διάταξη έχει ικανότητα αξονικής παραμόρφωσης της τάξεως του 1μm και ημιτονοειδής περιστροφής της τάξεως της 0,01°. Η αξονική ανάλυση είναι 50nm για εφαρμογή ημιτονοειδής κυματομορφής από 10μm έως 100μm. Η περιστροφική ανάλυση είναι 0,0005°.



Εικόνα 1.7: Διάταξη για μηχανικές δοκιμές διάτμησης και συμπίεσης σε δείγματα χόνδρου.[2]

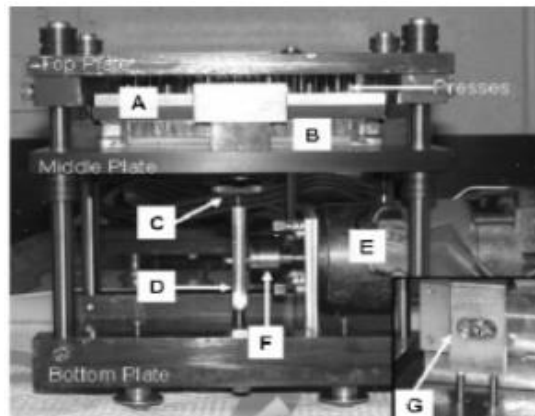
A Direct Compression Stimulator for Articular Cartilage and Meniscal Explants (2006)[3]

Και αυτή η διάταξη έχει την ικανότητα να λειτουργεί μέσα σε έναν επωαστήρα CO₂. Αποτελείται από μια μεγάλη αλουμινένια βάση για σταθερότητα. Δυο ράβδοι λειτουργούν σαν οδηγοί κίνησης της άνω πλάκας αλλά και σαν υποστήριξη του βηματικού κινητήρα που κινεί στο κάθετο άξονα την άνω πλάκα. Μια δυναμοκυψέλη παρέχει ανάδραση δύναμης για εξασφάλιση της επαφή με το δείγμα χόνδρου αλλά και για έλεγχο της δύναμης που ασκείται σε αυτό. Η ανάδραση θέσης γίνεται με τη χρήση ενός γραμμικού μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή. Ο θάλαμος που τοποθετούνται τα δείγματα ιστού έχει χωρητικότητα 45 δειγμάτων και επιτρέπει το περιβάλλον υγρό να κυκλοφορεί μεταξύ των δειγμάτων. ο θάλαμος είναι κατασκευασμένος από πολυσουλφόνη και μπορεί να αφαιρείται από την υπόλοιπη διάταξη, ώστε η τοποθέτηση των δειγμάτων να γίνεται σε αποστειρωμένο περιβάλλον. Η συσκευή έχει 3mm μέγιστη αξονική μετατόπιση με ανάλυση $\pm 1\mu\text{m}$. Επίσης, είναι ικανή να εφαρμόσει δύναμη 445N με ανάλυση 0,02N, με μέγιστη συχνότητα διέγερσης 5Hz.



*Εικόνα 1.8: Διεγερτής για απευθείας συμπίεση σε δείγματα χόνδρου και μηνίσκου[3]
Design and Application of an Oscillatory Compression Device for Cell Constructs (2007)[4]*

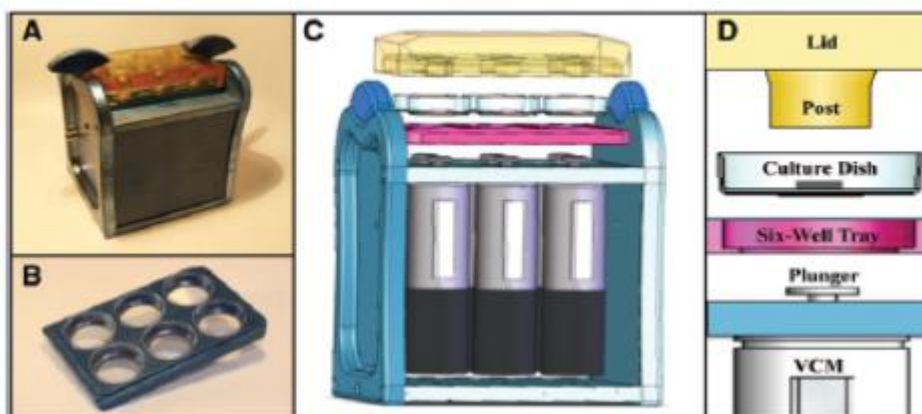
Η διάταξη αποτελείται από δυο πλάκες, κατασκευασμένες από ανοξείδωτο ατσάλι, οι οποίες συγκρατούνται μεταξύ τους με τη χρήση 4 ράβδων και έχει διαστάσεις που το κάνουν ικανό να μπει και να λειτουργήσει μέσα σε ένα πρότυπο επωαστήριο CO₂. Επίσης, διαθέτει μια ενδιάμεση πλάκα, κατασκευασμένη από αλουμίνιο, η οποία μπορεί αν συγκρατήσει ένα δοχείο με 96 πηγάδια (96 wellplate). Η άνω πλάκα διαθέτει 20 ακίδες (διαστάσεων: 2,5cm ύψος, 5,5mm διάμετρος). Η μεσαία πλάκα κινείται στον κατακόρυφο άξονα από ένα βηματικό κινητήρα που εδράζεται στην κάτω πλάκα. Επομένως καθώς ανεβαίνει η μεσαία πλάκα, οι ακίδες συμπιέζουν τα δείγματα ιστού που είναι τοποθετημένα στις αντίστοιχες θέσεις ενός δοχείου με 96 πηγάδια. Η συσκευή μπορεί να δεχτεί δείγματα ιστού πάχους έως 8mm και μπορεί να εφαρμόσει τραπεζοειδές, ημιτονοειδές στατικές και τριγωνικές κυματομορφές.



Εικόνα 1.9: Συσκευή για εφαρμογή ταλαντωτικής συμπίεσης σε κυτταρικές κατασκευές[4]

A Novel Bioreactor for the Dynamic Stimulation and Mechanical Evaluation of Multiple Tissue-Engineered Constructs (2011)[6]

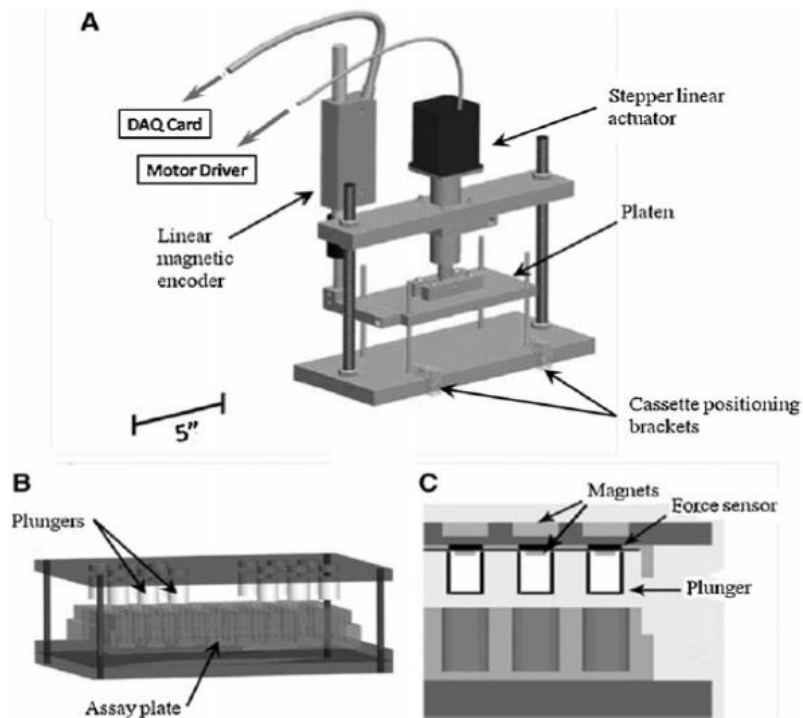
Η συσκευή είναι συμπαγής και έχει σχεδιαστεί για λειτουργία μέσα σε πρότυπο επωαστήριο CO₂. Τα δείγματα ιστού τοποθετούνται σε δίσκους καλλιέργειας που εδράζονται σε μια κατασκευή που αναπαριστά ένα δοχείο καλλιέργειας με 6 πηγάδια (εικόνα 1.10 Β). Ένα ημιδιαφανές καπάκι κατασκευασμένο από πολυσουλφόνη, περιλαμβάνει 6 κυλινδρικούς συμπιεστές, που είναι κεντραρισμένοι 6mm πάνω από το κέντρο κάθε πηγαδιού. Η δύναμη και η μετατόπιση ελέγχονται και υπολογίζονται με τη χρήση έξι ηλεκτρομαγνητικών επενεργητών που ο καθένας διαθέτει και έναν οπτικό κωδικοποιητή. Οι επενεργητές σηκώνουν το κάθε δίσκο καλλιέργειας και έτσι το κάθε δείγμα ιστού έρχεται σε επαφή με τους κυλινδρικούς συμπιεστές. Οι επενεργητές έχουν εύρος κίνησης 15mm, ταλαντεύονται με ταχύτητες έως 1,5m/s και εφαρμόζουν δυνάμεις έως 18N. Ο χειρισμός της συσκευής γίνεται με λογισμικό φτιαγμένο σε LabView.



Εικόνα 1.10: Βιο-αντιδραστήρας για δυναμική διέγερση και μηχανική αξιολόγηση πολλαπλών δειγμάτων ιστού.[6]

Design and Validation of a Compressive Tissue Stimulator with High-Throughput Capacity and Real-time Modulus Measurement Capability (2012)[7]

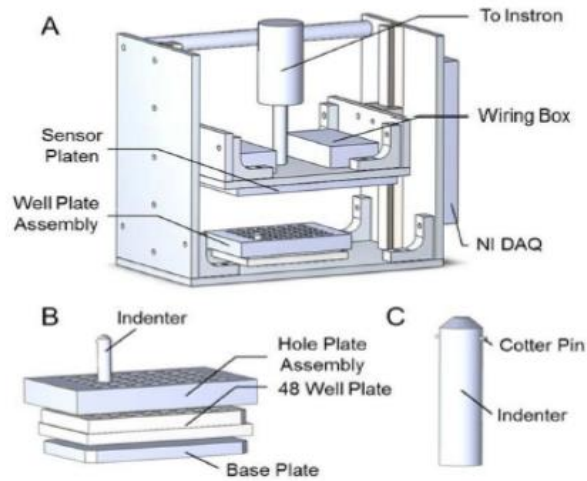
Η διάταξη έχει σχεδιαστεί για να χωράει και λειτουργεί μέσα σε ένα πρότυπο επωαστήριο CO₂. Όλα τα μεταλλικά μέρη είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο. Μια πλάκα κινείται από ένα γραμμικό επενεργητή, ο οποίος εδράζεται στην πάνω πλάκα της διάταξης. Η κινούμενη πλάκα οδηγείται μέσω τεσσάρων ράβδων και αντίστοιχων ρουλεμάν. Σημαντικό μέρος αυτού του σχεδιασμού είναι η αποσπώμενη κασετίνα (εικόνα 1.11 Β) όπου τοποθετούνται τα δείγματα ιστού. Το ανώτερο τμήμα της κασετίνας καθοδηγείται από 4 μπρούτζινους ράβδους, επιτρέποντας την κάθετη μετατόπιση της. Στην άνω επιφάνεια της κασετίνας, 12 μαγνήτες νεοδυμίου είναι τοποθετημένοι σε αντίστοιχες σπές, ώστε να ευθυγραμμίζονται με τα πηγάδια ενός δοχείου με 48 πηγάδια. 12 κυλινδρικά έμβολα από τεφλόν με μικρότερους μαγνήτες στην άνω επιφάνεια τους, συνδέονται μαγνητικά με την άνω πλάκα της κασετίνας. Τα έμβολα αυτά είναι που ασκούν φορτία στα δείγματα χόνδρου. Μεταξύ των εμβόλων και της άνω πλάκας της κασετίνας είναι τοποθετημένο ένα δίκτυο αισθητήρων δυνάμεως για τον έλεγχο της ασκούμενης δύναμης πάνω στα δείγματα. Ο χειρισμός της διάταξης πραγματοποιείται μέσω LabView.



Εικόνα 1.11: Διάταξη διεξαγωγής θλίψης σε πολλαπλά δείγματα ιστού με δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο το μέτρο ελαστικότητας.[7]

A High-Throughput Mechanical Screening Device for Cartilage Tissue Engineering (2014)[8]

Το περίβλημα αυτής της συσκευής αποτελείται από μία πλάκα αλουμινίου για βάση της διάταξης και δυο παράλληλες πλευρικές πλάκες, στις οποίες είναι τοποθετημένα γραμμικά έδρανα. Τα έδρανα αυτά χρησιμεύουν στην ευθυγράμμιση και στην ομαλή κατακόρυφη κίνηση μιας πλάκας από αλουμίνιο. Στην κάτω πλευρά αυτή της πλάκας είναι τοποθετημένο ένα δίκτυο αισθητήρων δύναμης. Για τον έλεγχο της κάθετης μετατόπισης της πλάκας, χρησιμοποιείται μια μηχανή Instron. Η διάταξη μπορεί να πραγματοποιήσει μηχανικές δοκιμές σε 48 δείγματα χόνδρου, τα οποία βρίσκονται μέσα στα πηγάδια μια πλάκας με 48 πηγάδια. Η 48αρα πλάκα τοποθετείται κάτω από ένα κομμάτι αλουμινίου, το οποίο διαθέτει 48 διαμπερείς οπές κεντραρισμένες τόσο με τα πηγάδια της 48αρας πλάκας αλλά και με το δίκτυο αισθητήρων. Μέσα από τις οπές περνάν 48 κυλινδρικοί συμπιεστές, στους οποίους έχουν τοποθετηθεί μια περόνη για την ταυτόχρονη απομάκρυνση τους. Έτσι η κινούμενη πλάκα της διάταξης έρχεται σε επαφή με την άνω επιφάνεια των συμπιεστών και τους ασκεί φορτίο. Εν συνεχεία, η κάτω επιφάνεια κάθε συμπιεστή ασκεί το φορτίο στο δείγμα χόνδρου με το οποίο έρχεται σε επαφή. Τα δεδομένα συλλέγονται μέσω ενός λογισμικού φτιαγμένο σε LabView.



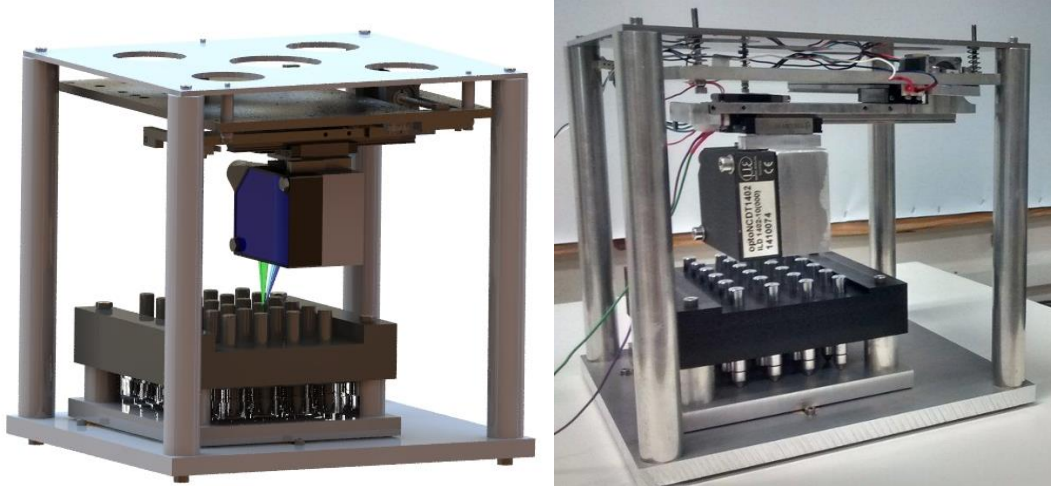
Εικόνα 1.12: Μηχανική συσκευή για πολλαπλά δείγματα ιστού.[8]

1.4. Σκοπός Διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός, η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός των ικανοτήτων μιας συσκευής για εργαστηριακές δοκιμές συμπίεσης σε πολλαπλά (High-Throughput) δείγματα ιστού.

2. Σχεδιασμός και Κατασκευή Διάταξης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τον έλεγχο της διάταξης. Οι τελικές διαστάσεις της είναι 220mm×194mm×208mm και έχει την ικανότητα να λειτουργήσει σε συνθήκες επώασης κυττάρων (37°C, 5% CO₂) μέσα σε έναν κανονικού μεγέθους επωαστήρα.



Εικόνα 2.1: Αριστερά: CAD της συσκευής. Δεξιά: Φωτογραφία της συσκευής

2.1. Σύνοψη της Διάταξης

2.1.1. Κατασκευαστικές Προδιαγραφές

Ξεκινώντας μια διαδικασία εύρεσης και επιλογής μιας κατασκευαστικής λύσης, πρέπει να θεσπιστούν οι προδιαγραφές, σύμφωνα με τις οποίες θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός της συσκευής. Για τη συγκεκριμένη συσκευή, οι πιο κρίσιμες κατασκευαστικές προδιαγραφές είναι:

- Να επιτελεί δοκιμή συμπίεσης σε περισσότερα από ένα δείγματα χόνδρου.
- Τα δείγματα του χόνδρου πρέπει να βρίσκονται σε κατάλληλο περιβάλλον, μέσα σε κάποια πλάκα που να επιτρέπει την εύκολη χρήση τους από τους πειραματιστές. Εδώ υφίσταται ο περιορισμός που έχει να κάνει με την τυποποίηση των πλακών πολλαπλών βοθρίων (multi-well plates) μέσα στα οποία μελετώνται συνήθως τα δείγματα χόνδρου μαζί με το περιβάλλον υγρό τους.
- Η διακριτική ικανότητα μέτρησης της παραμόρφωσης του ιστού λόγω αποδόμησης του $\leq 10\mu\text{m}$. Αυτό αντιστοιχεί στο 1% του πάχους ενός συνήθους δείγματος χόνδρου (1mm).
- Εισαγωγή των δειγμάτων με τρόπο άσπετο, ώστε να αποφευχθεί μόλυνση κατά την μέτρηση
- Η συσκευή πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες επώασης ευκαρυωτικών κυττάρων (θερμοκρασία 37°C, υγρασία >90%).
- Η μέτρηση των δειγμάτων πρέπει να διαρκεί έως 5 μέρες.
- Η συσκευή επιτρέπει την εύκολη και άσπετη τοποθέτηση των δειγμάτων ιστού σε κατά το δυνατόν ελάχιστο χρόνο με όσο δυνατόν καλύτερη επαναληψιμότητα.
- Δυνατότητα σύνδεσης της συσκευής με ηλεκτρονικό υπολογιστή, για την αποθήκευση των δεδομένων και την ανάλυση τους
- Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος, που θα δίνει την δυνατότητα σε μη ειδικευμένους χρήστες να το χρησιμοποιήσουν.

2.1.2. Εννοιολογικός Σχεδιασμός – Αρχή Λειτουργίας

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που τέθηκαν πραγματοποιήθηκε ο εννοιολογικός σχεδιασμός της συσκευής (conceptual design).

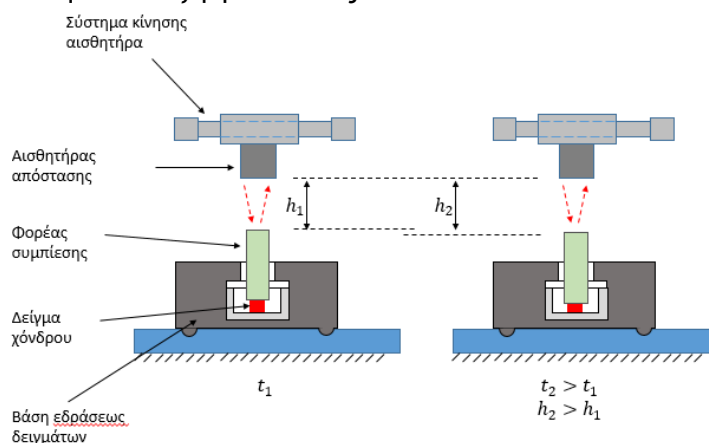
Η συσκευή που θα σχεδιαστεί, θα εκτελεί πειράματα συμπίεσης σε δείγματα χόνδρου. Τα δείγματα χόνδρου θα τοποθετούνται μέσα σε πηγάδια ενός δοχείου πηγαδιών. Η συμπίεση στα δείγματα θα γίνεται από φορείς συμπίεσης, και η δύναμη που θα ασκείται στα δείγματα χόνδρου θα προέρχεται εξ ολοκλήρου από το βάρος των φορέων συμπίεσης. Επομένως, είναι αναγκαία η ύπαρξη μιας βάσης στην οποία θα τοποθετείται η πλάκα που θα περιέχει τα δείγματα ιστού και οι φορείς συμπίεσης. Η βάση αυτή θα επιτρέψει την κάθετη μετατόπιση των φορέων συμπίεσης με την ελάχιστη επίδραση τριβής.

Η αποδόμηση του ιστού μετριέται μετρώντας την μετατόπιση του φορέα συμπίεσης: καθώς αποδομάται ο ιστός, ελαττώνεται η ελαστικότητα του, οπότε μετακινείται προς τα κάτω ο φορέας συμπίεσης. Μετρώντας τη μετατόπιση του φορέα συμπίεσης και γνωρίζοντας την αρχική διάσταση του δείγματος ιστού, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η τροπή και (έστω και χονδρικά) το μέτρο ελαστικότητας του ιστού.

Αφού η δύναμη που ασκείται στα δείγματα είναι γνωστή, δεν χρειάζεται η ύπαρξη στη συσκευή κάποιου αισθητήρα μέτρησης δύναμης. Από τη μέτρηση της κάθετης μετατόπισης των φορέων συμπίεσης θα εκτιμάται η παραμόρφωση των δειγμάτων. Η μέτρηση της κάθετης μετατόπισης θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενός αισθητήρα μέτρησης απόστασης. Η αρχή λειτουργίας τη διάταξης φαίνεται στην εικόνα 2.2

Για την μέτρηση πολλαπλών δειγμάτων είναι αναγκαία η ύπαρξη σχετικής κίνησης μεταξύ του αισθητήρα απόστασης και της βάσης με τα δείγματα χόνδρου. Αυτό πραγματοποιείται με τη κίνηση του αισθητήρα απόστασης σε δύο άξονες κάθετους μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο, χρησιμοποιείται ένας μόνο αισθητήρας απόστασης. Η επιλογή αυτή έχει το θετικό πρόσημο ότι μειώνει το κόστος (οι αισθητήρες απόστασης μεγάλης ακρίβειας έχουν υψηλό κόστος), έχει όμως το αρνητικό ότι προσθέτει πολυπλοκότητα και πηγές σφαλμάτων λόγω της ανάγκης κίνησης του αισθητήρα.

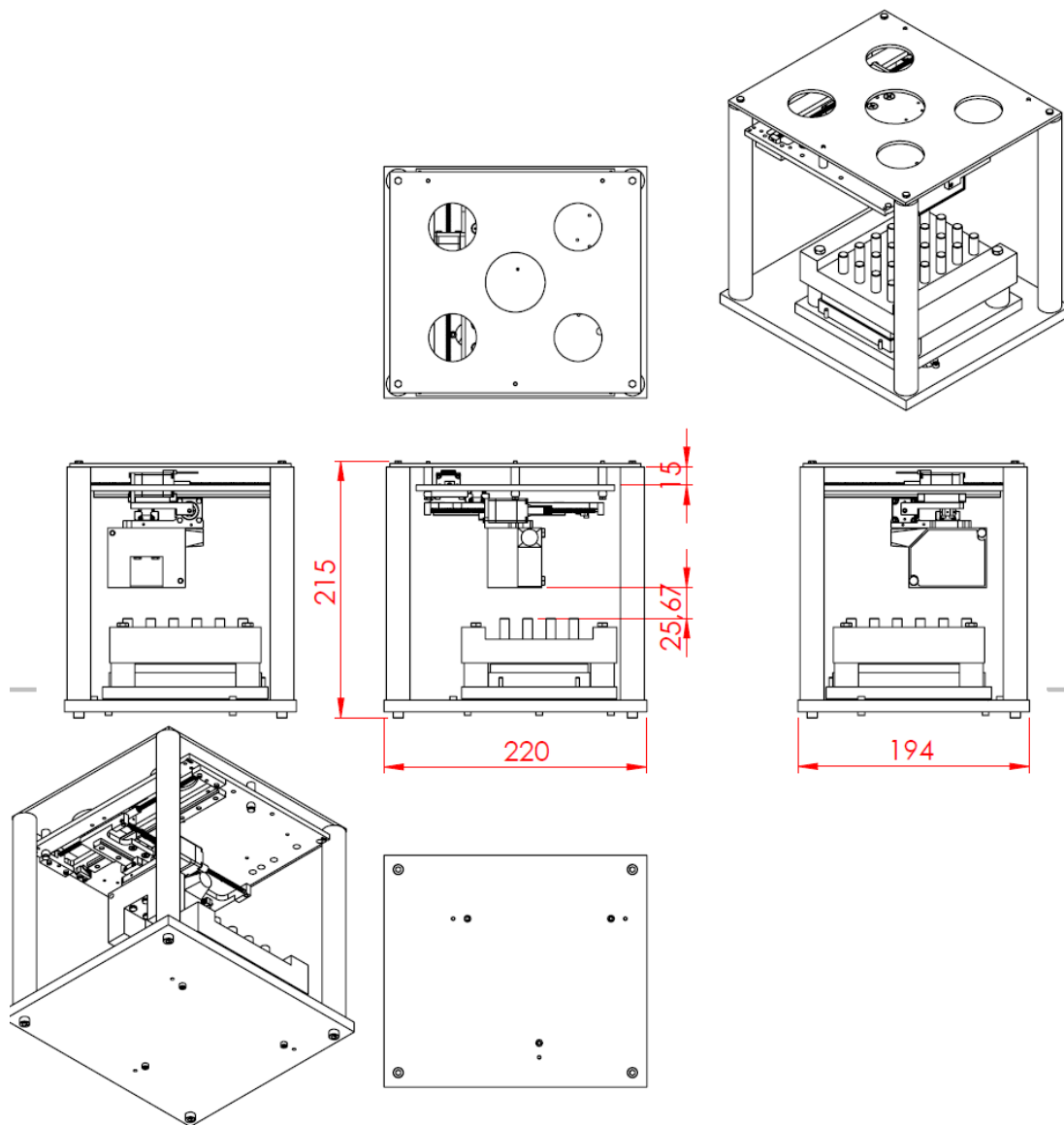
Οι μετρήσεις από τον αισθητήρα απόστασης μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για την αποθήκευση και επεξεργασία τους.



Εικόνα 2.2: Αρχή λειτουργίας διάταξη. Η αποδόμηση του ιστού μετριέται μετρώντας την μετατόπιση του φορέα συμπίεσης: καθώς αποδομάται ο ιστός, ελαττώνεται η ελαστικότητα του, οπότε μετακινείται προς τα κάτω ο φορέας συμπίεσης.

2.1.3. Κατασκευαστική Υλοποίηση

Η συσκευή μπορεί να χωριστεί σε 4 επιμέρους κομμάτια και το κάθε ένα έχει τα υποσυστήματά του: i) βάση έδρασης δειγμάτων, ii) αισθητήρας απόστασης, iii) σύστημα κίνησης αισθητήρα απόστασης, iv) βάση έδρασης συστήματος κίνησης.



Εικόνα 2.3: CAD drawing όλης της διάταξης

- **Βάση έδρασης δειγμάτων**

Αρχικά, επιλέχθηκε το είδος των δοχείων πηγαδιών που θα χρησιμοποιεί η συσκευή. Επιλέχθηκε η χρήση πλάκας με 24 πηγάδια. Δεν επιλέχθηκε δοχείο με περισσότερα πηγάδια για 2 λόγους, i) ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών μετρήσεων από το ίδιο δείγμα θα αυξανόταν, ii) όσο περισσότερα πηγάδια έχει ένα δοχείο τόσο πιο μικρά είναι τα πηγάδια και θα γινόταν δυσκολότερη η εύρεση των φορέων συμπίεσης.



Εικόνα 2.4 : Πλάκα με 24 πηγάδια[18].

Το κάθε δείγμα χόνδρου θα συμπιέζεται από ένα φορέα συμπίεσης. Οι φορείς αυτοί έχουν διπλό ρόλο. Πέρα από την καταπόνηση που θα ασκούν στα δείγματα, λόγω του βάρους τους, θα λειτουργούν και ως επιφάνειες μέτρησης. Επιλέχθηκε η αγορά 24^{ωv} κυλινδρικών γραμμικών αξόνων. Η μία τους πλευρά είναι επίπεδη και θα είναι η επιφάνεια που θα παίρνει μετρήσεις ο αισθητήρας απόστασης και η άλλη πλευρά διαθέτει μία οπή με εσωτερικό σπείρωμα κάθετο στον άξονα του. Στο σπείρωμα θα συσφίγγεται το μέρος του φορέα που θα έρχεται σε επαφή με το δείγμα χόνδρου. Για το δεύτερο κομμάτι του κάθε φορέα επιλέχθηκε η αγορά πείρων τοποθετήσεως, όπου στη μία τους πλευρά διαθέτουν εξωτερικό σπείρωμα και η άλλη άκρη τους είναι σφαιρική. Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζονται τα δύο διαφορετικά κομμάτια των φορέων συμπίεσης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η συναρμογή τους.



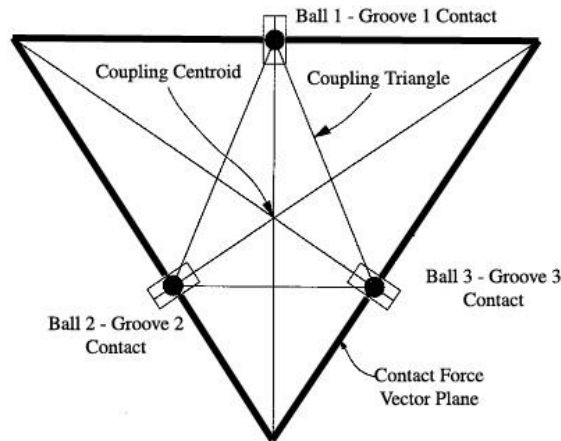
Εικόνα 2.5 : Φορέας συμπίεσης.

Η στέγαση της πλάκας πηγαδιών και των φορέων συμπίεσης γίνεται σε μία, άκαμπτη και αποσπώμενη από την υπόλοιπη συσκευή, βάση. Αυτή η βάση αποτελείται από τρία διαφορετικά υποσυστήματα. Μια πλάκα, πάνω στην οποία εδράζεται η πλάκα πηγαδιών. Τέσσερις κολώνες με διπλό ρόλο, την οριοθέτηση του χώρου που εισέρχεται η πλάκα πηγαδιών και την ανύψωση-στήριξη του οδηγού των φορέων συμπίεσης. Ο οδηγός των φορέων διαθέτει 24 οπές μέσα από τις οποίες οι φορείς συμπίεσης μπορούν να κινούνται γραμμικά κατά μήκος του κάθετου άξονα με μια ελεύθερη ολισθαίνουσα προσαρμογή.

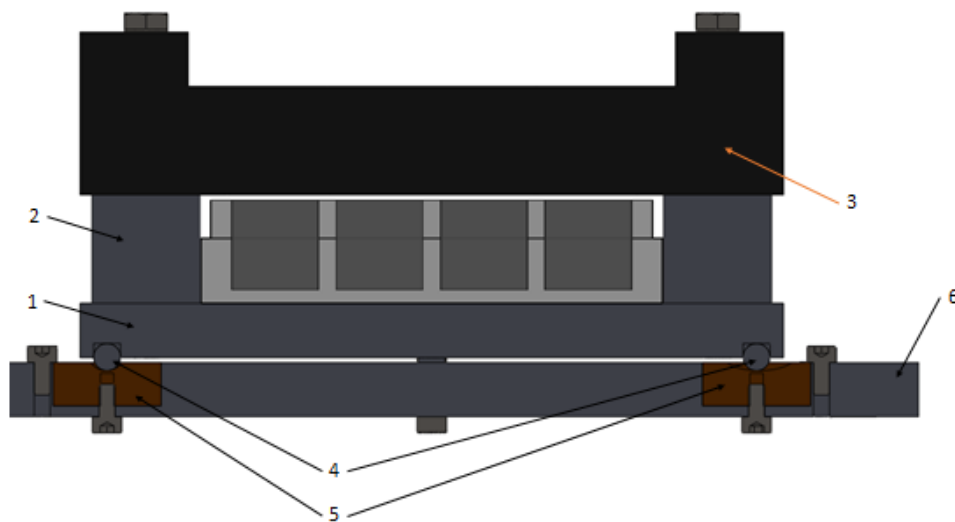
Η βάση είναι αποσπώμενη από την υπόλοιπη συσκευή, ώστε η φόρτωση των δειγμάτων χόνδρου και των φορέων συμπίεσης να γίνεται σε αποστειρωμένο περιβάλλον. Η σύνδεση του περιβλήματος και με την υπόλοιπη συσκευή γίνεται μέσω ενός ρυθμιζόμενου κινηματικού συνδέσμου Maxwell, με σκοπό να αυξηθεί η ακρίβεια τοποθέτησης.

Οι κινηματικοί σύνδεσμοι Maxwell είναι μηχανικές επαφές ακριβείας, που χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση και επανασύνδεση δυο διαφορετικών μηχανολογικών συστημάτων με μεγάλη επαναληψιμότητα. Η κινηματική σύζευξη πραγματοποιείται με μια τριγωνική διάταξη τριών ημισφαιρίων στο ένα μηχανολογικό

μέρος και τρία αντίστοιχα V-αυλάκια στο δεύτερο μηχανολογικό μέρος. Κάθε ημισφαίριο έχει δυο σημεία επαφής, έτσι προκύπτουν συνολικά έξι σημεία επαφής τα οποία είναι ικανά να περιορίσουν τους έξι βαθμούς ελευθερίας των μηχανολογικών μερών[19]. Τα αυλάκια κατασκευάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να ρυθμιστεί η γωνία τους, σε σχέση με την υπόλοιπη συσκευή. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να φέρουμε με μεγάλη ακρίβεια σε παραλληλότητα τα επίπεδα των φορέων συμπίεσης με αυτό του συστήματος κίνησης του αισθητήρα απόστασης.



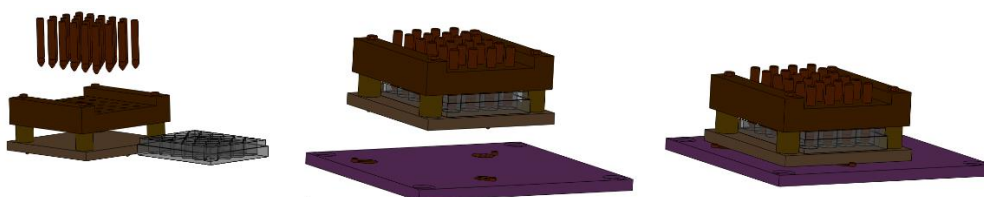
Εικόνα 2.6: Αρχή λειτουργίας κινηματικών συνδέσμων Maxwell.[19]



Εικόνα 2.7 : Τομή βάσης έδρασης δειγμάτων, ώστε να διακρίνονται οι κινηματικοί σύνδεσμοι όπου: 1) πλάκα πάνω στην οποία εδράζεται η πλάκα πηγαδιών, 2) κολώνες στήριξης, 3) οδηγός φορέων συμπίεσης, 4) σφαίρες που η λειτουργία τους είναι αυτή των ημισφαιρίων του κινηματικού συνδέσμου Maxwell, 5) 2 από τα 3 V-αυλάκια του κινηματικού συνδέσμου Maxwell, 6) κάτω βάση ολόκληρης συσκευής.

