

Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ  
ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή**

**Καλλιόπη Δ. Βουδούρη**

**Εισηγητές: Χρήστος Καμπούρης**

**Ιωάννης Βογιατζής**

**ΑΘΗΝΑ**

**11 ΜΑΡΤΙΟΥ 2022**



## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

**Καλλιόπη Δ. Βουδούρη**

**A.M. 73146577**

**Εισηγητής διπλωματικής εργασίας: Χρήστος Καμπούρης**

**Ιωάννης Βογιατζής**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/a</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	Ιωάννης Βογιατζής	Καθηγητής	
2	Σπυρίδων Ματιάτος	Λέκτορας Εφαρμογών	
3	Χρήστος Καμπούρης	Ακαδημαϊκός Υπότροφος	

**Ημερομηνία εξέτασης: 11/03/2022**



## **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Καλλιόπη Βουδούρη του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 73146577 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα  
Καλλιόπη Βουδούρη





Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ τον εισηγητή της διπλωματικής εργασίας κύριο Χρήστο Καμπούρη που με την πολύτιμη καθοδήγηση του κατάφερα να ολοκληρώσω την διπλωματική μου εργασία.

Ευχαριστώ την μητέρα μου, τον πατέρα μου και τους φίλους μου για τη βοήθεια και την υποστήριξη τους.





## **Τίτλος**

Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η πλήρης ανάπτυξη όλων των βασικών κατασκευαστικών σταδίων που είναι απαραίτητα για την εισαγωγή στην αγορά ενός νέου μηχανήματος. Τα στάδια ανάπτυξής του χωρίζονται:

- α. Στο σχεδιασμό του μηχανολογικού μέρους με τη χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD, ήτοι στην επιμέρους δισδιάστατη απεικόνιση των εξαρτημάτων του και την τρισδιάστατη σύνθεση όλου του συναρμολογήματος.
- β. Στη κατασκευή, που θα είναι βασισμένη για την κίνησή της σε βηματικούς κινητήρες, ελεγχόμενους από το κατάλληλο μικροϋπολογιστικό σύστημα.
- γ. Στη δυναμική ανάλυση τάσεων και δυνάμεων σε κατάλληλο πρόγραμμα προσομοίωσης και τέλος,
- δ. στην επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του συστήματος μέσω της παραγωγής ενός νέου εξαρτήματος.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Σύστημα Κατεργασίας, AutoCAD, ηλεκτρονική σχεδίαση, ανάλυση ορμής, CNC Router, UGS, GRBL, Arduino, Estlcam, Fusion360, 2D & 3D αναπαράσταση αντικειμένων.

## **Title**

Design and construction of a computer numeric controlled router unit.

## **ABSTRACT**

The purpose of the dissertation is the complete development of all the basic construction stages that are necessary for the introduction of a new machine on the market. The stages of its development are divided:

- a. In the design of the mechanical part using the design program AutoCAD, which is in the individual two-dimensional display of its components and the three-dimensional composition of the entire assembly.
- b. In the construction, which its movement will be based on stepper motors, controlled by the appropriate microcomputer.
- c. In the dynamic analysis of stresses and forces in a suitable simulation program and finally,
- d. to confirm the proper operation of the system through the production of a new component.

## **KEYWORDS**

Machining System, AutoCAD, electronic design, momentum analysis, CNC Router, UGS, GRBL, Arduino, Estlcam, Fusion360, 2D & 3D object representation.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....	iii
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	v
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	vii
Τίτλος .....	ix
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	ix
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	ix
Title .....	ix
ABSTRACT .....	ix
KEYWORDS .....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xvi
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	xvii
Κεφάλαιο 1 – Είδη και σχεδιασμός συστημάτων κατεργασίας .....	18
1.1 Εισαγωγή.....	18
1.2 CNC, εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση .....	18
1.3 Σχεδιαστικές κατηγορίες συστημάτων κατεργασίας CNC.....	20
1.4 Σχεδίαση μελέτη και παραγωγή με τη βοήθεια του υπολογιστή.....	21
1.5 Η σχεδίαση του συστήματος κατεργασίας - προδιαγραφές .....	22
1.5.1 Περιγραφή του σχεδιαστικού λογισμικού AutoCAD.....	22
1.5.2 Η τρισδιάστατη (3D) σχεδίαση του συστήματος κατεργασίας με το AutoCAD....	23
1.5.3 Η δισδιάστατη (2D) προσέγγιση του συστήματος κατεργασίας .....	29
1.5.4 Σχεδίαση του συστήματος κατεργασίας με το λογισμικό SOLIDWORKS .....	34
Κεφάλαιο 2 – Ανάλυση του συστήματος κατεργασίας με το SOLIDWORKS .....	43
2.1 Εισαγωγή.....	43
2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων και SOLIDWORKS.....	43
2.3 Η πρώτη στατική ανάλυση για το σύστημα κατεργασίας .....	44
2.3.1 Επεξήγηση των αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης του SOLIDWORKS.....	52
Κεφάλαιο 3 - Ξεκινώντας τη κατασκευή του συστήματος κατεργασίας .....	60
3.1 Εισαγωγή.....	60
3.2 Το Arduino ως κομμάτι του συστήματος κατεργασίας .....	60
3.3 Το λογισμικό GRBL σε συνδυασμό με το UGS .....	61
3.4 Λίγα λόγια για τους βηματικούς κινητήρες.....	69
3.5 Η κατασκευή του σκελετού του συστήματος κατεργασίας.....	74
3.6 Η σύνδεση των ηλεκτρονικών τμημάτων του συστήματος κατεργασίας.....	83
3.7 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή γεωμετρικού κώδικα.....	87

Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

Παραρτήματα .....	93
Παράρτημα 1 .....	93
Παράρτημα 2 .....	94
Παράρτημα 3 .....	96
Βιβλιογραφία.....	104
Τεχνικά εγχειρίδια που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία.....	106

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1 Παράδειγμα εργαλειομηχανής οριζόντιας κατεργασίας με ψηφιακή καθοδήγηση (Hass BT-40) .....	18
Εικόνα 1-2 Παράδειγμα φρέζας με ψηφιακή καθοδήγηση (Hass CM-1) .....	18
Εικόνα 1-3 Παράδειγμα CNC σκελετού με κινούμενο κρεβάτι (εικόνα από cnczone) .....	20
Εικόνα 1-4 Παράδειγμα CNC σκελετού με σταθερό κρεβάτι (εικόνα από cnczone) .....	21
Εικόνα 1-5 Πάτωμα βάσης.....	23
Εικόνα 1-6 Πάτωμα και ενδιάμεσα στηρίγματα.....	23
Εικόνα 1-7 Πάτωμα και πλαϊνά στηρίγματα (δύο τελάρα) .....	23
Εικόνα 1-8 Ολοκληρωμένη βάση και κρεβάτι με καπάκι .....	23
Εικόνα 1-9 Μπούσουλας (εικόνα από sinter.gr) .....	24
Εικόνα 1-10 T-track & T-slot (εικόνα από Joom).....	24
Εικόνα 1-11 Μέγγενη (εικόνα από cnc plus) .....	25
Εικόνα 1-12 Γραμμικός άξονας και φορεία .....	26
Εικόνα 1-13 Μπροστινή όψη γραμμικού άξονα και φορείων.....	26
Εικόνα 1-14 Πίσω όψη γραμμικού άξονα και φορείων .....	26
Εικόνα 1-15 BK12 Στήριγμα.....	26
Εικόνα 1-16 BF12 Στήριγμα .....	26
Εικόνα 1-17 SFU1605 Περικόχλιο.....	26
Εικόνα 1-18 HD16 Φορείο ή Φωλιά Περικοχλίου.....	26
Εικόνα 1-19 RM1605 Coupler & Παξιμάδι .....	26
Εικόνα 1-20 Κοχλίας-ατέρμονας τύπου Ball Screw .....	26
Εικόνα 1-21 Συναρμολόγηση Ball Screw 1 .....	27
Εικόνα 1-22 Συναρμολόγηση Ball Screw 2 .....	27
Εικόνα 1-23 Συναρμολόγηση Ball Screw 3 .....	27
Εικόνα 1-24 Τοποθέτηση Ball Screw και γραμμικών αξόνων στη βάση του CNC.....	27
Εικόνα 1-25 Βηματικός κινητήρας Nema 23 .....	27
Εικόνα 1-26 Limit switch.....	27
Εικόνα 1-27 Τοποθέτηση κινητήρων και limit switches.....	27
Εικόνα 1-28 Τοποθέτηση στηριγμάτων ένωσης xy αξόνων .....	28
Εικόνα 1-29 Τοποθέτηση της βάσης του x άξονα.....	28
Εικόνα 1-30 Τοποθέτηση γραμμικών αξόνων x.....	28
Εικόνα 1-31 Τοποθέτηση Ball Screw και κινητήρα στον x άξονα.....	28
Εικόνα 1-32 Z άξονας και τοποθέτηση γραμμικών αξόνων.....	29
Εικόνα 1-33 Τοποθέτηση Ball Screw στον z άξονα.....	29
Εικόνα 1-34 Τοποθέτηση βηματικού κινητήρα και limit switches στον z άξονα .....	29
Εικόνα 1-35 Τοποθέτηση της βάσης για το Router στον z άξονα.....	29
Εικόνα 1-36 Τοποθέτηση μάνδαλου στήριξης του Router στον z άξονα.....	29
Εικόνα 1-37 Τοποθέτηση Router στο z άξονα .....	29
Εικόνα 1-38 Δισδιάστατο σχέδιο της βάσεις του συστήματος κατεργασίας.....	31
Εικόνα 1-39 Δισδιάστατο σχέδιο από τμήμα υποστήριξης του κοχλία.....	31
Εικόνα 1-40 Δισδιάστατο σχέδιο τμήματος υποστήριξης του κοχλία .....	32
Εικόνα 1-41 Δισδιάστατο σχέδιο ενός φορέα .....	32
Εικόνα 1-42 Δισδιάστατο σχέδιο της φωλιάς του κοχλία .....	33
Εικόνα 1-43 Δισδιάστατο σχέδιο ενός γραμμικού άξονα .....	33
Εικόνα 1-44 Συναρμολογημένη άποψη του συστήματος κατεργασίας στο SOLIDWORKS. 34	

Εικόνα 1-45 Βάση και κρεβάτι συστήματος κατεργασίας .....	35
Εικόνα 1-46 Χ άξονας και πλάγιες πλευρές σύνδεσης με τη βάση .....	36
Εικόνα 1-47 Ζ άξονας .....	37
Εικόνα 1-48 Η βάση του συστήματος, α.κ 1 .....	38
Εικόνα 1-49 Το κρεβάτι του συστήματος (working bed), α.κ 2.....	38
Εικόνα 1-50 Αριστερό κομμάτι της γέφυρας, α.κ 4 .....	39
Εικόνα 1-51 Δεξί κομμάτι της γέφυρας, α.κ 5 .....	39
Εικόνα 1-52 Βασικό τμήμα της γέφυρας – τραβέρσα x άξονα, α.κ 6 .....	39
Εικόνα 1-53 Τραβέρσα z άξονα, α.κ 9 .....	40
Εικόνα 1-54 Βάση στήριξης του Router στον z άξονα, α.κ 11 .....	40
Εικόνα 1-55 Κομμάτι στήριξης κινητήρα (για τη βάση), α.κ 12.....	40
Εικόνα 1-56 Βηματικός κινητήρας Nema 23, α.κ 13 .....	40
Εικόνα 1-57 Ρουλεμάν, α.κ 17 .....	41
Εικόνα 1-58 Βίδα άλεν στρογγυλοκέφαλη, α.κ 25.....	41
Εικόνα 1-59 Coupler RM1605, α.κ 14 .....	41
Εικόνα 1-60 Γραμμικός κοχλίας-ατέρμονας, α.κ 23 .....	41
Εικόνα 1-61 Περικόχλιο, α.κ 21 .....	41
Εικόνα 1-62 Φωλιά περικοχλίου HD16, α.κ 22 .....	41
Εικόνα 1-63 BK12, α.κ 18.....	42
Εικόνα 1-64 Στήριγμα BF12, α.κ 16 .....	42
Εικόνα 1-65 Παξιμάδι, α.κ 15 .....	42
Εικόνα 1-66 Ροδέλα, α.κ 24 .....	42
Εικόνα 1-67 Ασφάλεια, α.κ 19.....	42
Εικόνα 1-68 Γραμμικός άξονας, α.κ 10.....	42
Εικόνα 1-69 Φορείο, α.κ 3.....	42
Εικόνα 1-70 Τερματικός διακόπτης (Limit Switch), α.κ 30.....	42
Εικόνα 2-1 Μπροστινή άποψη της γέφυρας πριν την ανάλυση .....	45
Εικόνα 2-2 Ισομετρική άποψη της γέφυρας πριν την ανάλυση .....	46
Εικόνα 2-3 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 1 .....	46
Εικόνα 2-4 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 2 .....	47
Εικόνα 2-5 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 3 .....	47
Εικόνα 2-6 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 4 .....	48
Εικόνα 2-7 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 5 .....	48
Εικόνα 2-8 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 6 .....	49
Εικόνα 2-9 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 7 .....	49
Εικόνα 2-10 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 8 .....	50
Εικόνα 2-11 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 9 .....	50
Εικόνα 2-12 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 10 .....	51
Εικόνα 2-13 Διαδικασία ανάλυσης, τελικό στάδιο .....	51
Εικόνα 2-14 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	52
Εικόνα 2-15 Αποτελέσματα von Mises Stress με φορτίο 100N (10kg) για τη γέφυρα.....	55
Εικόνα 2-16 Αποτελέσματα von Mises Stress με φορτίο 1000N (101kg) για τη γέφυρα.....	55
Εικόνα 2-17 Αποτελέσματα von Mises Stress με φορτίο 5000N (509kg) για τη γέφυρα.....	55
Εικόνα 2-18 Αποτελέσματα Equivalent Strain με φορτίο 100N (10kg) για τη γέφυρα .....	56
Εικόνα 2-19 Αποτελέσματα Equivalent Strain με φορτίο 1000N (101kg) για τη γέφυρα .....	56
Εικόνα 2-20 Αποτελέσματα Equivalent Strain με φορτίο 5000N (509kg) για τη γέφυρα .....	56