Στην εικόνα 2.8 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η βάση έδρασης δειγμάτων. Αφού δημιουργηθούν τα ζελέ αгарόζης σε κάθε πηγάδι τοποθετούμε τα δείγματα χόνδρου και το περιβάλλον υγρό τους στο δοχείο πηγαδιών. Στη συνέχεια εισέρχεται το δοχείο πηγαδιών μέσα στη βάση έδρασης δειγμάτων και τοποθετούνται οι φορείς συμπίεσης. Τέλος όλη η βάση έδρασης δειγμάτων τοποθετείται, με τη χρήση

των κινηματικών συνδέσμων, πάνω στη συσκευή, η οποία βρίσκεται μέσα στον επωαστήρα.



Εικόνα 2.8 :Λειτουργία βάσης έδρασης δειγμάτων

- **Αισθητήρας απόστασης**

Ο αισθητήρας απόστασης μετρά την απόσταση του από την πάνω επιφάνεια του φορέα συμπίεσης. Η μέτρηση αυτή δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της μεταβολής της θέσης του φορέα και επομένως και της παραμόρφωσης του δείγματος χόνδρου. Επίσης σημαντικό είναι ότι δεν πρέπει να υπάρχει επαφή με το στόχο μέτρησης, την πάνω επιφάνεια του φορέα συμπίεσης δηλαδή, και αυτό γιατί η παραμικρή επαφή του αισθητήρα με το φορέα θα άλλαζε σημαντικά τις συνθήκες ενός πειράματος αφού έτσι δεν θα γνωρίζαμε τη δύναμη που ασκείται στα δείγματα χόνδρου.

Επιλέχθηκε η χρήση αισθητήρα απόστασης βασισμένου στη τεχνολογία laser “time of flight”. Η διακριτική ικανότητα των οργάνων αυτών είναι πλήρως ικανοποιητική για τις μετατοπίσεις που αναμένονται να παρατηρηθούν. Ο αισθητήρας αυτός δεν πρέπει να βρίσκεται σε επαφή με το στόχο μέτρησης και έτσι δεν επηρεάζεται η αρχή λειτουργίας της συσκευής. Επίσης, λόγω του ενσωματωμένο controller παρέχουν μεγαλύτερη ευκολία χειρισμού και απουσία ρύθμισης διαφόρων εξαρτημάτων, αφού αυτό έχει γίνει εργοστασιακά.

Ο αισθητήρας απόστασης που επιλέχθηκε, είναι το μοντέλο ILD 1402-10 της σειράς optoNCDT 1402 που προϋπήρχε στο εργαστήριο και τα χαρακτηριστικά του κρίθηκαν ικανοποιητικά. Μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες επώασης (37° C, 95% υγρασία, 5% CO₂), έχει ανάλυση 1um, εύρος μέτρησης 10mm και πιο συγκεκριμένα μετρά απόσταση μεταξύ 20mm και 30mm. Κόστισε 2100€ και στη παραλαβή συμπεριλαμβανόταν και το καλώδιο σύνδεσης του με ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 2.9 : αισθητήρας απόστασης ILD 1402-10.[20]

- **Σύστημα κίνησης του αισθητήρα απόστασης**

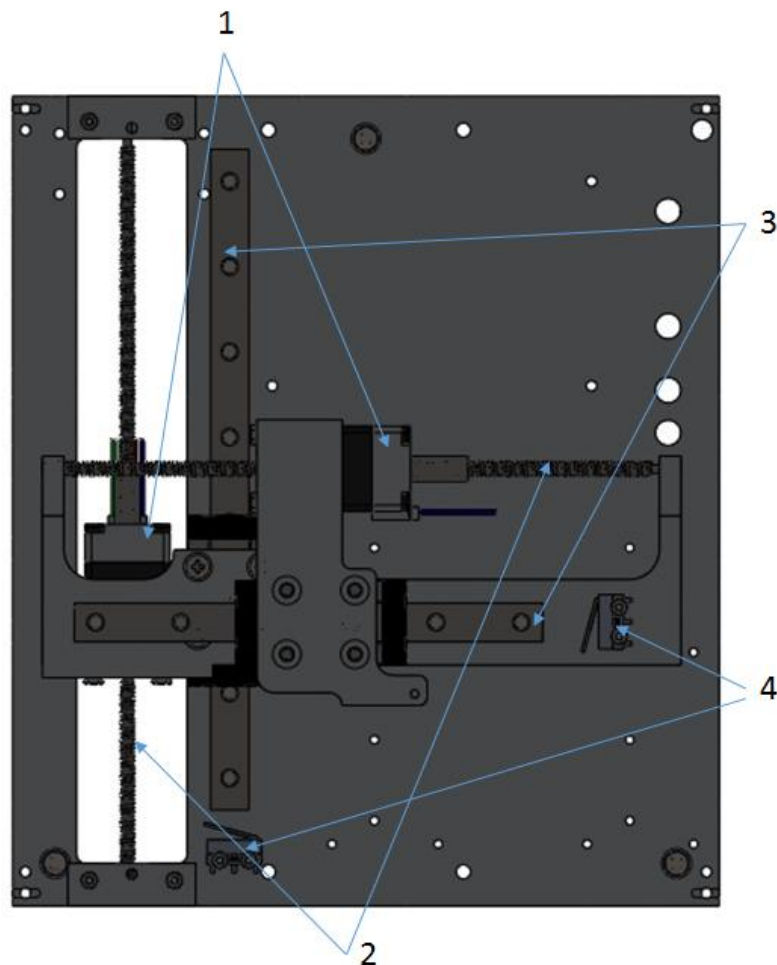
Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της διάταξης, πρέπει να υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δοχείου πηγαδιών και του αισθητήρα κίνησης, ώστε να μπορεί αυτός να λαμβάνει μετρήσεις από όλους τους φορείς συμπίεσης. Η βάση έδρασης δειγμάτων, κατά συνέπεια και το δοχείων πηγαδιών, θα παραμένουν σταθερά και ο αισθητήρας θα μετακινείται κάθε φορά στην επιθυμητή θέση για τη μέτρηση του επόμενου φορέα συμπίεσης. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί ένας μηχανισμός κίνησης με δύο άξονες τοποθετημένους κάθετα μεταξύ τους, σε κάθε έναν από τους οποίους η κίνηση θα πραγματοποιείται από ένα βηματικό κινητήρα (νούμερο [1] εικόνα 2.10) με περαστό κοχλία κίνησης (νούμερο [2], εικόνα 2.10). Το μεγάλο πλεονέκτημα των βηματικών κινητήρων είναι η ακρίβεια στην κίνηση τους χωρίς την χρήση κάποιου κωδικοποιητή

(encoder). Η κίνηση των δύο αξόνων θα γίνει με πάκτωση των κοχλιών κίνησης στις άκρες τους και ευθύγραμμη κίνηση του βηματικού κινητήρα. Για να λειτουργήσει σωστά αυτή η μέθοδος θα πρέπει ο κινητήρας να στερεωθεί, ώστε να του αποτραπεί να περιστραφεί.

Για τη εύρυθμη κίνηση των κινητήρων απαιτούνται γραμμικά έδρανα (γλίστρες). Επιλέχθηκαν γραμμικά έδρανα με χρήση σφαιρικών στοιχείων κύλισης (νούμερο [3], εικόνα 2.10). Αυτά αποτελούνται από δύο κομμάτια, μια ράγα και ένα μπλοκ. Μέσα στο μπλοκ υπάρχουν μικρές σφαίρες, οι οποίες κυλούνται πάνω στη ράγα. Όταν ένα φορτίο ασκείται στο μπλοκ, το φορτίο μεταφέρεται και ισομοιράζεται στις σφαίρες.

Οι βηματικοί κινητήρες δεν γνωρίζουν την αρχική τους θέση. Επομένως, κάθε φορά που η συσκευή θα ξεκινάει να λειτουργεί αλλά και όταν τελειώνει την σάρωση και των 24 φορέων συμπίεσης, θα πρέπει οι κινητήρες να κινούνται προς ένα σημείο. Το σημείο αυτό πρέπει να είναι ίδιο κάθε φορά και θα αποτελεί το «σημείο 0» του συστήματος. Αυτό θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση δύο κουμπιών (νούμερο [4]), εικόνα 2.10). Τα κάθε ένα από τα κουμπιά αφορά την αρχικοποίηση του κάθε άξονα. Ο ελεγκτής δίνει εντολή στους κινητήρες να κινηθούν προς μια κατεύθυνση μέχρι να πατηθεί το κουμπί. Όταν πατηθούν και τα δύο κουμπιά η διαδικασία της αρχικοποίησης τελειώνει.

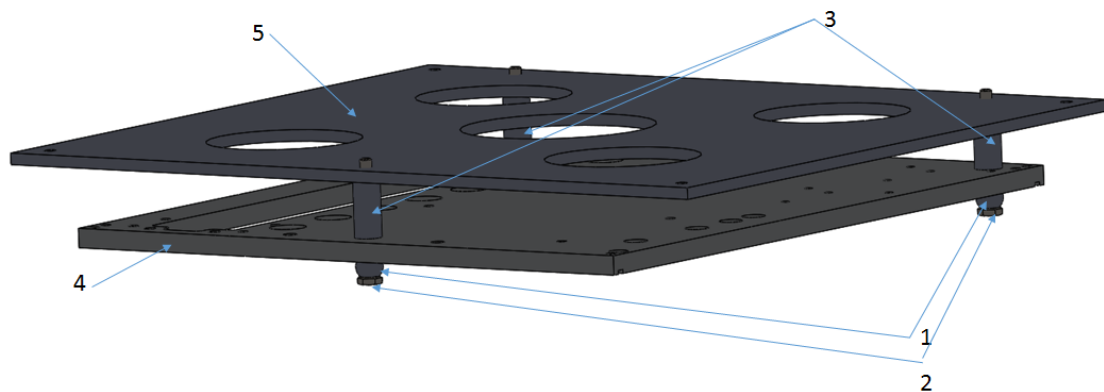
Η έδραση του αισθητήρα απόστασης πραγματοποιείται με τη χρήση ενός κομματιού αλουμινίου, με διαστάσεις όσες και του αισθητήρα για την απορρόφηση κραδασμών. Το κομμάτι αλουμινίου συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα κίνησης, μέσω τεσσάρων βιδών που καταλήγουν στο μπλοκ ενός από τα δυο γραμμικά έδρανα.



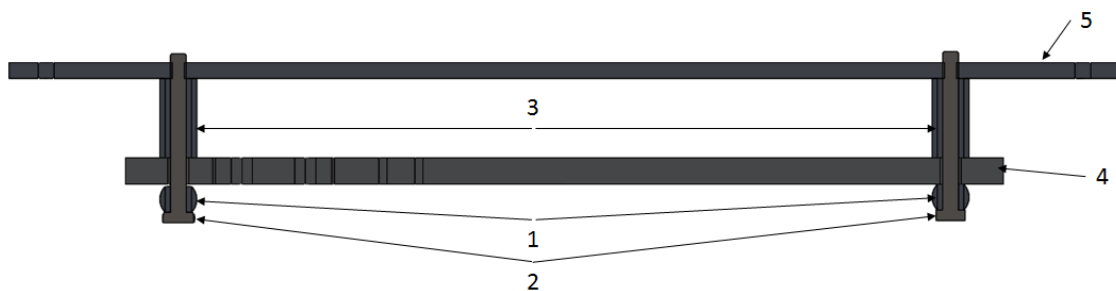
Εικόνα 2.10: Σύστημα κίνησης αισθητήρα απόστασης.

- *Βάση έδρασης συστήματος κίνησης*

Για να παίρνει σωστές μετρήσεις ο αισθητήρας απόστασης, πρέπει το επίπεδο που ορίζεται από την κάτω επιφάνεια του αισθητήρα να είναι παράλληλη με την επιφάνεια που ορίζεται από το στόχο της μέτρησης, δηλαδή τις πάνω επιφάνειες των φορέων συμπίεσης. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του αισθητήρα, γωνίες έως και 5° δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις του αισθητήρα. Για αποφυγή τέτοιων σφαλμάτων σχεδιάστηκε ένας μηχανισμός που δημιουργεί την επιθυμητή παραλληλότητα μεταξύ των δύο επιφανειών. Ο μηχανισμός αυτός αποτελείται από τρεις βίδες, τρεις σφαίρες ρουλεμάν και τρία ελατήρια και παρουσιάζεται στις εικόνες 2.11 και 2.12 όπου τα νούμερα των εικόνων αντιστοιχούν στα ίδια εξαρτήματα. Οι σφαίρες (νούμερο [1]) διαθέτουν οπές προκειμένου να περνάν οι βίδες (νούμερο [2]) από μέσα τους και έχουν απόλυτη συναρμογή τόσο με τις βίδες όσο και με την πλάκα όπου εδράζονται οι κινητήρες (νούμερο [4]) του συστήματος κίνησης. μεταξύ της πάνω πλάκας της βάσης έδρασης του συστήματος (νούμερο [5]) κίνησης και της πλάκας που εδράζονται οι κινητήρες τοποθετούνται τα ελατήρια (νούμερο [3]). Το σπείρωμα με το οποίο συνεργάζονται οι βίδες βρίσκεται στην πάνω πλάκα της βάσης έδρασης του συστήματος κίνησης. Με τον τρόπο αυτό ορίζονται τρία σημεία τα οποία ρυθμίζουν την κλίση της πλάκα έδρασης των κινητήρων και κατά συνέπεια και του αισθητήρα απόστασης.



Εικόνα 2.11 : Μηχανισμός ρύθμισης παραλληλότητας.

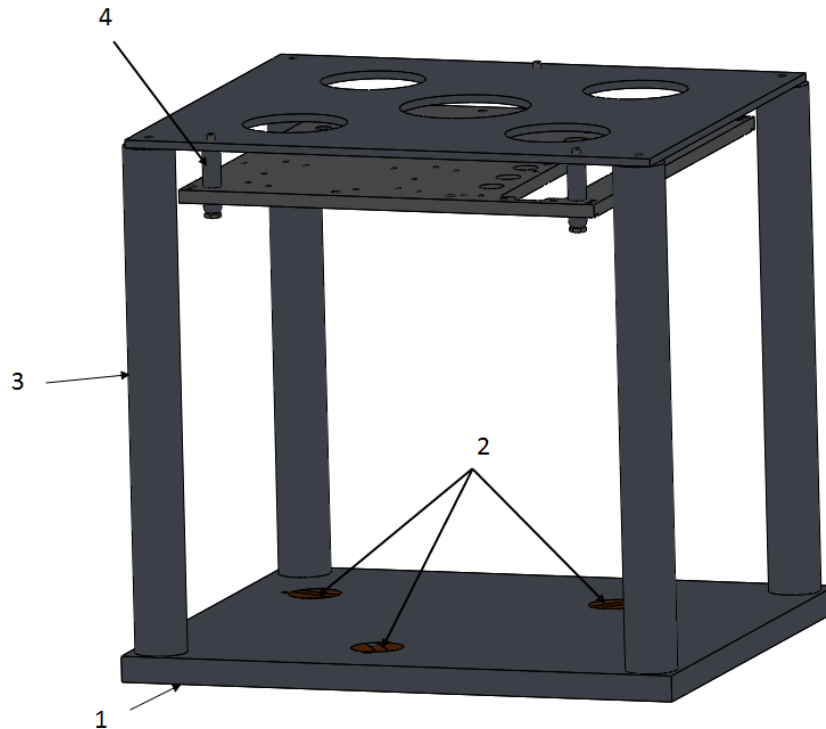


Εικόνα 2.12: Τομή του υποσυστήματος της εικόνας 2.11.

Για την στήριξη της πάνω πλάκας, και κατά συνέπεια και του συστήματος κίνησης του αισθητήρα, χρησιμοποιήθηκαν 4 ράβδοι που συνδέονται στέρεα στην πάνω και στην κάτω πλάκα της συσκευής με βίδες. Η κάτω πλάκα της συσκευής είναι αυτή που διαθέτει τα V-αυλάκια του κινηματικού συνδέσμου Maxwell. Το ύψος των ράβδων εκλέχτηκε τόσο ώστε η απόσταση μεταξύ της κάτω επιφάνειας του αισθητήρα και της επιφάνειας μέτρησης να είναι στο εύρος μέτρησης του αισθητήρα απόστασης.

Στην εικόνα 2.13 παρουσιάζεται ολόκληρη η βάση έδρασης του συστήματος κίνησης. Με νούμερο [1] είναι η κάτω πλάκα της βάσης έδρασης, όπου πάνω της βρίσκονται και

τα V-αυλάκια του κινηματικού συνδέσμου Maxwell (νούμερο [2]). Με το νούμερο [3] είναι οι 4 ράβδοι στήριξης και με το νούμερο [4] ο μηχανισμός ρύθμισης της παραλληλότητας.



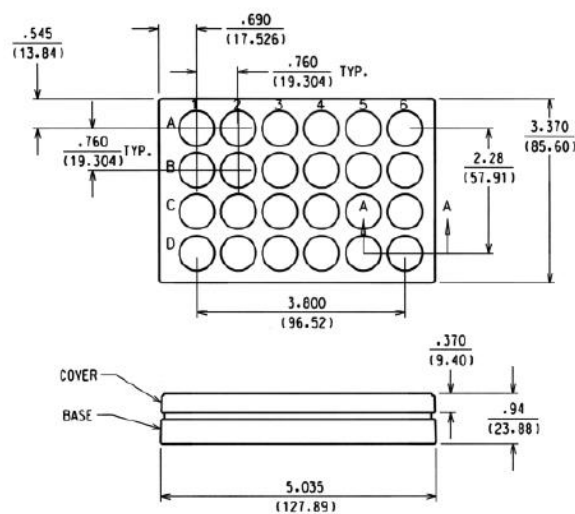
Εικόνα 2.13 : Βάση έδρασης συστήματος κίνησης

2.2. Κατασκευαστική Υλοποίηση της Διάταξης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται λεπτομερώς τα επιμέρους μηχανολογικά κομμάτια της συσκευής. Οι κατεργασίες ως επί των πλείστων πραγματοποιήθηκαν στο μηχανουργείο του εργαστηρίου από τον υποψήφιο διδάκτωρ κ. Γεώργιο Κανακάρη. Τα κατασκευαστικά σχέδια κάθε εξαρτήματος βρίσκονται στο παράρτημα.

2.2.1. Βάση Έδρασης Δειγμάτων

Η βάση έδρασης των δειγμάτων κατασκευάστηκε με βάση τις διαστάσεις μιας πλάκας με 24 πηγάδια, οι οποίες φαίνονται στην εικόνα 2.14

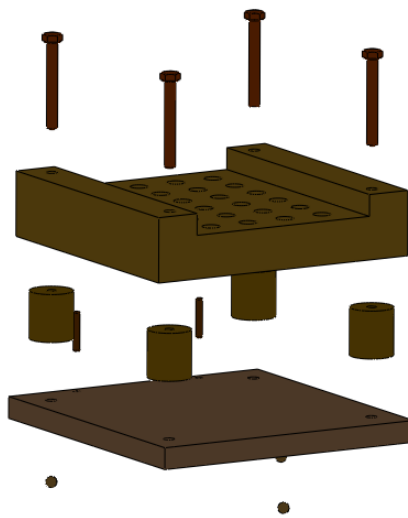


Εικόνα 2.14 : Σκαρίφημα δοχείου με 24 πηγάδια.[21]

Η κάτω πλάκα είναι φτιαγμένη από αλουμίνιο πάχους 10mm και επεξεργάστηκε στη φρέζα του μηχανουργείου του εργαστηρίου. Στην κάτω πλευρά της διαθέτει τρεις οπές, διαμέτρου 5mm και βάθους 2mm, οι οποίες βρίσκονται στις άκρες ενός ισοσκελούς τριγώνου. Στις οπές κολλήθηκαν σφαίρες 5mm που έχουν τη λειτουργία των ημισφαιρίων στο κινηματικό σύνδεσμο. Ακόμη διαθέτει 4 διαμπερείς οπές 5mm, για να περάσουν βίδες που θα συγκρατούν τις 4 κολώνες της βάσης. Οι 4 κολώνες από αλουμίνιο, διαμέτρου 20mm, τοποθετήθηκαν σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να λειτουργούν και σαν οδηγοί για το δοχείο πηγαδιών. Τέλος, ανοίχτηκαν δύο διαμπερείς οπές διαμέτρου 3mm, όπου τοποθετήθηκαν πείροι με σφιχτή ανοχή. Όταν το δοχείο πηγαδιών ακουμπήσει τους πείρους έχει φτάσει στην επιθυμητή θέση.

Οι φορείς συμπίεσης αγοράστηκαν από την εταιρία misumi (κωδικός καταλόγου: κυλινδρικός άξονας PSSFJT8_45_M5, σφαιρική κατάληξη SJPNGC5_P8_B5_R2). Έχουν διάμετρο 8mm εκτός από την επιφάνεια στην οποία θα γίνονται οι μετρήσεις, όπου με τραπεζοειδή τρόπο καταλήγει σε διάμετρο 7mm. Η σφαιρική κατάληξη των φορέων έχει ακτίνα 2mm. Το βάρος τους είναι 20 γραμμάρια. Για βελτιστοποίηση των μετρήσεων από κάθε φορέα συμπίεσης, αποφασίστηκε η λείανση της επιφάνειας που θα μετράει ο αισθητήρας.

Πάνω στις 4 κολώνες εδράζεται ο οδηγός των φορέων συμπίεσης. Ο οδηγός των φορέων κατασκευάστηκε από πολυοξυμεθυλένιο, ή γνωστό ως ακετάλη, ένα θερμοπλαστικό που χρησιμοποιείται σε εξαρτήματα ακριβείας που απαιτούν υψηλή ακαμψία, χαμηλή τριβή και εξαιρετική σταθερότητα στις διαστάσεις του. Η κατεργασία του έγινε στη CNC φρέζα του εργαστηρίου. Ανοίχτηκαν 24 διαμπερείς οπές των 8mm, που λειτουργία τους είναι η κατακόρυφη οδήγηση των φορέων συμπίεσης, με την επίδραση ελάχιστης τριβής, στο κέντρο κάθε πηγαδιού. Επομένως οι διαστάσεις μεταξύ των οπών ακολουθούν πιστά τις διαστάσεις ενός δοχείου με 24 πηγάδια.



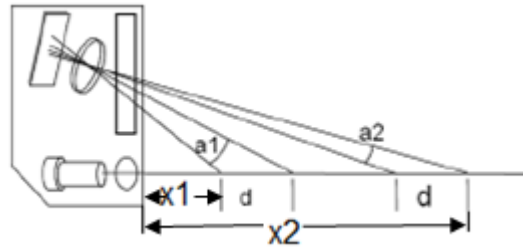
Εικόνα 2.15 : Βάση έδρασης δειγμάτων σε exploded View. Στη φωτογραφία διακρίνονται όλα τα εξαρτήματα της βάσης και ο τρόπος συναρμολόγησης της

2.2.2. Αισθητήρας Απόστασης

2.2.2.1. Αρχή Λειτουργίας

Ο αισθητήρας απόστασης είναι το βασικότερο κομμάτι της μετρικής διάταξης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αισθητήρας αυτός λαμβάνει τιμές απόστασης χωρίς να ασκεί επαφή στην επιφάνεια-στόχο, εκμεταλλευόμενος την αρχή της τριγωνικότητας για τον υπολογισμό της απόστασης. Αυτό το επιτυγχάνει εκπέμποντας μια ακτίνα laser από την ειδική δίοδο που διαθέτει. Η ακτίνα ανακλάται στο αντικείμενο στόχο και συλλέγεται από έναν εσωτερικό αισθητήρα της τεχνολογίας συζευγμένου φορτίου (charged-coupled

device ή CCD). Ανάλογα με την θέση εντοπισμού της ακτίνας πάνω στο δέκτη υπολογίζεται η απόσταση του στόχου. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη γωνία που σχηματίζει η ανακλώμενη ακτίνα.



Εικόνα 2.16: Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα απόστασης.[22]

Όσο πιο κοντά στον αισθητήρα είναι η τελικά μετρούμενη απόσταση d , τόσο πιο μεγάλη είναι η γωνία a . Για παράδειγμα, στην εικόνα 2.16 η a_1 είναι μεγαλύτερη από την a_2 . Αφού συλλεχθεί η ακτίνα φωτός τότε ένας μικροεπεξεργαστής στο εσωτερικό του αισθητήρα υπολογίζει τη γωνία a με βάση τη θέση της ανακλώμενης ακτίνας του συλλέκτη. Έτσι υπολογίζεται η ακριβής απόσταση του αντικείμενου-στόχου.

Επειδή η γεωμετρία στο εσωτερικό του αισθητήρα είναι προκαθορισμένη και επειδή ο συλλέκτης έχει πεπερασμένο μήκος, ο αισθητήρας έχει ένα εύρος μέτρησης το οποίο ξεκινά σε μία απόσταση x_1 έως μια απόσταση x_2 . Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούν ακτίνες σημείου.

2.2.2.2. Τεχνικά Χαρακτηριστικά

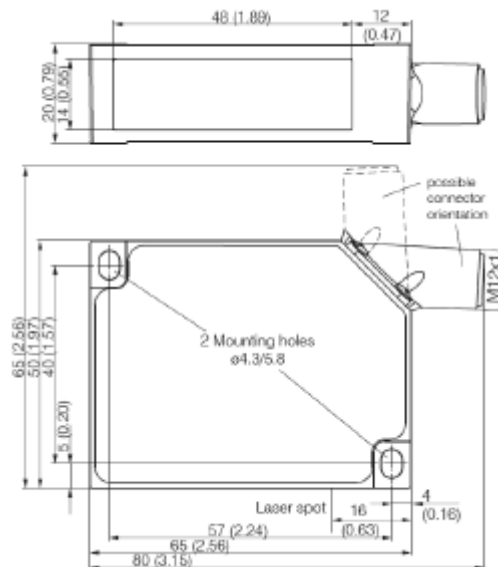
Model	ILD	1402-5	1402-10	1402-20	1402-50	1402-100	1402-200	1402-250VT	1402-500	
Measurement range	mm	5	10	20	50	100	200	250	500	
Start of range	mm	20	20	30	45	50	60	100	200	
Midrange	mm	22.5	25	40	70	100	160	225	500	
End of range	mm	25	30	50	95	150	240	340	600	
Linearity	μm	5, 6, 5, 10	7, 9, 10, 10	10, 10, 10, 10	10, 10, 10, 10	10, 10, 10, 10	10, 10, 10, 10	10, 10, 10, 10	10, 10, 10, 10	
		$\leq 0.18\% \text{ FSO}$							$\leq 0.5\% \text{ FSO}$	
Resolution	static, μm	0.5	1	2	5	10	20	50	120	
		$0.01\% \text{ FSO}^*$							$0.02\% \text{ FSO}^*$	
	dynamics, μm 1.5 kHz	1 ... 5	2 ... 5	5 ... 10	5 ... 20	10 ... 50	10 ... 100	20 ... 200	50 ... 500	
		$0.02 \dots 0.05\% \text{ FSO}$							$0.02 \dots 0.12\% \text{ FSO}$	
Measurement rate, programmable:		1.5 kHz; 1 kHz; 750 Hz; 375 Hz; 50 Hz								
Light source		3W red laser beam 1 mW, 670 nm (RDL)								
Laser class		Class 2 (II) acc. to DIN EN 60825-1: 2001-11								
Spot diameter	SMR, μm	110	110	210	1100	1400	2300	5000	2.5 x 5 mm	
	MR, μm	380	650	830	110	130	2200	5000	2.5 x 5 mm	
	BMP, μm	620	1450	930	1100	1400	2100	5000	2.5 x 5 mm	
Protection class		IP 67								
Vibration		15 g / 10 Hz ... 1 kHz							20 g / 10 Hz ... 1 kHz	
Shock		15 g / 6 ms (EC 68 2 29)								
Weight, without cable		approx. 85 g							approx. 130 g	
Temperature stability		0.03 % FSO/°C					0.08 % FSO/°C			
Operation temperature		0 ... 50 °C								
Storage temperature		-20 °C ... 70 °C								
Measurement value output	analog	4 ... 20 mA (1 ... 5 V with cable PC 1402-3/U) or								
	digital	RS422								

Εικόνα 2.17: Τεχνικά χαρακτηριστικά σειράς optoNCDT 1402.[16]

Στην εικόνα 2.17 εμφανίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά όλων των αισθητήρων της σειράς optoNCDT ILD1402 της εταιρίας micro-epsilon. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στη συσκευή είναι ο ILD1402-10.

Το εύρος μέτρησης του αισθητήρα είναι συνολικά 10mm και συγκεκριμένα από 20mm έως 30mm. Η πηγή της ακτίνας, είναι ένας ημιαγωγός laser με μήκος κύματος 670nm, δηλαδή χρώματος κόκκινου. Ο αισθητήρας κατατάσσεται στην κλάση laser 2(II) και παρότι η συνολική ενέργεια δεν ξεπερνάει το 1mW, δεν συνιστάται από τους κανόνες ασφαλείας η απευθείας οπτική επαφή με την ακτίνα. Η διάμετρος της ακτίνας ισούται με

110μm σε απόσταση ίση με την αρχή του εύρους μέτρησης (20mm), 650μm για το μέσον του εύρους (25mm) και 1200μm για το τέλος του εύρους (30mm). Το συνολικό βάρος του αισθητήρα είναι περίπου 83 γραμμάρια χωρίς να υπολογίζουμε το καλώδιο σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 2.18 Σκαρίφημα του αισθητήρα.[16]

Στην εικόνα 2.18 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά στοιχεία του αισθητήρα απόστασης. Ο αισθητήρας διαθέτει δύο ελλειπτικές οπές αντί-διαμετρικά για τη στερέωση του. Επίσης, η αρσενική υποδοχή σύνδεσης με καλώδιο μπορεί να έχει δύο κατευθύνσεις, οριζόντια και κάθετα ανάλογα με το μέρος που χρησιμοποιείται.

2.2.3. Σύστημα Κίνησης X-Y του Αισθητήρα Απόστασης

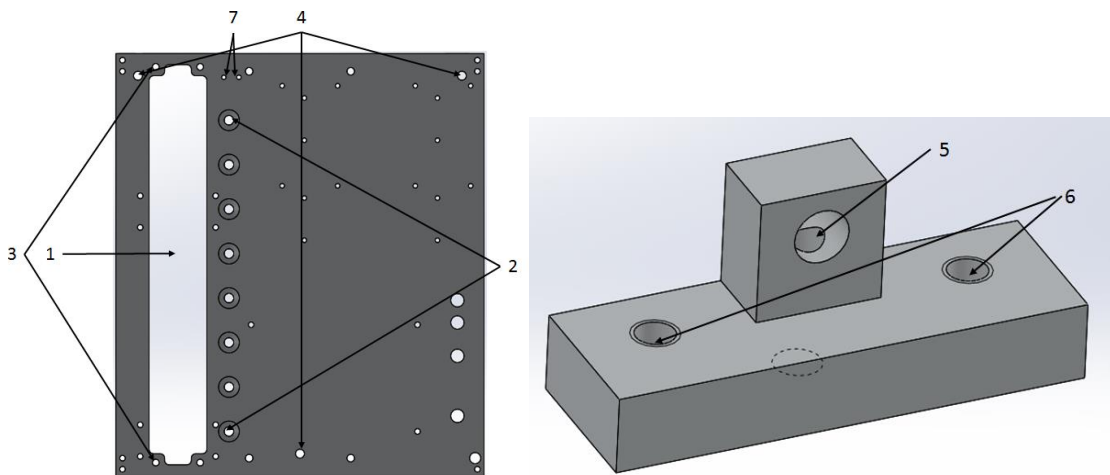
Για την κίνηση του αισθητήρα απόστασης πάνω από κάθε φορά συμπύεσης, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα σύστημα κίνησης στο X-Y επίπεδο.

Οι βηματικοί κινητήρες που επιλέχθηκαν είναι της εταιρίας nanotech μοντέλο L20. Διαθέτουν γωνία βήματος $1,8^\circ$ και συνεπώς μία ολόκληρη περιστροφή τους αποτελείται από 200 βήματα. Το κάθε βήμα του κινητήρα αντιστοιχεί σε γραμμική κίνηση 5μm, το οποίο μπορεί να μειωθεί και άλλο προγραμματιστικά. Η επιλογή των κοχλιών κίνησης και των γραμμικών εδράνων έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή να κινείται το αισθητήρας απόστασης πάνω από ολόκληρο το δοχείο με τα 24 πηγάδια. Έτσι για τον ένα άξονα αγοράστηκε βίδα οδηγός μήκους 180mm και γραμμικό έδρανο 155mm, ενώ για τον δεύτερο άξονα βίδα οδηγός 150mm και γραμμικό έδρανο 115mm. Τα γραμμικά έδρανα αγοράστηκαν από την εταιρία misumi (κωδικός καταλόγου: SSELBV10). Έστω x άξονας ο μεγάλος και y ο μικρός.



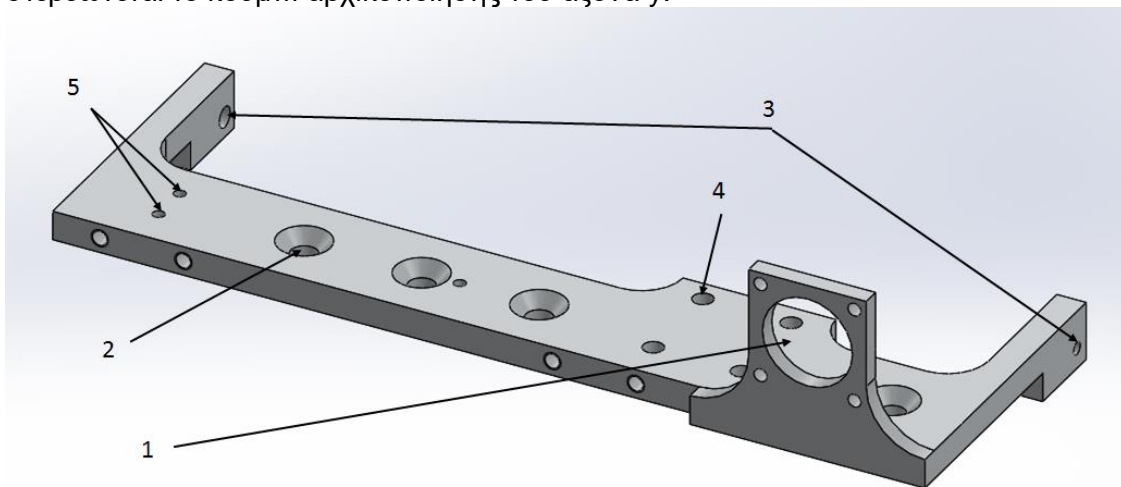
*Εικόνα 2.19 : Αριστερά: Γραμμικό έδρανο.[23]
Δεξιά: Γραμμικός βηματικός επενεργητής.[24]*

Για την έδραση του άξονα x χρησιμοποιήθηκε μια πλάκα αλουμινίου διαστάσεων 190mm×166mm και πάχους 5mm, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 2.20. η πολυγωνική τρύπα στο [1] είναι εκεί που θα τοποθετηθεί ο κινητήρας του άξονα x. Η βίδα οδηγός του κινητήρα εδράζεται σε κάθε της άκρη από το αλουμινένιο εξάρτημα που φαίνεται στο δεξιό μέρος της εικόνας 2.20. Η βίδα οδηγός εισέρχεται στην οπή [5] όπου συγκρατείται από μία σκουλικό-βίδα (set screw κάθετη σε αυτήν. Στη συνέχεια οι οπές [6] του εξαρτήματος, με τη χρήση βιδών, συνεργάζονται με τις οπές [3] της βάσης έδρασης του συστήματος κίνησης για την έδραση του κινητήρα του άξονα x. Στις 8 οπές, με νούμερο [2] στην εικόνα 2. , συνδέεται το γραμμικό έδρανο. Οι οπές με νούμερο [4], διαμέτρου 5mm, είναι αυτές από τις οποίες περνάνε οι τρεις βίδες ρύθμισης της παραλληλότητας μεταξύ του επιπέδου αισθητήρα απόστασης και των κεφαλών των φορέων συμπίεσης. Τέλος, στις οπές [7] στερεώνεται το κουμπί αρχικοποίησης του άξονα x.



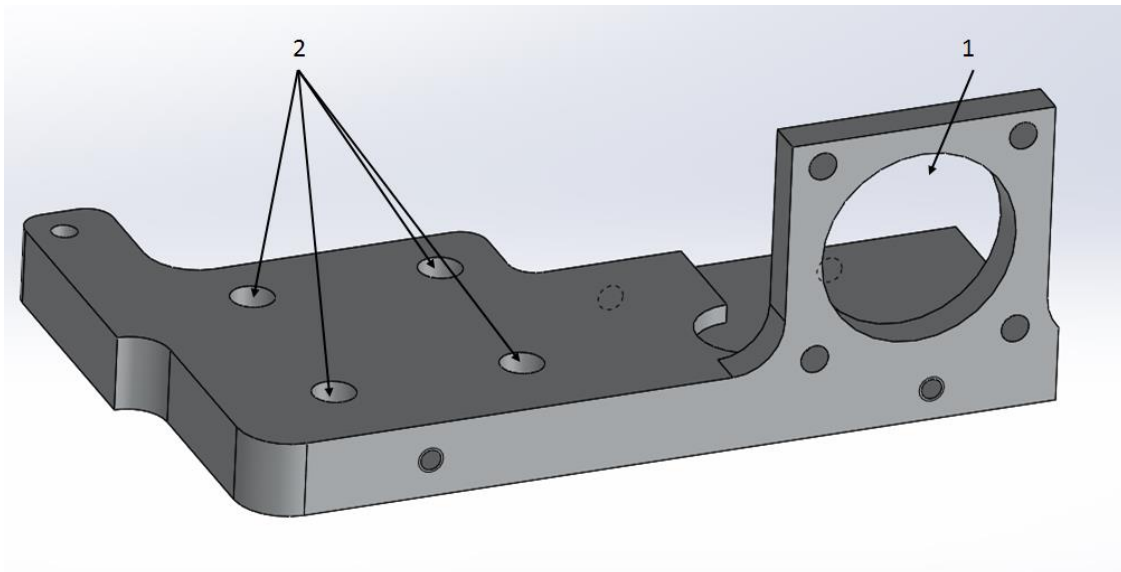
Εικόνα 2.20 : Αριστερά: Βάση έδρασης κινητήρα x άξονα. Δεξιά: Εξάρτημα έδρασης βίδα οδηγού του x άξονα.

Για την αποφυγή της περιστροφής του κινητήρα του άξονα x, αλλά και για τη συνεργασία με τον κινητήρα y κατασκευάστηκε το εξάρτημα της εικόνας 2.21. Στη θέση [1] βιδώνεται ο κινητήρας x. Στις οπές με νούμερο [2] συνδέεται το γραμμικό έδρανο του άξονα y, και στις οπές με νούμερο [3] εδράζεται η βίδα οδηγός του κινητήρα y. Για κάθε μία από τις οπές [3] υπάρχει μία κάθετη ως προς αυτές οπές, από τις οποίες περνάν σκουλικό-βίδες που συγκρατούν τη βίδα οδηγό του κινητήρα y. Στις οπές με νούμερο [4] γίνεται η σύνδεση του εξαρτήματος με το γραμμικό έδρανο του άξονα x. Τέλος, στις οπές [5] στερεώνεται το κουμπί αρχικοποίησης του άξονα y.



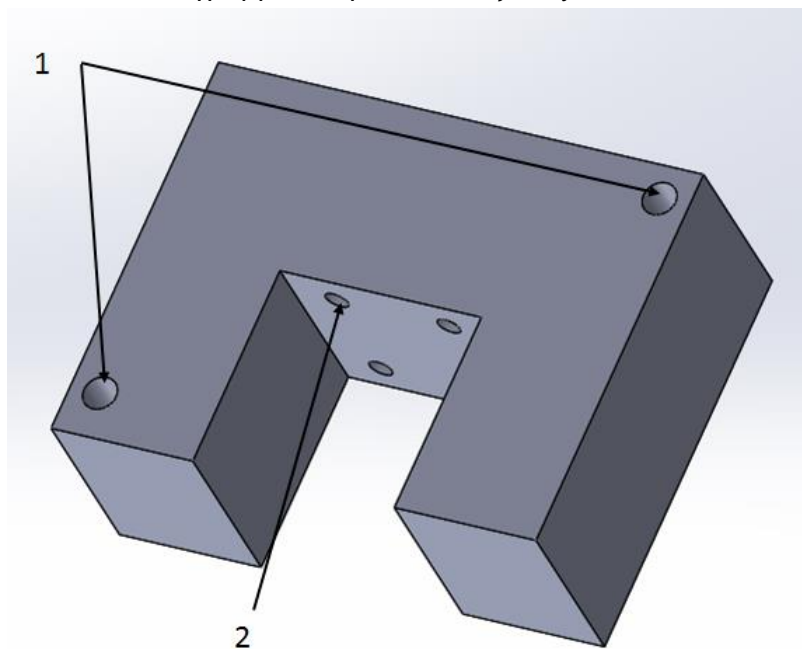
Εικόνα 2.21 : Εξάρτημα έδρασης βίδα οδηγού του άξονα y.

Για την αποφυγή της περιστροφής του κινητήρα του άξονα y και για την ένωση του με το γραμμικό έδρανο του άξονα y κατασκευάστηκε το εξάρτημα της εικόνας 2.22 . Στη θέση [1] βιδώνεται ο κινητήρας. Στις τέσσερις οπές με νούμερο [2] γίνεται η σύνδεση του εξαρτήματος με το γραμμικό έδρανο του άξονα y .

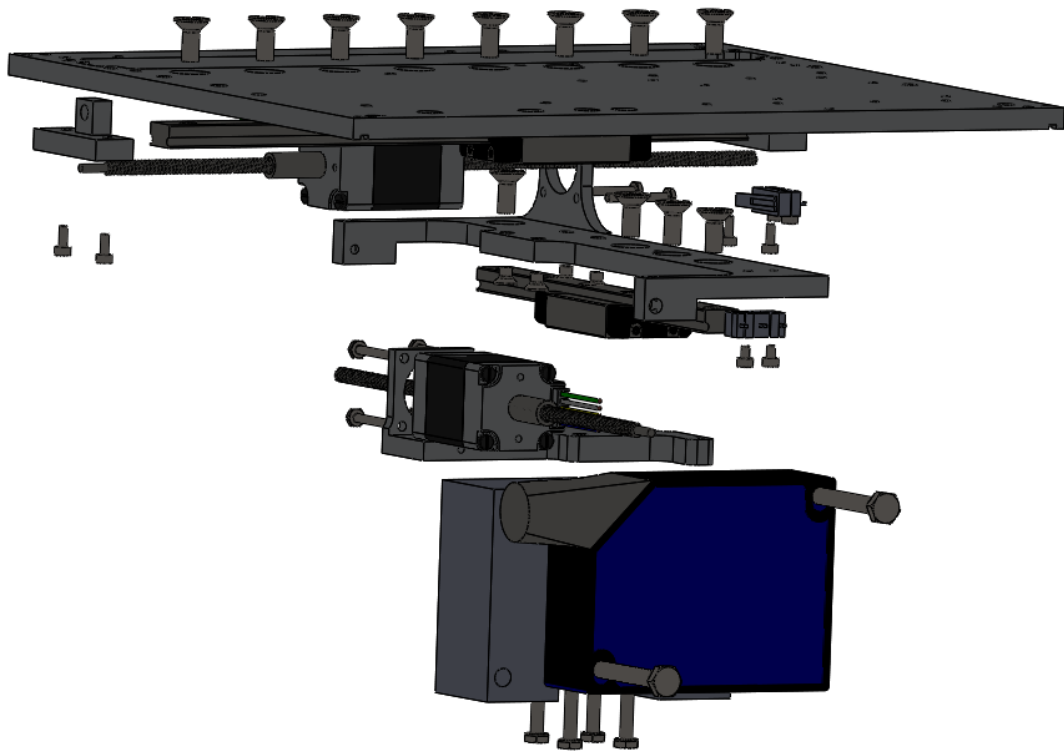


Εικόνα 2.22 : Εξάρτημα έδρασης κινητήρα άξονα y .

Για την έδραση του αισθητήρα απόστασης κατασκευάστηκε από αλουμίνιο το εξάρτημα της εικόνας 2.23 Στις οπές με νούμερο [1] στερεώνεται ο αισθητήρας απόστασης με χρήση βιδών που περνάνε μέσα από τις ελλειπτικές οπές που διαθέτει ο αισθητήρας. Από 4 οπές με νούμερο [2] περνάνε βίδες, που εν συνεχεία μέσω του εξαρτήματος της εικόνας 2. βιδώνονται στο γραμμικό έδρανο του άξονα y .



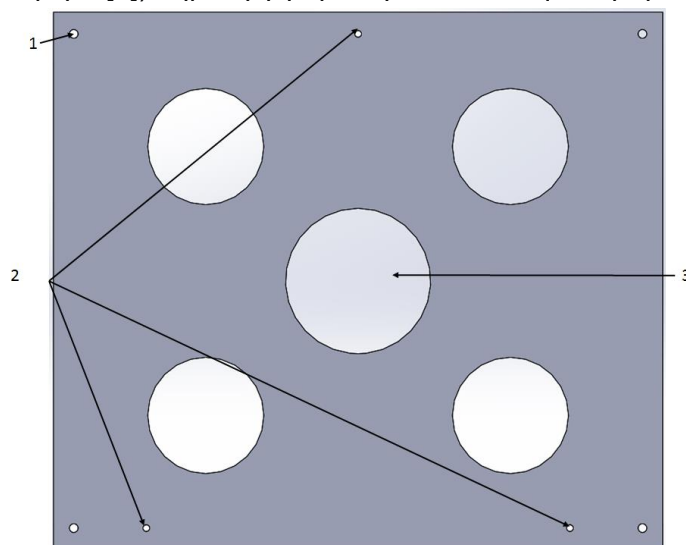
Εικόνα 2.23 : Εξάρτημα έδρασης αισθητήρα απόστασης.



Εικόνα 2.24: Σύστημα κίνησης αισθητήρα απόστασης σε exploded view.

2.2.4. Βάση Έδρασης Συστήματος Κίνησης

Η πάνω πλάκα της βάσης έδρασης του συστήματος κίνησης είναι φτιαγμένη από ανοξείδωτο ασάλι και κατασκευάστηκε με κοπή laser, εκτός εργαστηρίου. Το ανοξείδωτο ασάλι επιλέχθηκε από το αλουμίνιο για μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη. Οι διαστάσεις της πάνω πλάκας είναι 210mm×185mm με πάχος 3mm. Οι οπές που βρίσκονται σε αυτήν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 3 ομάδες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.25 . Με νούμερο [1] είναι οι οπές από τις οποίες περνάνε οι βίδες που ενώνονται με τις ράβδους στήριξης. Με το νούμερο [2] είναι οι οπές, με σπείρωμα M3, που συνεργάζονται με τις βίδες του μηχανισμού ρύθμισης παραλληλότητας. Τέλος, οι μεγάλες οπές (νούμερο [3]) δημιουργήθηκαν για ελάττωση του βάρους της πλάκας.

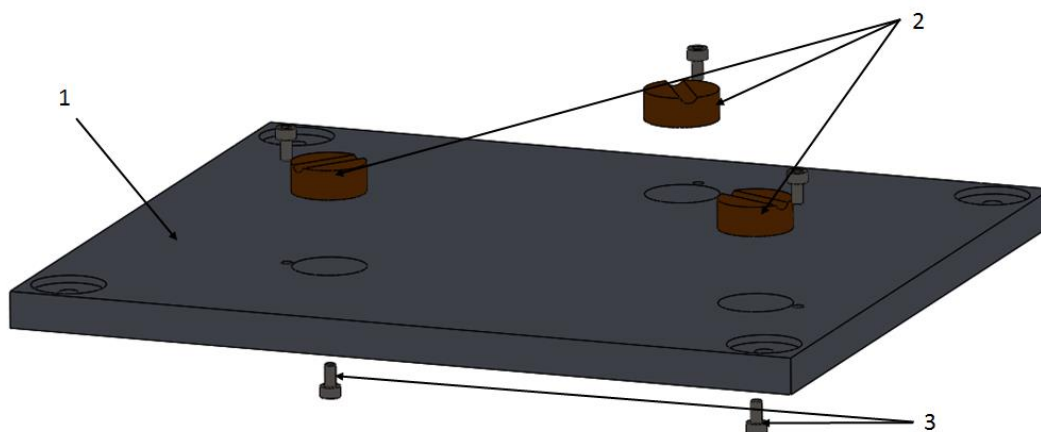


Εικόνα 2.25: Πάνω πλάκα της βάσης έδρασης του συστήματος κίνησης

Για τον μηχανισμό ρύθμισης παραλληλότητας δημιουργήθηκαν οπές διαμέτρου 3mm σε 3 σφαίρες με ακτίνα 2,5mm. Μέσα από αυτές τις οπές περνάνε οι βίδες M3 που ρυθμίζουν την κλίση του συστήματος κίνησης. Οι σφαίρες και η πλάκα έδρασης των κινητήρων έχουν απόλυτη συναρμογή μεταξύ τους, η οποία επιτεύχθηκε με την δημιουργία κωνικής επιφάνειας στο σημείο που ακουμπάει η κάθε σφαίρα.

Οι 4 ράβδοι στήριξης κατασκευάστηκαν από αλουμίνιο με διάμετρο 20mm και ύψος 197mm, ώστε ο αισθητήρας απόστασης να απέχει από τις κεφαλές των φορέων συμπίεσης από 20mm έως 30mm. Στην κάτω πλευρά της κάθε ράβδου υπάρχει σπείρωμα M5 και στην πάνω πλευρά τους σπείρωμα M3.

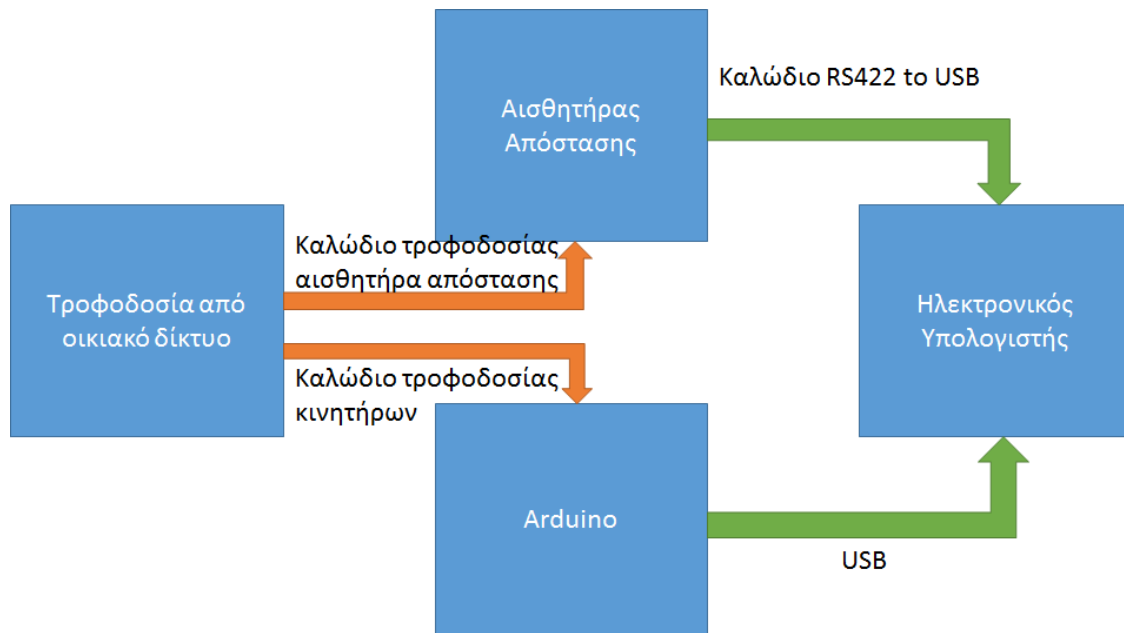
Στην εικόνα 2.26 παρουσιάζονται τα επιμέρους κομμάτια της κάτω πλάκας της διάταξης. Αυτή αποτελείται από μία πλάκα αλουμινίου (νούμερο [1]), διαστάσεων 220mm×194mm και πάχους 10mm, και από τρία κυλινδρικά κομμάτια ορείχαλκου (νούμερο [2]), που διαθέτουν τα V-αυλάκια του κινηματικού συνδέσμου Maxwell. Στην πλάκα αλουμινίου δημιουργήθηκαν 4 πατούρες με βάθος 2mm, που χρησιμεύουν για καλύτερη έδραση των ράβδων στήριξης. Επίσης, φτιάχτηκαν 3 πατούρες με βάθος 8mm για την είσοδο των κομματιών από ορείχαλκο. Τα κομμάτια από ορείχαλκο έχουν διάμετρο 20mm και ύψος 8mm. Τα κομμάτια αυτά διαθέτουν στην πάνω επιφάνεια τους και κατά μήκος μιας διαμέτρου τους από ένα αυλάκι με ακτίνα 2,50mm. Τα αυλάκια αυτά σε συνδυασμό με τις σφαίρες διαμέτρου 5mm, που βρίσκονται στο κάτω μέρος της βάσης έδρασης των δειγμάτων, αποτελούν τον κινηματικό σύνδεσμο Maxwell της διάταξης. Κάθε κομμάτι ορείχαλκου διαθέτει στο κέντρο του μία οπή με σπείρωμα M3, όπου με τη χρήση των βιδών νούμερο [3] γίνεται η ρύθμιση της γωνίας κάθε αυλακιού σε σχέση με την υπόλοιπη διάταξη.



Εικόνα 2.26: Κάτω πλάκα της βάσης έδρασης σε Exploded View

2.3. Στοιχεία Ελέγχου της Διάταξης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται όλα τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρολογικά στοιχεία της διάταξης.



Εικόνα 2.27: Απεικόνιση του ηλεκτρικού συστήματος της συσκευής.

2.3.1. Ηλεκτρονικά Στοιχεία Χαμηλού Επιπέδου (Low Level)

2.3.1.1. Έλεγχος Κίνησης X-Y μέσω Arduino

Ο έλεγχος της αυτοματοποιημένης κίνησης των δυο κινητήρων του συστήματος κίνησης του αισθητήρα απόστασης γίνεται με τη χρήση του περιβάλλοντος Arduino και έναν αλγόριθμο που παρουσιάζεται στο παράρτημα. Το Arduino είναι ένας μικροεπεξεργαστής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός προσυναρμολογημένων πλακετών Arduinoστη αγορά. Για τη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο πλακέτας Arduino MEGA ADK που βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega2560. Η τάση λειτουργίας του είναι τα 5V και τροφοδοτείται από ένα καλώδιο, USB συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μέσω του ίδιου καλωδίου γίνεται και το «ανέβασμα», του γραμμένου σε γλώσσα Wiring, αλγορίθμου. Η πλακέτα περιέχει τόσο αναλογικές όσο και ψηφιακές εισόδους/εξόδους, εξόδους τάσης 3.3V και 5V και μπορεί να συνδεθεί και να ελέγξει μεγάλη γκάμα εξαρτημάτων.



Εικόνα 2.28: Αριστερά: Μικροεπεξεργαστής Arduino MEGA ADK.[26] Δεξιά: Βηματικός οδηγός Easy Driver.[25]

Για τον έλεγχο κάθε ενός από τους βηματικούς κινητήρες χρησιμοποιήθηκε μια οδήγηση βηματικού κινητήρα (stepper driver). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν οι οδηγοί EasyDriver της εταιρίας Sparkfun. Με τη χρήση του γίνεται δυνατός ο έλεγχος του ρεύματος και της τάσης που θα δέχεται ο κινητήρας. Αυτό πραγματοποιείται με ρύθμιση ενός ποτενσιόμετρου που βρίσκεται πάνω στην πλακέτα και την μέτρηση της τάσης με τη χρήση βολτόμετρου. Το εύρος του ρεύματος που μπορεί να οδηγήσει σε έναν διπολικό βηματικό κινητήρα κυμαίνεται από 150mA έως 750mA ανά φάση. Μπορεί

να δεχτεί μέγιστη τάση κινητήρα 30V, και επειδή περιέχει ρυθμιστή τάσης 5V χρειάζεται μόνο μία πηγή τροφοδοσίας για να λειτουργήσει. Πάνω στην πλακέτα κάθε οδηγού, υπάρχουν οπές στις οποίες έγινε συγκόλληση αρσενικών ακίδων ώστε να είναι λειτουργικός με πλάκες πρωτοτύπων (prototyping breadboards). Ακολουθεί μικρή επεξήγηση των οπών του κάθε οδηγού:

Οι οπές στο πάνω μέρος του κάθε βηματικού οδηγού φαίνονται στην εικόνα 2.29 και οι λειτουργίες τους είναι οι εξής:



Εικόνα 2.29 : Οπές στο πάνω μέρος του βηματικού οδηγού.[25]

Οι οπές A αποτελούν ένα H-bridge και εκεί συνδέονται δύο καλώδια από το ίδιο πηνίο ενός διπολικού βηματικού κινητήρα. Αντίστοιχα, στις οπές B συνδέονται τα καλώδια του άλλου πηνίου. Η οπή PFD αποτελεί είσοδο τάσης, με την οποία ο χρήστης επιλέγει το χρόνο που απαιτείται ώστε να μειωθεί το πλάτος του παλμού του ρεύματος που στέλνει στο κινητήρα ο οδηγός από τη μέγιστη στην ελάχιστη τιμή του (current decay mode). Η οπή RST αποτελεί λογική είσοδος του κυκλώματος. Όταν έχει οριστεί LOW, όλες οι εντολές βήματος (STEP) αγνοούνται. Αντίστοιχα εάν οριστεί HIGH ενεργοποιείται ο έλεγχος των βημάτων. Η οπή enable αποτελεί λογική είσοδο. Όταν έχει οριστεί HIGH, η λειτουργία του τρανζίστορ (FET) του οδηγού απενεργοποιείται και αντίστροφα εάν οριστεί LOW ενεργοποιείται. Με τη χρήση αυτής της εισόδου μειώνονται οι πιθανότητες να υπερθερμανθεί το τρανζίστορ. Η MS2 είναι μια από τις δύο λογικές εισόδους με τις οποίες γίνεται έλεγχος του μικροβηματισμού. Η οπή GND αποτελεί γείωση του συστήματος και η M+ είναι είσοδος τροφοδοσίας μεταξύ 6V και 30V, ανάλογα με τη τάση που χρειάζεται ο βηματικός κινητήρας.

Οι οπές στο κάτω μέρος του κάθε βηματικού οδηγού φαίνονται στη εικόνα 2.30 και οι λειτουργίες τους είναι οι εξής:



Εικόνα 2.30 : Οπές στο κάτω μέρος του βηματικού οδηγού.[25]

Οι οπές GND αποτελούν γείωση του συστήματος. Η 5V είναι έξοδος τάσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τροφοδοσία σε εξωτερικά ηλεκτρικά κυκλώματα. Η λογική είσοδος SLP όταν οριστεί σε LOW, όλες οι έξοδοι του οδηγού απενεργοποιούνται και η κατανάλωση ενέργειας ελαχιστοποιείται. Η MS1 είναι η άλλη λογική είσοδος ελέγχου του μικροβηματισμού. Οποιαδήποτε μετάβαση της λογικής εισόδου STEP από LOW σε HIGH οδηγεί τον κινητήρα να κινηθεί για ένα βήμα. Τέλος, με τη λογική είσοδο DIR ελέγχεται η φορά περιστροφής του κινητήρα.

Για τη λειτουργία του κάθε οδηγού οι οπές που πρέπει να συνδεθούν οπωσδήποτε είναι: GND, M+, A, B, STEP και DIR. Τα υπόλοιπα είναι προαιρετικής χρήσης. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιείται και η είσοδος ENABLE για προστασία του κυκλώματος από υπερθέρμανση.

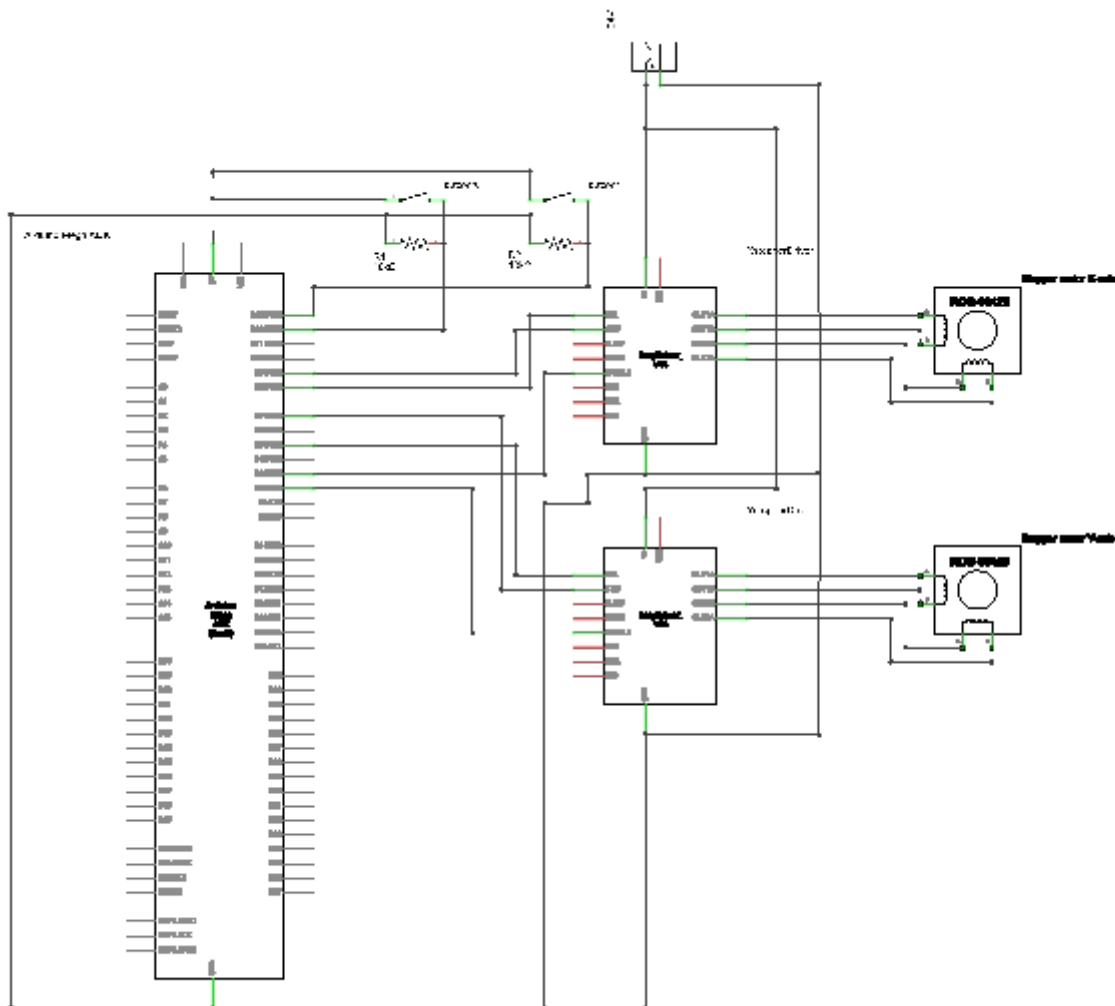
Με τη χρήση των MS1 και MS2 μπορεί να γίνει βηματική κίνηση με διαίρεση 1, 1/2, 1/4, 1/8. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι συνδυασμοί ανοιχτών και κλειστών σημάτων για διαίρεση βήματος. Χωρίς σύνδεση και έλεγχο των δύο αυτών σημάτων, ο οδηγός έχει σαν προεπιλογή διαίρεση βήματος 1/8. Στη παρούσα εφαρμογή δεν ελέγχονται τα δυο αυτά σήματα ώστε να έχουμε διαίρεση βήματος 1/8, δηλαδή το κάθε βήμα των βηματικών κινητήρων είναι πλέον $5\text{um}/8=0.625\text{um}$.

MS1	MS2	Διαίρεση Βήματος
LOW	LOW	1
HIGH	LOW	1/2
LOW	HIGH	1/4
HIGH	HIGH	1/8

Πίνακας 2.1 Σήματα ελέγχου για διαίρεση βήματος

Οι βηματικοί κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τυπική τιμή τάσης ρεύματος λειτουργίας στα 24V. Επιλέχθηκε το τροφοδοτικό με κωδικό προϊόντος RS part number 188-781 με έξοδο 24V και μέγιστο ρεύμα 5A, που υπερκαλύπτει τις ανάγκες του συστήματος.

Για να μπορεί να κινηθεί το σύστημα πρέπει να υπάρχει και η κατάλληλη συνδεσμολογία. Στην εικόνα 2.31 παρουσιάζεται το σχηματικό κύκλωμα του συστήματος κίνησης X-Y.

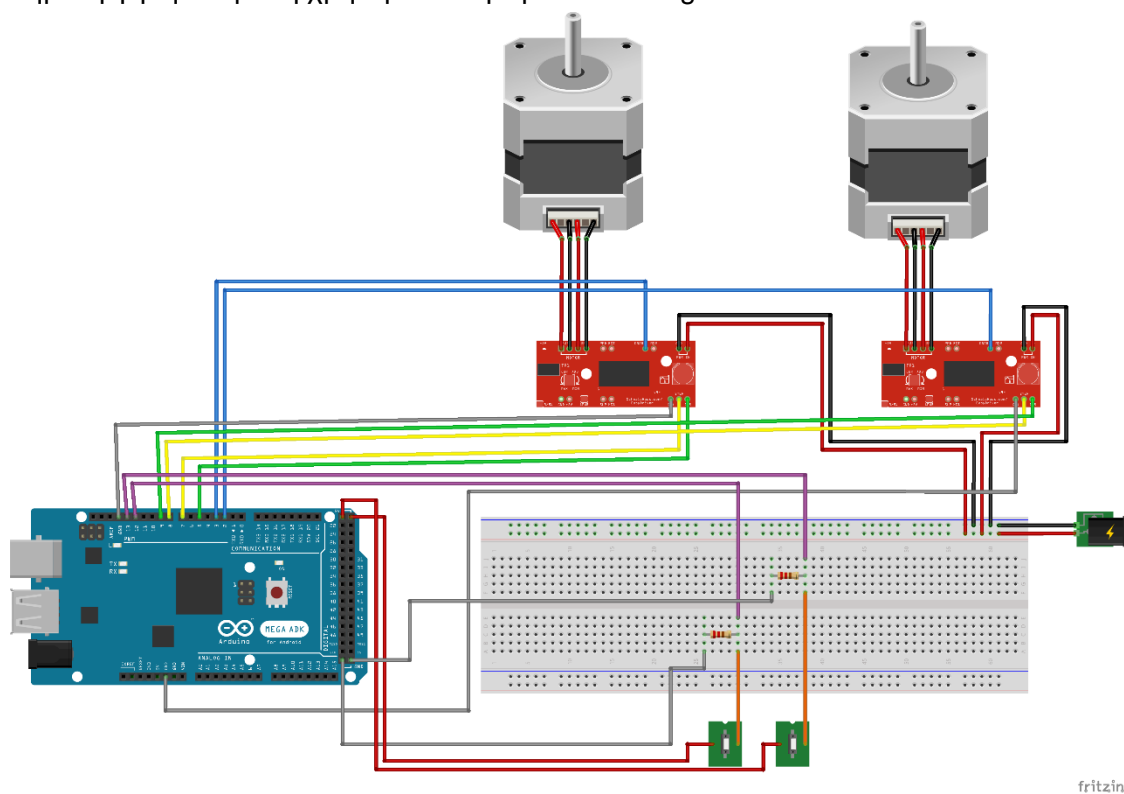


fritzing

Εικόνα 2.31 : Σχηματικό κύκλωμα του συστήματος κίνησης.

Για τη συνδεσμολογία του συστήματος ακολουθήθηκαν οι κανόνες του κυκλώματος και με αυτό τον τρόπο διαμορφώθηκε σε μια πλάκα πρωτοτύπων (breadboard), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.32 . Χρησιμοποιήθηκαν καλώδια, κινητήρες, κουμπιά, ένας μικροελεγκτής, οδηγοί κινητήρων και δυο αντιστάσεις 1 kΩ για τη λειτουργία των

κουμπιών. Το σχηματικό κύκλωμα και η αναπαράσταση του κυκλώματος δημιουργήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Fritzing.



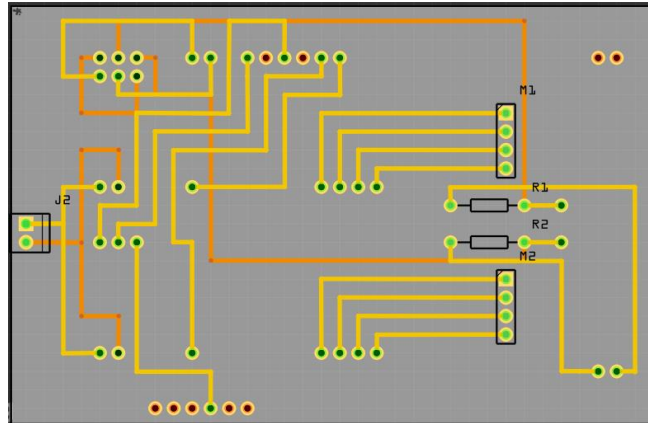
fritzing

Εικόνα 2.32 : Αναπαράσταση κυκλώματος σε Breadboard.

Η χρήση breadboard και καλωδίων ενδείκνυται μόνο σε μικρά και απλουστευμένα κυκλώματα για την κατασκευή και έλεγχο του πρωτοτύπου. Με αυτόν τον τρόπο είναι επικίνδυνο να υπάρξει είτε κάποιο βραχυκύκλωμα, είτε μετακίνηση καλωδίων, που θα οδηγούσε σε παύση λειτουργίας του συστήματος.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της εκτύπωσης κυκλωμάτων σε πλακέτα (printed circuit board, PCB). Με αυτή την τεχνική γίνεται περιορισμένη χρήση καλωδίων και άλλων εξαρτημάτων, τα οποία ενδέχεται να μετακινηθούν από τη θέση τους. Για την τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται πλάκες, οι οποίες στη μία ή και στις δύο πλευρές είναι επικαλυμμένες με λεπτό στρώμα χαλκού. Σχεδιάζεται το κύκλωμα σε κατάλληλο πρόγραμμα και μέσω μιας CNCμηχανής υψηλής ακρίβειας δημιουργούνται κανάλια χαλκού που ενώνουν διαφορετικές τρύπες και αντικαθιστούν την λειτουργία των καλωδίων. Έπειτα πάνω στη πλάκα συνδέονται τα εξαρτήματα και οι ενώσεις μεταξύ των συνεργαζόμενων εξαρτημάτων είναι έτοιμες. Τα εξαρτήματα τοποθετούνται με την χρήση κολλητηρίου. Έτσι διαμορφώνεται ένα κύκλωμα αρκετά πιο συμπακνωμένο από το προηγούμενο και πιο στιβαρό. Η πλάκα που έχει διαμορφωθεί χρησιμοποιείται πολλές φορές για να συνδεθεί απευθείας με τον μικροεπεξεργαστή σαν ασπίδα (shield) και οι συνολικές διαστάσεις του εξαρτώνται από το μέγεθος του κυκλώματος.