Εικόνα 2-21 Αποτελέσματα URES με φορτίο 100N (10kg) για τη γέφυρα.....	57
Εικόνα 2-22 Αποτελέσματα URES με φορτίο 1000N (101kg) για τη γέφυρα.....	57
Εικόνα 2-23 Αποτελέσματα URES με φορτίο 5000N (509kg) για τη γέφυρα.....	57
Εικόνα 2-24 Αποτελέσματα FOS για φορτίο 100N (10kg) για τη γέφυρα .....	58
Εικόνα 2-25 Αποτελέσματα FOS για φορτίο 1000N (101kg) για τη γέφυρα .....	58
Εικόνα 2-26 Αποτελέσματα FOS για φορτίο 5000N (509kg) για τη γέφυρα .....	58
Εικόνα 2-27 Ανάλυση ροπής, von Mises Stress για δύναμη 100N.....	59
Εικόνα 2-28 Ανάλυση ροπής, Equivalent Strain για δύναμη 100N.....	59
Εικόνα 2-29 Ανάλυση ροπής, URES για δύναμη 100N.....	59
Εικόνα 3-1 Arduino PIN Out διάγραμμα .....	60
Εικόνα 3-2 UGS περιβάλλον.....	62
Εικόνα 3-3 Εκτέλεση του setup wizard στο UGS .....	63
Εικόνα 3-4 UGS setup wizard, πρώτο βήμα .....	63
Εικόνα 3-5 UGS setup wizard, επιτυχής σύνδεση της GRBL με το UGS .....	64
Εικόνα 3-6 UGS setup wizard, βήμα δεύτερο.....	64
Εικόνα 3-7 UGS setup wizard, έλεγχος καλωδίωσης κινητήρων.....	65
Εικόνα 3-8 UGS setup wizard, καλιμπράρισμα των βηματικών κινητήρων.....	66
Εικόνα 3-9 UGS setup wizard, έλεγχος limit switches .....	67
Εικόνα 3-10 Συνδεσμολογία Normal Closed για τους τερματικούς διακόπτες (εικόνα από github.com).....	68
Εικόνα 3-11 Συνδεσμολογία Normal Closed για τους τερματικούς διακόπτες με φιλτράρισμα σημάτων (εικόνα από github.com).....	68
Εικόνα 3-12 UGS setup wizard, επιλογή σημείου Home.....	69
Εικόνα 3-13 Αρχική θέση του ρότορα του βηματικού κινητήρα (εικόνα realpars) .....	71
Εικόνα 3-14 Δεύτερη θέση του ρότορα του βηματικού κινητήρα (εικόνα realpars) .....	71
Εικόνα 3-15 Τρίτη θέση του ρότορα του βηματικού κινητήρα (εικόνα realpars).....	71
Εικόνα 3-16 Τέταρτη θέση του ρότορα του βηματικού κινητήρα (εικόνα realpars).....	71
Εικόνα 3-17 Εσωτερική μορφή ενός βηματικού κινητήρα (εικόνα από okeanis).....	71
Εικόνα 3-18 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (εικόνα από robotiki_G) .....	71
Εικόνα 3-19 Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης (εικόνα από robotiki_G).....	72
Εικόνα 3-20 Υβριδικός βηματικός κινητήρας (εικόνα από robotiki_G).....	72
Εικόνα 3-21 Βοηθητική διάταξη για την κοπή των ξύλινων κομματιών της κατασκευής (σχέδιο της γραφούσης).....	75
Εικόνα 3-22 Στιγμιότυπο από τη κατασκευή της βάσης του συστήματος (εικόνα της γραφούσης).....	77
Εικόνα 3-23 Στιγμιότυπο από τη κατασκευή της βάσης του συστήματος κατεργασίας (εικόνα της γραφούσης) .....	77
Εικόνα 3-24 Στιγμιότυπο από την ένωση των στηριγμάτων των γραμμικών αξόνων του Z άξονα (εικόνα της γραφούσης).....	77
Εικόνα 3-25 Στιγμιότυπο από την ένωση των στηριγμάτων των γραμμικών αξόνων του X και του Y άξονα (εικόνα της γραφούσης) .....	77
Εικόνα 3-26 Στιγμιότυπο από το τρύπημα των στηριγμάτων των βηματικών κινητήρων (εικόνα της γραφούσης) .....	78
Εικόνα 3-27 Στιγμιότυπο από τη συναρμογή της βάσης (εικόνα της γραφούσης) .....	78

Εικόνα 3- 28 Βοηθητικό σημάδεμα για την κοπή των στηριγμάτων της γέφυρας (εικόνα της γραφούσης).....	78
Εικόνα 3-29 Κοπή των στηριγμάτων της γέφυρας με τη χρήση ρούτερ (εικόνα της γραφούσης).....	78
Εικόνα 3-30 Τρύπημα του αριστερού στηρίγματος της γέφυρας (εικόνα της γραφούσης) ....	78
Εικόνα 3- 31 Τρίψιμο ακμών με γυαλόχαρτο μετά την κοπή με το ρούτερ (εικόνα της γραφούσης).....	78
Εικόνα 3-32 Συναρμογή της γέφυρας του συστήματος κατεργασίας (εικόνα της γραφούσης) .....	79
Εικόνα 3-33 Συναρμογή Z τραβέρσας με γραμμικούς άξονες και φορεία (εικόνα της γραφούσης).....	79
Εικόνα 3-34 Στιγμιότυπο από τη σύνδεση του τμήματος της γέφυρας με το τμήμα του Z άξονα (εικόνα της γραφούσης).....	80
Εικόνα 3-35 Μπροστινή άποψη του συστήματος κατεργασίας (εικόνα της γραφούσης).....	80
Εικόνα 3-36 Πλάγια άποψη του συστήματος κατεργασίας (εικόνα της γραφούσης) .....	80
Εικόνα 3-37 Τρύπημα των στηριγμάτων του ρούτερ (εικόνα της γραφούσης) .....	81
Εικόνα 3-38 Λείανση των στηριγμάτων του ρούτερ με γυαλόχαρτο (εικόνα της γραφούσης) .....	81
Εικόνα 3-39 Επιβεβαίωση ότι το ρούτερ ταιριάζει με τα στηρίγματα που του κάναμε (εικόνα της γραφούσης) .....	81
Εικόνα 3-40 Τοποθέτηση των στηριγμάτων για τη συγκράτηση του ρούτερ στη κατασκευή (εικόνα της γραφούσης) .....	81
Εικόνα 3-41 Κατασκευαστικό σκαρίφημα βοηθητικής λάμας (σχέδιο της γραφούσης) .....	82
Εικόνα 3-42 Παράδειγμα προσαρμογής της λάμας (φωτογραφία της γραφούσης) .....	82
Εικόνα 3-43 Διάταξη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (φωτογραφία της γραφούσης) .....	83
Εικόνα 3- 44 USB Panel Mount B – Αρσενικό σε B θηλυκό (εικόνα από skroutz.gr .....	84
Εικόνα 3-45 Ζεύγη τυλιγμάτων κινητήρα (εικόνα της γραφούσης).....	84
Εικόνα 3-46 Pin out του Arduino σύμφωνα με το GRBL (εικόνα από github.com) .....	85
Εικόνα 3- 47 Συνδεσμολογία οδήγησης X άξονα CNC (εικόνα της γραφούσης).....	85
Εικόνα 3- 48 Συνδεσμολογία οδήγησης Y άξονα CNC (εικόνα της γραφούσης).....	86
Εικόνα 3- 49 Συνδεσμολογία οδήγησης Y άξονα CNC (εικόνα της γραφούσης).....	86
Εικόνα 3-50 Συνδεσμολογία Normal Closed Loop τερματικών διακοπών (εικόνα της γραφούσης).....	87
Εικόνα 3-51 Το πρώτο κατεργασμένο κομμάτι από το σύστημα κατεργασίας.....	89
Εικόνα 3-52 Παράδειγμα τεμαχίου μετά από κατεργασία .....	89
Εικόνα 3-53 Παράδειγμα τεμαχίου μετά από κατεργασία .....	89
Εικόνα 3-54 Παράδειγμα τεμαχίου μετά από κατεργασία .....	89
Εικόνα 3-55 Επιφάνεια εργασίας Easel (εικόνα της γραφούσης) .....	90
Εικόνα 3-56 Επιφάνεια εργασίας EstlCAM (εικόνα της γραφούσης).....	91
Εικόνα 3-57 Επιφάνεια εργασίας Carbide Creator (εικόνα της γραφούσης) .....	92
Εικόνα Π- 1 Το αγορασμένο επιτραπέζιο παιχνίδι SOLO κλειστό.....	96
Εικόνα Π- 2 Το αγορασμένο επιτραπέζιο παιχνίδι SOLO ανοιχτό.....	96
Εικόνα Π- 3 Το αγορασμένο επιτραπέζιο παιχνίδι SOLO έτοιμο για παιχνίδι.....	96
Εικόνα Π- 4 Σχέδιο του δικού μας SOLO στο AutoCAD.....	97
Εικόνα Π- 5 Ρύθμιση τραπέζιου κοπής.....	98
Εικόνα Π- 6 Ξεκινώντας την κοπή του ξύλου.....	98

Εικόνα Π- 7 Μετά την κοπή του ξύλου.....	98
Εικόνα Π- 8 Καμαρώνοντας τα αποτελέσματα.....	98
Εικόνα Π- 9 Στερέωση του τεμαχίου προς κατεργασία στο κρεβάτι του συστήματος .....	99
Εικόνα Π- 10 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας .....	99
Εικόνα Π- 11 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας .....	99
Εικόνα Π- 12 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας .....	99
Εικόνα Π- 13 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας .....	99
Εικόνα Π- 14 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας .....	99
Εικόνα Π- 15 Στιγμιότυπο από τη δεύτερη φάση κατεργασίας .....	100
Εικόνα Π- 16 Στιγμιότυπο από τη δεύτερη φάση κατεργασίας .....	100
Εικόνα Π- 17 Στιγμιότυπο από τη δεύτερη φάση κατεργασίας .....	100
Εικόνα Π- 18 Στιγμιότυπο από την δοκιμή που κάναμε στο πάνω μέρος του ταμπλό .....	100
Εικόνα Π- 19 Το ταμπλό του επιτραπέζιου έτοιμο για παιχνίδι.....	101

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1- 1 Τρόποι συγκράτησης τεμαχίων, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	25
Πίνακας 1- 2 Κατάλογος κομματιών της βάσης του συστήματος κατεργασίας (BOM).....	35
Πίνακας 1- 3 Κατάλογος κομματιών του x άξονα του συστήματος κατεργασίας .....	36
Πίνακας 1- 4 Κατάλογος εξαρτημάτων του z άξονα του συστήματος κατεργασίας.....	37
Πίνακας 2- 1 Factor Of Safety σε σχέση με τον εξοπλισμό .....	54
Πίνακας 2- 2 Factor Of Safety σε σχέση με το είδος της εφαρμογής .....	54
Πίνακας 3- 1 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του συστήματος κατεργασίας	76
Πίνακας 3- 2 Συνδεσμολογίες κινητήρων, drivers και Arduino.....	86
Πίνακας 3- 3 Οι βασικές εντολές G-code.....	88
Πίνακας Π- 1 Συγκεντρωτικός πίνακας λογισμικών.....	93
Πίνακας Π- 2 SWOT Ανάλυση για το σύστημα κατεργασίας.....	94



### ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
UGS	Universal G-Code Sender
2D	Δισδιάστατη απεικόνιση
3D	Τρισδιάστατη απεικόνιση
GRBL	Garble
G-Code	Geometric Code
M-Code	Machine Code
CNC	Computer Numerical Control
ISO	International Organization for Standardization
DIN	Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization)
PCB	Printed Circuit Board
FEA	Finite Element Analysis
BOM	Bill Of Materials

## Κεφάλαιο 1 – Είδη και σχεδιασμός συστημάτων κατεργασίας

### 1.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια μικρή αναφορά στις εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση σε γενικό πλαίσιο. Έπειτα θα γίνει σύγκριση των δύο πιο συνηθισμένων κατηγοριών συστημάτων κατεργασίας CNC. Στη συνέχεια θα τεθούν οι ορισμοί για το τι είναι το CAD/CAM και θα γίνει παρουσίαση δύο προγραμμάτων σχεδίασης. Τέλος θα γίνει η ξενάγηση των σταδίων σχεδίασης του δικού μας συστήματος κατεργασίας ξύλου μέσω των λογισμικών AutoCAD και SOLIDWORKS.

### 1.2 CNC, εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση

Τα CNC μηχανήματα [1],[2] χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις σύγχρονες διαδικασίες κατασκευής. Είναι γνωστά ήδη από τη δεκαετία του 1940 όπου οι μηχανικοί της εποχής, χρησιμοποιούσαν διάτρητες ταινίες για να οδηγήσουν τα εργαλεία κοπής και τους κινητήρες τους. Η εισαγωγή αυτής της νέας τεχνολογίας στον κατασκευαστικό κλάδο επέτρεψε την δημιουργία πιο περίπλοκων σχημάτων. Η μεγάλη πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών οδήγησε στη δημιουργία και συστηματική χρήση των εργαλειομηχανών που καθοδηγούνται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Οι μηχανές αυτές στις μέρες μας έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με το χειριστή τους μέσω μονάδας καθοδήγησης η οποία μπορεί να δέχεται εντολές και πληροφορίες, να επεξεργάζεται δεδομένα, να αποθηκεύει πληροφορίες και να παρουσιάζει αποτελέσματα. Ακολουθούν δυο ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων μηχανών.



**Εικόνα 1-1** Παράδειγμα εργαλειομηχανής οριζόντιας κατεργασίας με ψηφιακή καθοδήγηση (Hass BT-40)



**Εικόνα 1-2** Παράδειγμα φρέζας με ψηφιακή καθοδήγηση (Hass CM-1)

Οι εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- Υψηλή διαστατική ακρίβεια (dimensional accuracy) και ακρίβεια μορφής και θέσης.
- Κατεργασία σύνθετων επιφανειών στο χώρο, που είναι αποτέλεσμα της σύγχρονης κίνησης σε πολλούς άξονες.
- Μείωση των σκάρτων κομματιών και δειγματοληπτικός περιορισμός του ελέγχου ποιότητας.