Στη παρούσα εφαρμογή διαμορφώθηκε κύκλωμα για πλάκα με επίστρωση χαλκού από δυο πλευρές. Η πλακέτα σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Fritzing και κατασκευάστηκε με τη CNC μικρο-φρέζα LPKF ProtoMat S62, που δημιουργεί τις επιθυμητές οπές πάνω στη πλακέτα και αφαιρεί το χαλκό στα σημεία που πρέπει για να δημιουργηθούν τα κανάλια. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικό κολλητήριο για να στερεωθούν οι βάσεις των εξαρτημάτων, οι αντιστάσεις και οι γειώσεις.



Εικόνα 2.33 : Σχέδιο πλακέτας (PCB)

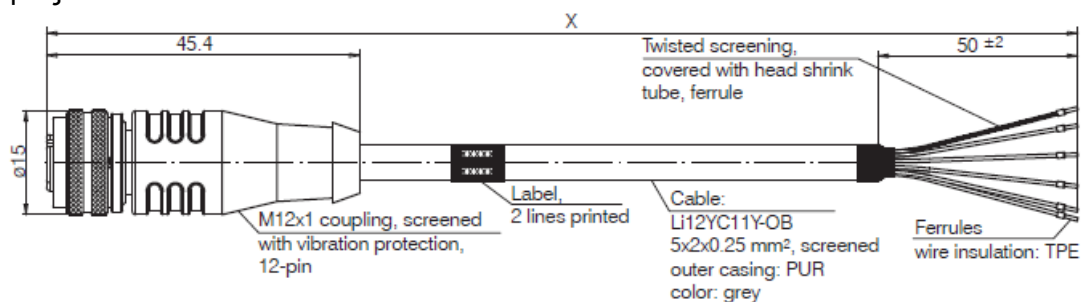
Στην εικόνα 2.33 παρουσιάζεται το σχέδιο της πλακέτας. Με κίτρινο χρώμα είναι τα κανάλια στην πάνω πλευρά της πλακέτας και με πορτοκαλί χρώμα στη κάτω. Στα σημεία που βρίσκονται οι κύκλοι θα γίνουν τρύπες, μέσα από τις οποίες θα περάσουν τα εξαρτήματα. Οι διαστάσεις της πλακέτας είναι τέτοιες ώστε να εφαρμόζει απόλυτα σε έναν μικροεπεξεργαστή Arduino MEGA ADK. Η έδραση της πλακέτας με τον μικροεπεξεργαστή γίνεται μέσω των τρυπών στην άνω και κάτω πλευρά της πλακέτας, όπου είναι συγκολλημένες αρσενικές ακίδες και θηλυκώνουν με τις αντίστοιχες εισόδους του μικροεπεξεργαστή.

2.3.1.2. Επικοινωνίας Η/Υ με τον Αισθητήρα Απόστασης

Η σύνδεση του αισθητήρα απόστασης με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι κομβικής σημασίας. Παρέχει τη δυνατότητα ευκολότερου χειρισμού και ανάκτησης των αποτελεσμάτων της μέτρησης και απλοποιεί την διαδικασία περαιτέρω επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Η έξοδος του αισθητήρα απόστασης, δηλαδή η τιμή της μέτρησης, μπορεί να είναι είτε αναλογική είτε ψηφιακή. Η αναλογική έξοδος αντιστοιχεί σε τιμές έντασης ρεύματος από 4mA έως 20mA ή σε τιμές τάσης από 1V έως 5V. Η μορφή της αναλογικής εξόδου εξαρτάται από τον τύπο του καλωδίου με τον οποίο συνδέεται ο αισθητήρας. Η ψηφιακή εκδοχή της εξόδου βασίζεται στο σειριακό πρωτόκολλο RS422. Το πρωτόκολλο αυτό προσδιορίζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου ψηφιακής επικοινωνίας. Η τάση λειτουργίας του αισθητήρα κυμαίνεται από 11V έως 30V και μέγιστο ρεύμα 50mA, με τυπική τιμή τα 24V.

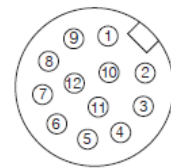
Τα καλώδια, που περιλαμβάνονται στο κουτί παράδοσης του αισθητήρα από την εταιρία, είτε διαθέτουν έξοδο σε ένταση ηλεκτρικού ρεύματος είτε σε τάση ή και τα δύο. Τα καλώδια έχουν τη δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας με προσωπικό υπολογιστή. Τα καλώδια αυτά (εικόνα 2.34), έχουν στη μία άκρη τους τη θηλυκή σύνδεση με τη συσκευή του αισθητήρα και στην άλλη είναι ελεύθερα συνδετικά καλωδίων. Το καλώδιο για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι το PC 1402-3/U με αναλογική έξοδο τάσης και μήκος 3m.



Εικόνα 2.34: Καλώδιο σύνδεσης αισθητήρα. [16]

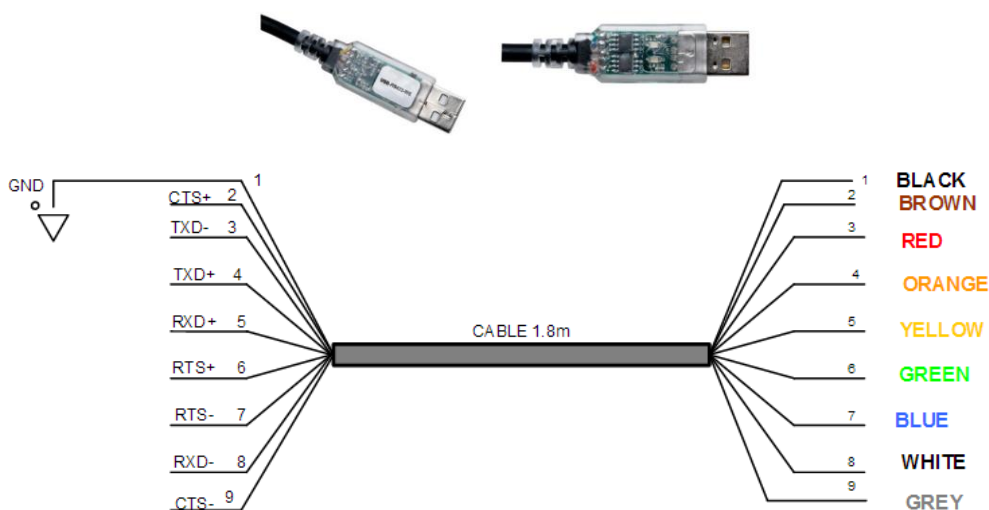
Κάθε ένα από τα 12 συνδετικά αντιστοιχούν σε κάποια λειτουργία του αισθητήρα και στην ουσία αποτελούν προέκταση των αντίστοιχων αρσενικών ακροδεκτών του αισθητήρα. Η λειτουργία κάθε ακροδέκτη παρουσιάζεται στον πίνακα 2.2. Τα συνδετικά 3, 4 της υποδοχής του αισθητήρα αντιστοιχούν στο πράσινο και κίτρινο του καλωδίου και είναι η σειριακή είσοδος. Τα 5,6 με τα γκρι και ροζ είναι η σειριακή έξοδος του αισθητήρα. Το 7 που καταλήγει στο κόκκινο είναι η παροχή τάσης στον αισθητήρα. Για να κλείσει το κύκλωμα και να λειτουργήσει ο αισθητήρας πρέπει το 8 (μαύρο) να συνδεθεί με τη γείωση. Το 9 (βιολετί) σχετίζεται με τη λειτουργία teach in, με την οποία μπορεί να γίνει μείωση του εύρους μετρήσεως για βελτίωση της ανάλυσης. Το 10 (καφέ) δίνει το σήμα σφάλματος, το 11(άσπρο) δίνει την αναλογική έξοδο σε ένταση ηλεκτρικού ρεύματος και το 12 (μπλε) είναι η γείωση.

Pin	Description		Color code PC1402-x/l	Specification
3	RS422 Rx+	Serial input	green	Internally terminated with 120 Ohm
4	RS422 Rx-		yellow	
5	RS422 Tx+	Serial output	grey	Terminate externally with 120 Ohm
6	RS422 Tx-		pink	
7	+U _b		red	11 ... 30 VDC, typical 24 VDC / 50 mA
8	Laser off	Switch input	black	Laser is active, if pin 8 is connected with GND
9	Teach in		violet	Connected to GND for at least 30 ms
10	Error	Switch output	brown	Open-Collector (NPN), I _{max} = 100 mA, U _{max} = 30 VDC, short circuit proof, turn off the power supply to reset the short circuit protection
11	I _{OUT}		white	
12	GND		blue	Supply and signal ground
1/2	n.c.			



Πίνακας 2.2: Αντιστοίχιση ακίδων θηλυκής υποδοχής με χρώματα συνδετικών στην άλλη άκρη του καλωδίου.[16]

Η πλειονότητα των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών επικοινωνούν με εξωτερικές συσκευές μέσω πρωτοκόλλου USB. Έτσι για την επικοινωνία του αισθητήρα με ένα σύγχρονο ηλεκτρονικό υπολογιστή χρειάζεται η μετατροπή των σημάτων του πρωτοκόλλου RS422 σε USB. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το καλώδιο USB-RS422-WE-180-BT της εταιρίας FTDI. Στη μια άκρη του καλωδίου υπάρχει μια αρσενική υποδοχή USB και το απαραίτητο ηλεκτρικό κύκλωμα για τη μετατροπή του σήματος σε πρωτόκολλο RS422(εικόνα 2.35). Στην άλλη άκρη του καλωδίου υπάρχουν ελεύθερα συνδετικά καλωδίων.



Εικόνα 2.35 Καλώδιο USB-RS422-WE-180-BT.[27]

Τα καλώδια 3 και 4 ,χρώματος κόκκινου πορτοκαλί αντίστοιχα, είναι η σειριακή έξοδος. Τα 5 και 8 (κίτρινο, άσπρο) αποτελούν την σειριακή είσοδο. Τα υπόλοιπα τέσσερα καλώδια (RTS+,RTS-,CTS+,CTS-) επιτρέπουν στον δέκτη (receiver) και στον πομπό (transmitter) να ειδοποιούν ο ένας τον άλλο για την κατάσταση τους. Με αυτόν τον τρόπο κατεστραμμένα δεδομένα από κάποια συσκευή δεν επηρεάζουν το μηχανισμό ελέγχου ροής (flow control). Τέλος, το καλώδιο 1 χρώματος μαύρου αποτελεί τη γείωση του συστήματος.

Για την επικοινωνία μεταξύ των δυο καλωδίων τα συνδετικά σειριακής επικοινωνίας πρέπει να συνδεθούν σταυρωτά μεταξύ τους. Δηλαδή, το Tx- του PC 1402 3-U με το Rx- του καλωδίου της FTDI και ούτω καθεξής. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι συνδέσεις μεταξύ των δυο καλωδίων που έγιναν για να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ του αισθητήρα απόστασης και ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

PC 1402-3/U	USB-RS422-WE-180-BT
Rx+(πράσινο)	Tx+(πορτοκαλί)
Rx-(κίτρινο)	Tx-(κόκκινο)
Tx+(γκρι)	Rx+(κίτρινο)
Tx-(ροζ)	Rx-(άσπρο)
GND(μπλε)	GND(μαύρο)

Πίνακας 2.3: Συνδέσεις μεταξύ του καλωδίου εξόδου του αισθητήρα απόστασης PC 1402-3/U και του συστήματος USB-RS422-WE-180-BT που μετατρέπει το σήμα από πρωτόκολλο RS422 σε πρωτόκολλο USB.

Η τροφοδοσία του αισθητήρα με 24V προσφέρεται από ένα τροφοδοτικό τάσης με κωδικό προϊόντος IUZ120WK.

Τέλος, το PC 1402 3-U είναι ένα αρκετά δύσκαμπτο καλώδιο, το οποίο παρατηρήθηκε ότι με την κίνηση του αισθητήρα απόστασης στο x-y επίπεδο επηρέαζε την έδραση του αισθητήρα με συνέπεια τις μη αξιόπιστες μετρήσεις. Για αυτό το λόγο κόπηκε και απομακρύνθηκε το εξωτερικό περίβλημα του καλωδίου (εικόνα 2.35).



Εικόνα 2.36: Καλώδιο PC1402 3-U πριν και μετά

2.3.2. Ηλεκτρονικά Στοιχεία Υψηλό Επίπεδο (High Level)

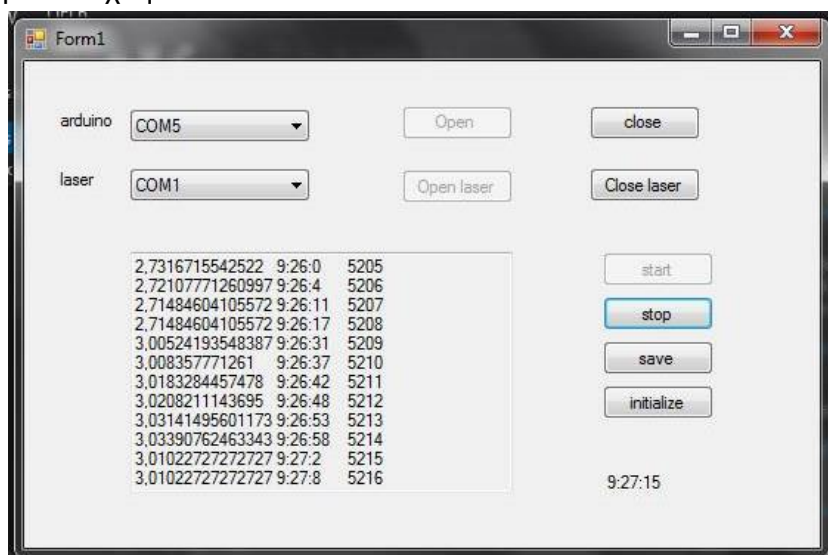
2.3.2.1. Λογισμικό χειρισμού του αισθητήρα

Το λογισμικό του αισθητήρα που παρέχεται από τον κατασκευαστή ονομάζεται ILD1402 tool V2.00. Το λογισμικό αυτό επιτρέπει τον εύκολο χειρισμό του αισθητήρα. Οι ελάχιστες απαιτήσεις συστήματος για να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει το λογισμικό είναι οι εξής: i) λειτουργικό σύστημα Windows 2000, XP, Vista ή 7, ii) επεξεργαστής Pentium III, iii) 256 MB RAM, iv) ανάλυση οθόνης 1024×768 pixels. Στο παράρτημα βρίσκεται οδηγός χρήσεως του λογισμικού.

2.3.2.2. Γραφικό Περιβάλλον Επικοινωνίας Διάταξης-Χρήστη

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της συσκευής, ο αισθητήρας απόστασης κινείται πάνω από κάθε φορέα συμπίεσης και παίρνει μετρήσεις απόστασης οι οποίες μετά από επεξεργασία δίνουν πληροφορίες για την αποδόμηση του ιστού. Για να είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις του πρέπει ο αισθητήρας να είναι σε θέση ηρεμίας πάνω από κάθε θέση μέτρησης. Απαιτείται μια επικοινωνία μεταξύ του προγράμματος που ελέγχει το σύστημα κίνησης x-y (προγραμματισμένο στο arduino) και του αισθητήρα απόστασης, ώστε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής να αποθηκεύει τις μετρήσεις μόνο όταν ο αισθητήρας σταματάει σε μια θέση μέτρησης. Για αυτό τα λόγο αναπτύχθηκε ένα γραφικό περιβάλλον (graphical user interface, GUI) για ηλεκτρονικό υπολογιστή, το οποίο αναλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ του προγράμματος arduino και του αισθητήρα με σκοπό τον αυτοματισμό και την απλοποίηση της χρήσης της συσκευής.

Το γραφικό περιβάλλον σχεδιάστηκε στο ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (integrated development environment, IDE) Visual Studio 2012 της εταιρίας Microsoft. Το Visual Studio υποστηρίζει διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού όπως η C,C++,HTML κλπ. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C Sharp (C#). Η γλώσσα αυτή αναπτύχθηκε για τη δημιουργία εφαρμογών που μπορούν να λειτουργήσουν στα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα που χρησιμοποιούν εξελιγμένα λειτουργικά συστήματα και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε.



Εικόνα 2.37 : Γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας Διάταξης-Χρήστη.

Στην εικόνα 2.37 παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον που αναπτύχθηκε. Αποτελείται από μία μόνο αρχική οθόνη. Για να ξεκινήσει η συσκευή την διεξαγωγή πειράματος πρέπει πρώτα να εδραιωθεί επικοινωνία μεταξύ του μικροεπεξεργαστή (arduino) και του αισθητήρα απόστασης με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή που διαθέτει το γραφικό περιβάλλον. Αυτό επιτυγχάνεται στο πάνω μέρος της σελίδας του γραφικού περιβάλλοντος, όπου ο χρήστης επιλέγει τις σειριακές θύρες COM του ηλεκτρονικού υπολογιστή στις οποίες είναι συνδεδεμένα ο μικροεπεξεργαστής και ο αισθητήρας και στη συνέχεια πατάει το κουμπί open. Ο χρήστης δεν χρειάζεται να ασχοληθεί με τις λεπτομέρειες της σύνδεσης των δυο διαφορετικών συστημάτων με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτές οι πληροφορίες είναι εισαγμένες στον κώδικα του γραφικού περιβάλλοντος και εάν κάποιος θέλει να τις τροποποιήσει μπορεί να το κάνει μόνο με αλλαγή στον κώδικα. Παραδείγματος χάριν ο αισθητήρας επικοινωνεί με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με Baud Rate 115200. Εάν κάποιος αλλάξει, μέσω του λογισμικού της εταιρίας του αισθητήρα, το Baud Rate θα πρέπει να το αλλάξει και στον κώδικα του γραφικού περιβάλλοντος για να μπορεί να επιτευχθεί η επικοινωνία με τον αισθητήρα.

Μεγάλο μέρος της σελίδας του γραφικού περιβάλλοντος καλύπτεται από ένα κουτί διαλόγου, στο οποίο δεν μπορεί να γράψει κάτι ο χρήστης. Εδώ εμφανίζονται όλες οι μετρήσεις που παίρνει ο αισθητήρας απόστασης μαζί με τον χρόνο δειγματοληψίας της εκάστοτε μέτρηση και με τον αύξοντα αριθμός της, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.36.

Αφού έχει γίνει η σύνδεση του μικροεπεξεργαστή και του αισθητήρα, ενεργοποιούνται τα κουμπιά στο δεξιό μέρος της σελίδας. Με το πάτημα του κουμπιού start στέλνεται σήμα στον μικροεπεξεργαστή να κινήσει τους κινητήρες σύμφωνα με τον αλγόριθμο που είναι αποθηκευμένος σε αυτόν. Δηλαδή ξεκινάει η διαδικασία πειράματος. Με τη χρήση του κουμπιού stop διακόπτεται η λειτουργία της συσκευής και ουσιαστικά τερματίζεται το πείραμα. Συνιστάται η χρήση αυτού του κουμπιού να γίνεται όταν ο αισθητήρας απόστασης έχει πάρει και την τελευταία μέτρηση από κάθε γύρο της 24-πλάκας. Πατώντας το κουμπί save αποθηκεύονται τα δεδομένα που υπάρχουν στο κουτί διαλόγου σε ένα αρχείο txt για περαιτέρω επεξεργασία. Τα κάθε αρχείο txt αποθηκεύεται σε έναν φάκελο με το όνομα DATA που θα πρέπει να δημιουργηθεί στην επιφάνεια εργασίας του ηλεκτρονικού υπολογιστή που λειτουργεί το γραφικό περιβάλλον. Για αλλαγή τοποθεσίας του φακέλου ο χρήστης πρέπει να τροποποιήσει το κώδικα. Με τη χρήση του κουμπιού initialization γίνεται αρχικοποίηση των κινητήρων του συστήματος κίνησης x-y.

Κάτω από τα κουμπιά υπάρχει ένας μετρητής χρόνου που ξεκινάει να μετράει με το πάτημα του κουμπιού start και σταματάει με τη χρήση του κουμπιού stop.

Κατά τη διάρκεια ενός πειράματος, όταν ο αισθητήρας φτάσει πάνω από μια θέση μέτρησης ο μικροεπεξεργαστής στέλνει σήμα στο γραφικό περιβάλλον ότι σταμάτησε και αδρανοποιείται μέχρι να πάρει απάντηση. Στη συνέχεια υπάρχει μια αναμονή 2 δευτερόλεπτων ώστε να ηρεμήσει η διάταξη από κραδασμούς και το γραφικό περιβάλλον στέλνει σήμα στον αισθητήρα να πάρει μέτρηση. Όταν παρθεί η μέτρηση το γραφικό περιβάλλον στέλνει σήμα στον μικροεπεξεργαστή να συνεχίσει την λειτουργία του από εκεί που σταμάτησε.

Οι εντολές που στέλνει το γραφικό περιβάλλον στον αισθητήρα έχουν δομή ASCII στο δεκαεξαδικό σύστημα και πάρθηκαν από το εγχειρίδιο χρήσης του αισθητήρα. Ο αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιήσει δυο διαφορετικά πρωτόκολλα δεδομένων, το ILD1402 και το ILD1401. Το γραφικό περιβάλλον που σχεδιάστηκε χρησιμοποιεί το ILD1402.

Όταν το γραφικό περιβάλλον ζητά από τον αισθητήρα μια μέτρηση, ο αισθητήρας απαντά μεταδίδοντας μια ψηφιακή τιμή. Όταν χρησιμοποιείται η ψηφιακή έξοδος δεδομένων του αισθητήρα, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση, η τιμή αυτή είναι ένας ακέραιος αριθμός μεταξύ 0 και 16367. Στη συνέχεια το γραφικό περιβάλλον χρησιμοποιεί την παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της μέτρησης

$$x[mm] = (digital_{out} \times \frac{1.02}{16368} - 0.01) \times MR[mm]$$

όπου: x είναι η μετρούμενη απόσταση από την αρχή του εύρους μέτρησης του αισθητήρα σε χιλιοστά. Παραδείγματος χάριν εάν η τιμή είναι 2,3284, αυτό σημαίνει ότι η μετρούμενη απόσταση από τον αισθητήρα είναι $20 + 2,3284 = 22,3284$ mm. $Digital_{out}$ είναι η ψηφιακή τιμή από 0 έως 16367 και MR είναι το εύρος μέτρησης του αισθητήρα (measurement range), δηλαδή στη περίπτωση του αισθητήρα που χρησιμοποιούμε $MR = 10$ mm

Εκτός από τις ψηφιακές τιμές από 0 έως 16367 ο αισθητήρας μπορεί να δώσει και κάποιες τιμές σφάλματος οι οποίες κυμαίνονται από 16370 έως 16383. Όταν το γραφικό περιβάλλον της διάταξης διαβάσει αυτές τις τιμές εμφανίζει στο κουτί διαλόγων τη λέξη error μαζί με το χρόνο και τον αύξοντα αριθμό.

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αντιγραφόταν το αρχείο txt σε αρχείο excel (.xlsx) και γινόταν ανάλυση με χρήση Matlab.

3. Πειραματική Αξιολόγηση της Διάταξης

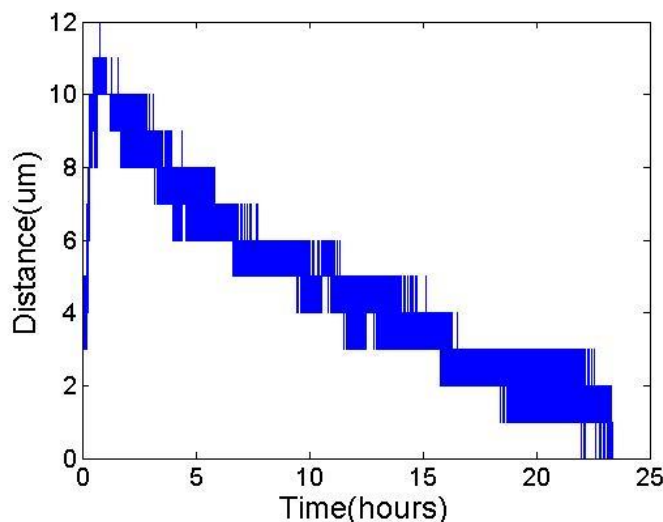
Πριν την εφαρμογή της συσκευής για την μελέτη τη αποδόμησης ιστών, πρέπει να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων της και οι διαφορές πηγές σφαλμάτων. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αυτής.

3.1. Θερμική Ευστάθεια Μετρήσεων

Η διάταξη είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί σε συνθήκες επώασης ευκαρυωτικών κυττάρων (37° C, ≥90% υγρασία). Οι συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία των μετρήσεων του αισθητήρα απόστασης λόγω συστολής-διαστολής των διαφορετικών μερών της διάταξης, όταν αυτή εισέρχεται από συνθήκες περιβάλλοντος σε συνθήκες επώασης. Για τον έλεγχο της θερμικής ευστάθειας των μετρήσεων διεξήχθησαν δυο διαφορετικά πειράματα.

3.1.1. Θερμικά Σφάλματα κατά την Αλλαγή Θερμοκρασίας της Διάταξης

Στο πείραμα αυτό, τοποθετήθηκε ολόκληρη η διάταξη από συνθήκες περιβάλλοντος σε συνθήκες επώασης(37°C) και διαπιστώθηκε η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας στον αισθητήρα απόστασης κυρίως λόγω διαστολής των διαφόρων εξαρτημάτων της. Πάρθηκαν μετρήσεις για μια ημέρα πάνω από ένα φορέα συμπίεσης, ενώ ο αισθητήρας απόστασης δεν κινούνταν. Η συλλογή των δεδομένων έγινε με τη χρήση του λογισμικού της εταιρίας του αισθητήρα απόστασης.



Εικόνα 3.1: Πάνω: Προφίλ μετρήσεων από ILD102 tool. Κάτω: Προφίλ μετρήσεων

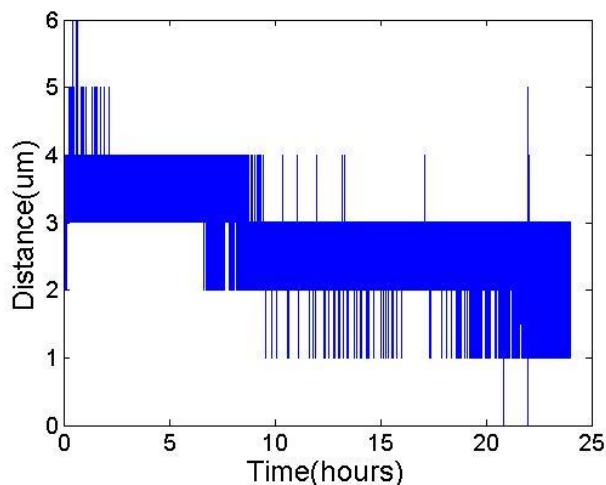
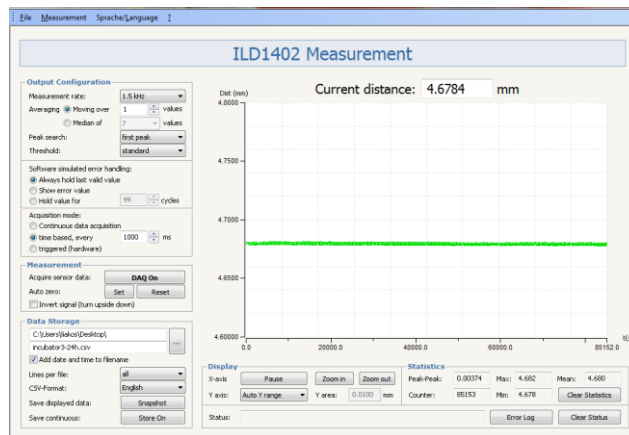
Ο αισθητήρας απόστασης ξεκίνησε να δέχεται μετρήσεις μόλις συνδέθηκε στη τροφοδοσία του με ρυθμό μία μέτρηση ανά δευτερόλεπτο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1.

Παρατηρούμε ότι από την αρχή του πειράματος και για μισή ώρα περίπου υπάρχει μια απότομη αύξηση της μέτρησης απόστασης κατά 12μm. Αυτή η απότομη αύξηση οφείλεται στην αύξηση θερμοκρασίας του αισθητήρα λόγω ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι γνωστό ότι η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου κάποιου αγωγού προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του. Εάν το διάστημα κατά το οποίο ήταν απενεργοποιημένος ο αισθητήρας απόστασης, ήταν αρκετά μεγάλο ώστε η θερμοκρασία του να εξισωθεί με αυτή του περιβάλλοντος το, τότε κατά την επόμενη ενεργοποίησή του, η ροή ηλεκτρικού ρεύματος στα κυκλώματα του προκαλεί απότομη αύξηση της θερμοκρασίας τους και άνιση κατανομή αυτής τοπικά στον αισθητήρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται το θερμικό σφάλμα της απόστασης, γύρω στα 12μm που παρουσιάζεται στην αρχή της απόκρισης της εικόνα 3.1 κάτω. Η περίοδος της απότομης αυτής αύξησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αισθητήρα λόγω ενεργοποίησης του χαρακτηρίζεται ως περίοδος προθέρμανσης (warm-up time) και είναι περίπου ίση με 30 λεπτά. Οι συνέπειες που μπορεί να προκύψουν στα αποτελέσματα εάν δεν ληφθεί υπόψη η ανάγκη προθέρμανσης του αισθητήρα, είναι σημαντικές όσο αναφορά τις μετρήσεις του αισθητήρα απόστασης. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητο, μετά από κάθε ενεργοποίηση του αισθητήρα να προβλέπεται περίοδος προθέρμανσης τουλάχιστον 30 λεπτών, διάστημα κατά το οποίο η διάταξη δεν θα πρέπει να εκτελεί μετρήσεις-πείραμα.

Η δεύτερη παρατήρηση, στο διάγραμμα της εικόνας 3.1, είναι η μείωση της μέτρησης μετά τα πρώτα 30 λεπτά, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της διαστολής των υλικών της διάταξης λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας της συσκευής και του διαφορετικού συντελεστή θερμικής διαστολής που έχουν τα διάφορα εξαρτήματα της συσκευής. Τα θερμικά σφάλματα που οφείλονται στην θερμική διαστολή της συσκευής σταθεροποιούνται μετά από 15 ώρες. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της εικόνας 3.1. με βάση το πείραμα αυτό, συνίσταται πριν από την διεξαγωγή ενός πειράματος η διάταξη να τοποθετείται στον επωαστήρα για τουλάχιστον 24 ώρες, ώστε να σταθεροποιηθεί θερμοκρασιακά και οι μετρήσεις να μην περιέχουν θερμικά σφάλματα.

3.1.2. Έλεγχος Μετρήσεων σε Αλλαγή Θερμοκρασίας στη Βάση Έδρασης Δειγμάτων

Η βάση έδρασης των δειγμάτων, αποσπάται από την υπόλοιπη διάταξη, ώστε να επιτρέψει την τοποθέτηση των δειγμάτων χόνδρου και των φορέων συμπίεσης σε στείρες συνθήκες. Στη συνέχεια η βάση τοποθετείται στην υπόλοιπη διάταξη μέσα στον επωαστήρα. Ο αναγκαίος χρόνος που παραμένει η βάση έδρασης δειγμάτων εκτός επωαστήρα, εκτιμήθηκε περίπου 15 λεπτά, μπορεί να είναι κρίσιμος για τη μεταβολή των διαστάσεων της λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής. Για αυτό το λόγο διεξήχθη ένα πείραμα, κατά το οποίο αφαιρέθηκε η βάση έδρασης δειγμάτων από των επωαστήρα (ενώ βρισκόταν ήδη μια μέρα μέσα μαζί με την υπόλοιπη διάταξη) και παρέμεινε 20 λεπτά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε στη διάταξη, μέσα στον επωαστήρα, και ο αισθητήρας απόστασης, αφού είχε γίνει προθέρμανση του, άρχισε να παίρνει μετρήσεις πάνω από ένα φορέα συμπίεσης ενώ ο αισθητήρας απόστασης παρέμεινε ακίνητος. Το πείραμα διήρκεσε μια ημέρα και ο αισθητήρας έπαιρνε μετρήσεις κάθε δευτερόλεπτο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 3.2 .



Εικόνα 3.2: Πάνω: Προφίλ μετρήσεων από ILD1402 tool. Κάτω: Προφίλ μετρήσεων.

Παρατηρώντας το διάγραμμα, υπάρχει μια αύξηση των τιμών μετρήσεων έως 4um στα πρώτα 15 λεπτά των μετρήσεων. Στη συνέχεια σταθεροποιούνται οι μετρήσεις, ενώ η μείωση ενός μικρού που εμφανίζεται κοντά στις 5,30 ώρες πιο πιθανόν να οφείλεται σε κάποιον εξωτερικό παράγοντα (π.χ. άνοιγμα-κλείσιμο της πόρτας του επωαστήρα) παρά σε διαστολή των υλικών της βάσης έδρασης των δειγμάτων. Στην υπόλοιπη διάρκεια του πειράματος οι μετρήσεις είναι μέσα στο εύρος ακρίβειας του αισθητήρα απόστασης.

Οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν σε αυτό το πείραμα, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, όμως για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μπορεί να υπάρξει αναμονή 15 λεπτών μέχρι να ξεκινήσουν οι μετρήσεις ή να αγνοηθούν οι πρώτες μετρήσεις από κάθε φορά συμπίεσης.

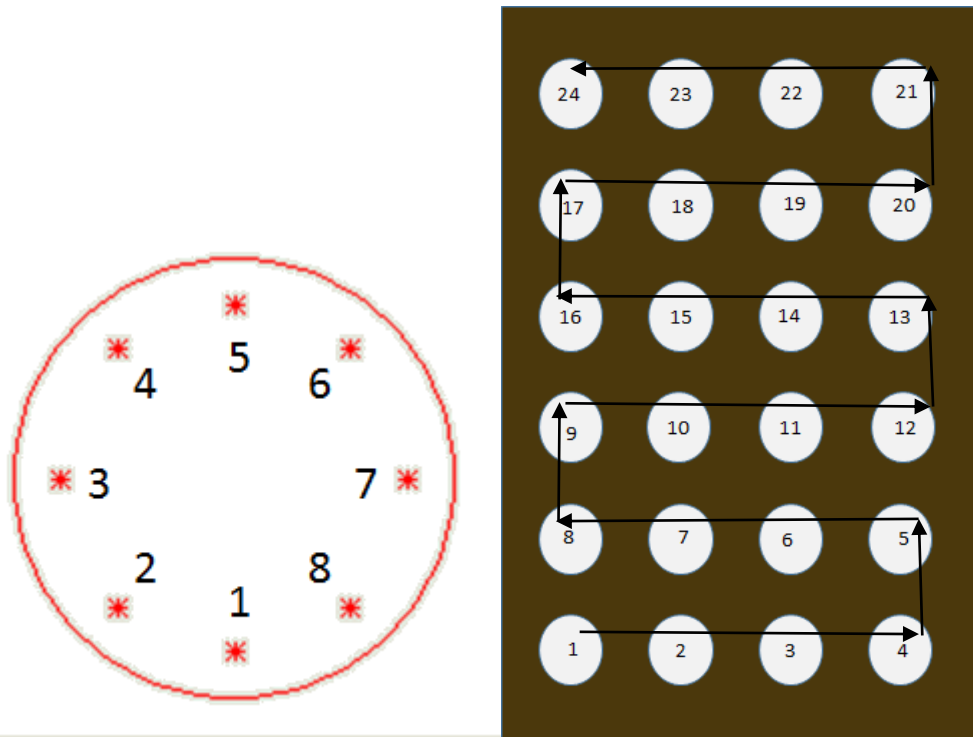
3.2. Ακρίβεια και Επαναληψιμότητα Μετρήσεων

Σε αυτό το εδάφιο παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που ποσοτικοποιούν την επαναληψιμότητα των μετρήσεων της διάταξης όταν λαμβάνονται μετρήσεις και στις 24 θέσεις της πλάκας. Πριν γίνει χρήση μιας συσκευής για το σκοπό που σχεδιάστηκε πρέπει οι σχεδιαστές και οι χρήστες της να ξέρουν εάν και πόσο είναι ικανή η συσκευή να πραγματοποιήσει τη «δουλειά» για την οποία σχεδιάστηκε.