- Ελάχιστος χαμένος παραγωγικός χρόνος και μικρότερος χρόνος παραμονής του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή.
- Εύκολος προγραμματισμός και χειρισμός.
- Σαφής έλεγχος της παραγωγής αφού ο χρόνος κατεργασίας καθορίζεται με ακρίβεια.
- Μεγάλη ευελιξία στις κατεργασίες που εκτελούνται.
- Αύξηση της παραγωγικότητας, της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών, άρα και αύξηση της ανταγωνιστικότητας.
- Κυρίως δε, αύξηση της σταθερής παραγωγικότητας.

Οι εντολές που δέχεται μια τέτοια εργαλειομηχανή ονομάζεται κώδικας μηχανής (M-Code). Ο κώδικας μηχανής είναι τυποποιημένος κατά DIN/ISO και έτσι οι βασικές εντολές είναι σταθερές για όλους τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών και λογισμικών ελέγχου τους. Εδώ είναι χρήσιμο να αναφερθεί πως μονάχα ο M-Code δεν είναι αρκετός για την ολοκληρωμένη λειτουργία μιας εργαλειομηχανής. Ο συνδυασμός G-Code και M-Code είναι αυτό που χρειάζεται για την πλήρη καθοδήγηση ενός τέτοιου μηχανήματος. Στη πράξη και τα δύο είδη κώδικα ελέγχουν τον εξοπλισμό ενός μηχανήματος, ρυθμίζουν όμως διαφορετικές κινήσεις. Οι εντολές του G-Code λένε στο εργαλείο που και πώς να κόψει το κατεργαζόμενο υλικό. Οι εντολές του M-Code κατευθύνουν το μηχανήμα να αλλάξει εργαλεία, να μετακινήσει κάποιον άξονα ή να κάνει άλλες εργασίες που όμως δεν είναι σχετικές με τον τρόπο κοπής.

Τα είδη των εργαλειομηχανών [3],[4] ποικίλουν, τα πιο γνωστά είναι:

- Τα συστήματα κοπής
- Κοπή οξυγόνου
- Plasma cutters
- Punching cutters

Τα CNC λέιζερ κοπής που κατηγοριοποιούνται σε:

- Λέιζερ  $CO_2$  που είναι κατάλληλα για κοπή, τρύπημα και χαρακτηριστική
- Τα λέιζερ νεοδυμίου (Nd) και
- Τα λέιζερ νεοδυμίου υτρίου – αλουμινίου – γρανάτη (Nd:YAG) που είναι πανομοιότυπα σε στυλ και διαφέρουν μόνο στην εφαρμογή.

Και οι τρεις τύποι λέιζερ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για συγκόλληση. Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος τύπος λέιζερ είναι του  $CO_2$ .

Έπειτα υπάρχουν οι τόννοι CNC οι οποίοι διακρίνονται ανάλογα με τους άξονες ελευθερίας που διαθέτουν και το μήκος που μπορούν να κατεργαστούν. Έτσι έχουμε:

- Τόννους δύο αξόνων (X Z)
- Τόννους τριών αξόνων (X Y Z) και
- Τόννους που μπορούν να φτάσουν τους δώδεκα άξονες. Τέτοιες περιπτώσεις είναι αρκετά σύνθετες με άνω του ενός εργαλείου κατεργασίας.

Τέλος έχουμε τις φρέζες CNC. Το φρεζάρισμα είναι η διαδικασία της μηχανικής κατεργασίας που χρησιμοποιεί περιστροφικούς κοπτήρες για την αφαίρεση υλικού προωθώντας ένα κόπτη σε ένα τεμάχιο κατεργασίας. Τα είδη φρεζών διακρίνονται:

- Στις φρέζες μικρού μεγέθους όπου συνήθως έχουν τρεις άξονες
- Στις φρέζες μεσαίου μεγέθους ή μικρών κέντρων κατεργασίας με πέντε έως έξι άξονες
- Και τις φρέζες μεγάλων διαστάσεων οι οποίες μπορούν να κατεργαστούν μεγάλα σε μέγεθος κομμάτια και να κάνουν πιο περίπλοκες κατασκευές αφού υφίστανται κέντρα κατεργασίας μέχρι 12 βαθμούς ελευθερίας.

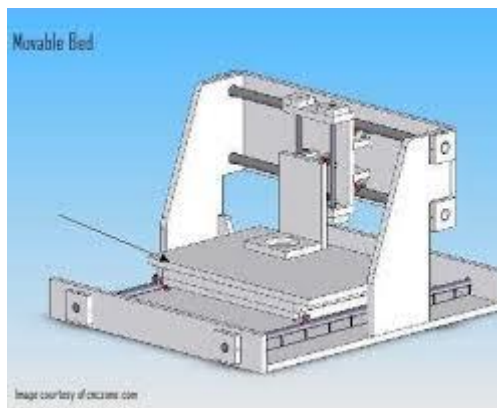
Ακόμα υπάρχουν και πιο περίπλοκα είδη όπως αυτά των ηλεκτροδιαβρώσεων σύρματος και βύθισης και τα υβριδικά πολυμηχανήματα.

Βεβαίως είναι αναπτυσσόμενη και η διαδικασία κατασκευής εξαρτημάτων από 3D εκτυπωτές (additive manufacturing-προσθετική διαδικασία παραγωγής έναντι της αφαιρετικής).

Πέρα όμως από την χρήση των CNC στο χώρο της βιομηχανίας έχει αναπτυχθεί και η οικιακή – ιδιωτική χρήση. Η άφθονη παραγωγή ηλεκτρονικών και μηχανικών εξαρτημάτων χαμηλού κόστους έχουν καταστήσει ευκολότερη και οικονομικότερη την κατασκευή CNC μηχανημάτων. Έτσι έχει γίνει προσιτή η ιδιοκατασκευή και η αγορά ενός μικρού μηχανήματος από τον οποιονδήποτε.

### 1.3 Σχεδιαστικές κατηγορίες συστημάτων κατεργασίας CNC

Γενικότερα υπάρχει μια τεράστια ποικιλία στο σχεδιασμό CNC μηχανών [1]. Δυο εκ των βασικότερων κατηγοριών χωρίζονται με βάση την σκελετική τους δομή. Η μία κατηγορία έχει σταθερό σκελετό και κινούμενο κρεβάτι (Stationary Gantry, Mobile bed). Ενδεικτικά ένα μοντέλο αυτής της κατηγορίας είναι σαν αυτό στην Εικόνα 1.3.



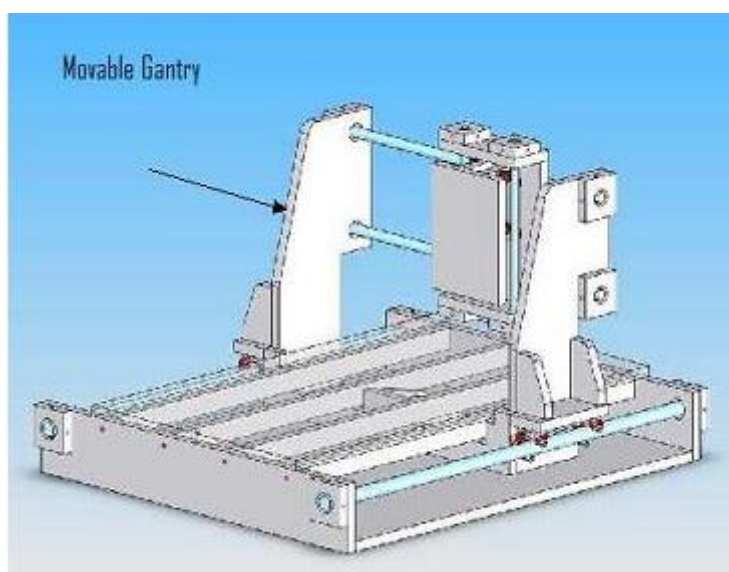
**Εικόνα 1-3 Παράδειγμα CNC σκελετού με κινούμενο κρεβάτι (εικόνα από cnczone)**

Αυτού του τύπου ο σχεδιασμός είναι λιγότερο χρησιμοποιούμενος από τους κατασκευαστές και τους ερασιτέχνες για CNC Router από ό,τι ο σχεδιασμός με κινούμενο σκελετό. Φυσικά υπάρχουν λόγοι για τους οποίους κάποιος θα διαλέξει τον τύπο CNC με κινούμενο κρεβάτι. Αυτός ο σχεδιαστικός τύπος είναι συνηθέστερος σε μικρά CNC μηχανήματα όπως αυτά για χάραξη και για PCB. Για τέτοιου μεγέθους μηχανήματα, ο σχεδιασμός με κινούμενο κρεβάτι δουλεύει ικανοποιητικά διότι τα κομμάτια προς κατεργασία είναι ιδιαίτερα ελαφριά (μικρότερη αδράνεια σε σχέση με την κεφαλή).

Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτού του σχεδιαστικού τύπου είναι ότι δημιουργεί έναν στιβαρό σκελετό ο οποίος δεν παραμορφώνεται εύκολα και κρατάει σταθερά το εργαλείο κοπής. Αυτό συμβαίνει επειδή ο σκελετός είναι στατικός και δε χρειάζεται να είναι ελαφρύς ή να

συμμορφώνεται με ένα συγκεκριμένο μέγεθος για να ταιριάζει με τους γραμμικούς άξονες και τα ρουλεμάν του μηχανήματος. Αντίθετα κατά την κατασκευή ενός CNC με κινητό σκελετό, πρέπει να ληφθούν υπό όψη κατά τη κατασκευή, το βάρος του σκελετού και το μέγεθος του, έτσι ώστε να μπορούν να ταιριάζουν με τα μεγέθη των γραμμικών αξόνων και των ρουλεμάν και να μην υπερβαίνουν το βάρος υπό το οποίο μπορούν να δουλέψουν σωστά. Έτσι ο τύπος CNC με κινούμενο κρεβάτι δίνει μεγαλύτερη ελευθερία ως προς τον σχεδιασμό.

Η άλλη κατηγορία CNC μηχανών είναι με κινητό σκελετό και σταθερό κρεβάτι (Mobile Gantry, Stationary bed). Αυτού του είδους ο σχεδιασμός είναι συνηθέστερος. Το μεγάλο πλεονέκτημα σε αυτόν τον σχεδιαστικό τύπο είναι ότι οι άλλοι δυο άξονες κινούνται κατά μήκος του x άξονα, δηλαδή του σταθερού κρεβατιού πάνω στο οποίο σταθεροποιούνται τα τεμάχια προς κατεργασία. Κυρίως όμως το κρεβάτι είναι ίσο με το μέγεθος του τεμαχίου προς επεξεργασία. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα τέτοιου τύπου CNC φαίνεται στην Εικόνα 1.4 παρακάτω.



Εικόνα 1-4 Παράδειγμα CNC σκελετού με σταθερό κρεβάτι (εικόνα από cnczone)

#### 1.4 Σχεδίαση μελέτη και παραγωγή με τη βοήθεια του υπολογιστή

Γενικότερα στην εποχή μας υπάρχουν πάρα πολλά σχεδιαστικά προγράμματα και συστήματα που παρέχουν εντυπωσιακές δυνατότητες όσον αφορά τη σχεδίαση, τη μελέτη και την υποστήριξη της παραγωγής προϊόντων. Τρεις βασικοί όροι διέπουν το σύνολο της σχεδίασης, μελέτης και παραγωγής με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή [5]. Ο πρώτος όρος είναι το CAD (Computer Aided Design/Drawing) δηλαδή σχεδίαση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο δεύτερος όρος είναι το CAM (Computer Aided Manufacture) που σημαίνει παραγωγή με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Και ο τρίτος είναι το CAE (Computer Aided Engineering) δηλαδή ο έλεγχος επίδοσης ενός παραγόμενου αντικειμένου με χρήση υπολογιστή.

Με το CAD/CAM/CAE λοιπόν αξιοποιείται η πληροφορική σε όλα τα στάδια ανάπτυξης ενός προϊόντος. Ποιο συγκεκριμένα το λογισμικό, συνεισφέρει στη δημιουργία των ψηφιακών μοντέλων, στην ανάλυση, στη βελτιστοποίηση της μορφής και της αντοχής αλλά και στον προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών των προϊόντων.

Η σχεδίαση, η μελέτη και παραγωγή με τη βοήθεια του υπολογιστή βασίζεται στην τεχνολογία των γραφικών και της μαθηματικής μοντελοποίησης κατά κύριο λόγο. Ο βασικός παράγοντας κατά τη διάρκεια σχεδίασης και μελέτης είναι η δημιουργία του τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου του προϊόντος που θα αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη των εφαρμογών που θα βελτιώσουν και τελικά θα παραγάγουν το προϊόν. Έτσι λοιπόν μπορούμε να καταλάβουμε πως ο βασικότερος λόγος ύπαρξης των συστημάτων CAD/CAM είναι η ανάπτυξη άρτιων προϊόντων εξαρχής μέσα στον ελάχιστο δυνατό χρόνο ανάπτυξης, με το μικρότερο κόστος και την υψηλότερη ποιότητα.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε ιδιαίτερη προσπάθεια να αξιοποιηθούν κατά το μέγιστο δυο CAD/CAM λογισμικά προκειμένου να δημιουργηθεί το δικό μας σύστημα κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή. Τα δυο λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση και την στατική ανάλυση του συστήματος κατεργασίας είναι το AutoCAD 2010 και το SOLIDWORKS 2020.

Επιλέχθηκαν δύο λογισμικά προκειμένου να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες που δίνουν το καθένα από αυτά ώστε στο τέλος το σύστημα κατεργασίας να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστο, εύκολο στην παραγωγή του, όσο γίνεται πιο οικονομικό και με την υψηλότερη δυνατή απόδοση.