Αφού έγιναν οι κατάλληλες ρυθμίσεις παραλληλότητας του επιπέδου μέτρησης του αισθητήρα με το επίπεδο των κεφαλών των συμπιεστών αλλά και η ρύθμιση του κινηματικού συνδέσμου Maxwell (οι διαδικασίες περιγράφονται στο παράρτημα), ολόκληρη η διάταξη εισήχθη στον επωαστήρα για 24 ώρες, ώστε να επέλθει σε θερμοκρασιακή ισορροπία.

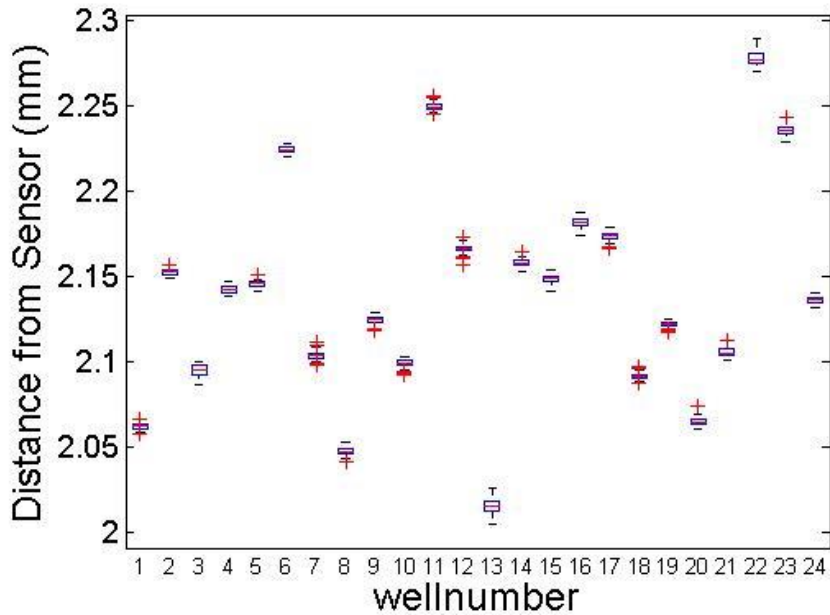
Για την αποφυγή σφαλμάτων μετρήσεων του αισθητήρα αλλά και για αξιοπιστία στα αποτελέσματα, ο αισθητήρας απόστασης δεν παίρνει μόνο μια μέτρηση πάνω από κάθε

συμπιεστή. Αντιθέτως ακολουθεί ένα κυκλικό προφίλ με κέντρο το κέντρο της κεφαλής του συμπιεστή και ακτίνα 5mm, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3 αριστερά. Η εικόνα 3.3 δεξιά απεικονίζεται το προφίλ της κίνησης του αισθητήρα πάνω και από τους 24 συμπιεστές. Η συσκευή χρειάζεται περίπου 20 λεπτά για να πάρει μετρήσεις και από τους 24 συμπιεστές με το συγκεκριμένο προφίλ μετρήσεων. Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, οι συμπιεστές δεν συμπιέζαν κάποιο υλικό (π.χ. δείγματα χόνδρου) αλλά ήταν σταθεροί και η κάτω επιφάνεια τους ακουμπούσε στον πάτο ενός πηγαδιού ενός δοχείου με 24 πηγάδια.



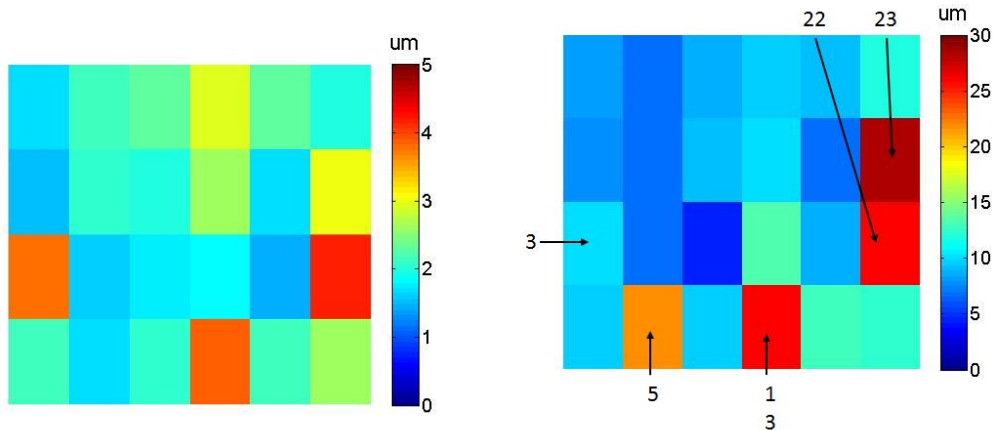
Εικόνα 3.3: Αριστερά: Προφίλ μετρήσεων στην άνω επιφάνεια ενός συμπιεστή. Δεξιά: Προφίλ κίνησης αισθητήρα πάνω και από τους 24 συμπιεστές.

Το πείραμα διήρκησε 44 ώρες, δηλαδή η διάταξη πήρε 130 διαφορετικές οκτάδες μετρήσεων από κάθε συμπιεστή ($130 \cdot 8 = 1040$ μετρήσεις από κάθε συμπιεστή). Τα δεδομένα που παρέχει ο αισθητήρας αποθηκεύτηκαν και η ανάλυση τους έγινε στο περιβάλλον Matlab. Από την κάθε οκτάδα τιμών εξάγεται ο μέσος όρος αυτών και συγκρίνεται με τους μέσους κάθε οκτάδας από τον ίδιο συμπιεστή. Η σύγκριση αυτή θα παρουσιαστεί σε τιμές τυπικής απόκλισης μεταξύ των μέσο όρων. Επίσης, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση όλων των μετρήσεων από ένα συμπιεστή (1040 μετρήσεις) και οι τυπικές αποκλίσεις κάθε οκτάδας από όλους τους συμπιεστές.



Εικόνα 3.4: Θηκόγραμμα (boxplot) των μέσων όρων από κάθε συμπιεστή.

Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μέσων όρων από κάθε οκτάδα μετρήσεων. Στη εικόνα παρουσιάζονται οι μέσοι όροι από κάθε συμπιεστή (well number) σε θηκόγραμμα. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ διαφορετικών συμπιεστών είναι μικρότερη από 300 μm , αποτέλεσμα που μας δείχνει ότι το σύστημα ρύθμισης της παραλληλότητας λειτουργεί ικανοποιητικά. Παρατηρείται το πολύ μικρό εύρος κάθε κουτιού καθώς επίσης και κάποιες τιμές οι οποίες βρίσκονται έξω από το κουτί και θα μπορούσαν να θεωρηθούν ακραίες τιμές. Παρ' όλα αυτά ακόμα και αυτές οι τιμές βρίσκονται πολύ κοντά στις υπόλοιπες και όπως θα δειχθεί στη συνέχεια με τα αποτελέσματα των τυπικών αποκλίσεων μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικές.



Εικόνα 3.5: Αριστερά: Χάρτης χρωμάτων με τις τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων από κάθε συμπιεστή. Δεξιά: Χάρτης χρωμάτων με τις τυπικές αποκλίσεις όλων των μετρήσεων από κάθε συμπιεστή

Στην εικόνα 3.5 αριστερά παρουσιάζεται ένας χάρτης χρωμάτων με τις τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων από κάθε συμπιεστή. Ο πίνακας χρωμάτων, και για τις δύο εικόνες, αντιπροσωπεύει ένα δοχείο με 24 πηγάδια, δηλαδή τους 24 συμπιεστές της διάταξης, με πρώτο το κουτί πάνω αριστερά. Η μικρότερη τυπική απόκλιση μέσω όρων που υπολογίστηκε είναι 1,6 μm ενώ η μεγαλύτερη 4,2 μm . Σχεδόν σε όλους τους συμπιεστές (21 από τους 24) η τυπική απόκλιση των μέσων όρων των μετρήσεων είναι κάτω από 3 μm . Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με την διακριτική ικανότητα (resolution) του

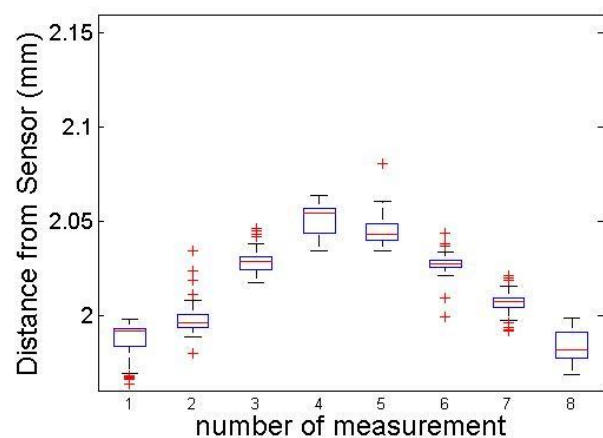
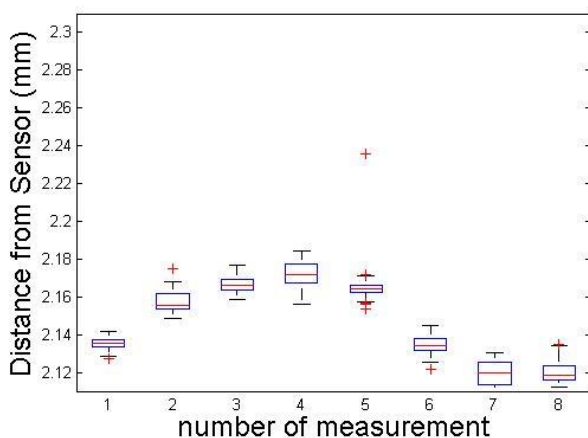
αισθητήρα, που είναι της τάξης του 1μm σύμφωνα με την εικόνα 2.14, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η διάταξη λειτουργεί με ικανοποιητική επαναληψιμότητα.

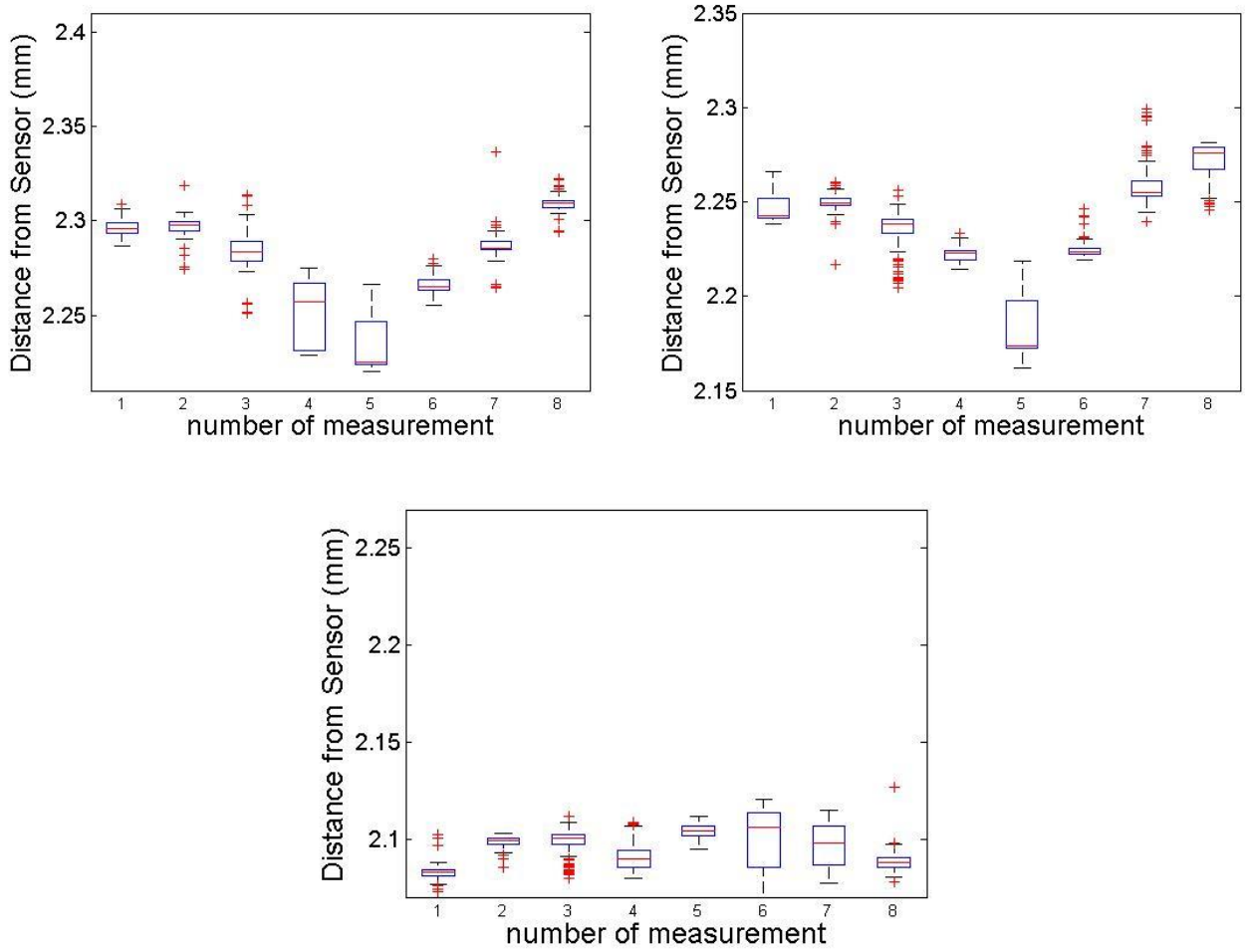
Ο χάρτης χρωμάτων της εικόνας 3.5 δεξιά παρουσιάζει τις τυπικές αποκλίσεις όλων των μετρήσεων από κάθε συμπιεστή, δηλαδή 8*130=1040 μετρήσεις. Η μικρότερη τυπική απόκλιση που υπολογίστηκε είναι 4,4μm και η μεγαλύτερη 28,5μm. Δέκα από τους 24 συμπιεστές έχουν τυπική απόκλιση από όλες τις μετρήσεις μεγαλύτερη από 10μm και τρεις πάνω από 20μm. Η διαφορά αυτή στις τυπικές αποκλίσεις μπορεί να εμφανίζεται είτε από διαφορετική τραχύτητα στις άνω επιφάνειες των συμπιεστών ή λόγω απόκλισης του φορέα συμπίεσης από τον κάθετο άξονα του λόγω μεγαλύτερης ανοχής στις οπές του οδηγού των φορέων συμπίεσης. Η πρώτη περίπτωση απορρίπτεται, γιατί η λείανση έγινε ταυτόχρονα και με τον ίδιο τρόπο και στους 24 φορείς. Η δεύτερη περίπτωση αναλύεται στη συνέχεια.

Στις εικόνες 3.6 παρατηρούμε τα θηκογράμματα από τους 4 συμπιεστές με τυπική απόκλιση όλων των μετρήσεων μεγαλύτερη από 20μm και από ένα τυχαίο συμπιεστή με μικρή τυπική απόκλιση. Οι αριθμημένες θέσεις τους φαίνονται στην δεξιά εικόνα 3.5. Ο κατακόρυφος άξονας σε όλα τα θηκογράμματα έχει το ίδιο εύρος που ισούται με 200μm. Παρατηρώντας τα θηκογράμματα και συγκρίνοντας τα μεταξύ τους, διακρίνεται ότι στους 4 συμπιεστές που έχουμε μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις παρουσιάζεται μια αύξηση ή μείωση των τιμών στις θέσεις 4,5,6 που δεν εμφανίζεται στο συμπιεστή της θέσης 3. Αυτό επιβεβαιώνει την προηγούμενη υπόθεση ότι οι οπές του οδηγού των φορέων συμπίεσης στις θέσεις 5,13,22, και 23 έχουν μεγαλύτερη ανοχή από τις υπόλοιπες. Στη συνέχεια αναλύεται η δυσμενέστερη περίπτωση, αυτή της θέσης 23 όπου η διαφορά ελάχιστης και μέγιστης τιμής φτάνει τα 140μm και η τυπική απόκλιση όλων των μετρήσεων είναι 28.5μm

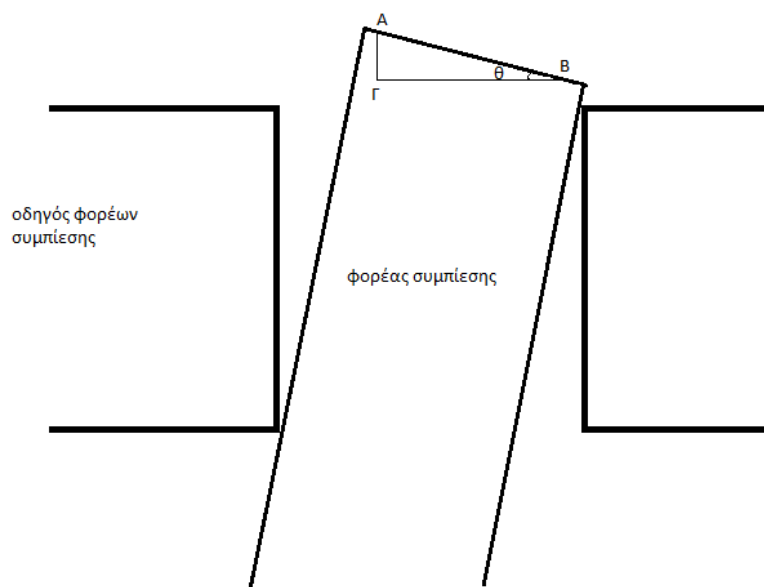
Στην εικόνα 3.7 φαίνεται μια αναπαράσταση της κλίσης του φορέα συμπίεσης λόγω κακής ανοχής της οπής του οδηγού του. Η θέση A αντιστοιχεί στη μέτρηση νούμερο 1 και η θέση B αντιστοιχεί στη μέτρηση νούμερο 5. Η απόσταση ΑΓ ισούται με τη διαφορά των τιμών μετρήσεων από τον αισθητήρα, η οποία στη χειρότερη περίπτωση είναι ΑΓ=140μm. Επίσης, γνωστή είναι και η πλευρά ΑΒ=5mm αφού η διάμετρος του κύκλου πάνω στον οποίο παίρνει μετρήσεις ο αισθητήρας είναι 5mm. Επομένως η κλίση της θ του φορέα συμπίεσης είναι:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{AG}{AB} = \sin^{-1} \frac{140}{5000} = 1,6^\circ$$



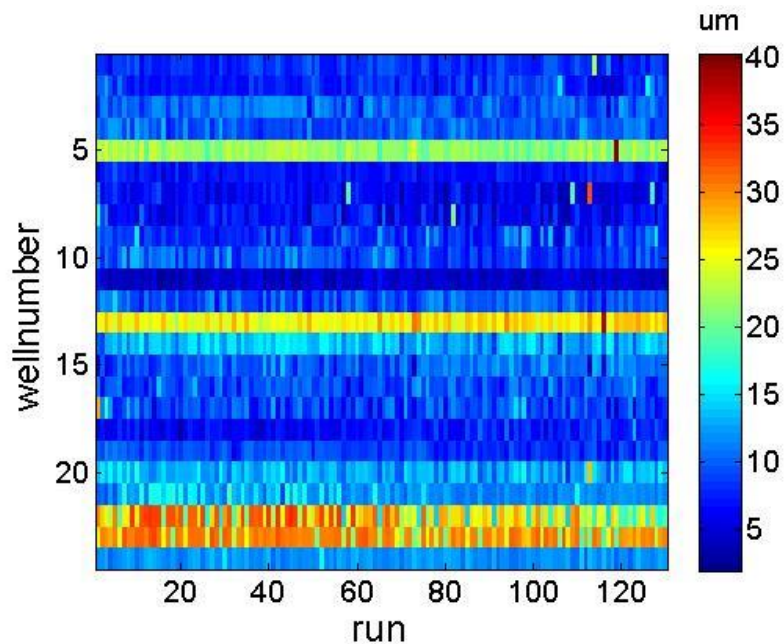


Εικόνα 3.6: Θηκογράμματα μετρήσεων συμπίεστων στις θέσεις: Πάνω αριστερά: θέση 5. Πάνω δεξιά: θέση 13. Μέση αριστερά: θέση 22. Μέση δεξιά: θέση 23. Κάτω: θέση 3.



Εικόνα 3.7: Κλίση φορέα συμπίεσης μέσα σε σπή οδηγού φορέων συμπίεσης.

Τέλος για να διαπιστωθεί η χρονική σταθερότητα της επαναληψιμότητας της διάταξης εξήχθησαν σε χάρτη χρωμάτων οι τυπικές αποκλίσεις κάθε οκτάδας μετρήσεων από κάθε συμπιεστή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζεται στην εικόνα 3.8. Η ελάχιστη τυπική απόκλιση είναι 1,9 μm ενώ η μέγιστη είναι 40,3 μm η οποία εμφανίζεται στο συμπιεστή της θέσης 5 στην 119 οκτάδα από τις 130. Αυτή η τιμή μπορεί να θεωρηθεί τυχαία αφού δεν ξαναεμφανίζεται στη θέση 5 τέτοια απόκλιση ξανά, αλλά ούτε σε κάποιον άλλο φορέα στην 119 οκτάδα του.



Εικόνα 3.8: Χάρτης χρωμάτων τυπικής απόκλισης κάθε οκτάδας μετρήσεων

4. Πειραματική Εφαρμογή: Παρακολούθηση Εκφυλισμού Χόνδρου

Οι δυνατότητες της διάταξης παρουσιάζονται σε ένα πιλοτικό πείραμα μελέτης της αποδόμησης χόνδρου από το ένζυμο κολλαγενάση.

4.1. Προετοιμασία δειγμάτων χόνδρου.

Η προετοιμασία των δειγμάτων χόνδρων πραγματοποιήθηκε από την μεταπτυχιακή φοιτήτρια του εργαστηρίου Εμβιομηχανικής και Συστημικής Βιολογίας Αναστασία Γκουσιούδη σύμφωνα με τη διπλωματική της [10].

Τα δείγματα προέρχονται από τις αρθρώσεις ενός χοίρου 5-6 μηνών. Οι αρθρώσεις παραλήφθηκαν μια εβδομάδα μετά την ευθανασία του ζώου. Σε αυτή την εβδομάδα, οι αρθρώσεις διατηρήθηκαν στους 4°C. Με την άφιξή τους στο εργαστήριο, αφαιρέθηκαν προσεκτικά το δέρμα και οι τένοντες, χωρίς να γίνει ζημιά στους εσωτερικούς ιστούς και η επιφάνεια του αρθρικού χόνδρου αποκαλύφθηκε

Οι επιφάνειες του αρθρικού χόνδρου ξεπλύθηκαν με phosphate-buffered saline (PBS) και κόπηκαν σε φέτες. Οι φέτες του αρθρικού χόνδρου, αποθηκεύτηκαν προσωρινός σε ένα τριβλίο μαζί με 12.5mL PBS και αντιβιοτικά πενικιλίνης και στρεπτομυκίνης (PBS+P/S). Έπειτα μεταφέρθηκαν σε έναν επωαστήρα. Αφού πέρασαν 24 ώρες, οι φέτες αρθρικού χόνδρου κόπηκαν με έναν διατρητή βιοψίας σε δείγματα αρθρικού χόνδρου διαμέτρου 3mm. Τα δείγματα αποθηκεύτηκαν προσωρινός σε ένα τριβλίο με 8mL PBS+P/S.

Χρησιμοποιώντας την BOSE μηχανή του εργαστηρίου, εκτιμήθηκε το ύψος του κάθε δείγματος. Έπειτα, κάθε δείγμα αρθρικού χόνδρου αποθηκεύτηκε με 150uL PBS σε ένα σωληνάριο χωρητικότητας 0,02ml και αποθηκεύτηκαν στους -80°C.

4.2. Διαδικασία εισαγωγής δειγμάτων χόνδρου στην διάταξη

Για την εκτέλεση πειραμάτων σε δείγματα χόνδρου είναι αναγκαία η τοποθέτηση του δείγματος στο κέντρο κάθε πηγαδιού μιας 24αρης πλάκας. Αυτό επιτεύχθηκε με τη δημιουργία ζελέ αγαρόζης 2% διαλυμένης σε νερό (Type I) σε κάθε ένα πηγάδι. Στη συνέχεια, με χρήση μιας ιδιοσυσκευής κεντράρεται ένας διατρητής βιοψίας διαμέτρου 3mm με το πηγάδι με ακρίβεια και καθετότητα (εικόνα 4.1). Ο διατρητής βιοψίας αφαιρεί από το ζελέ αγαρόζης ένα κύλινδρο με διάμετρο 3mm. Η διάμετρος αυτή, είναι η διάμετρος του δείγματος χόνδρου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί δοκιμή συμπίεσης. Στο κυλινδρικό κενό που έχει δημιουργηθεί στο ζελέ αγαρόζης τοποθετείται το δείγμα χόνδρου.



Εικόνα 4,1: Πάνω αριστερά: Ζελέσ αγαρόζης μέσα σε πηγάδια. Πάνω δεξιά: ζελέσ αγαρόζης με κυλινδρική τρύπα στο κέντρο. Κάτω αριστερά: Συσκευή κεντραρίσματος ενός biopsy punch. Κάτω δεξιά: Διαδικασία αφαίρεσης κυλινδρικού τμήματος.

Το δείγμα αρθρικού χόνδρου πρέπει να περιβάλλεται από το κατάλληλο διάλυμα θρεπτικού. Για αυτό το λόγω πριν την τοποθέτηση του σε κάθε πηγάδι αγαρόζης, εναποθέτουμε στα πηγάδια 300ul θρεπτικού (DMEM+FBS), ώστε να πάρει το θρεπτικό τη θέση του νερού στο ζελέ αγαρόζης. Μετά την τοποθέτηση του θρεπτικού γίνεται εισαγωγή της πλάκας με τα 24 πηγάδια σε επωαστήρα για μία ώρα και έπειτα επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία άλλη μια φορά.



Εικόνα 4.2: Αριστερά: Ζελέσ αγαρόζης μέσα στα πηγάδια. Δεξιά: Ζελέσ αγαρόζης μετά την απορρόφηση του θρεπτικού

Τέλος, γίνεται η τοποθέτηση στο κυλινδρικό κενό που έχει δημιουργηθεί στο ζελέ αγαρόζης του δείγματος χόνδρου.

4.3. Πειραματικός Σχεδιασμός

Λόγω έλλειψης δειγμάτων χόνδρου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αποδόμησης χονδρικού ιστού σε 4 δείγματα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στη συνέχεια:

- Ρύθμιση παραλληλότητας και κινηματικού συνδέσμου Maxwell εκτός επωαστήρα.
- Εισαγωγή ολόκληρης διάταξης στον επωαστήρα για 24 ώρες, ώστε να επέλθει σε θερμοκρασιακή ισορροπία.
- Δημιουργία ζελέ αγαρόζης 2% και τοποθέτηση της στα πηγάδια ενός δοχείου με 24 πηγάδια. Αναμονή 3 ώρες για να στερεοποιηθεί ο ζελέσ αγαρόζης.
- Δημιουργία οπών διαμέτρου 3mm στο κέντρο κάθε πηγαδιού με χρήση της ιδιοσυσκευής της εικόνας 4,1.
- Τοποθέτηση 300ul θρεπτικού (DMEM+FBS) σε κάθε πηγάδι αγαρόζης, ώστε το θρεπτικό να πάρει τη θέση του νερού μέσα στο ζελέ. Τοποθέτηση του δοχείου με τα 24 πηγάδια μέσα σε επωαστήρα για μία ώρα.
- Αφαίρεση του δοχείου με τα 24 πηγάδια από επωαστήρα, και αφαίρεση θρεπτικού από κάθε πηγάδι και τοποθέτηση καινούργιου (300ul). Εισαγωγή ξανά στον επωαστήρα για μία ώρα.
- Δημιουργία διαλυμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα. Το ένα περιέχει μόνο θρεπτικό και το άλλο θρεπτικό μαζί με κολλαγενάση σε ποσότητα 1mg/ml.
- Ενεργοποίηση αισθητήρα απόστασης για 30 λεπτά
- Αφαίρεση δοχείου με 24 πηγάδια από επωαστήρα και αφαίρεση θρεπτικού από πηγάδια.
- Εναπόθεση περιβάλλοντος υγρού για διεξαγωγή του πειράματος στα πηγάδια. Και στα 4 πηγάδια 500ul από το αντίστοιχο διάλυμα.
- Αφαίρεση βάσης έδρασης δειγμάτων από επωαστήρα.
- Τοποθέτηση δειγμάτων χόνδρων στα πηγάδια, μέσα στις κυλινδρικές οπές του ζελέ αγαρόζης.
- Τοποθέτηση δοχείου με 24 πηγάδια στη βάση έδρασης δειγμάτων.
- Εναπόθεση των φορέων συμπίεσης πάνω στα δείγματα χόνδρου.

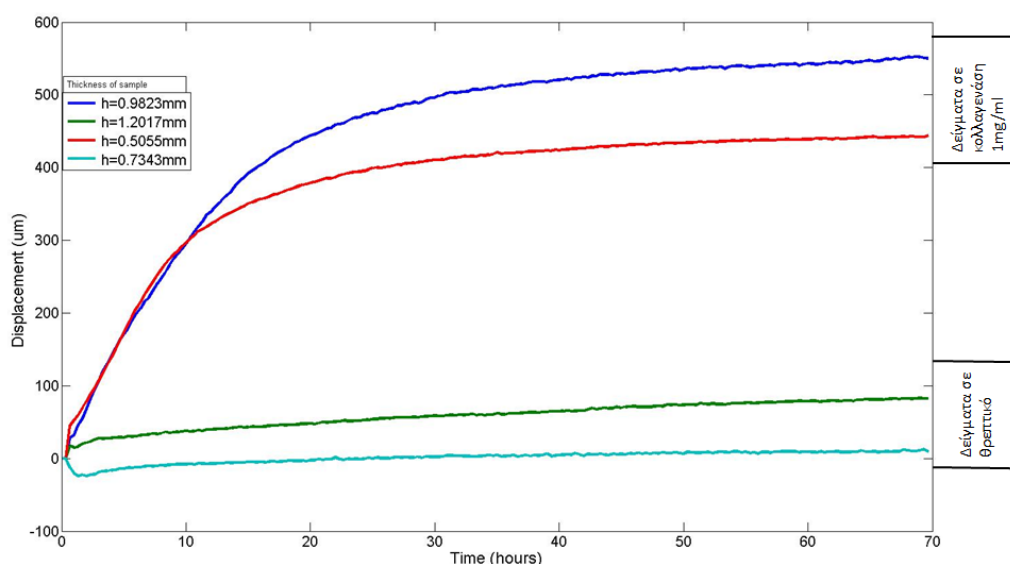
- Τοποθέτηση βάσης έδρασης δειγμάτων στη διάταξη με χρήση κινηματικού συνδέσμου Maxwell.
- Έναρξη μετρήσεων.

Το προφίλ κίνησης του αισθητήρα απόστασης είναι ίδιο με αυτό που φαίνεται στην εικόνα 3.3 των πειραμάτων αξιολόγησης της διάταξης.

4.4. Πειραματικά Αποτελέσματα

Το πείραμα διήρκησε συνολικά σχεδόν 70 ώρες, κατά τις οποίες η συσκευή πήρε 210 διαφορετικές οκτάδες μετρήσεων πάνω από κάθε συμπιεστή και κατά συνέπεια από κάθε δείγμα χόνδρου. Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις των δειγμάτων χόνδρων. Κατά τη διάρκεια σχεδόν των δυο πρώτων ορών του πειράματος παρατηρείται μια μεγάλη μεταβολή των μετατοπίσεων και στις 4 καμπύλες. Αυτό οφείλεται επειδή οι χόνδροι δεν αφέθηκαν σε θρεπτικό, πριν την εκκίνηση του πειράματος, με αποτέλεσμα να μην είναι σε ισορροπία με το περιβάλλον τους και να υπάρχουν φαινόμενα διόγκωσης ή συρρίκνωσης των δειγμάτων χόνδρου.

Για τις πρώτες περίπου 7 ώρες παρατηρείται η ίδια κλίση αποδόμησης ιστού στα δυο δείγματα με κολλαγενασή. Στη συνέχεια αυτή η κλίση αλλάζει και το δείγμα με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα σταθεροποιείται πιο νωρίς από το άλλο δείγμα. Αυτή η αλλαγή στις κλίσεις των καμπύλων των δειγμάτων χόνδρων που αποδομούνται από κολλαγενάση οφείλεται στα διαφορετικά πάχη των δειγμάτων.



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα μετατόπισης 4 δειγμάτων χόνδρου.

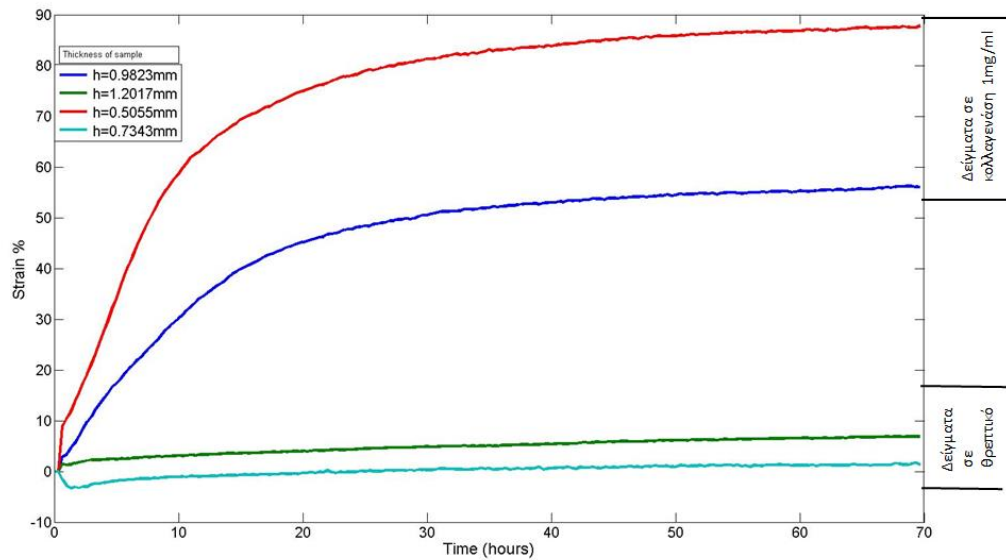
Στη συνέχεια υπολογίστηκε η σχετική παραμόρφωση (strain) κάθε δείγματος και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3. Όπου σχετική παραμόρφωση είναι:

$$e(\%) = \frac{\Delta h}{h_0}$$

όπου: e είναι η σχετική παραμόρφωση επί της εκατό

Δh η μετατόπιση σύμφωνα με την εικόνα 4.2 και

h₀ είναι το αρχικό πάχος κάθε δείγματος που φαίνεται στο υπόμνημα των εικόνων 4.2 και 4.3



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης 4 δειγμάτων χόνδρου.

Τα δυο δείγματα που δεν αποδομούνται από κολλαγενάση παρουσιάζουν, μετά τις δυο πρώτες ώρες αστάθειας, μια σταθερή καμπύλη σχετικής παραμόρφωσης.

Η διαφορά που εμφανίζεται στην τελική σχετική παραμόρφωση μεταξύ των δύο δειγμάτων που αποδομούνται από κολλαγενάση οφείλεται στο ότι τα δείγματα του χόνδρου έχουν παρθεί από διαφορετικά σημεία πάνω στον αρθρικό χόνδρο.

5. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός, η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός μιας συσκευής για ταυτόχρονη μέτρηση (High-throughput) της αποδόμησης δειγμάτων χονδρικού ιστού. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων χαρακτηρισμού της διάταξης, αλλά και αυτά της αποδόμησης ιστού, η διάταξη μπορεί να μετρήσει με καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα μετατοπίσεις λόγω παραμόρφωσης του ιστού.

Φυσικά, όπως και σε κάθε πρότυπη συσκευή, υπάρχουν δυνατότητες περαιτέρω εξέλιξης:

Παρατηρήθηκε ότι σε συνθήκες επώασης ευκαρυωτικών κυττάρων το σύστημα κίνησης του αισθητήρα απόστασης χάνει μέρος της αξιοπιστίας του λόγω της υγρασίας >90%. Οι βίδες, που εδράζουν τις δυο βίδες οδηγούς κάθε κινητήρα, ξεβιδώνουν με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πλέον ευθυγράμμιση της κίνησης των κινητήρων με τα αντίστοιχα γραμμικά έδρανα. Προτείνεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός νέου συστήματος κίνησης, με χρήση δυο γραμμικών εδράνων για κάθε άξονα και με καινούργιες εδράσεις των βιδών οδηγών των κινητήρων.

Ανάπτυξη του ήδη υπάρχον γραφικού περιβάλλοντος, ώστε να δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης της αποδόμησης των δειγμάτων χόνδρου σε πραγματικό χρόνο (real-time monitoring).

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξέταση της δυνατότητας διεξαγωγής μηχανικών δοκιμών σε δείγματα χόνδρου κάτω από δυναμικές συνθήκες.

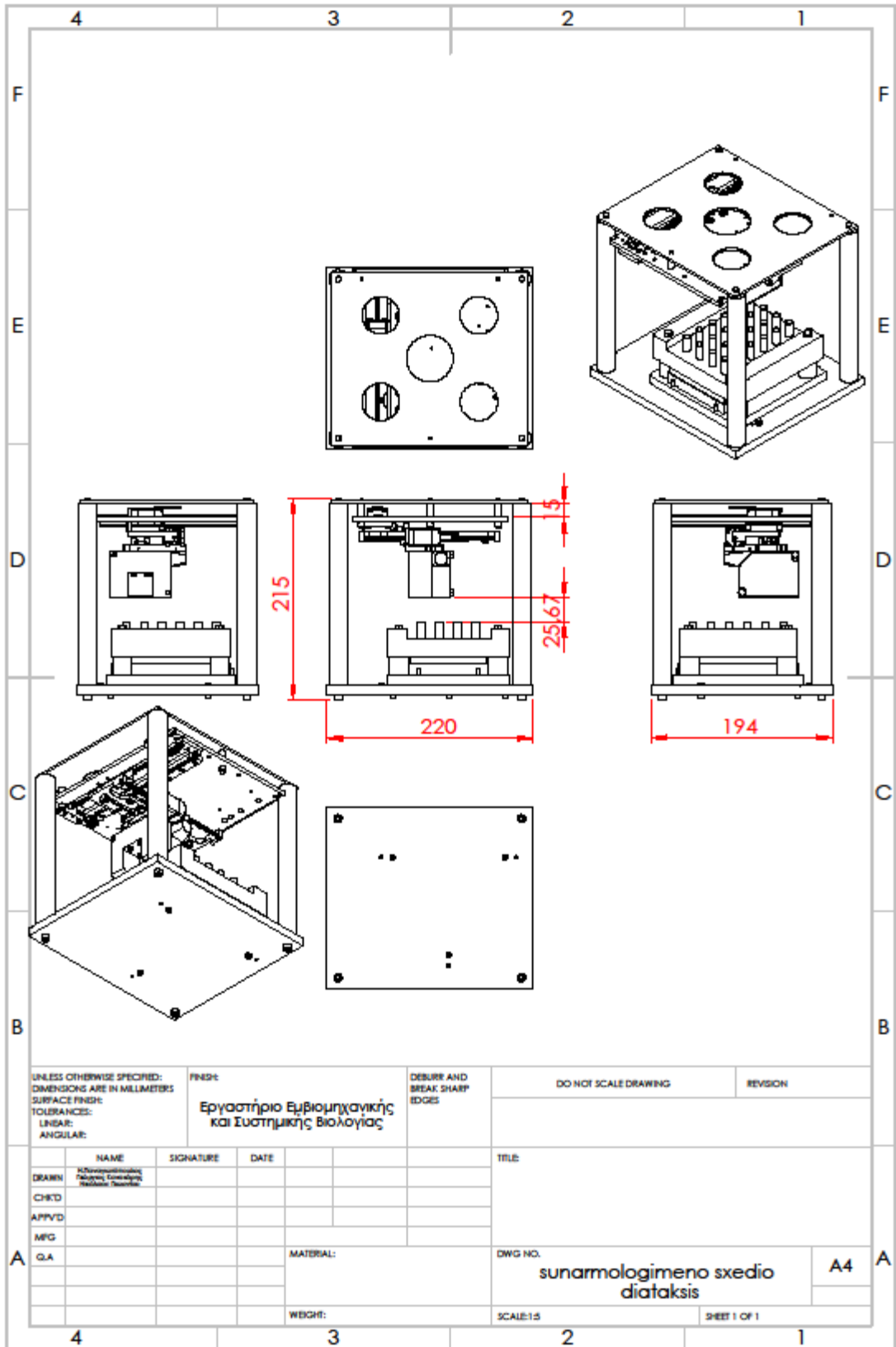
6. Βιβλιογραφία

1. A computer-controlled mechanical culture system for biological testing of articular cartilage explants, J.Steinmeyer, 1997.
2. A versatile shear and compression apparatus for mechanical stimulation of tissue culture explants, Eliot H.Frank, 2000.
3. A direct compression stimulator for articular cartilage and meniscal explants, Adam C. Aufderheide and Kyriacos A. Athanasiou, 2006.
4. Design and application of an oscillatory compression device for cell constructs, Theresa R. Cassino, 2007.
5. A simple measuring device for laboratory indentation tests on cartilage. Wolfgang Koeller, 2008.
6. A novel bioreactor for the dynamic stimulation and mechanical evaluation of multiple tissue-engineered constructs, Trevor J. Lujan, 2011.
7. Design and validation of a compressive tissue stimulator with high-throughput capacity and real-time measurement capability, David J. Salvetti, 2011.
8. A high throughput mechanical screening device for cartilage tissue engineering, Bhavana Mohanraj, 2014.
9. The Physiology of Sports Injuries and Repair Processes Kelc Robi. 2013
10. Quantification of cartilage biomechanics under dynamic mechanical loading, Gkousioudi Anastasia, 2016
11. Διάταξη μέτρησης ελαστικότητας πολλαπλών δοκιμίων, Παναγιώτης Αλευράς, 2010
12. Μελέτη της επίδρασης συστατικών της εξωκυττάριας μήτρας στα μονοπάτια σηματοδότησης των χονδροκυττάρων, Γρατσία Εμμανουέλα, 2016
13. Μοριακοί παθογενετικοί μηχανισμοί στην εκφυλιστική νόσο των αρθρώσεων, Παγιωτόπουλος Δημήτριος
14. The Physiology of Sports Injuries and Repair Processes Kelc Robi. 2013
15. Biomechanics and Modeling of Skeletal Soft Tissues. Rami Korhonen and Simo Saarakkala.2011
16. *Instruction Manual optoNCDT 1402*
17. <http://www.arthritis-health.com/>
18. <http://www.morganvillesci.com/>
19. <http://kinematiccouplings.org>
20. <http://www.micro-epsilon.com/>
21. <http://www.corning.com/>
22. <http://www.waycon.de/>
23. <http://www.misumi-europe.com/en/>
24. <http://en.nanotec.com/>
25. <http://www.sparkfun.com/>
26. <http://www.arduino.cc/>
27. <http://www.ftdichip.com/>

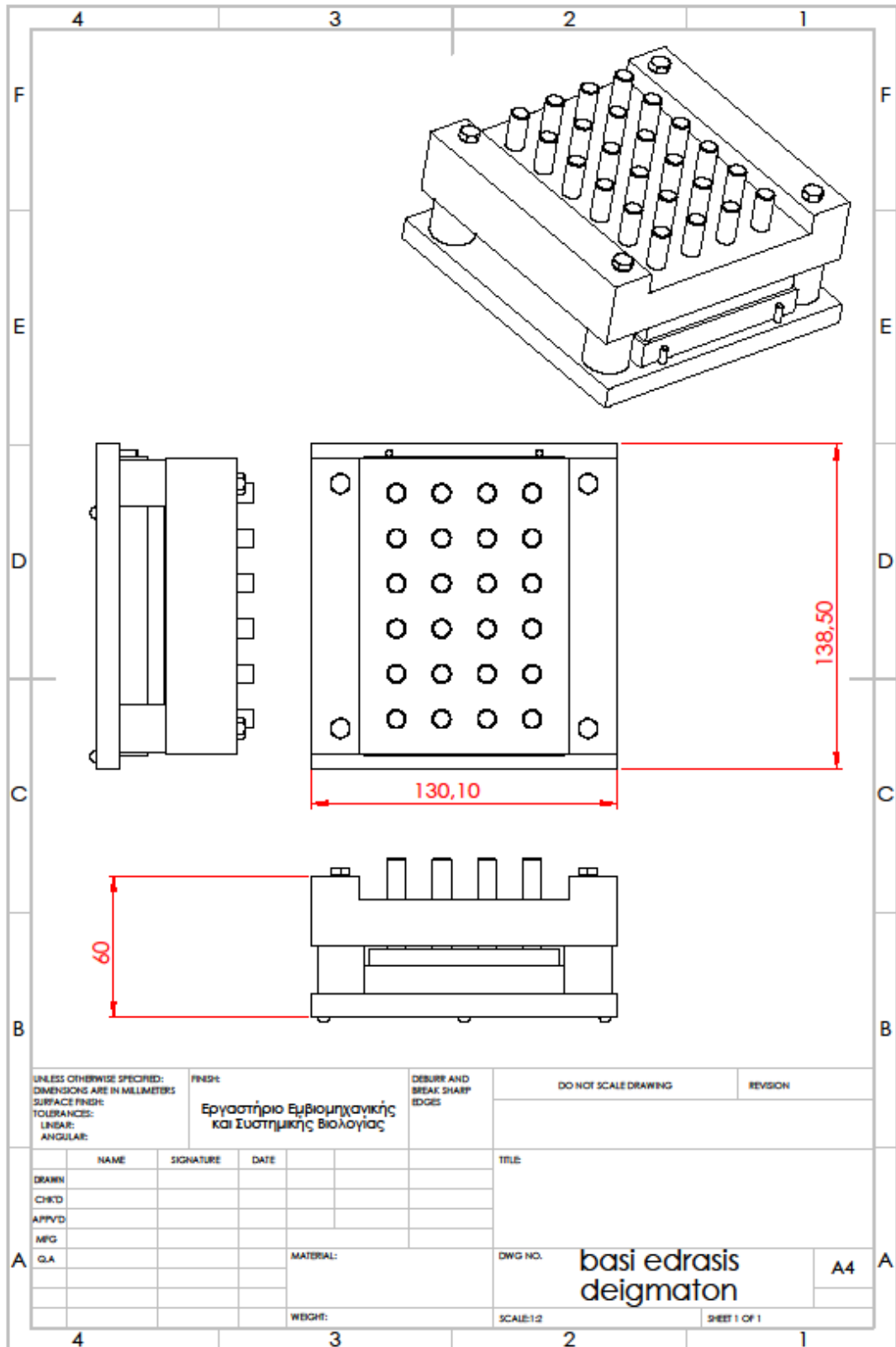
Παραρτήματα

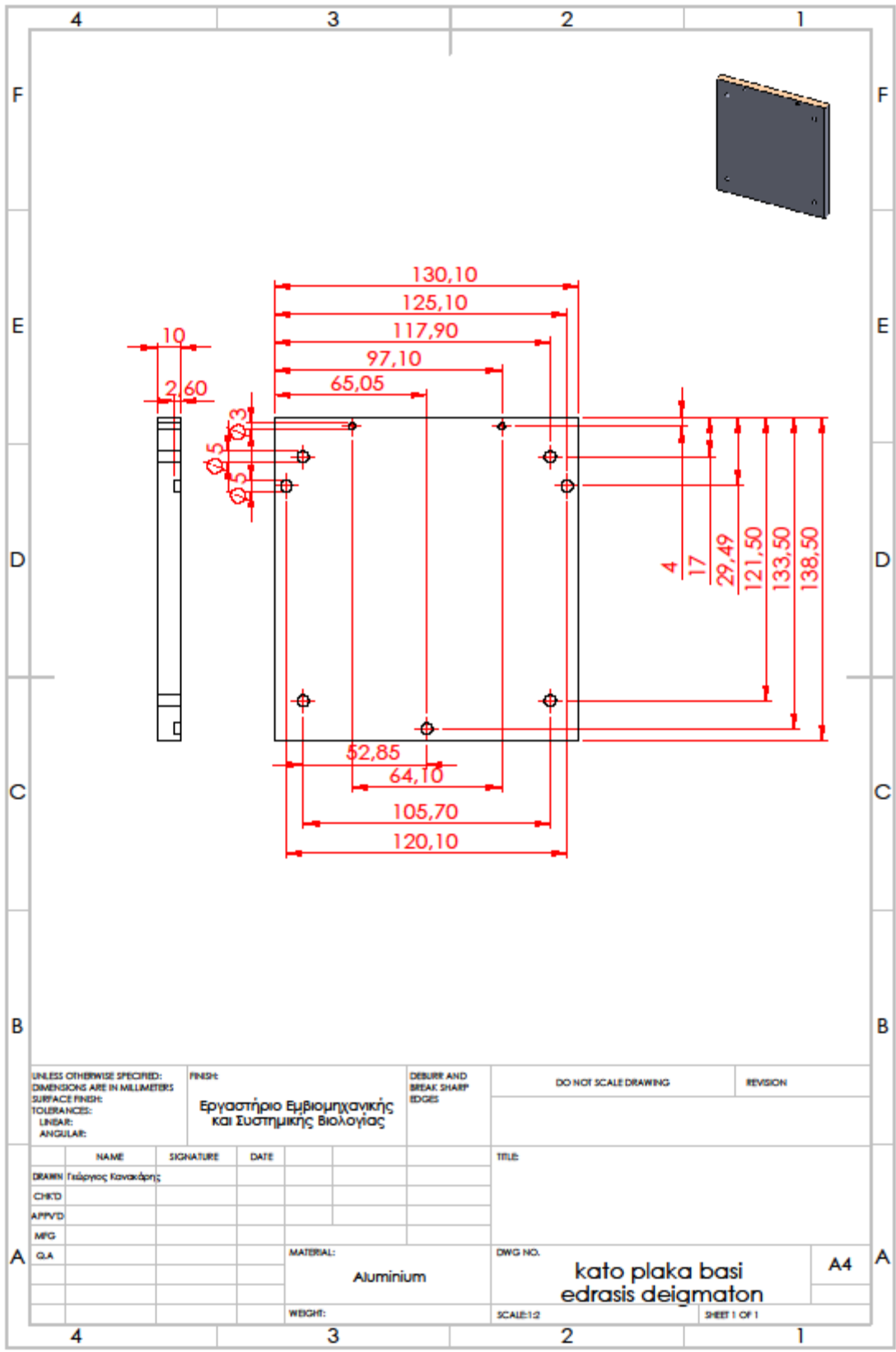
Παράρτημα Α: Κατασκευαστικά Σχέδια

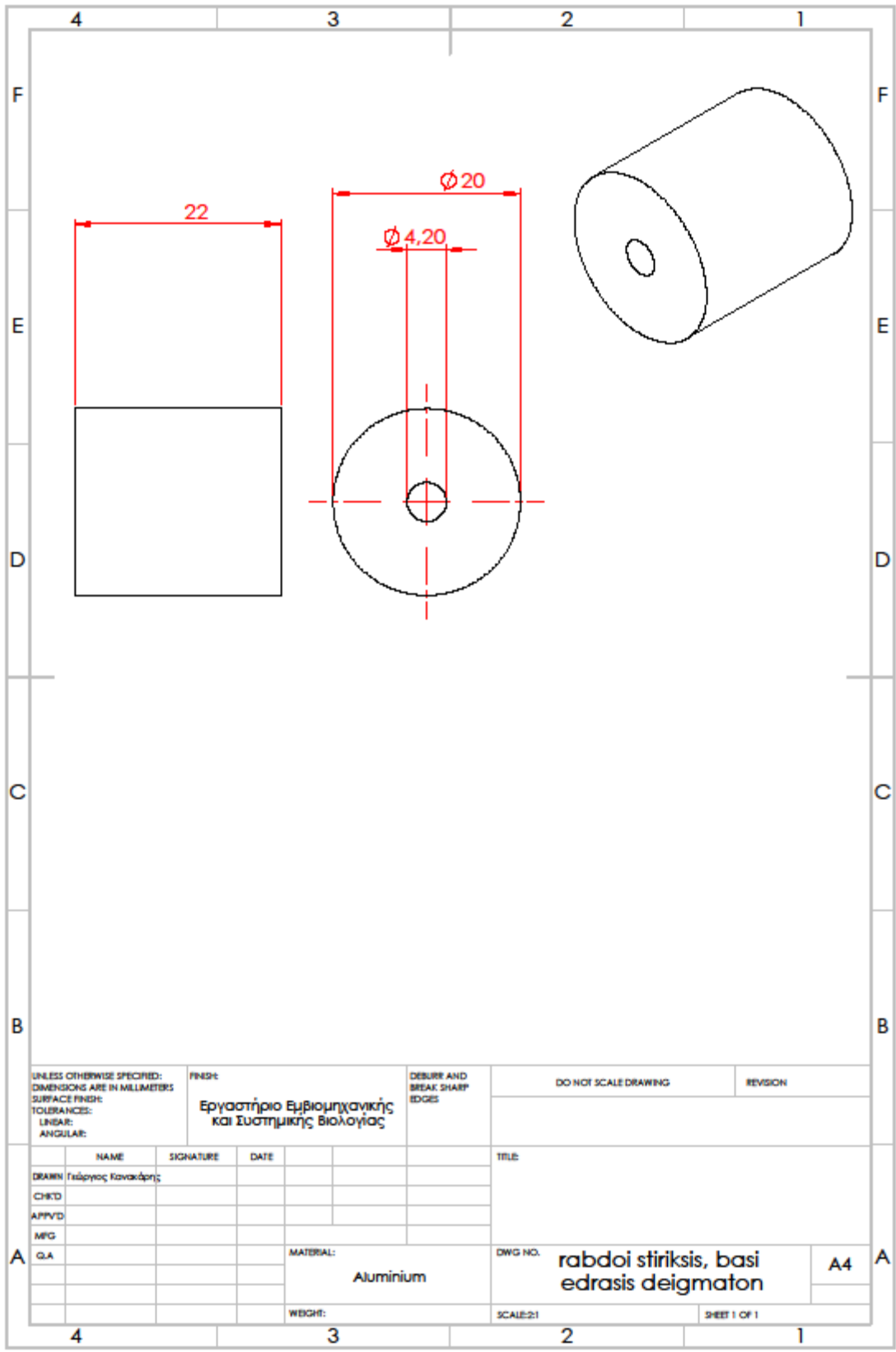
Στο παράρτημα Α παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια της διάταξης.



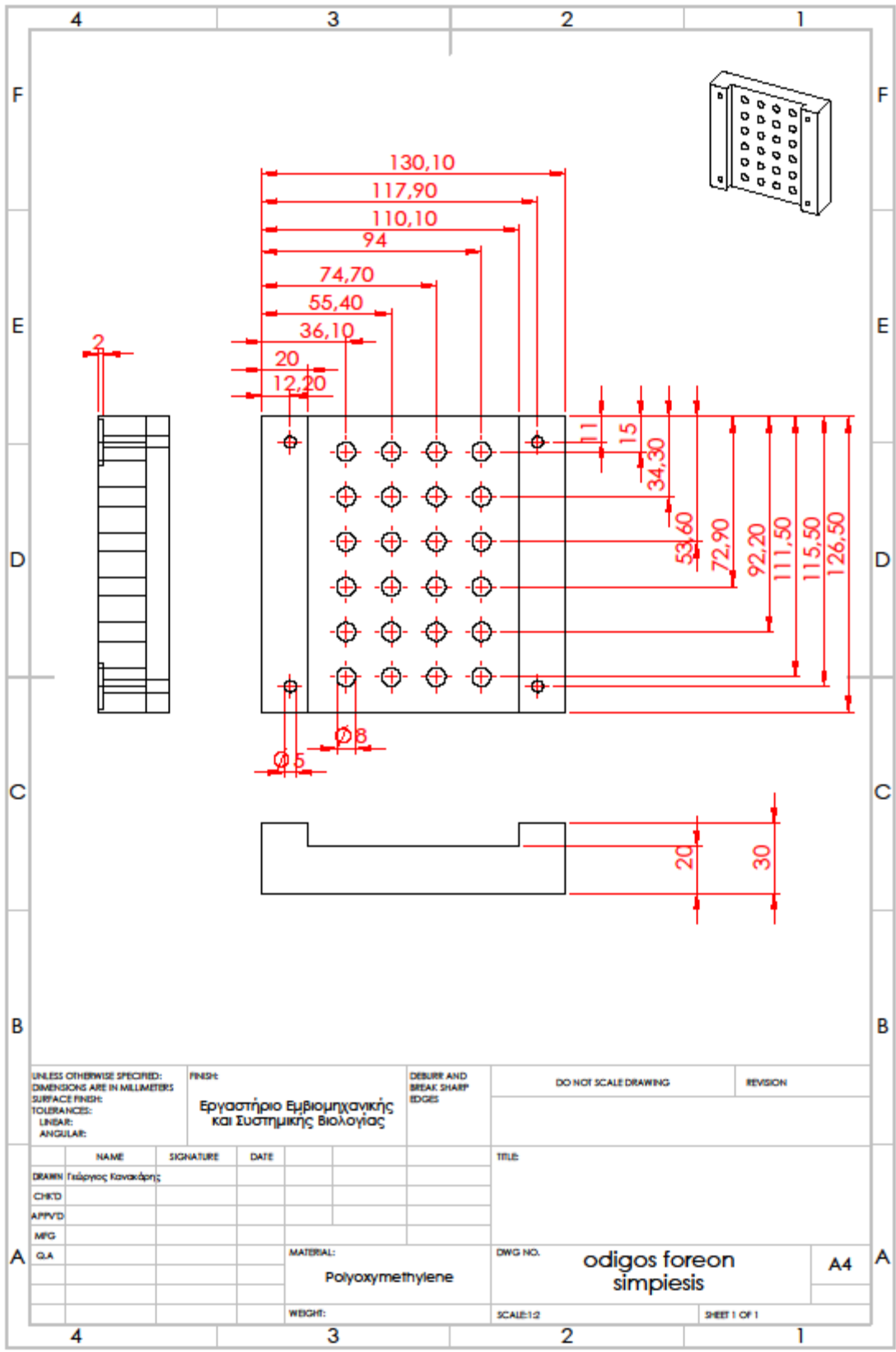
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΒΑΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

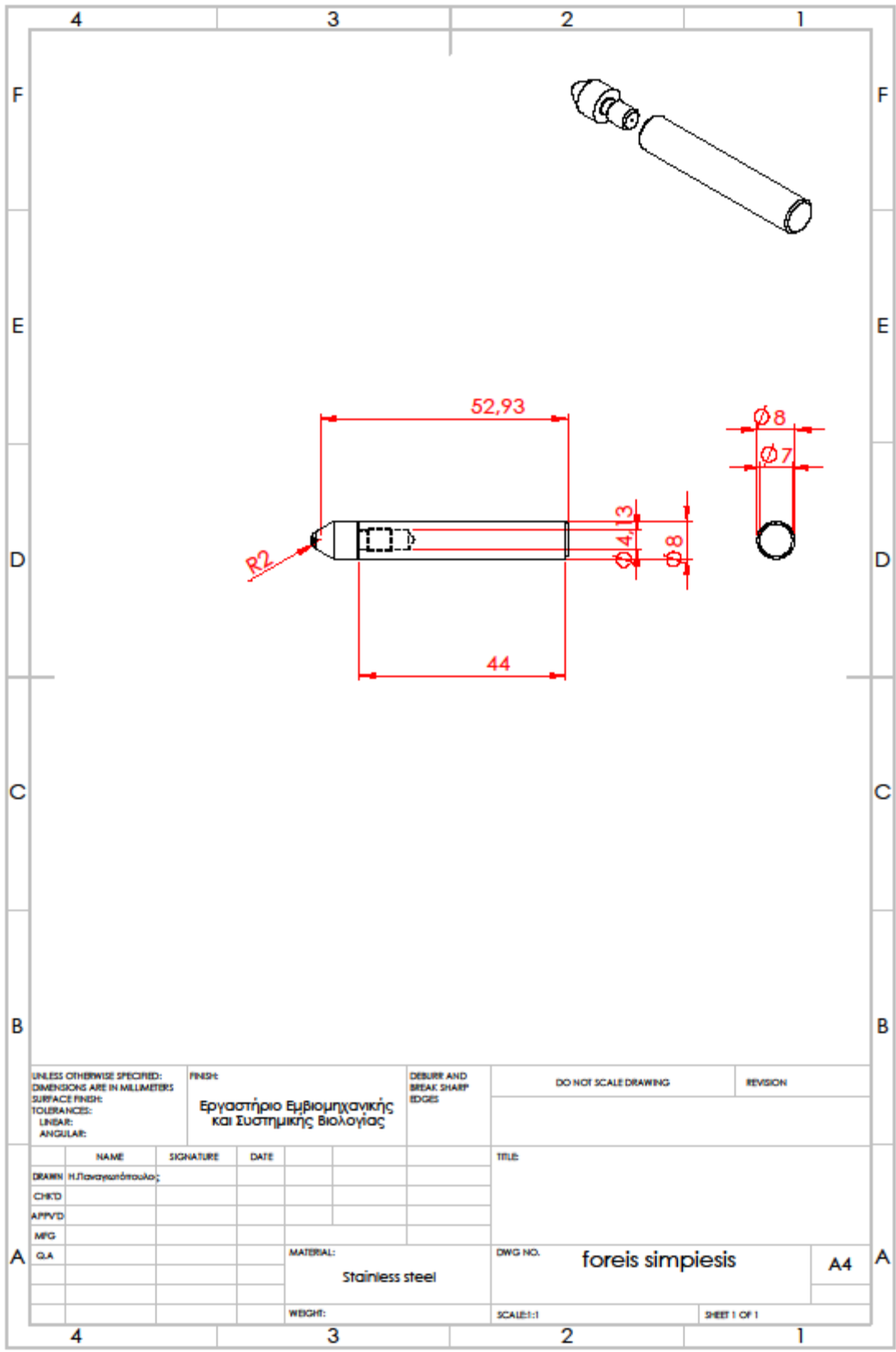




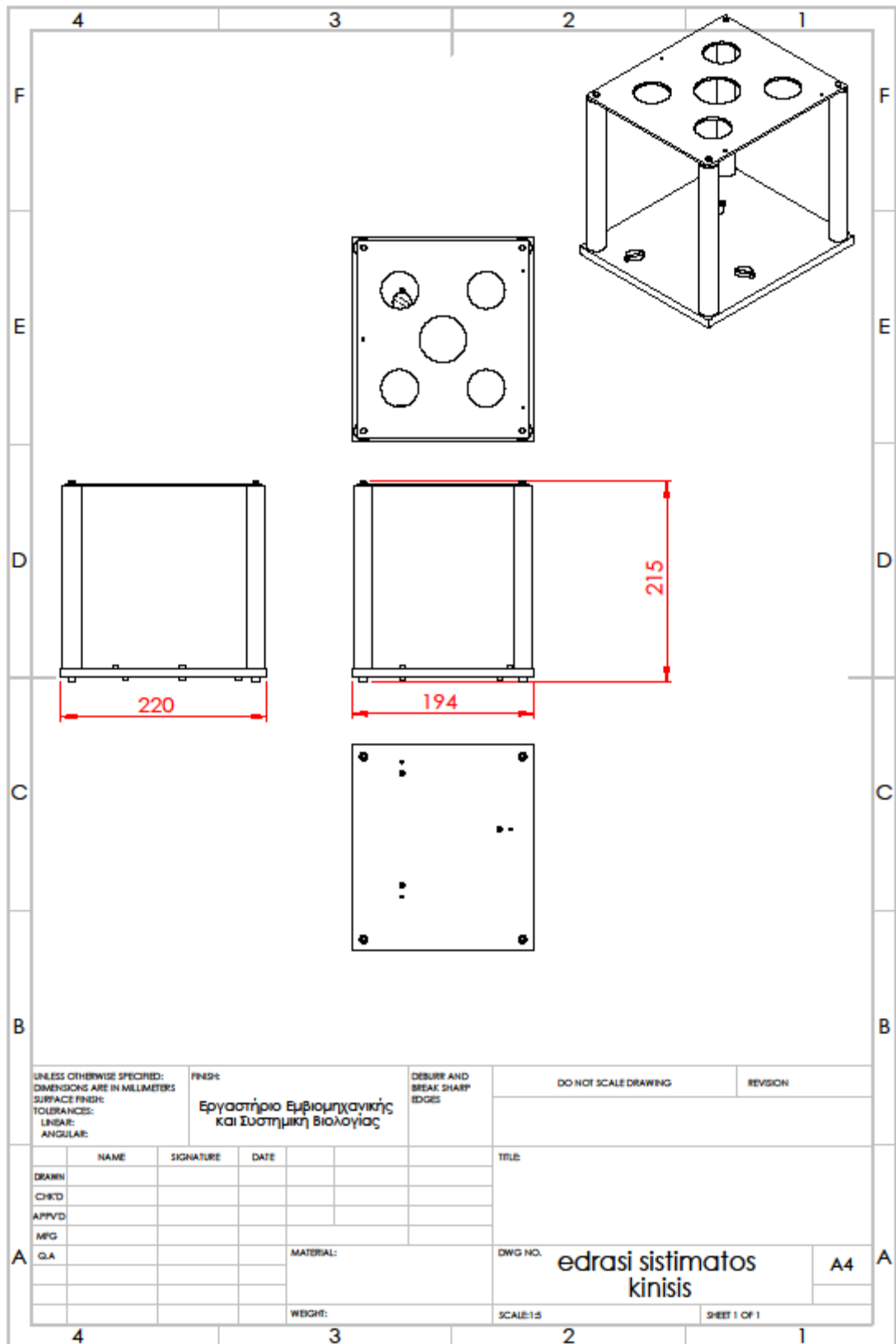


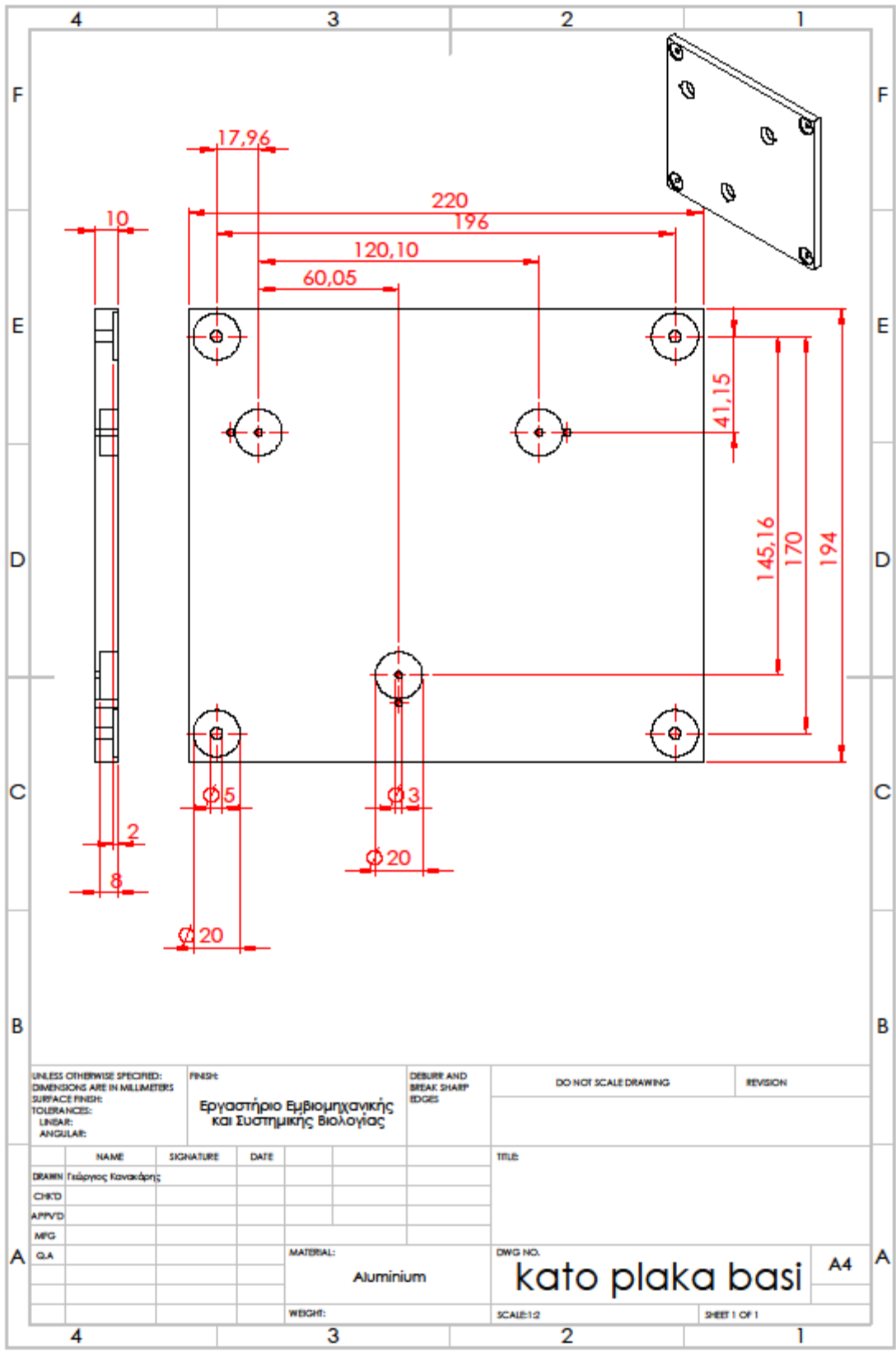
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:		Εργαστήριο Εμβιομηχανικής και Συστημικής Βιολογίας					
TOLERANCES:		DEBURE AND BREAK SHARP EDGES					
LINEAR:							
ANGULAR:							
	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE			
DRAWN	Γεώργιος Κονακάρης						
CHECKED							
APPROVED							
MFG							
QA				MATERIAL:	Aluminium		DWG NO.
					rabdoi stirkisis, basi edraisis deigmaton		A4
				WEIGHT:			SCALE:2:1
							SHEET 1 OF 1