### 1.5 Η σχεδίαση του συστήματος κατεργασίας - προδιαγραφές

Στόχος της σχεδίασης του συστήματος είναι να συγκεντρωθούν πληροφορίες που θα βοηθήσουν στη κατασκευή του συστήματος κατεργασίας με τις κατάλληλες προδιαγραφές για την κατεργασία ξύλου και πλαστικού προσφέροντας ασφάλεια στο χρήστη και ποιότητα στο αποτέλεσμα της κατεργασίας. Ο σκελετός του συστήματος θα πρέπει να φτιαχτεί με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτρέπει στο χειριστή να **επιβλέπει** τη διαδικασία της κατεργασίας χωρίς όμως να χρειάζεται να επεμβαίνει κατά τη διάρκεια της. Ακόμη απαιτούμενο είναι να υπάρχει εύκολη **πρόσβαση** στο κρεβάτι του συστήματος ώστε να μπορεί ο χειριστής να **σταθεροποιήσει** το τεμάχιο προς κατεργασία εύκολα και με ασφάλεια.

Σημαντικό επίσης είναι με βάση το σχεδιασμό να γίνει και η κατάλληλη επιλογή υλικών και εξαρτημάτων ώστε η τελική σύνθεση του συστήματος να έχει την απαραίτητη **στιβαρότητα** και να μπορεί να κατεργαστεί τα υλικά σωστά. Κάτι που επίσης παίζει μεγάλο ρόλο είναι και το **βάρος** του συστήματος αφού όσο πιο βαρύ είναι τόσο πιο ακριβό και δύσκολο στη μεταφορά γίνεται. Ακόμη ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στο βάρος των αξόνων που εξυπηρετούν την κίνηση του συστήματος καθώς όσο αυξάνεται το βάρος τους τόσο **μεγαλύτερης ισχύος** κινητήρες θα χρειάζονται.

#### 1.5.1 Περιγραφή του σχεδιαστικού λογισμικού AutoCAD

Το AutoCAD [6] είναι ένα από τα δημοφιλέστερα και ισχυρότερα λογισμικά 2D και 3D σχεδίασης. Εξυπηρετεί την παραγωγή τεχνικών σχεδίων όλων των τύπων και για αυτό χρησιμοποιείται από πολλούς επαγγελματικούς και όχι μόνο κλάδους. Το λογισμικό ανήκει στη γνωστή πολυεθνική εταιρία λογισμικού Autodesk και για τη χρήση του είναι απαραίτητη η αγορά του ή η καταβολή συνδρομής. Πρωτοκυκλοφόρησε στην αγορά τον Δεκέμβριο του 1982. Από τότε μέχρι σήμερα η εταιρία αναβαθμίζει διαρκώς το λογισμικό της, παράγοντας σχεδόν κάθε χρόνο νέες εκδόσεις με ακόμη περισσότερες δυνατότητες και ευκολότερη χρήση προς τον σχεδιαστή.

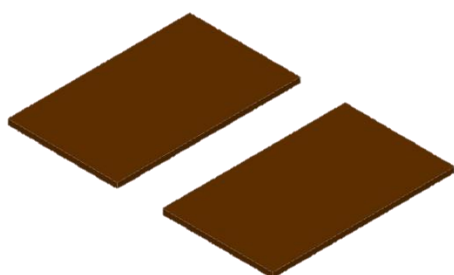
### 1.5.2 Η τρισδιάστατη (3D) σχεδίαση του συστήματος κατεργασίας με το AutoCAD

Η σχεδίαση του συστήματος κατεργασίας ξεκίνησε στο AutoCAD 2010. Πολύ σημαντικό ρόλο στις διαστάσεις του συστήματος κατεργασίας έπαιξαν τα έτοιμα εξαρτήματα (Off the shelf) που χρησιμοποιήθηκαν. Κάποια εξαρτήματα όπως για παράδειγμα οι γραμμικοί και οι ατέρμονες άξονες παλούνται στην αγορά σε συγκεκριμένες διαστάσεις. Έτσι για να ταιριάξουν τα έτοιμα εξαρτήματα με τα κομμάτια που κατασκευάστηκαν για το σύστημα κατεργασίας έγινε πρώτα η αναζήτηση των εξαρτημάτων και με βάση τις διαστάσεις αυτών βγήκαν και οι διαστάσεις για τα κομμάτια που κατασκευάστηκαν.

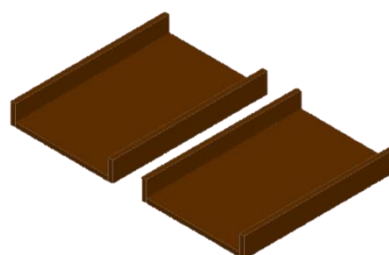
Για το σχεδιασμό των εξαρτημάτων στο AutoCAD χρησιμοποιήθηκαν αναφορές από τα φυλλάδια των κατασκευαστών, έτσι οι διαστάσεις τους είναι πραγματικές στο σχέδιο. Αυτό το γεγονός μας έδωσε μεγάλη ευκολία στον υπολογισμό των διαστάσεων των ξύλινων τμημάτων του συστήματος ώστε να ταιριάξουν με τα εξαρτήματα που κυκλοφορούν στην αγορά. Τα ξύλινα μέρη κατασκευάστηκαν στο εργαστήρι του πατέρα μου, ο οποίος είναι μαραγκός.

Παρακάτω θα γίνει παρουσίαση των σχεδίων σε τρισδιάστατη αναπαράσταση (3D) με τη σειρά που δημιουργήθηκαν στο AutoCAD. Για την ευκολότερη διαχείριση του τελικού σχεδίου, τα κομμάτια από τα οποία αποτελείται το CNC σχεδιάστηκαν πρώτα σε ξεχωριστά αρχεία. Έπειτα συνδυάστηκαν όλα μαζί για να δώσουν την τελική μορφή του συστήματος κατεργασίας. Εδώ θα πρέπει να διευκρινιστεί πως ο σκελετός του μηχανήματος, πλην των μηχανικών μερών, επιλέχτηκε να κατασκευαστεί από ξύλο και συγκεκριμένα από κόντρα πλακέ θαλάσσης (σημύδα) διότι είναι αρκετά ελαφρύ, ιδιαίτερα ανθεκτικό στην υγρασία, και λόγω της εύκολης πρόσβασης σε μηχανήματα κατεργασίας ξύλου (ξύλουργείο). Ακόμα το ξύλο είναι ιδιαίτερα φιλικό ως υλικό στον ερασιτέχνη χρήστη θυμίζοντας παλαιότερες όμορφες εποχές.

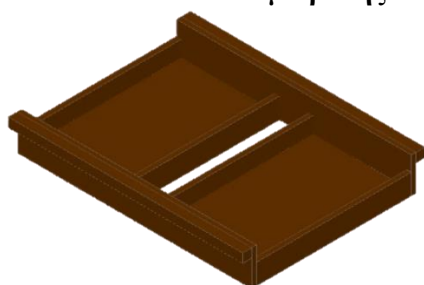
Το πρώτο κομμάτι που σχεδιάστηκε ήταν το κρεβάτι, δηλαδή η επιφάνεια πάνω στην οποία θα στηρίζονται τα τεμάχια προς κατεργασία, και η βάση του. Παρακάτω φαίνονται τα στάδια σχεδίασης τους.



**Εικόνα 1-5 Πάτωμα βάσης**

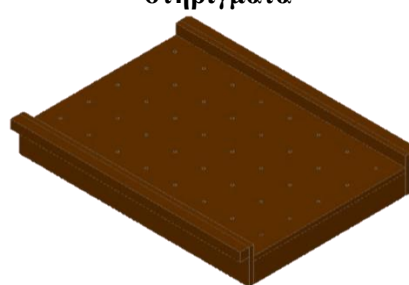


**Εικόνα 1-6 Πάτωμα και ενδιάμεσα στηρίγματα**



**Εικόνα 1-7 Πάτωμα και πλαϊνά στηρίγματα (δύο τελάρα)**

Σχέδια της γραφούσης.



**Εικόνα 1-8 Ολοκληρωμένη βάση και κρεβάτι με καπάκι**

Τα δύο τελάρα που φαίνονται στην εικόνα 1-7 θα χρησιμεύσουν αργότερα για την τοποθέτηση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Έτσι δε θα χρειαστεί κάποιο εξωτερικό κουτί για να «φιλοξενήσει» τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του μηχανήματος. Επιπλέον το καπάκι, που φαίνεται στην εικόνα 1-8, ή αλλιώς κρεβάτι είναι αποσπώμενο οπότε η πρόσβαση στα ηλεκτρονικά μέρη θα είναι εύκολη. Οι τρύπες που φαίνονται στην επιφάνεια του κρεβατιού μπορούν να χρησιμεύσουν για τη στήριξη των τεμαχίων προς κατεργασία. Η ιδέα είναι να



**Εικόνα 1-9 Μπούσουλαις**  
(εικόνα από [sinter.gr](http://sinter.gr))

τοποθετηθούν μπούσουλαις ή αλλιώς μούφες (κυλινδρικά μεταλλικά εξαρτήματα που διαθέτουν βόλτες στο εξωτερικό τους περίβλημα, ώστε να βιδώνουν όπως οι βίδες, αλλά και με βόλτες στο εσωτερικό τους ώστε να μπορεί να βιδώσει μια βίδα σε αυτό). Έτσι θα μπορούν μέσα στις τρύπες του κρεβατιού να βιδώνουν και να ξεβιδώνουν βίδες που θα συγκρατούν τα τεμάχια προς κατεργασία. Έτσι δε θα φθείρεται η επιφάνεια του κρεβατιού αφού οι βίδες συγκράτησης του τεμαχίου δεν θα τρυπούν το ξύλο του κρεβατιού αλλά θα βιδώνουν και θα ξεβιδώνουν στους μπούσουλαις. Αν ένα τεμάχιο θέλουμε να το στερεώσουμε στο κρεβάτι με αυτό τον τρόπο μπορούμε είτε να θυσιάσουμε ένα μικρό τμήμα του τεμαχίου προς κατεργασία και να βιδώσουμε σε αυτό τις βίδες που θα το συγκρατήσουν. Διαφορετικά μπορούμε να βιδώσουμε περιφερειακά του τεμαχίου προς κατεργασία κομμάτια ξύλου που θα το συγκρατούν

Μία εναλλακτική προσέγγιση για την συγκράτηση των τεμαχίων στο κρεβάτι είναι η χρήση χαρτοταινίας και κατάλληλης κόλλας. Ουσιαστικά η χαρτοταινία απλώνεται στην επιφάνεια του κρεβατιού και στο κάτω μέρος του τεμαχίου προς κατεργασία. Μεταξύ των δύο επιφανειών χαρτοταινίας απλώνεται λευκή κόλλα και συνδέονται οι δύο επιφάνειες. Αυτός ο τρόπος στήριξης είναι αρκετά χρονοβόρος γιατί χρειάζεται αρκετός χρόνος μέχρι να στεγνώσει η κόλλα και αυτό είναι που τον κάνει και επικίνδυνο. Αν η κόλλα δε στεγνώσει καλά υπάρχει κίνδυνος να απελευθερωθεί το τεμάχιο κατά τη διάρκεια κατεργασίας του και έτσι να προκληθεί ατύχημα. Όμως το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του τρόπου συγκράτησης είναι ότι δίνει ελευθερία κινήσεων στην κεφαλή του CNC. Έτσι κατά την παραγωγή του g-code δεν χρειάζεται να υπολογίσουμε τα σημεία συγκράτησης του τεμαχίου, ο κώδικας βγαίνει πιο εύκολα και δεν χρειάζεται περαιτέρω κατεργασία (πχ φινιρίσμα των σημείων συγκράτησης) του τεμαχίου μετά από αυτήν του CNC.

Ένας άλλος τρόπος να σταθεροποιηθούν τα τεμάχια προς κατεργασία στο κρεβάτι είναι με τη βοήθεια T-track προφίλ αλουμινίου και T-slot (clamp) σταθεροποιητών. Χρειάζονται δυο προφίλ αλουμινίου τα οποία θα τοποθετηθούν σε γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους, με τη γωνία να βρίσκεται στο σημείο 0 του κρεβατιού. Έτσι για παράδειγμα, τοποθετώντας ένα τετράγωνο τεμάχιο ξύλου με τη μια του γωνία να ακουμπά στη γωνία που σχηματίζουν τα δυο προφίλ αλουμινίου και δύο T-slot clamps να κρατούν τις άλλες δυο γωνίες που εφάπτονται στα αλουμίνια σταθεροποιούμε πλήρως το τεμάχιο.



**Εικόνα 1-10 T-track & T-slot**  
(εικόνα από Joom)





Μία άλλη επιλογή για συγκράτηση τεμαχίου είναι με μία μέγγενη. Τα δύο εξωτερικά μέρη της μέγγενης στερεώνονται στο κρεβάτι ενώ οι σιαγώνες είναι ελεύθερες να μετακινηθούν κατά μήκος των αξόνων της. Το τεμάχιο προς κατεργασία πιάνεται μεταξύ των σιαγώνων.

**Εικόνα 1-11 Μέγγενη (εικόνα από cnc plus)**

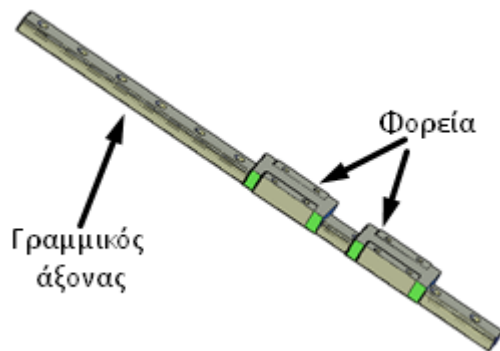
Τέλος, μια ακόμα ιδέα είναι να βιδωθεί πάνω από το κρεβάτι του μηχανήματος ένα «θυσιαζόμενο» κομμάτι ξύλου. Σε αυτό το ξύλο θα τοποθετούνται τα κομμάτια προς κατεργασία και γύρω τους θα βιδώνονται τάκοι που θα συγκρατούν τα κομμάτια. Στο πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα υπέρ και τα κατά των προαναφερθέντων επιλογών για το τρόπο συγκράτησης των τεμαχίων.