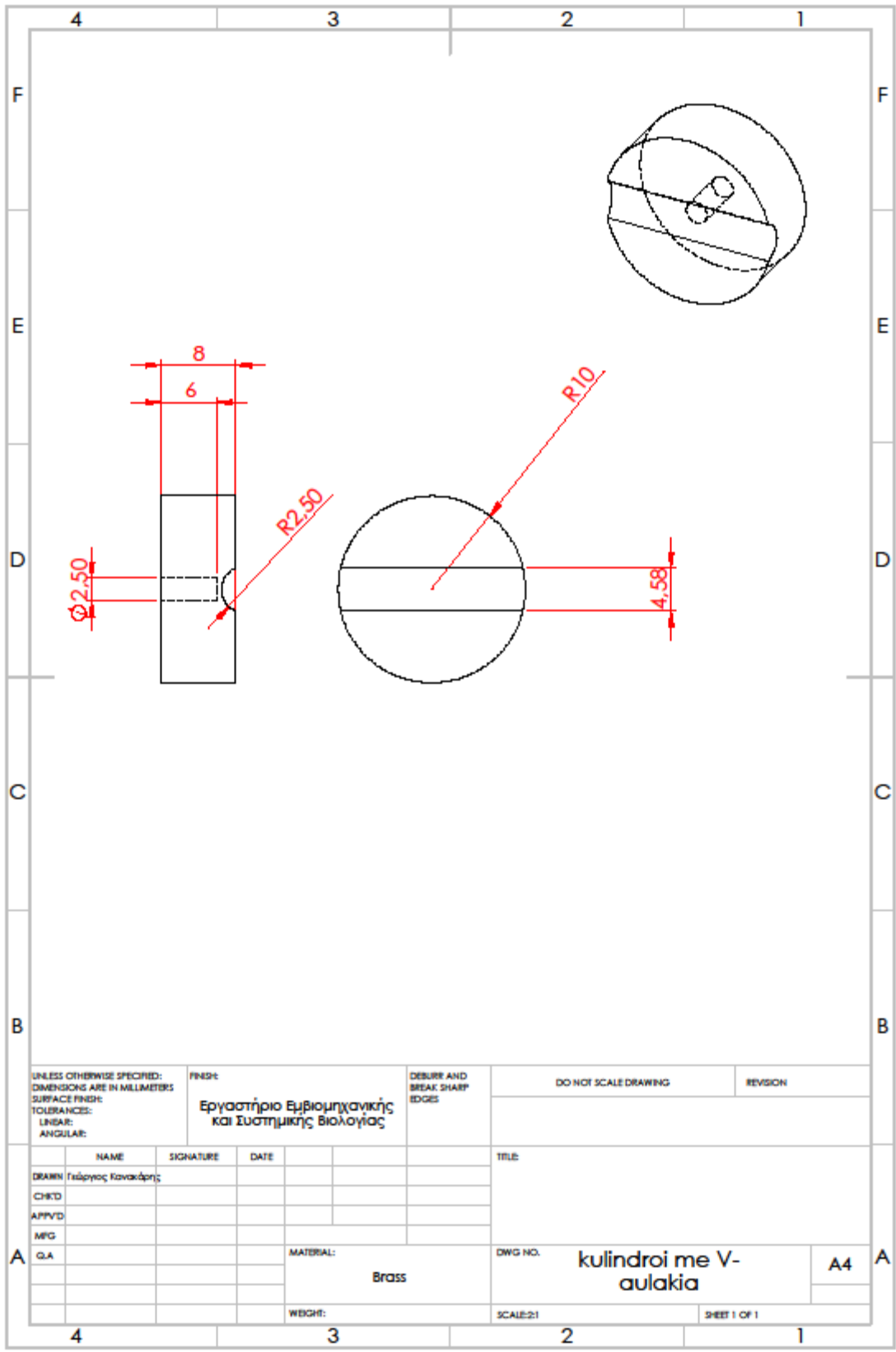


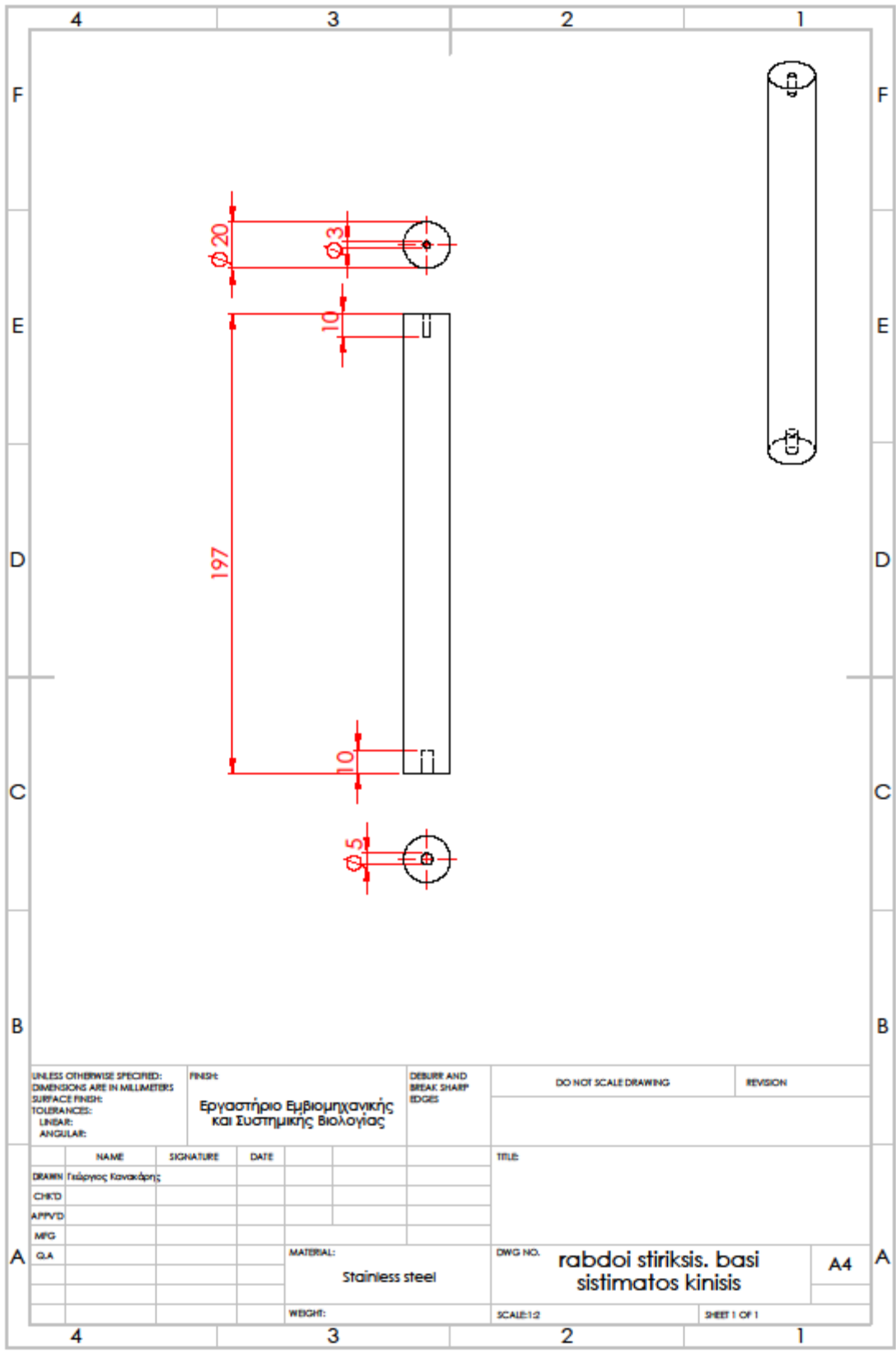


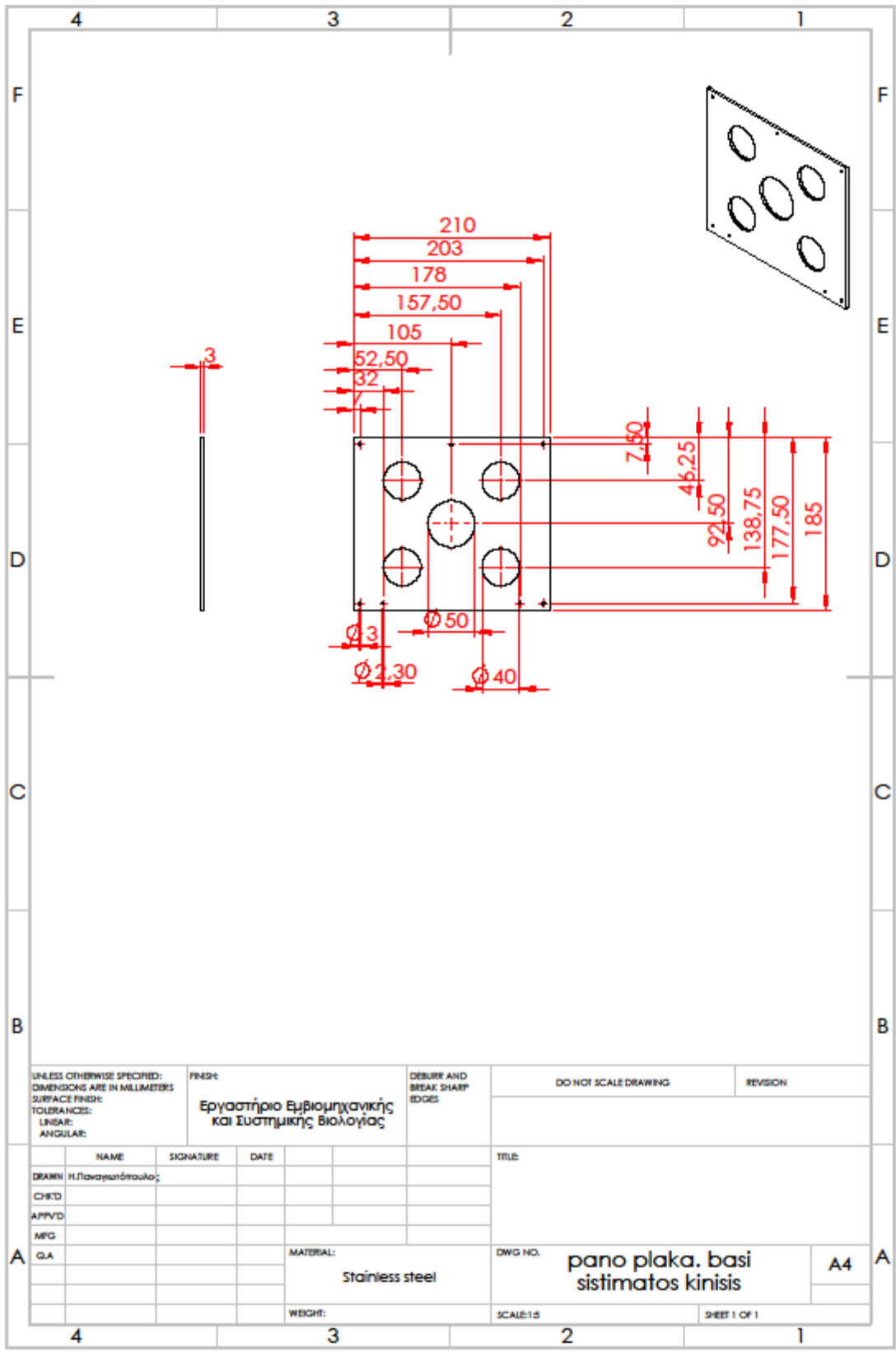
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΒΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ



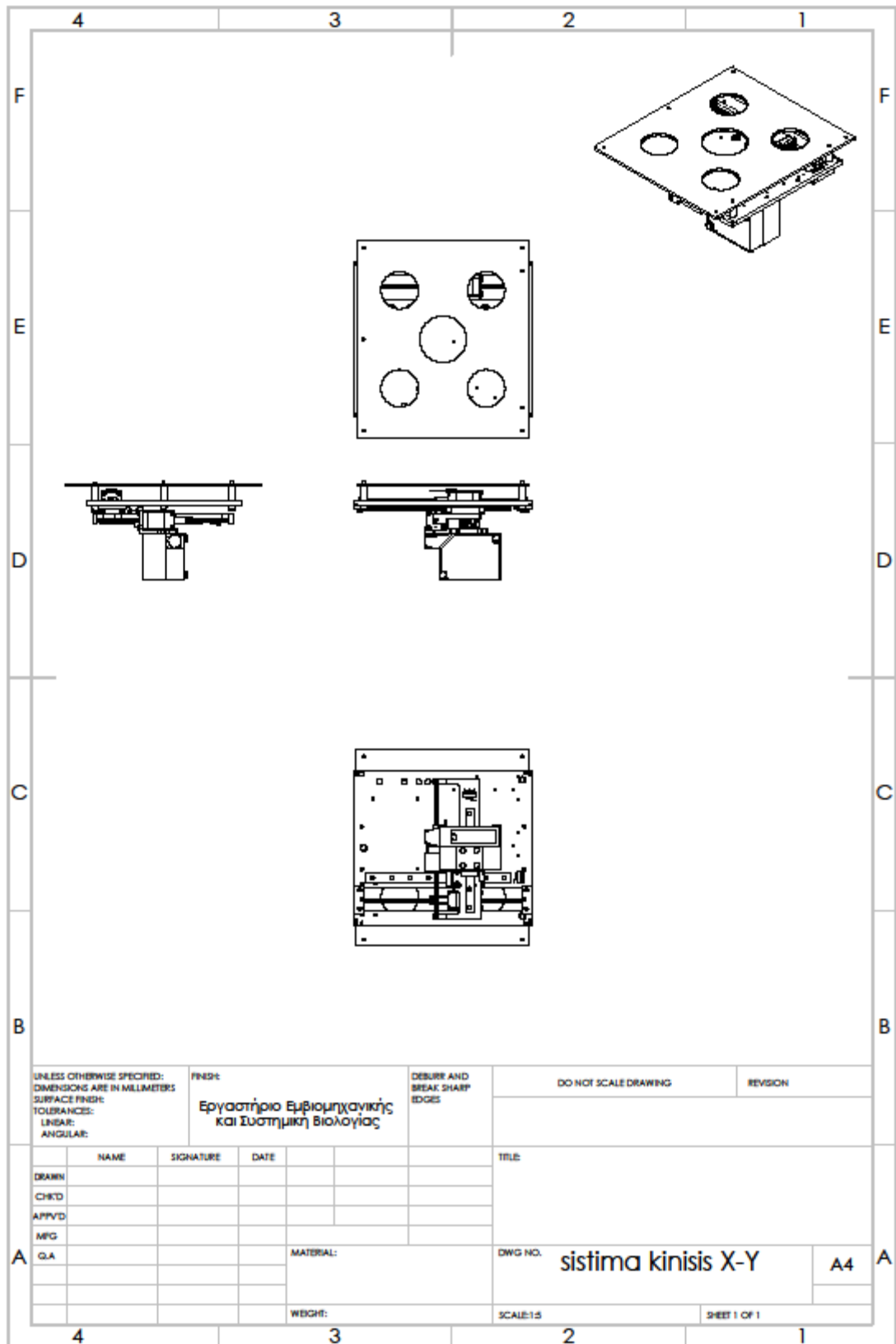


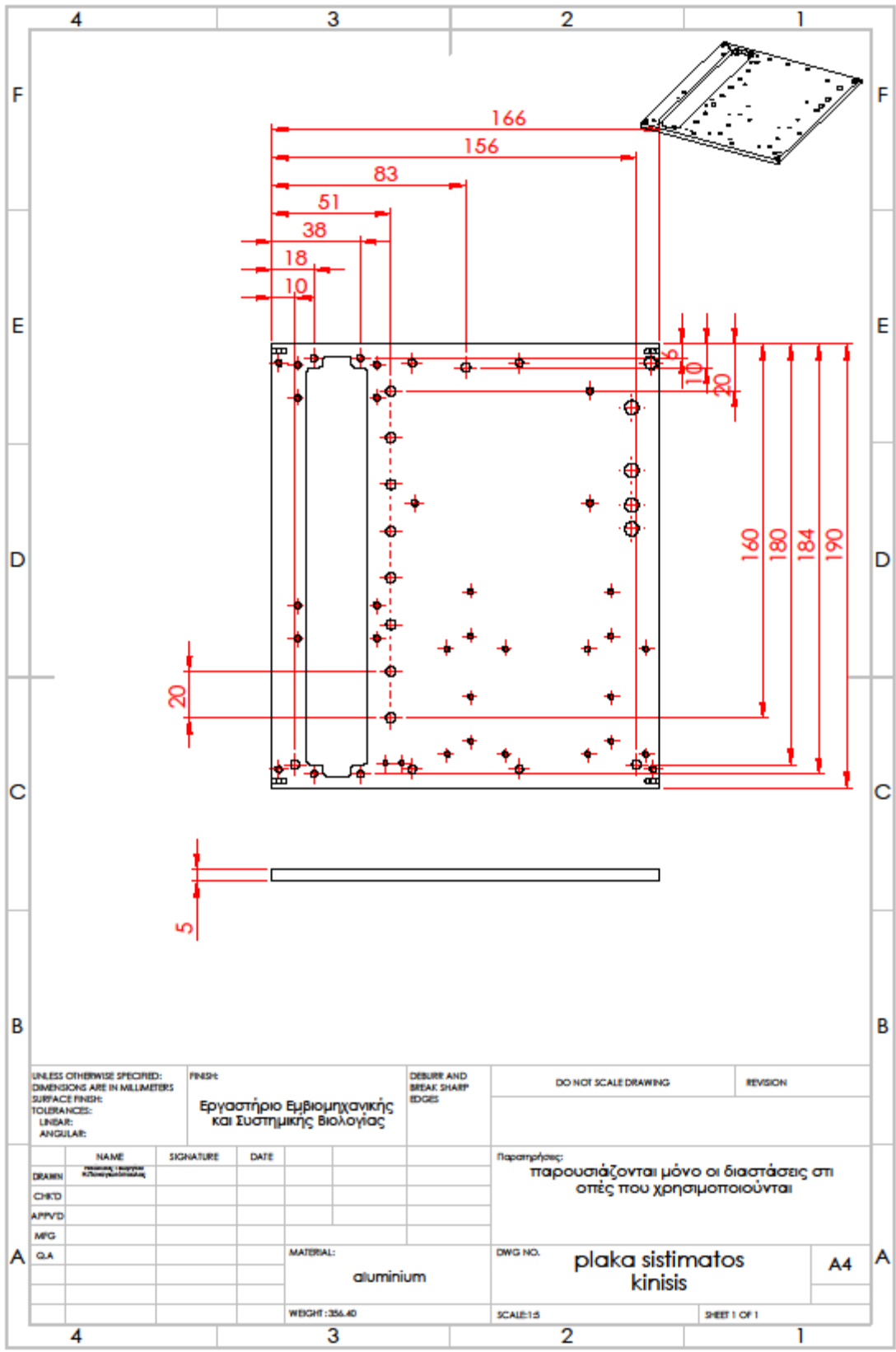




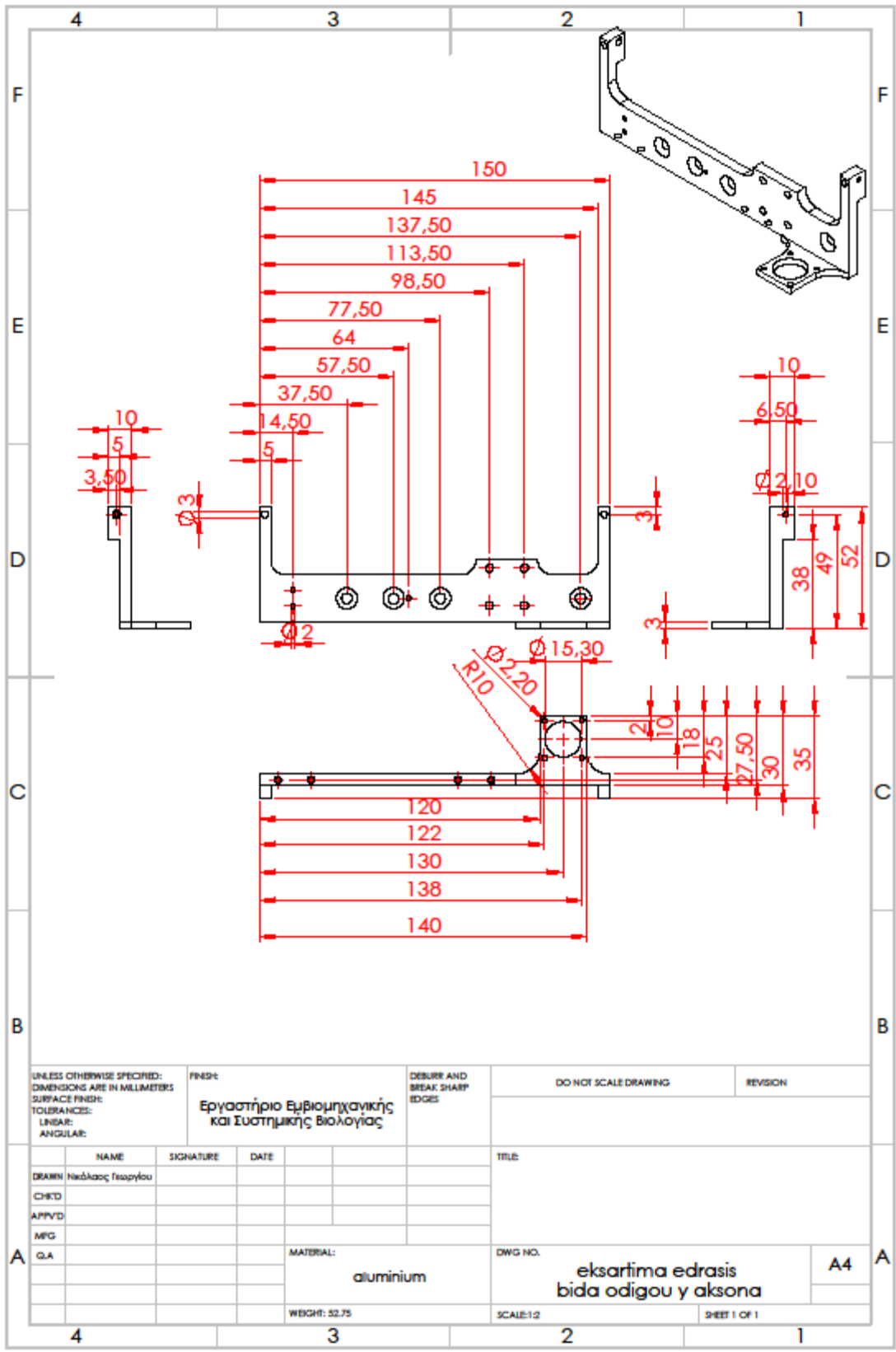


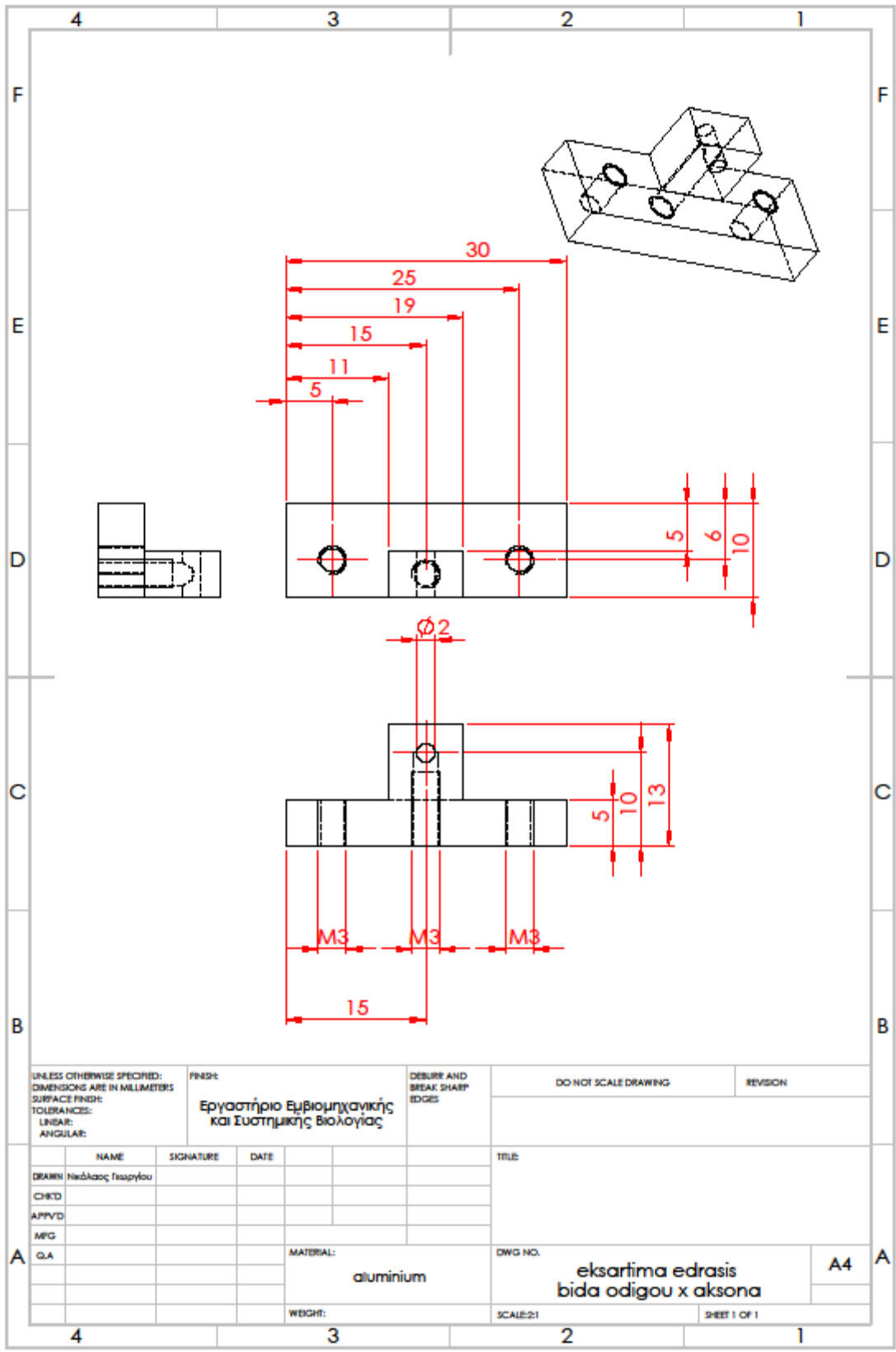
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

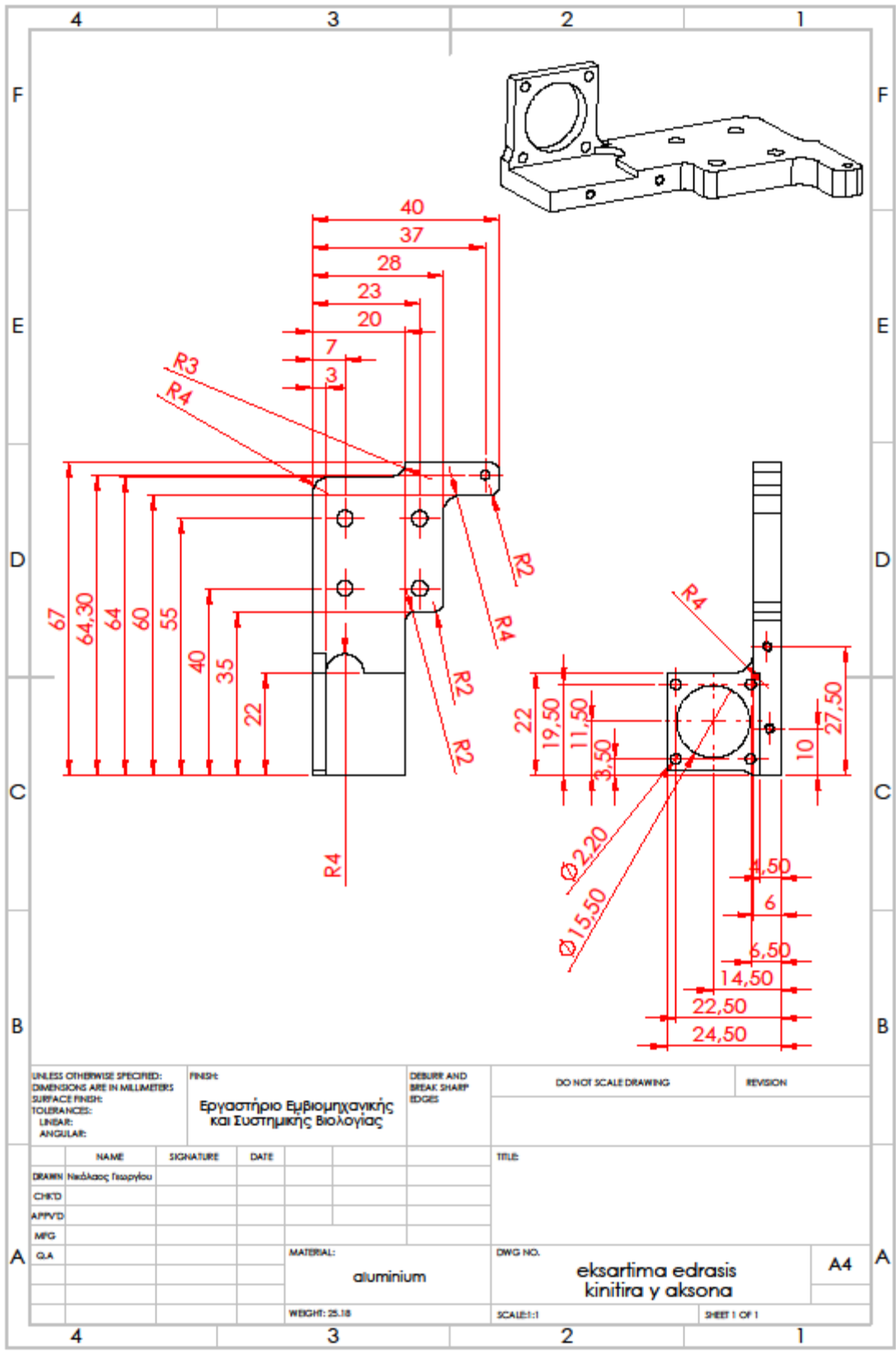




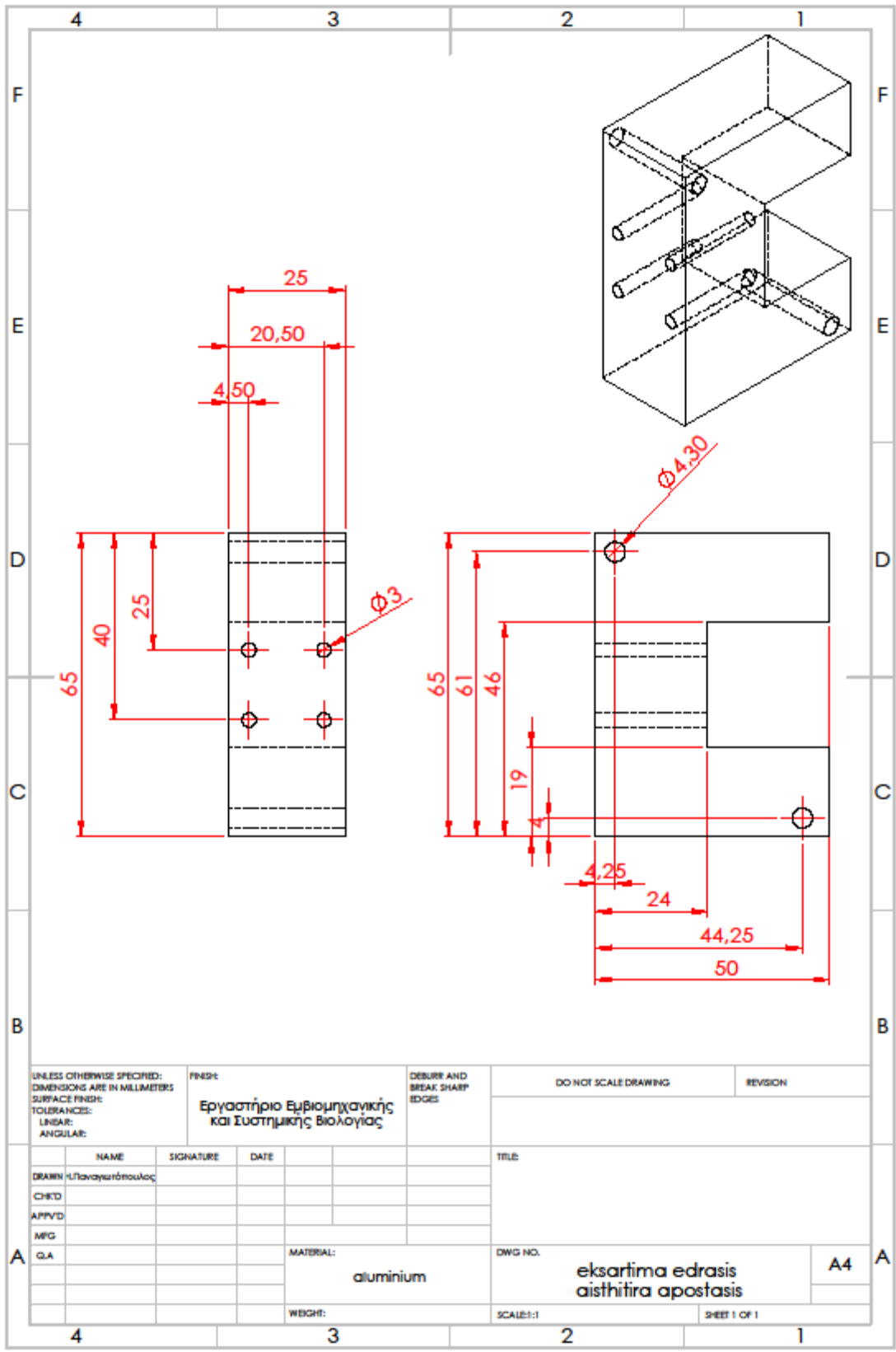
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH: Εργαστήριο Εμβιομηχανικής και Συστημικής Βιολογίας	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN CHK'D APP'VD MFG Q.A.		SIGNATURE	DATE	Παρατηρήσεις: παρουσιάζονται μόνο οι διαστάσεις στις οπές που χρησιμοποιούνται	
MATERIAL: aluminium			DWG NO. plaka sistimatos kinisis	A4	
WEIGHT : 356.40			SCALE: 1:5	SHEET 1 OF 1	





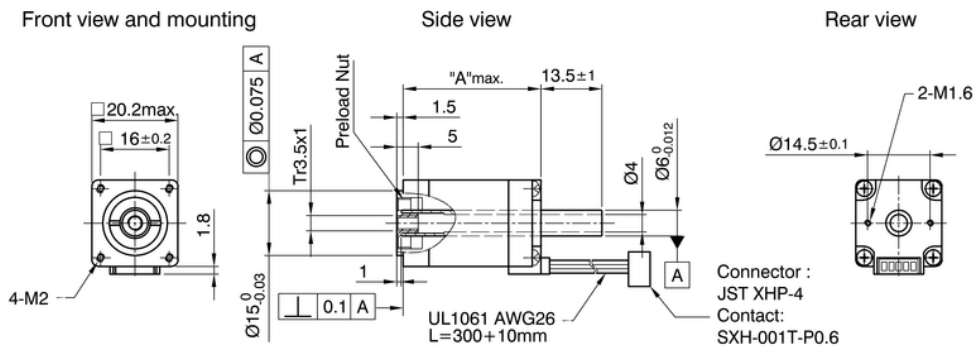


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH: Εργαστήριο Εμβιομηχανικής και Συστημικής Βιολογίας	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE	
DRAWN Νικόλαος Γεωργίου					
CHECKD					
APPV'D					
MFG					
QA			MATERIAL: aluminium	DWG NO. eksartima edrasis kinitira y aksona	A4
			WEIGHT: 25.18	SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH: Εργαστήριο Εμβιομηχανικής και Συστημικής Βιολογίας	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE	
DRAWN (Λ/Παναγιώταρος)					
CHECKD					
APPV'D					
MFG					
QA			MATERIAL: aluminium	DWG NO. eksartima edrasis aisthitira apostasis	A4
			WEIGHT:	SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1

KINHΤΗΡΑΣ L2018S0604



Παράρτημα Β: Κώδικας Λογισμικού

Στο παράρτημα Β παρατίθενται οι κώδικες λογισμικού για τη χρήση της συσκευής.

Β1. Κώδικας arduino

Παρατίθενται οι κώδικες arduino που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή πειραμάτων, για τη ρύθμιση παραλληλότητας και ρύθμιση κινηματικού συνδέσμου Maxwell.

Κώδικας για διεξαγωγή πειραμάτων

```
#include <AccelStepper.h>
AccelStepper stepperX(1, 8 ,9); //(1, step , dir),
EasyDriver 1/8 microstepping
AccelStepper stepperY(1, 7, 5);//
const int enableX = 2;
const int enableY = 3;
const int buttonY = 12;
const int buttonX = 13;
int fByte = 0;
int inByte = 0;
int i = 0;
int j = 0;
int stopByte = 0;
boolean Stop = true;
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  stepperY.setMaxSpeed(10000.0);
  stepperY.setAcceleration(5000.0);
  stepperX.setMaxSpeed(10000.0);
  stepperX.setAcceleration(5000.0);
  pinMode(buttonX, INPUT);
  pinMode(buttonY, INPUT);
  pinMode(enableX, OUTPUT);
  pinMode(enableY, OUTPUT);
  digitalWrite(enableY,HIGH);
  digitalWrite(enableX, HIGH); }
void experiment();
void sarosi();
void scan();
void initi();
void metrisi();
void loop(){
  if (Serial.available() > 0)
    {inByte = Serial.read();}
    if(inByte == 'I'){
      initi();}
    if(inByte == 'E'){
      initi();
      delay(500);
      experiment();
      delay(500);
      initi(); }}
//subrutines
void experiment(){
  delay(1000);
  digitalWrite(enableY, LOW);
  stepperY.move(-9500);
  stepperY.runToPosition();
  digitalWrite(enableY, HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(enableX, LOW);
  stepperX.move(30880);
  stepperX.runToPosition();
  digitalWrite(enableX, HIGH);
  sarosi();}
void sarosi(){
  scan();
  for( i = 0; i<3; i++){
    digitalWrite(enableY, LOW);
    stepperY.move(-30880);
    stepperY.runToPosition();\
    digitalWrite(enableY, HIGH);
    delay(500);
    scan();}
  digitalWrite(enableX, LOW);
  stepperX.move(30880);
  stepperX.runToPosition();
  digitalWrite(enableX, HIGH);
  delay(500);
  scan();
  for( j = 0; j<3; j++){
    digitalWrite(enableY, LOW);
    stepperY.move(30880);
    stepperY.runToPosition();
    digitalWrite(enableY, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite( enableX, LOW);
    scan(); }}
void scan(){
  digitalWrite(enableY, LOW);
  stepperY.move(2250);
  stepperY.runToPosition();
  digitalWrite(enableY,HIGH);
  delay(200);
  digitalWrite(enableX,LOW);
  stepperX.move(-700);
  stepperX.runToPosition();
  delay(1000);
```

```

metrisi();
stepperX.move(700);
stepperX.runToPosition();
delay(200);
digitalWrite(enableX,HIGH);
digitalWrite(enableY,LOW);
stepperY.move(2250);
stepperY.runToPosition();
delay(1000);
metrisi();
digitalWrite(enableY, HIGH);
digitalWrite(enableX , LOW);
stepperX.move(2800);
stepperX.runToPosition();
digitalWrite(enableX,HIGH);
delay(200);
digitalWrite(enableY,LOW);
stepperY.move(700);
stepperY.runToPosition();
delay(1000);
metrisi();
stepperY.move(-700);
stepperY.runToPosition();
digitalWrite(enableY,HIGH);
delay(200);
digitalWrite(enableX,LOW);
stepperX.move(2800);
stepperX.runToPosition();
delay(1000);
metrisi();
digitalWrite(enableX, HIGH);
digitalWrite(enableY, LOW);
stepperY.move(-2250);
stepperY.runToPosition();
digitalWrite(enableY,HIGH);
delay(200);
digitalWrite(enableX,LOW);
stepperX.move(700);
stepperX.runToPosition();
delay(1000);
metrisi();
stepperX.move(-700);
stepperX.runToPosition();
digitalWrite(enableX,HIGH);
delay(200);
digitalWrite(enableY,LOW);
stepperY.move(-2250);

```

```

stepperY.runToPosition();
delay(1000);
metrisi();
digitalWrite(enableY, HIGH);
digitalWrite(enableX, LOW);
stepperX.move(-2800);
stepperX.runToPosition();
digitalWrite(enableX,HIGH);
delay(200);
digitalWrite(enableY,LOW);
stepperY.move(-1350);
stepperY.runToPosition();
delay(1000);
metrisi();
stepperY.move(1350);
stepperY.runToPosition();
digitalWrite(enableY,HIGH);
delay(200);
digitalWrite(enableX,LOW);
stepperX.move(-2800);
stepperX.runToPosition();
delay(1000);
metrisi();
digitalWrite(enableX ,HIGH);}
void initi(){
  while (digitalRead(buttonX) == LOW ||
digitalRead(buttonY) == LOW){
if(digitalRead(buttonY) == LOW) {
  digitalWrite(enableY, LOW);
  stepperY.setSpeed(5000);
  stepperY.runSpeed(); }
else{
  digitalWrite(enableY, HIGH);}
if (digitalRead(buttonX) == LOW){
  digitalWrite(enableX, LOW);
  stepperX.setSpeed(-5000);
  stepperX.runSpeed();}
else{
  digitalWrite(enableX, HIGH); }}}
void metrisi(){
  Serial.write('S');
  while(Stop){
    if (Serial.available() > 0) {
      stopByte = Serial.read(); }
    if(stopByte == 'M'){
      delay(2000);
      Stop = false; } }
  Stop =true;}

```

Κώδικας για ρύθμιση παραλληλότητας

```

#include <AccelStepper.h>
AccelStepper stepperX(1, 8, 9);
AccelStepper stepperY(1, 7, 5);
int enableX=2;
int enableY=3;
int buttonY = 12;
int buttonX = 13;

```

```

void setup(){
  stepperX.setMaxSpeed(10000.0);
  stepperX.setAcceleration(5000.0);
  stepperY.setMaxSpeed(10000.0);
  stepperY.setAcceleration(5000.0);
  pinMode(buttonX, INPUT);
  pinMode(buttonY, INPUT);}

```

```

void loop(){
  digitalWrite(enableY,LOW);
  stepperY.move(-8200);
  stepperY.runToPosition();
  digitalWrite(enableY,HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(enableX,LOW);
  stepperX.move(14000);
  stepperX.runToPosition();
  digitalWrite(enableX,HIGH);
  delay(45000);
  digitalWrite(enableY,LOW);
  stepperY.move(-92640);
  stepperY.runToPosition();
  digitalWrite(enableY,HIGH);
  delay(45000);
  digitalWrite(enableY, LOW);
  stepperY.move(30880);
  stepperY.runToPosition();
  digitalWrite(enableY,HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(enableX,LOW);

```

```

  stepperX.move(154400);
  stepperX.runToPosition();
  digitalWrite(enableX,HIGH);
  delay(45000);
  initialize();
  delay(2000);}
void initialize(){
  while (digitalRead(buttonX) == LOW ||
  digitalRead(buttonY) == LOW){
  if (digitalRead(buttonY) == LOW)
  { digitalWrite(enableY,LOW);
  stepperY.setSpeed(5000);
  stepperY.runSpeed();}
  else{
  digitalWrite(enableY,HIGH);}
  if (digitalRead(buttonX) == LOW){
  digitalWrite(enableX,LOW);
  stepperX.setSpeed(-5000);
  stepperX.runSpeed();
  digitalWrite(enableX,HIGH);}
  else{
  }}}

```

B2. Κώδικας γραφικού περιβάλλοντος.

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;
using System.IO;
using System.Threading;
using System.Threading.Tasks;
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;
namespace GUI
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        byte[] laser1 = new byte[4] { 0x2B, 0x2B, 0x2B,
0x0D };
        byte[] laser2 = new byte[4] { 0x49, 0x4C, 0x44,
0x31 };
        byte[] dataoff = new byte[4] { 0x20, 0x76, 0x00,
0x02 };
        byte[] dataon = new byte[4] { 0x20, 0x77, 0x00,
0x02 };
        string indata;
        int arddata;
        int hour, min, sec, ms = 0;
        int i = 0;
        double x;
        bool meas = true;
        object misValue =
System.Reflection.Missing.Value;

        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            getAvailablePorts();
        }
        void getAvailablePorts()
        {
            string[] ports = SerialPort.GetPortNames();
            comboBox1.Items.AddRange(ports);
            comboBox2.Items.AddRange(ports);
        }

        private void openarduino_Click(object sender,
EventArgs e)
        {
            if (comboBox1.Text == "")
            {
                textBox1.AppendText("Please select
arduino Port" + "\t\t\t" + "\n");
            }
            else
            {
                try
                {
                    comboBox1.Text;
                    arduinoPort.PortName =
                    arduinoPort.BaudRate = 9600;
                    arduinoPort.Open();
                    if (arduinoPort.IsOpen)
                    {
                        textBox1.AppendText("arduino
achieve" + "\t\t\t" + "\n");
                    }
                }
                catch (Exception err)
                {
                    MessageBox.Show(err.Message);
                }
                openarduino.Enabled = false;
                closearduino.Enabled = true;
            }
        }

        private void closearduino_Click(object sender,
EventArgs e)
        {
            arduinoPort.Close();
            closearduino.Enabled = false;
            openarduino.Enabled = true;
        }

        private void openlaser_Click(object sender,
EventArgs e)
        {
            if (comboBox2.Text == "")
            {
                textBox1.AppendText("Please select laser
Port" + "\t\t\t" + "\n");
            }
            else
            {
                try
                {
                    laserPort.PortName = comboBox2.Text;
                    laserPort.BaudRate = 115200;
                    laserPort.Parity = Parity.None;
                    laserPort.StopBits = StopBits.One;
                    laserPort.Handshake = Handshake.None;
                    laserPort.Open();
                    if (laserPort.IsOpen)
                    {
                        textBox1.AppendText("laser achieve" +
"\t\t\t" + "\n");
                    }
                }
                catch (Exception err)
                {
                    MessageBox.Show(err.Message);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        openlaser.Enabled = false;
        closelaser.Enabled = true;
        start.Enabled = true;
        initializebutton.Enabled = true;
    }
}

private void closelaser_Click(object sender,
EventArgs e)
{
    laserPort.Close();
    closelaser.Enabled = false;
    openlaser.Enabled = true;
}

private void start_Click(object sender, EventArgs
e)
{
    start.Enabled = false;
    arduinoPort.Write("E");
    timer1.Start();
    textBox1.Text = string.Empty;
    while (meas)
    {
        arduinoPort.Write("M");
        arduinoPort.DataReceived += new
SerialDataReceivedEventHandler(ArduinoDataReceivi
edHandler);
        laserPort.DataReceived += new
SerialDataReceivedEventHandler(DataReceiviedHand
ler);
        arduinoPort.Write("M");
        meas = false;
    }
    meas = true;
}

void ArduinoDataReceiviedHandler(object sender,
SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    SerialPort asp = (SerialPort)sender;
    arddata = asp.ReadChar();
    this.BeginInvoke(new
EventHandler(arduino_event));
}

private void arduino_event(object sender,
EventArgs e)
{
    if (arddata == 83)
    {
        if (laserPort.IsOpen)
        {
            laserPort.Write(laser1, 0, 4);
            laserPort.Write(laser2, 0, 4);
            laserPort.Write(dataon, 0, 4);
        }
    }
}

void DataReceiviedHandler(object sender,
SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    SerialPort sp = (SerialPort)sender;
    indata = sp.ReadExisting();
    this.BeginInvoke(new
EventHandler(display_event));
}

private void display_event(object sender,
EventArgs e)
{
    int value;
    if (int.TryParse(indata, out value))
    {
        if (value < 16367 && value > 1000 )
        {
            i++;
            x = (((value * (1.02 / 16368)) - 0.01) * 10);
            textBox1.AppendText(x+ "\t"+ label1.Text
+"\t"+ i + "\t" + "\n");
            laserPort.Write(laser1, 0, 4);
            laserPort.Write(laser2, 0, 4);
            laserPort.Write(dataoff, 0, 4);
        }
        else if (value > 16367 && value < 16384)
        {
            i++;
            textBox1.AppendText("Error meas" + "\t"
+ label1.Text + "\t" + i + "\t" + "\n");
        }
    }
}

private void stop_Click(object sender, EventArgs
e)
{
    arduinoPort.Write("F");
    laserPort.Write(laser1, 0, 4);
    laserPort.Write(laser2, 0, 4);
    laserPort.Write(dataoff, 0, 4);
    start.Enabled = true;
    timer1.Stop();
}

private void save_Click(object sender, EventArgs
e)
{
    try
    {
        string pathfile =
@"C:\Users\liakos\Desktop\DATA\device_data" +
DateTime.Now.ToString("dd-MM-yyyy hh-mm-ss") +
".txt";
        string[] alllines = textBox1.Text.Split("\n");
        System.IO.File.WriteAllLines(pathfile,
alllines);
    }
}

```

```

        MessageBox.Show("Data has been saved to
" + pathfile, " Save file");
    }
    catch (Exception ex3)
    {
        MessageBox.Show(ex3.Message, "Error");
    }
}

private void timer1_Tick(object sender, EventArgs
e)
{
    label1.Text = hour + ":" + min + ":" +
sec.ToString();
    sec++;
    if (sec > 59)
    {

```

```

        min++;
        sec = 0;
    }
    if (min > 59)
    {
        hour++;
        min = 0;
    }
}

private void initializebutton_Click_1(object
sender, EventArgs e)
{
    arduinoPort.Write("I");
}
}
}

```

Παράρτημα Γ: Εγχειρίδιο Χρήσης Διάταξης

Γ1.Οδηγίες χρήσεως συσκευής.

Ρύθμιση παραλληλότητας επιπέδου αισθητήρα απόστασης και επιπέδου φορέων συμπίεσης.

Η διαδικασία αυτή γίνεται με τη χρήση του κώδικα arduino, που βρίσκεται στο παράρτημα Β1, και του λογισμικού του αισθητήρα απόστασης που παρέχεται από τον κατασκευαστή (οδηγός χρήσης παράρτημα Γ2).

Αρχικά γίνεται ενεργοποίηση του αισθητήρα απόστασης. Αφού τελειώσει ο χρόνος προθέρμανσης του αισθητήρα απόστασης (τουλάχιστον 30 λεπτά) τοποθετούμε τρεις φορείς συμπίεσης στις θέσεις 1,4 και 22 της εικόνας 3.3. Έπειτα, ανοίγουμε το λογισμικό του αισθητήρα απόστασης και πηγαίνουμε στη οθόνη measurement και δίνουμε εντολή στον αισθητήρα να παίρνει μετρήσεις. Φορτώνουμε τον κώδικα arduino(παράρτημα Β) στον μικροεπεξεργαστή και συνδέουμε την τροφοδοσία των κινητήρων. Ο κώδικας αυτός, δίνει εντολή να κινηθούν οι κινητήρες, και κατά συνέπεια και ο αισθητήρας απόστασης, πάνω από τους τρεις φορείς συμπίεσης και να περιμένει εκεί για 45 δευτερόλεπτα. Όσο είναι πάνω από κάθε φορέα συμπίεσης, σημειώνουμε την τιμή που παίρνει ο αισθητήρα απόστασης μέσω του λογισμικού του και ρυθμίζοντας τις τρεις βίδες (οι οποίες είναι πάνω από κάθε έναν από τους τρεις φορείς συμπίεσης) προσπαθούμε να πετύχουμε οι τρεις τιμές να είναι κατά το δυνατόν ίδιες. Αφού περάσει πάνω και από τους τρεις φορείς το σύστημα αρχικοποιείται και ξεκινά την διαδικασία από την αρχή.

Ρύθμιση κινηματικού συνδέσμου Maxwell.

Ο κινηματικός σύνδεσμος Maxwell, εκτός από τη δυνατότητα που δίνει για αποσύνδεση και επανασύνδεση της βάσης έδρασης των δειγμάτων με την υπόλοιπη διάταξη, χρησιμεύει και για την ρύθμιση της διεύθυνσης των αξόνων του συστήματος κίνησης με τους υποθετικούς άξονες της βάσης έδρασης δειγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετούμε φορείς συμπίεσης στις θέσεις 1,8,9,16,17 και 24 της εικόνας 3.3 και με κώδικα arduino (παράρτημα Β) οδηγούμε τον αισθητήρα απόστασης πάνω από το κέντρο του φορέα συμπίεσης της θέσης 1. Ο αισθητήρας απόστασης θα κάνει κίνηση μόνο με τον άξονα x, έτσι εάν δεν χρειάζεται ρύθμιση ο κινηματικός σύνδεσμος θα πρέπει η κουκίδα από την ακτίνα laser του αισθητήρα να περάσει πάνω από το κέντρο κάθε συμπίεστη. Εάν δεν γίνει αυτό γίνεται ρύθμιση των κυλινδρικών εξαρτημάτων από ορείχαλκο με τη χρήση των βιδών νούμερο [3] στην εικόνα 2.25.

Εισαγωγή στον επωαστήρα

Για την εισαγωγή στον επωαστήρα όλης της συσκευής, αρχικά αφαιρούμε τους συνδετήρες καλωδίων από την breadboard ή από την πλάκα pcb. Έπειτα γίνεται ξεβίδωμα του καλωδίου PC1402-3/U από τον αισθητήρα. Τοποθετούμε τη διάταξη μέσα στον επωαστήρα και βγάζουμε τα καλώδια των κινητήρων και των κουμπιών από την οπή πίσω πάνω αριστερά που διαθέτει ο επωαστήρας. Από την ίδια οπή περνάμε από έξω προς τα μέσα και το καλώδιο του αισθητήρα απόστασης. Η στεγάνωση της οπής γίνεται με έναν φελλό που περιέχει 2 οπές για να περνάν τα καλώδια. Έπειτα γίνεται σύνδεση του αισθητήρα με το καλώδιο του και τοποθετούμε τα καλώδια των κινητήρων και των κουμπιών στη σωστή θέση. Πιο συγκεκριμένα για τα καλώδια, τα καλώδια με χρώμα πράσινο και άσπρο των κουμπιών συνδέονται με τις αντίστοιχες αντιστάσεις τους, ενώ αυτά με χρώμα μωβ και μπλέ με τις εισόδους 5V του arduino.

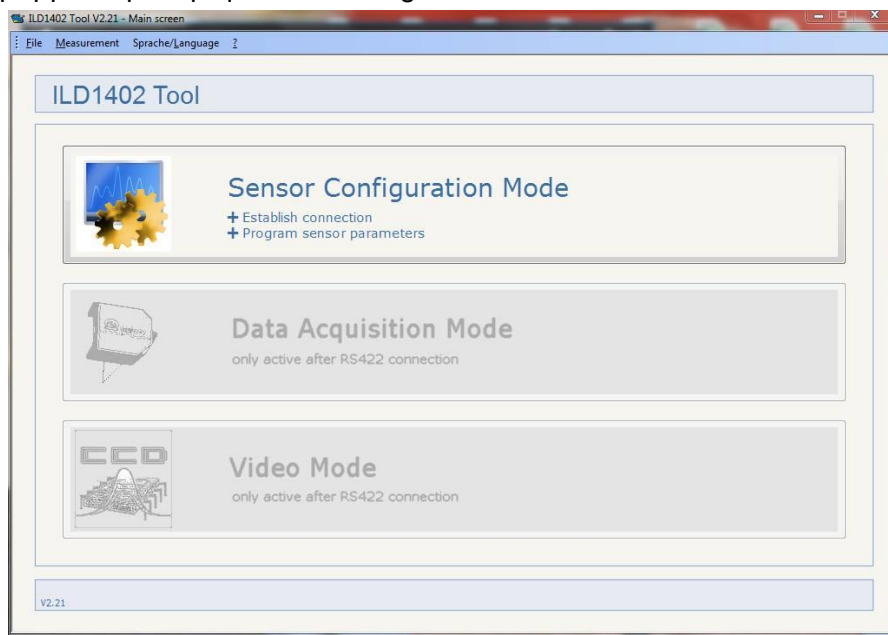
Ευθυγράμμιση αξόνων κινητήρων

Ένα πιθανόν πρόβλημα που μπορεί να εμφανιστεί είναι να χαλάσει η ευθυγράμμιση των αξόνων των κινητήρων. Εάν γίνει αυτό, πρέπει να γίνει χαλάρωση της έδρασης της βίδα οδηγού του εκάστοτε κινητήρα (για τον x άξονα το εξάρτημα της εικόνας 2.20 και για τον άξονα y οι βίδες στις οπές νούμερο [3] της εικόνας 2.21) και διαδοχικές κινήσεις του κινητήρα σε όλο το εύρος του. Όταν ο κινητήρας φτάνει σε κάθε άκρη του εύρους

κίνησης του συσφίγγεται η αντίστοιχη έδραση. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να μπορεί να κινηθεί ο κάθε κινητήρας ομαλά σε όλο το εύρος του.

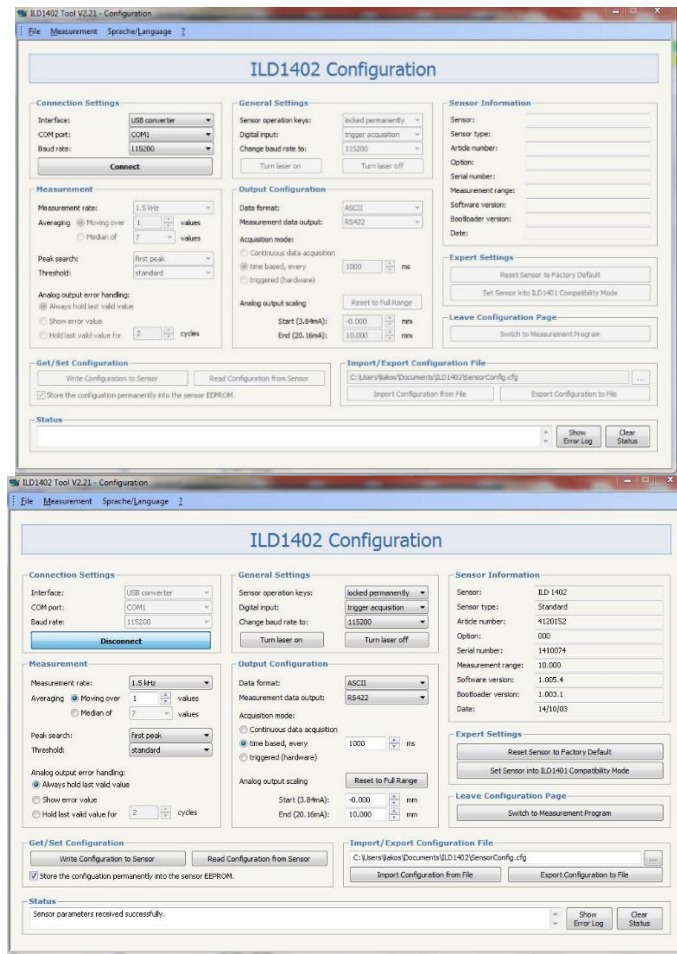
Γ2. Λογισμικό χειρισμού του αισθητήρα.

Στην εικόνα Γ.1 φαίνεται το αρχικό μενού του αισθητήρα. Με το που εκκινήσει το πρόγραμμα, ο αισθητήρας δεν έχει αναγνωρισθεί από τον υπολογιστή. Για να εδραιώσουμε την επικοινωνία επιλέγουμε τη μόνη δυνατή επιλογή που μας επιτρέπει το πρόγραμμα, δηλαδή τη sensor configuration mode.



Εικόνα Γ.1 : αρχικό μενού ILD1402 tool

Στη συνέχεια εμφανίζεται η σελίδα της εικόνας Γ.2 . στο πάνω αριστερά μέρος βλέπουμε τρεις επιλογές με τις οποίες καθορίζουμε κάποιες παραμέτρους της σύνδεσης, όπως τη θύρα επικοινωνίας και το Baud Rate. Πατώντας την επιλογή Connect το πρόγραμμα προσπαθεί να αναγνωρίσει τον αισθητήρα και να εδραιώσει την επικοινωνία μεταξύ τους. Μόλις αυτό επιτευχθεί ενεργοποιούνται και οι υπόλοιπες επιλογές της σελίδας αυτής (εικόνα Γ.2 κάτω), οι οποίες είναι χωρισμένες σε εννιά διαφορετικά πεδία επιλογών.



Εικόνα Γ.2: Πάνω: πριν το connect Κάτω: μετά το connect

1. Measurement

Στο πεδίο αυτό μπορεί να επιλεγεί ο επιθυμητός ρυθμός με τον οποίο ο αισθητήρας θα λαμβάνει τιμές (measurement rate) και το εάν θα διατηρεί τη μέση τιμή αυτών των τιμών ή τον διάμεσο αυτών. Επίσης, μπορεί να οριστεί ο τρόπος που ο αισθητήρας θα αναγνωρίζει αντανakλάσεις από επιφάνειες που καθρεφτίζουν (peak search) και να τεθεί υψηλότερο ή χαμηλότερο όριο για τον χαρακτηρισμό των σημάτων ως έγκυρων προ αποφυγή θορύβων. Τέλος, μπορεί να οριστεί πως θα χειρίζεται το πρόγραμμα τα σήματα σφάλματος (analog error output handling).

2. Get/set configuration

Με τις επιλογές αυτού του πεδίου μπορούν να σταλούν και να ληφθούν οι ρυθμίσεις του αισθητήρα. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης των ρυθμίσεων που έχουν καθοριστεί από το χρήστη αλλιώς στην επόμενη ενεργοποίηση του αισθητήρα οι ρυθμίσεις θα έχουν ξαναγίνει οι εργοστασιακές (store the configuration permanently).

3. Status

Στο πεδίο αυτό εμφανίζονται μηνύματα για την κατάσταση του αισθητήρα και για τα σφάλματά του.

4. General settings

Σε αυτό το πεδίο μπορεί να γίνει η επιλογή για την κατάσταση ενεργοποίησης του πλήκτρου λειτουργίας select που έχει ο αισθητήρας (sensor operation key). Επίσης, δίνει τη δυνατότητα επιλογής να τεθεί η είσοδος του αισθητήρα ως trigger ή ως teach. Με τη λειτουργία trigger ο αισθητήρας πραγματοποιεί μετρήσεις ανάλογα με το σήμα εισόδου που έχει τη μορφή παλμού, ενώ με τη λειτουργία teach μπορεί να τεθεί μικρότερο εύρος μέτρησης για βελτίωση της ανάλυσης. Τέλος, μπορεί να τεθεί νέο Baud Rate στην επικοινωνία και να ανοίξουμε ή να κλείσουμε τον αισθητήρα.

5. Output configuration

Εδώ ρυθμίζονται οι παράμετροι της εξόδου. Αρχικά μπορεί να γίνει επιλογή της δομής των δεδομένων μεταξύ BIN και ASCII και το αν η έξοδος θα είναι αναλογική ή ψηφιακή. Επίσης, δίνεται η επιλογή ρύθμισης του τρόπου ανάκτησης των δεδομένων ως συνεχούς, διακοπτόμενο (π.χ. κάθε 10 sec.) και βάσει της λειτουργίας trigger. Τέλος μπορεί να ρυθμιστεί το εύρος μέτρησης για την αναλογική έξοδο.

6. Import/export configuration file

Εδώ δίνεται η επιλογή να αποθηκευτούν οι ρυθμίσεις σε ένα ξεχωριστό αρχείο ή να διαβαστούν ρυθμίσεις που υπάρχουν σε κάποιο αρχείο.

7. Sensor information

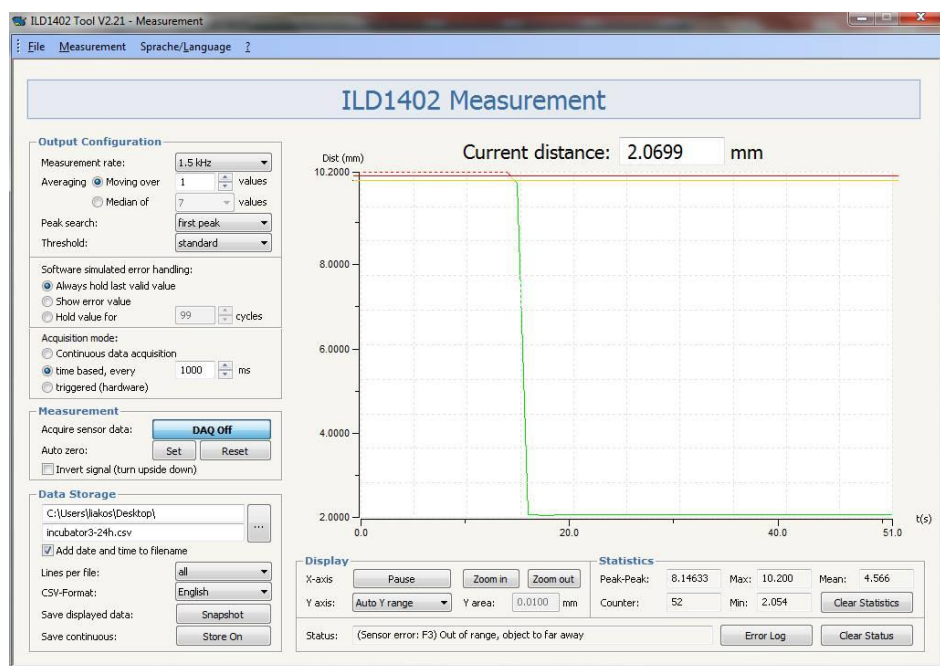
Στο πεδίο αυτό αναγράφονται πληροφορίες σχετικά με τον αισθητήρα που είναι συνδεδεμένος με το πρόγραμμα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο ειδικά όταν χρησιμοποιούνται περισσότεροι αισθητήρες.

8. Expert settings

Δυο επιλογές δίνονται σε αυτό το πεδίο. Η πρώτη είναι η επαναφορά των ρυθμίσεων του αισθητήρα στις εργοστασιακές του και η δεύτερη κάνει συμβατό τον αισθητήρα με προηγούμενη έκδοση του προγράμματος ILD1401.

9. Leave configuration page

Μέσω αυτού του πεδίου μπορεί να γίνει η μεταπήδηση στη σελίδα μέτρησης (measurement program) που είναι και η δεύτερη επιλογή του αρχικού μενού (εικόνα Γ.3).



Εικόνα Γ.3 Σελίδα μέτρησης του ILD102 tool.

Με το που εμφανιστεί αυτή η σελίδα ο αισθητήρας αρχίζει τη μέτρηση σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που επεξηγήθηκαν προηγουμένως. Σε αυτή τη σελίδα δίνεται η δυνατότητα μετατροπής κάποιων από των ρυθμίσεων που περιγράφηκαν προηγουμένως, κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Επιπλέον το πρόγραμμα δίνει και κάποιες νέες δυνατότητες:

A. Measurement

Στο πεδίο αυτό μπορεί να γίνει η εκκίνηση και η παύση της ανάκτησης των δεδομένων (DAQ off/on), ενώ μπορεί να τεθεί ως μηδενική τιμή η τρέχουσα.

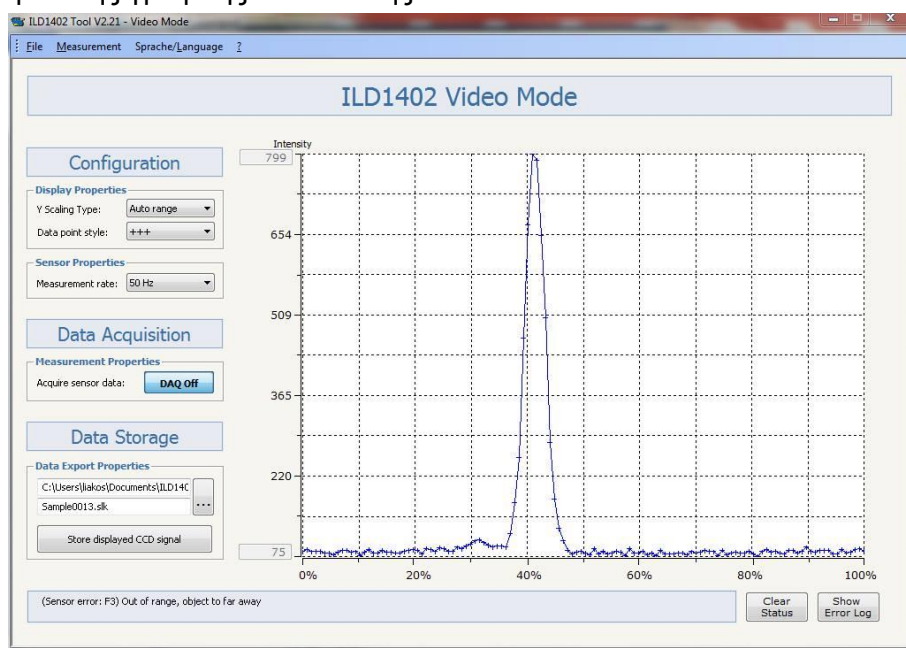
B. Data storage

Εδώ επιλέγονται οι παράμετροι αποθήκευσης των δεδομένων όπως το είδος, το όνομα του αρχείου κ.λπ.

C. Display-statistics

Στο πεδίο αυτό γίνεται η διαχείριση της γραφικής αναπαράστασης των δεδομένων, η οποία βρίσκεται ακριβώς πάνω από αυτό το πεδίο. Επίσης, εμφανίζονται κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά αυτής, το μέγιστο-ελάχιστο, το εύρος, η μέση τιμή των τιμών και το πόσες μετρήσεις έχει πάρει ο αισθητήρας.

Τέλος το πρόγραμμα διαθέτει, στο αρχικό μενού του, και μια τρίτη επιλογή, τη video mode. Η μετάβαση σε αυτή τη σελίδα γίνεται από τη γραμμή εργασιών του παραθύρου Measurement > Video Mode. Τότε εμφανίζεται η σελίδα της εικόνας Γ.4 με τις αντίστοιχες επιλογές της. Στη σελίδα αυτή υπάρχει μια γραφική παράσταση της έντασης του φωτός που συλλέγει ο αισθητήρας. Δίνονται οι επιλογές αποθήκευσης των δεδομένων, προσδιορισμού του ρυθμού μέτρησης του αισθητήρα και ρύθμισης των παραμέτρων της γραφικής απεικόνισης.



Εικόνα Γ.4 : Σελίδα Video-Mode του LD1402 tool.