Στήριξη τεμαχίων	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Στήριξη με μπούσουλες και βίδες για τη συγκράτηση	Προσφέρει μεγάλη σταθερότητα και γρήγορη εφαρμογή στην πράξη.	Είναι δυσκολότερη και ακριβότερη η υλοποίηση. Ακόμη κατά την προετοιμασία του GCODE θα πρέπει να γίνονται επιπλέον υπολογισμοί για τα σημεία συγκράτησης και υποστήριξης του ωφέλιμου τεμαχίου. Απαιτείται περαιτέρω κατεργασία (λείανση ακμών κτλ) μετά το πέρας της επεξεργασίας.
Στήριξη με χαρτοταινία και κόλα για τη συγκράτηση	Είναι φθηνότερη σαν υλοποίηση και διευκολύνει την παραγωγή του GCODE. Δεν απαιτείται περαιτέρω κατεργασία του τεμαχίου μετά το πέρας της επεξεργασίας.	Χρονοβόρα κατά την εφαρμογή. Επικίνδυνη, αφού μπορεί να φθείρει την επιφάνεια του κρεβατιού ή να απελευθερωθεί το τεμάχιο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του.
Στήριξη με T-slot clamps & T-track προφίλ αλουμινίου	Προσφέρουν πολύ καλή και εύκολη σταθεροποίηση τεμαχίων. Δίνουν τη δυνατότητα να υπάρχει σταθερό σημείο μηδέν στο κρεβάτι του μηχανήματος. Δεν καταστρέφουν την επιφάνεια του κρεβατιού.	Πρέπει κατά τη παραγωγή του GCODE να υπολογιστούν τα σημεία συγκράτησης ώστε να μην προκληθεί ατύχημα κατά την διάρκεια κατεργασίας.
Συγκράτηση με μέγγενη	Τα κομμάτια σταθεροποιούνται εύκολα και γρήγορα. Δεν καταστρέφεται η επιφάνεια του κρεβατιού.	Το σημείο μηδέν δεν είναι σταθερό αλλά αλλάζει κάθε φορά ανάλογα με το μέγεθος του τεμαχίου. Δεν επιτρέπει την περιφερειακή επεξεργασία των τεμαχίων.
Συγκράτηση με θυσιαζόμενο τεμάχιο	Γρήγορη πρόσδεση των τεμαχίων στο τραπέζι. Δεν καταστρέφεται η επιφάνεια του τραπεζιού.	Θέλει προσοχή στην περιφερειακή επεξεργασία των τεμαχίων.

**Πίνακας 1- 1 Τρόποι συγκράτησης τεμαχίων, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα**

Ο τρόπος συγκράτησης που επιλέχθηκε για το σύστημα κατεργασίας είναι αυτός με την χαρτοταινία και την λευκή κόλλα. Οι λόγοι αυτής της επιλογής είναι πρώτων το ότι είναι οικονομικός και δεύτερον διευκολύνει πάρα πολύ την διαδικασία παραγωγής του g-code.

Ο σχεδιασμός συνεχίστηκε με τους γραμμικούς άξονες και τα φορεία. Οι γραμμικοί άξονες με τη βοήθεια των φορείων εξυπηρετούν την γραμμική ή αλλιώς ευθύγραμμη κίνηση ενός τμήματος του σκελετού της μηχανής σε έναν άξονα (x, y, z). Για να γίνει πιο κατανοητή η χρησιμότητα των γραμμικών αξόνων μπορεί κάποιος να προσομοιώσει πως ένας γραμμικός άξονας είναι οι ράγες ενός τρένου, το τμήμα του σκελετού της μηχανής που κινείται είναι ένα τρένο και τα φορεία είναι οι ρόδες του.



**Εικόνα 1-12 Γραμμικός άξονας και φορεία**  
Σχέδια της γραφούσης.



**Εικόνα 1-13 Μπροστινή όψη γραμμικού άξονα και φορείων**

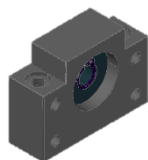


**Εικόνα 1-14 Πίσω όψη γραμμικού άξονα και φορείων**

Εκτός από τους γραμμικούς άξονες και τα φορεία για την κίνηση χρειάζονται και κοχλίες τύπου Ball Screw. Παρακάτω ακολουθούν τα κομμάτια ενός ολοκληρωμένου σετ Ball Screw.



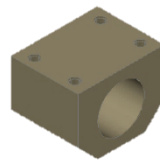
**Εικόνα 1-15 BK12 Στήριγμα**



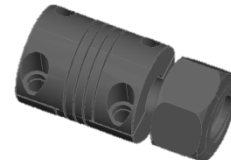
**Εικόνα 1-16 BF12 Στήριγμα**



**Εικόνα 1-17 SFU1605 Περικόχλιο**



**Εικόνα 1-18 HD16 Φορείο ή Φωλιά Περικοχλίου**



**Εικόνα 1-19 RM1605 Coupler & Παξιμάδι**

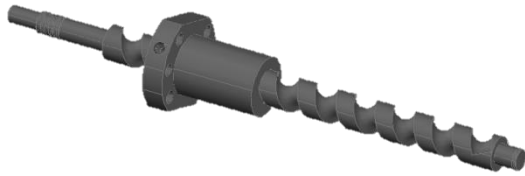


**Εικόνα 1-20 Κοχλίας-ατέρμονας τύπου Ball Screw**

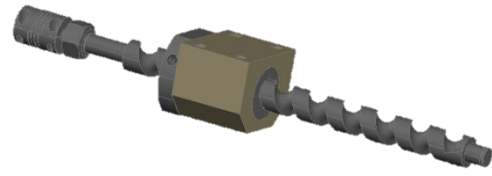
Σχέδια της γραφούσης.

Στη συνέχεια ακολουθεί η συναρμολόγηση ενός σετ Ball Screw και η τοποθέτηση δύο τέτοιων σετ στη βάση του σκελετού μαζί με δυο γραμμικούς άξονες και τα φορεία τους. Αυτά τα δύο σετ κοχλίων-ατέρμονων και γραμμικών αξόνων θα συμμετέχουν στην κίνηση του γ άξονα.

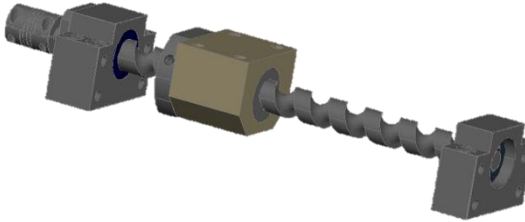
Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή



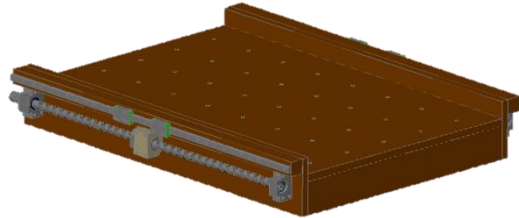
Εικόνα 1-21 Συναρμολόγηση Ball Screw 1



Εικόνα 1-22 Συναρμολόγηση Ball Screw 2

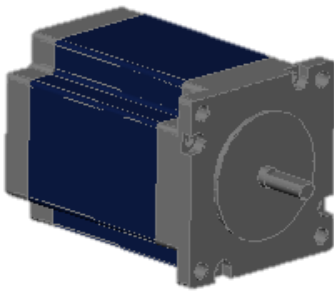


Εικόνα 1-23 Συναρμολόγηση Ball Screw 3  
Σχέδια της γραφούσης.

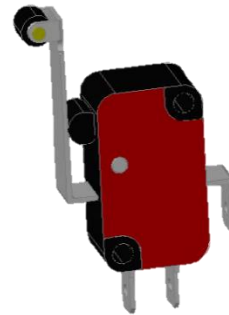


Εικόνα 1-24 Τοποθέτηση Ball Screw και γραμμικών αξόνων στη βάση του CNC

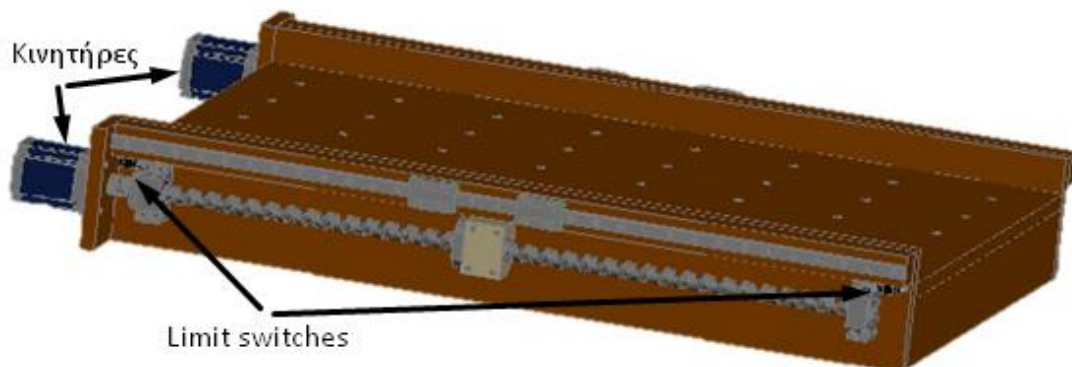
Στην εικόνα 1-24 βλέπουμε μια 3D αναπαράσταση της βάσης του CNC μηχανήματος μαζί με το κρεβάτι τους γραμμικούς άξονες και τα δύο ολοκληρωμένα σετ κοχλιών τύπου Ball Screw. Για να δοθεί κίνηση στο σύνολο των ως άνω κομματιών μένει να προστεθούν στο σχέδιο της εικόνας 1-24 δύο βηματικοί κινητήρες τύπου Nema 23 οι οποίοι επιλέχθηκαν βάση των προδιαγραφών τους (ροπή, ισχύς). Έπειτα για να είναι ασφαλέστερη η κίνηση που θα εκτελείται στον y άξονα τοποθετούνται δύο limit switches στις δυο άκρες του άξονα.



Εικόνα 1-25 Βηματικός κινητήρας Nema 23



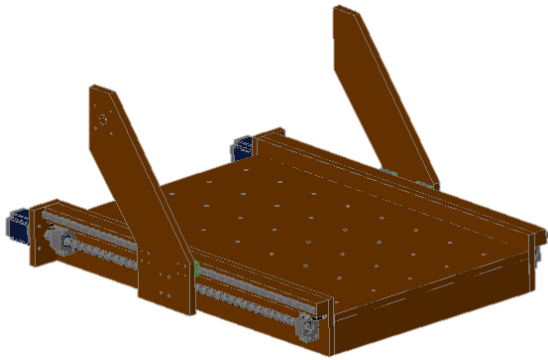
Εικόνα 1-26 Limit switch



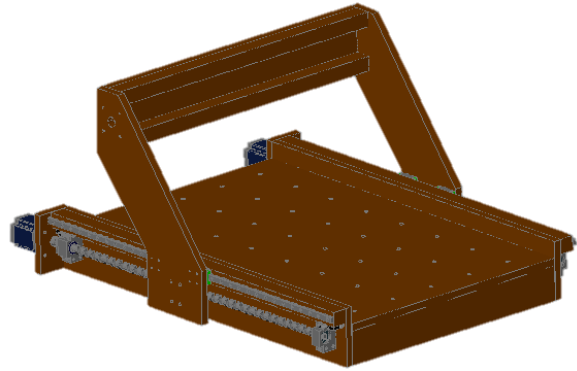
Εικόνα 1-27 Τοποθέτηση κινητήρων και limit switches

Σχέδια της γραφούσης.

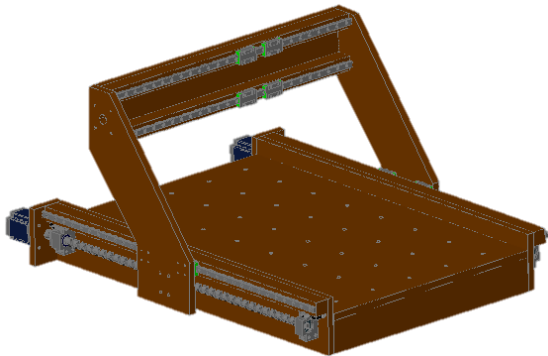
Στην εικόνα 1-27 φαίνεται πλέον ολοκληρωμένη η βάση του μηχανήματος. Ως τώρα έχει σχεδιαστεί μόνο ο y άξονας κίνησης. Παρακάτω θα προστεθούν βήμα - βήμα στο σχέδιο τα κομμάτια και τα εξαρτήματα που είναι απαραίτητα για τον x άξονα.



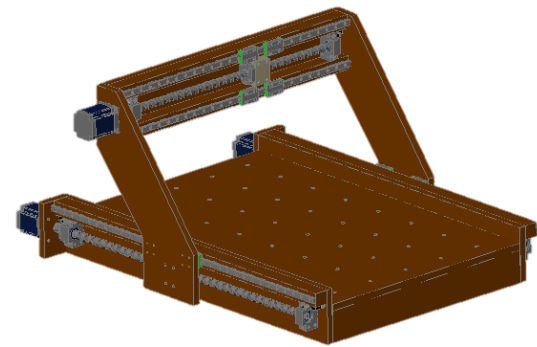
**Εικόνα 1-28 Τοποθέτηση στηριγμάτων ένωσης xy αξόνων**



**Εικόνα 1-29 Τοποθέτηση της βάσης του x άξονα**



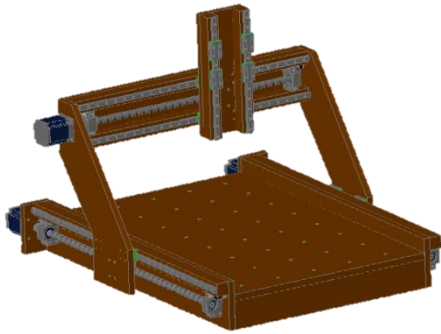
**Εικόνα 1-30 Τοποθέτηση γραμμικών αξόνων x**



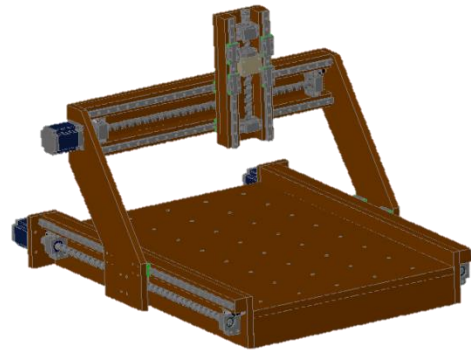
**Εικόνα 1-31 Τοποθέτηση Ball Screw και κινητήρα στον x άξονα**

Σχέδια της γραφούσης.

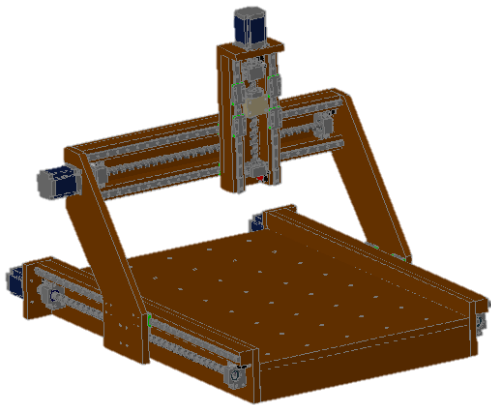
Στην εικόνα 1-28 φαίνονται τα δύο πλαϊνά στηρίγματα που συνδέουν τον x με τον y άξονα. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στις εικόνες 1-30 και 1-31, τα εξαρτήματα που τοποθετούνται στο ξύλινο σκελετό για τον x άξονα είναι τα ίδια με αυτά που περιγράψαμε και για τον y. Ακριβέστερα, για την κίνηση στον x άξονα τοποθετήθηκαν δύο γραμμικοί άξονες με δύο φορεία ο κάθε ένας, ένα σετ κοχλία τύπου Ball Screw, δύο limit switches και ένας βηματικός κινητήρας Nema 23. Με παρόμοιο τρόπο και τις ίδιες απαιτήσεις σε εξαρτήματα, σχεδιάζεται και ο z άξονας του οποίου τα βήματα σχεδίασης φαίνονται παρακάτω.



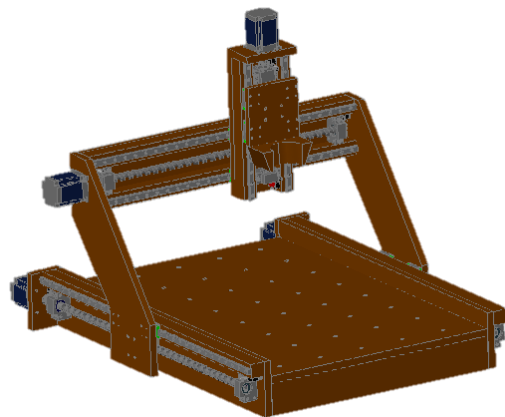
**Εικόνα 1-32 Z άξονας και τοποθέτηση γραμμικών αξόνων**



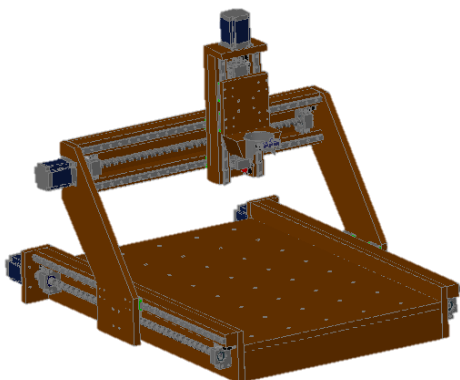
**Εικόνα 1-33 Τοποθέτηση Ball Screw στον z άξονα**



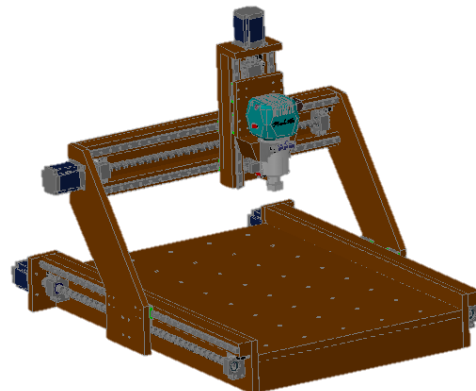
**Εικόνα 1-34 Τοποθέτηση βηματικού κινητήρα και limit switches στον z άξονα**



**Εικόνα 1-35 Τοποθέτηση της βάσης για το Router στον z άξονα**



**Εικόνα 1-36 Τοποθέτηση μάνδαλου στήριξης του Router στον z άξονα**



**Εικόνα 1-37 Τοποθέτηση Router στο z άξονα**

Σχέδια της γραφούσης.

Με την τοποθέτηση του z άξονα στο σχέδιο ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός του συστήματος κατεργασία. Όπως φαίνεται και στις εικόνες το μηχάνημα σχεδιάστηκε με βάση τη δεύτερη σχεδιαστική κατηγορία στην οποία αναφερθήκαμε στη παράγραφο 1.3, δηλαδή σταθερού κρεβατιού και κινούμενου σκελετού (Mobile Gantry, stationary bed).

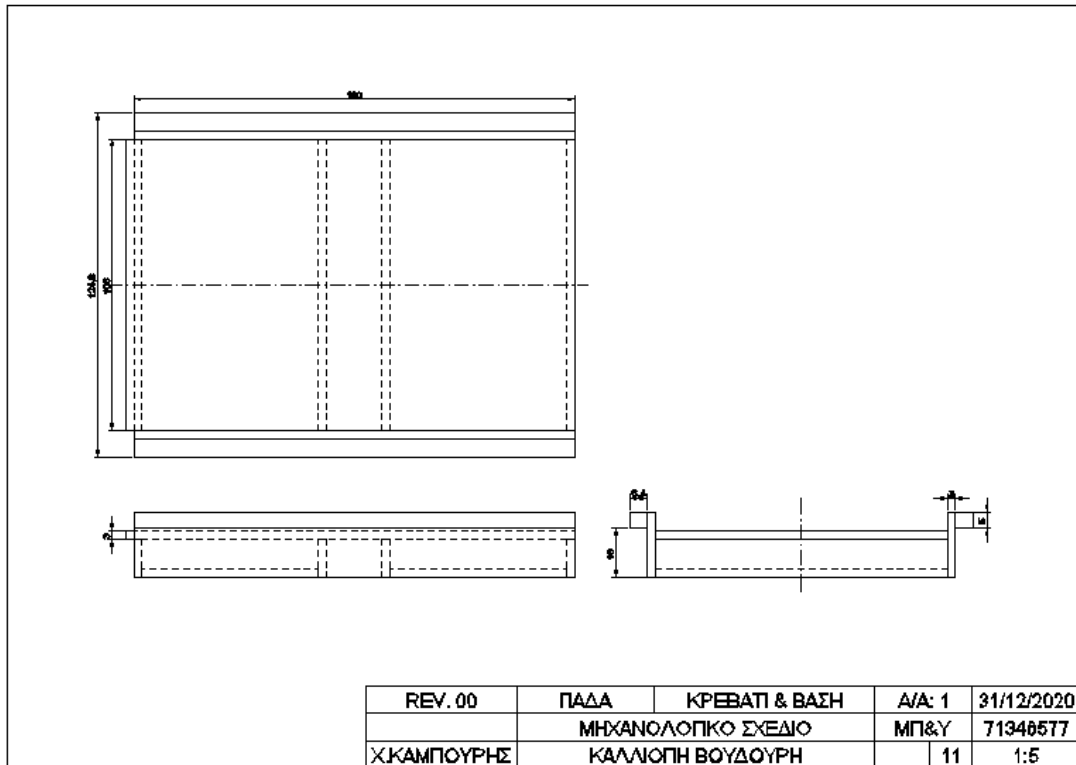
### **1.5.3 Η δισδιάστατη (2D) προσέγγιση του συστήματος κατεργασίας**

Γενικά το τεχνικό σχέδιο είναι μια γραφική αναπαράσταση, η οποία γίνεται με συγκεκριμένους κανόνες και με την οποία παρουσιάζονται οι ιδέες του μελετητή για την

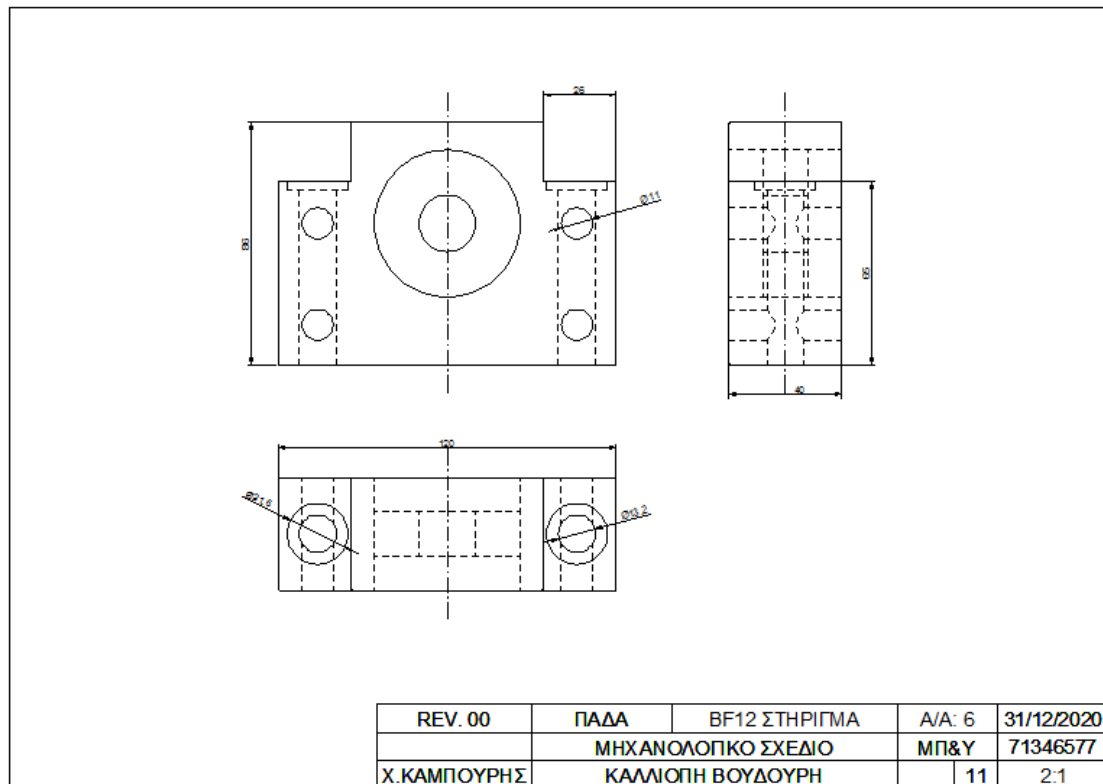
κατασκευή ενός τεχνικού έργου. Το τεχνικό σχέδιο είναι μια παγκόσμια γλώσσα αφού είναι το δυνατότερο μέσο επικοινωνίας ανάμεσα στο τεχνικό και τον απλό καθημερινό κόσμο. Το σχέδιο έχει τεράστια «δύναμη» σαν εργαλείο. Αρκεί να σκεφτεί κανείς πως ένας Έλληνας θέλει να συνομιλήσει με έναν Κινέζο και κανένας από τους δύο δε γνωρίζει τη γλώσσα του άλλου, οι πιθανότητες να καταφέρουν να συνεννοηθούν είναι μηδαμινές. Αν όμως γνωρίζουν τους βασικούς κανόνες σχεδίασης τότε μπορούν να συζητούν επί ώρες πάνω από ένα τεχνικό σχέδιο χωρίς την παραμικρή πιθανότητα παρερμηνείας. Είναι το κοινώς λεγόμενο, «Μια εικόνα χίλιες λέξεις».

Το δισδιάστατο σχέδιο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για όλες τις ειδικότητες των μηχανικών. Η δισδιάστατη σχεδίαση είναι η βάση του τρισδιάστατου σχεδίου. Χρησιμοποιώντας μονάχα δυο διαστάσεις μπορούμε να απεικονίσουμε στο χαρτί με λεπτομέρεια ένα οποιοδήποτε πραγματικό αντικείμενο. Συνήθως αρκούν μονάχα τρεις όψεις για να περιγραφεί πλήρως ένα αντικείμενο σε δισδιάστατο σχέδιο, αυτές είναι η πρόοψη, η κάτοψη ή η άνοψη και η πλάγια όψη [7]. Η πρόοψη σε ένα δισδιάστατο σχέδιο είναι εκείνη που παρέχει τις περισσότερες εμφανείς πληροφορίες και σχεδιάζεται πάντα στο κέντρο σε σχέση με τις υπόλοιπες όψεις. Παρόλο που επιλέχθηκε να σχεδιαστεί το σύστημα κατεργασίας σε τρισδιάστατη μορφή θεωρήθηκε απαραίτητο στάδιο να χρησιμοποιηθεί και δισδιάστατη σχεδίαση σε πολλά εξαρτήματα. Ο βασικότερος λόγος ήταν διότι μόνον μέσω του δισδιάστατου σχεδίου θα μπορούσε να γίνει ο συνδυασμός μερών μηχανής και εξαρτημάτων, αρκετά από τα οποία υπήρχαν ήδη στην αγορά (out of the shelf). Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι τα μηχανικά κομμάτια που επιλέχθηκαν για τη κίνηση (γραμμικοί άξονες, ατέρμονες άξονες, φορεία, κτλ) είναι βιομηχανικά εξαρτήματα επαγγελματικής χρήσης. Η ορθή διαδικασία σχεδιασμού προϋποθέτει τη μελέτη των τεχνικών σχεδίων και των προδιαγραφών των κατασκευαστών. Αφού επιβεβαιωθεί ότι πληρούνται οι βασικές απαιτήσεις του συστήματος μας τότε επιλέγονται και τα αντίστοιχα εξαρτήματα.

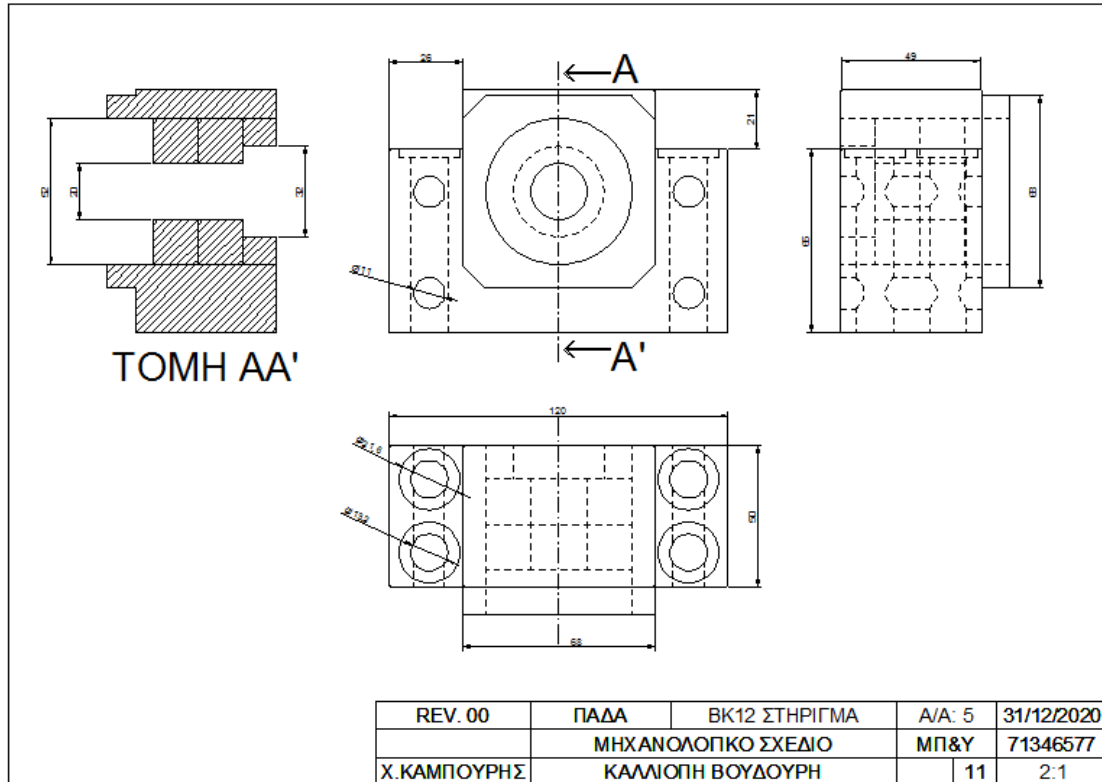
Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά δισδιάστατα σχέδια τα οποία δημιουργήσαμε με τη χρήση του AutoCAD. Κάποια προέρχονται από μηχανικά εξαρτήματα του συστήματος κατεργασίας και κάποια άλλα από κομμάτια του σκελετού του.



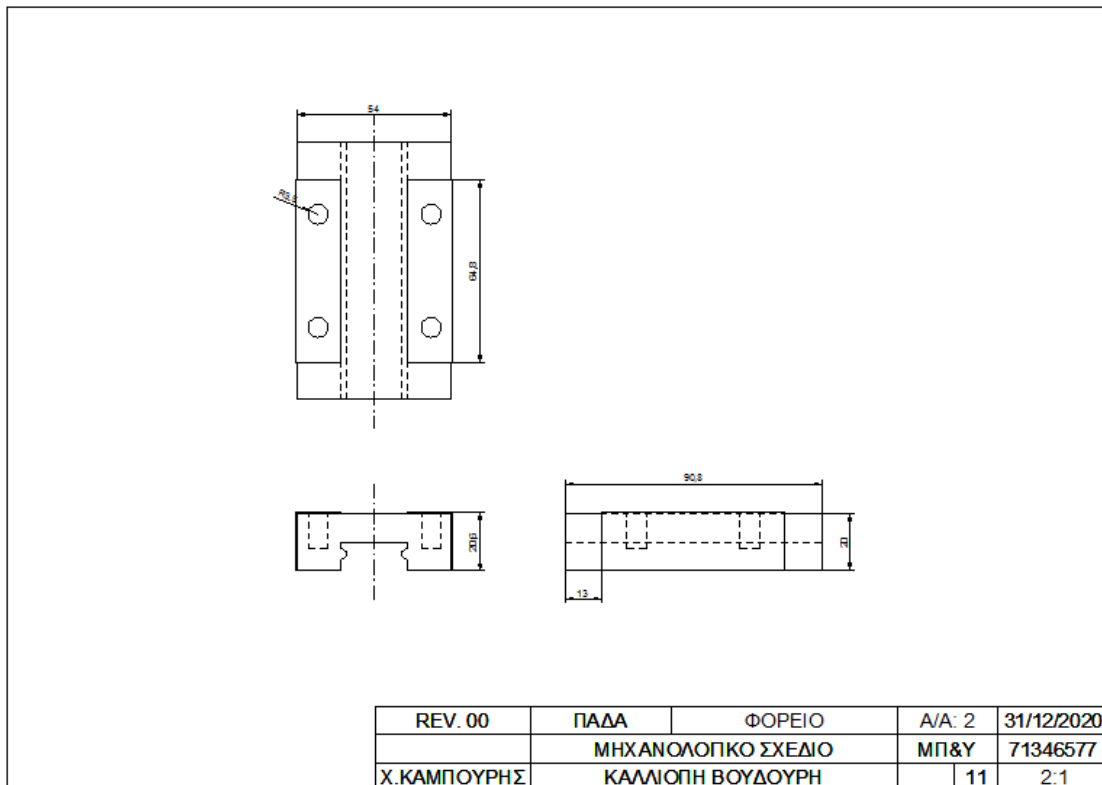
Εικόνα 1-38 Δισδιάστατο σχέδιο της βάσης του συστήματος κατεργασίας



Εικόνα 1-39 Δισδιάστατο σχέδιο από τμήμα υποστήριξης του κοχλία

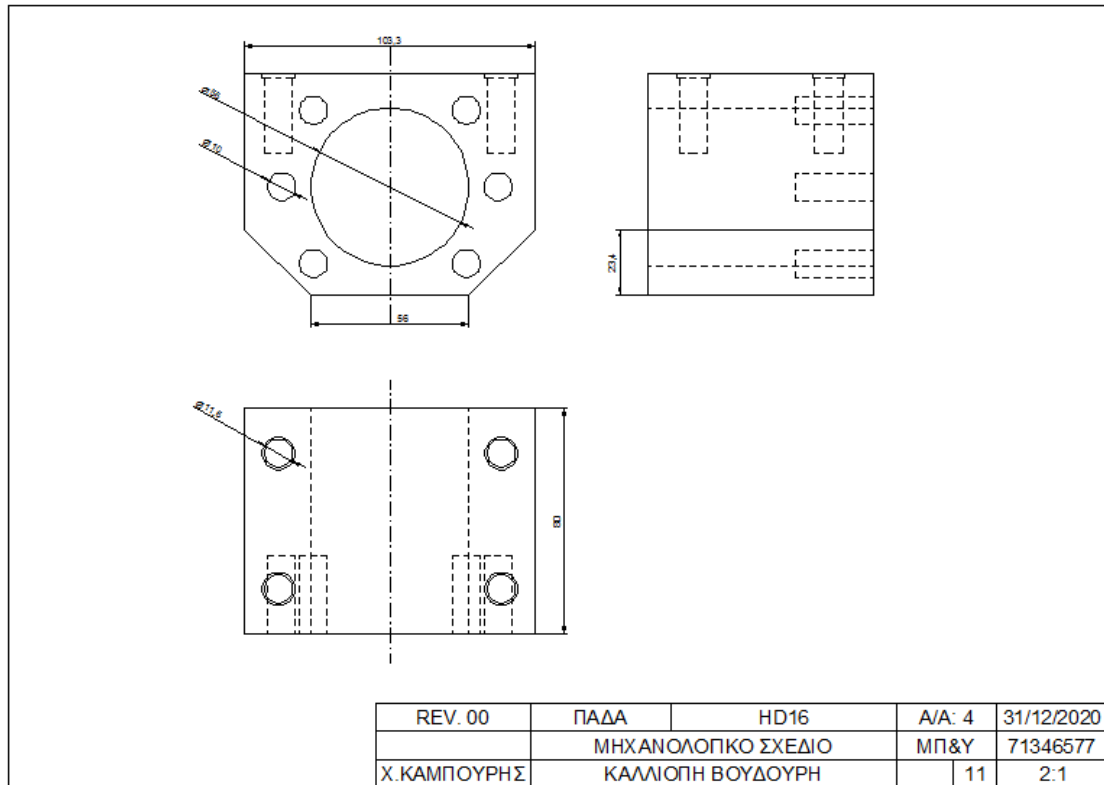


Εικόνα 1-40 Δισδιάστατο σχέδιο τμήματος υποστήριξης του κοχλία

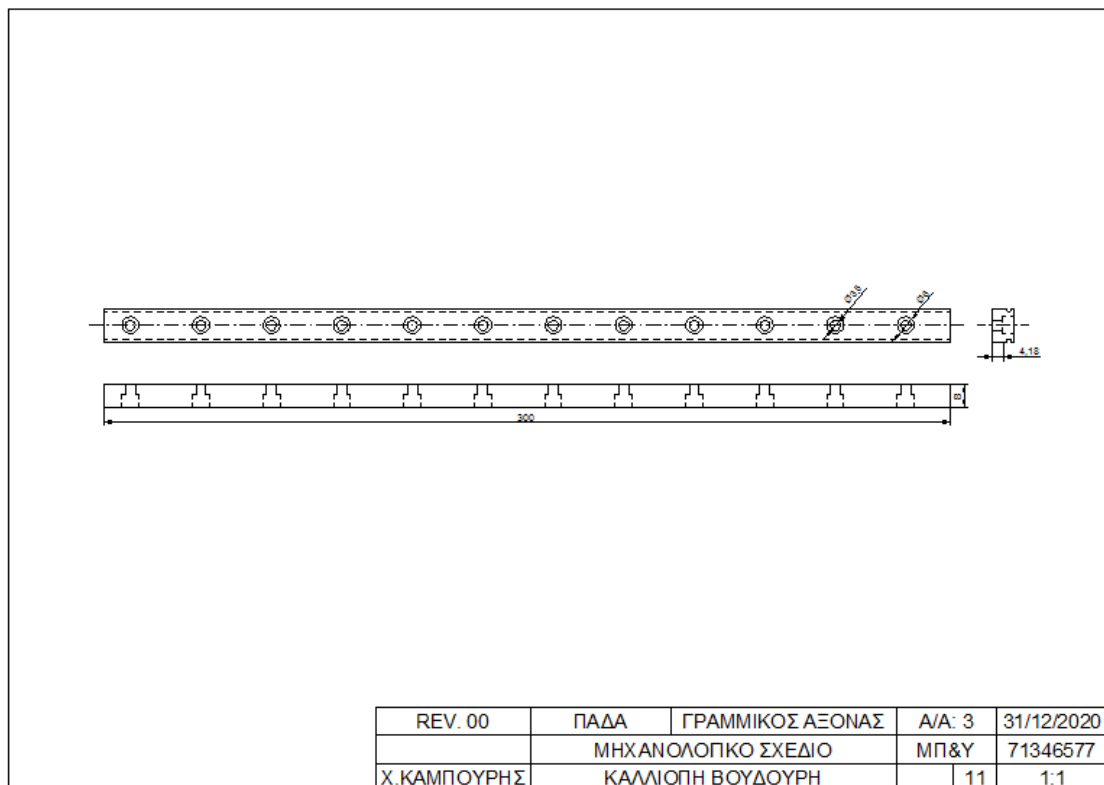


Εικόνα 1-41 Δισδιάστατο σχέδιο ενός φορέα





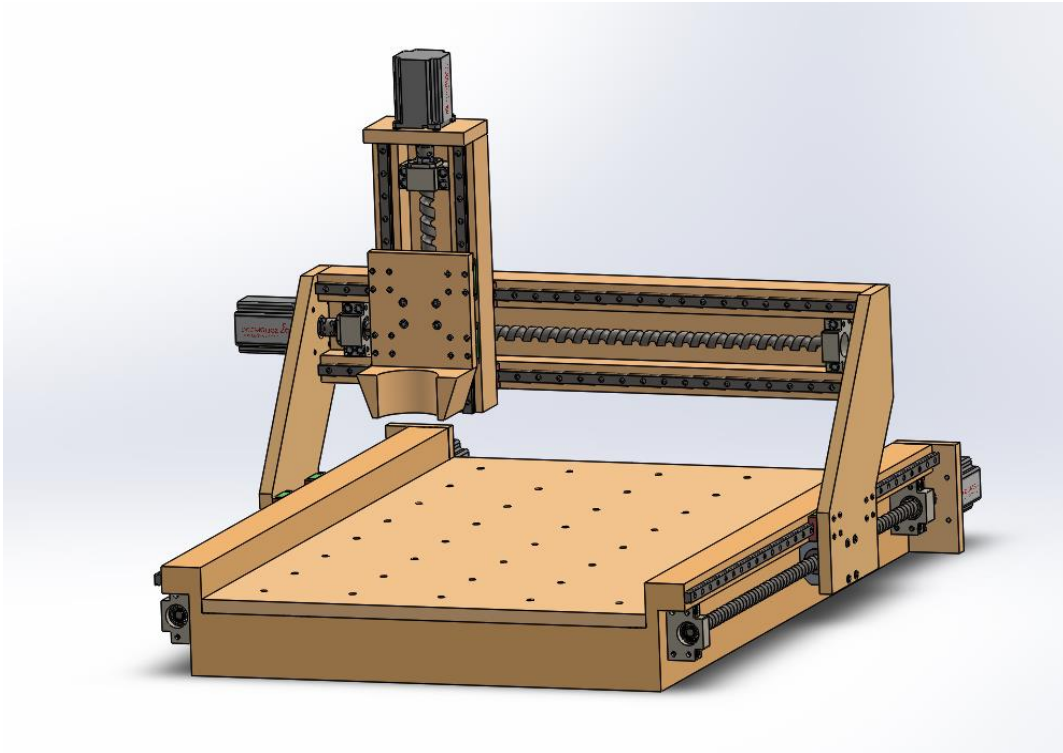
Εικόνα 1-42 Δισδιάστατο σχέδιο της φωλιάς του κοχλίου



Εικόνα 1-43 Δισδιάστατο σχέδιο ενός γραμμικού άξονα

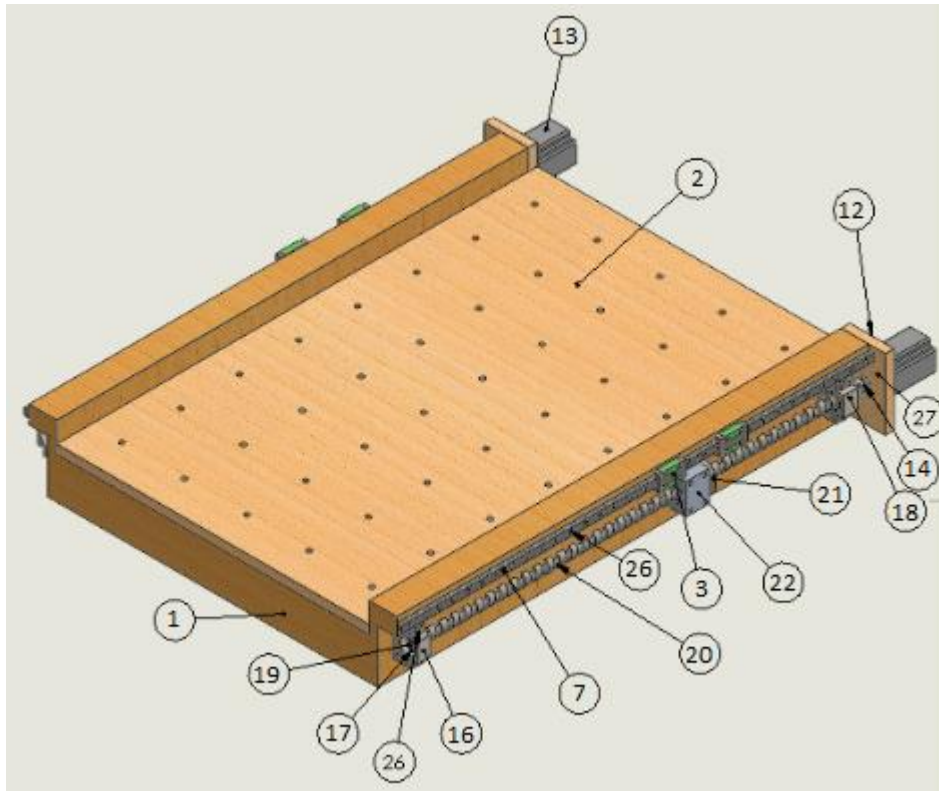
#### 1.5.4 Σχεδίαση του συστήματος κατεργασίας με το λογισμικό SOLIDWORKS

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί αναλυτικά ο σχεδιασμός του συστήματος κατεργασίας με τη χρήση του λογισμικού SOLIDWORKS. Θα δοθεί μια πιο λεπτομερής και ρεαλιστική εκδοχή του σχεδιασμού του συστήματος καθώς η συγκεκριμένη σχεδιαστική πλατφόρμα μας δίνει εύκολα και γρήγορα τη δυνατότητα να εφαρμόσουμε, το υλικό ή τα υλικά από τα οποία αποτελούνται, τα αντικείμενα που σχεδιάζουμε. Παρακάτω φαίνεται το σύστημα κατεργασίας συναρμολογημένο, τα μόνα κομμάτια που λείπουν από το σχέδιο είναι το Router και οι καλωδιοφορείς.



**Εικόνα 1-44 Συναρμολογημένη άποψη του συστήματος κατεργασίας στο SOLIDWORKS**

Το πρώτο τμήμα του συστήματος κατεργασίας που θα τεθεί προς ανάλυση είναι η βάση του συστήματος η οποία υποστηρίζει την κίνηση του y άξονα. Ακολουθεί η παρουσίαση των κομματιών που την αποτελούν.

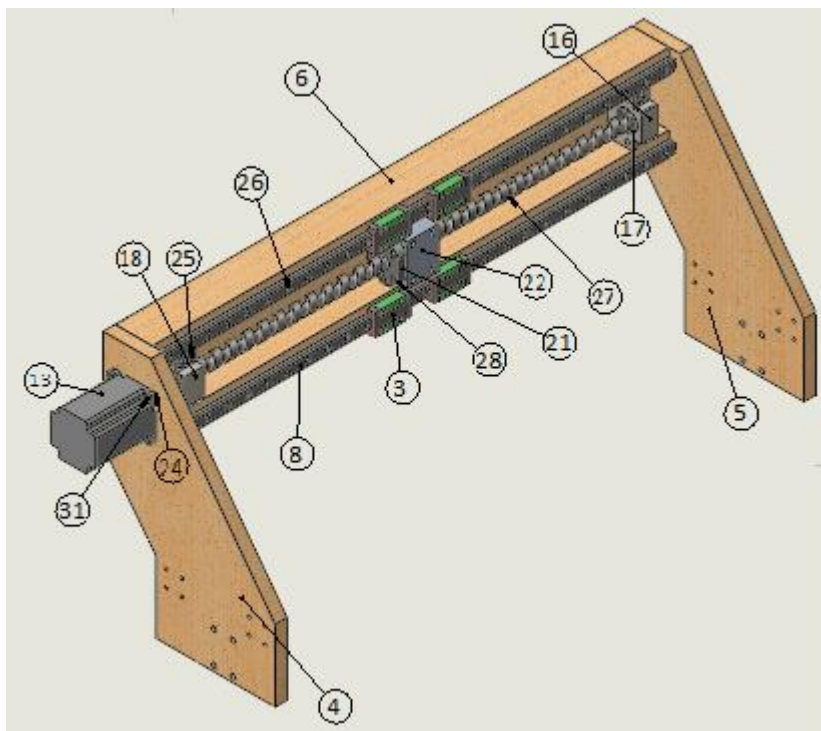


Εικόνα 1-45 Βάση και κρεβάτι συστήματος κατεργασίας

Αρίθμηση κομματιών	Ονομασία κομματιών	Πλήθος κομματιών
1	Βάση σκελετού	1
2	Κρεβάτι, επιφάνεια πρόσδεσης τεμαχίων	1
3	Φορείο	4
7	Γραμμικός άξονας για το επίπεδο y	2
12	Κομμάτι συγκράτησης βηματικού κινητήρα του y άξονα	2
13	Βηματικός κινητήρας Nema 23 του y άξονα	2
14	Συνδέτης (coupler RM1605)	2
15	Παξιμάδι (από το set του κοχλία)	2
16	Δευτερεύον στήριγμα κοχλία (BF12)	2
17	Ρουλεμάν	6
18	Πρωτεύον στήριγμα κοχλία (BK12)	2
19	Ασφάλεια κοχλία	2
20	Κοχλίας y άξονα	2
21	Περικόχλιο y άξονα (SFU1605)	2
22	Φωλιά περικοχλίου (HD16)	2
24	Ροδέλα μεταλλική για τη σταθεροποίηση του κινητήρα	16
25	Βίδες για τη σταθεροποίηση των στηριγμάτων του κοχλία	12
26	Βίδες σταθεροποίησης γραμμικού άξονα y	64
28	Βίδες σύνδεσης περικοχλίου με τη φωλιά του	12
29	Βίδες για την πρόσδεση στα φορεία	16
30	Τερματικοί διακόπτες	2
31	Βίδες σταθεροποίησης κινητήρα	8

Πίνακας 1- 2 Κατάλογος κομματιών της βάσης του συστήματος κατεργασίας (BOM)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ολόκληρος ο άξονας x ή αλλιώς η γέφυρα του συστήματος κατεργασίας.

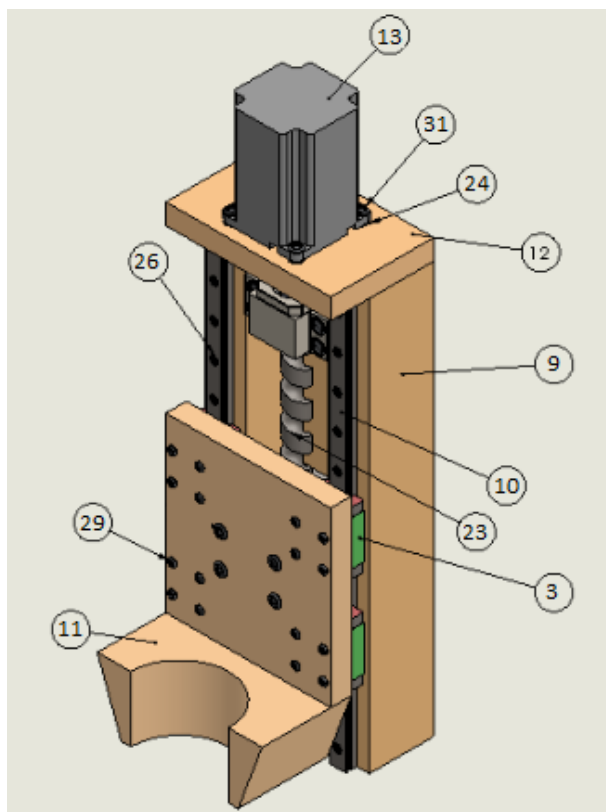


Εικόνα 1-46 X άξονας και πλάγιες πλευρές σύνδεσης με τη βάση

Αρίθμηση κομματιών	Ονομασία κομματιών	Πλήθος κομματιών
3	Φορείο	4
4	Αριστερή πλευρά στήριξης	1
5	Δεξιά πλευρά στήριξης	1
6	Τραβέρσα X άξονα	1
8	Γραμμικός άξονας για το επίπεδο x	2
13	Βηματικός κινητήρας Nema 23 του x άξονα	1
14	Συνδέτης (coupler RM1605)	1
15	Παξιμάδι	1
16	Δευτερέων στήριγμα κοχλία (BF12)	1
17	Ρουλεμάν	3
18	Πρωτεύων στήριγμα κοχλία (BK12)	1
19	Ασφάλεια κοχλία	1
21	Περικόχλιο x άξονα (SFU1605)	1
22	Φωλιά περικοχλίου (HD16)	1
24	Ροδέλες	8
25	Βίδες για τη σταθεροποίηση των στηριγμάτων του κοχλία	6
26	Βίδες σταθεροποίησης γραμμικού άξονα x	52
27	Κοχλίας x άξονα	1
28	Βίδες σύνδεσης περικοχλίου με τη φωλιά του	6
29	Βίδες για την πρόσδεση στα φορεία	16
30	Τερματικοί διακόπτες	2
31	Βίδες σταθεροποίησης κινητήρα	4

Πίνακας 1- 3 Κατάλογος κομματιών του x άξονα του συστήματος κατεργασίας

Ακολουθεί το συναρμολόγημα ολόκληρου του z άξονα.



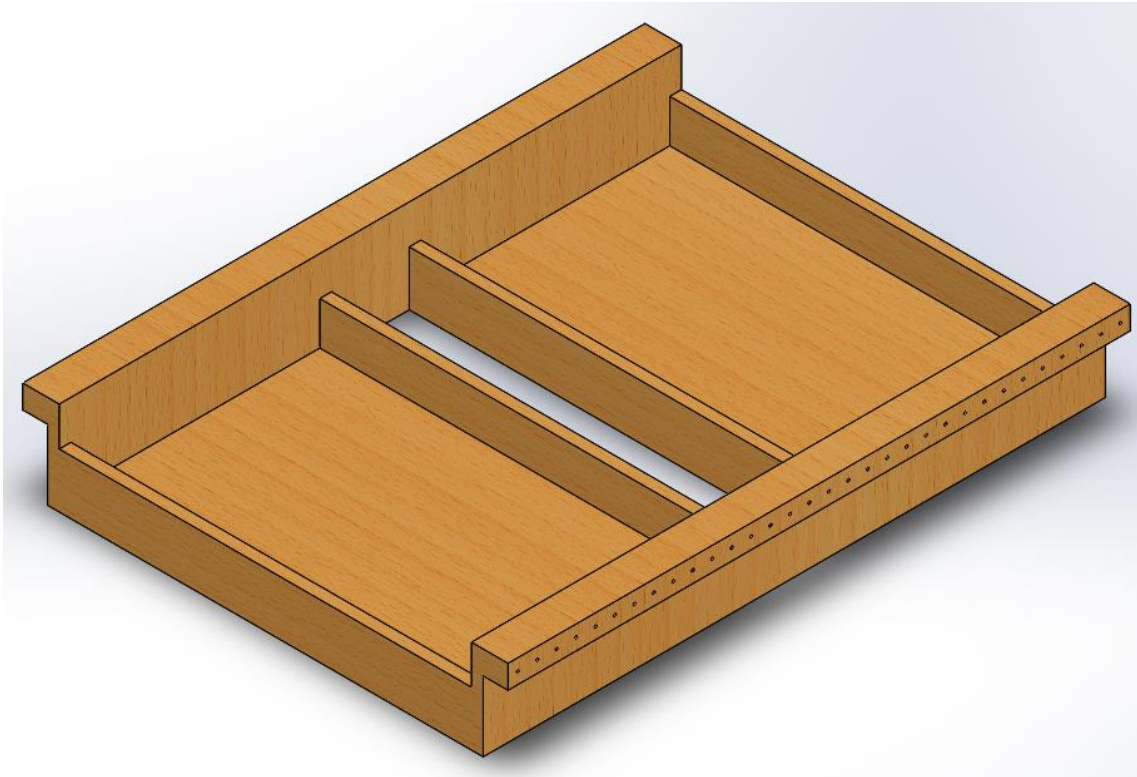
Εικόνα 1-47 Z άξονας

Αρίθμηση κομματιών	Ονομασία κομματιών	Πλήθος κομματιών
3	Φορείο	4
9	Τραβέρσα Z άξονα	1
10	Γραμμικός άξονας για το επίπεδο z	2
11	Βάση στήριξης του Router	1
12	Κομμάτι συγκράτησης βηματικού κινητήρα του z άξονα	1
13	Βηματικός κινητήρας Nema 23 του z άξονα	1
14	Συνδέτης (coupler RM1605)	1
15	Παξιμάδι	1
16	Δευτερεύων στήριγμα κοχλία (BF12)	1
17	Ρουλεμάν	3
18	Πρωτεύων στήριγμα κοχλία (BK12)	1
19	Ασφάλεια κοχλία	1
21	Περικόχλιο z άξονα (SFU1605)	1
22	Φωλιά περικοχλίου (HD16)	1
23	Κοχλίας z άξονα	1
24	Ροδέλες	8
25	Βίδες για τη σταθεροποίηση των στηριγμάτων του κοχλία	6
26	Βίδες σταθεροποίησης γραμμικού άξονα z	24
28	Βίδες σύνδεσης περικοχλίου με τη φωλιά του	6
29	Βίδες για τη πρόσδεση στα φορεία	16
30	Τερματικοί διακόπτες	2
31	Βίδες σταθεροποίησης κινητήρα	4

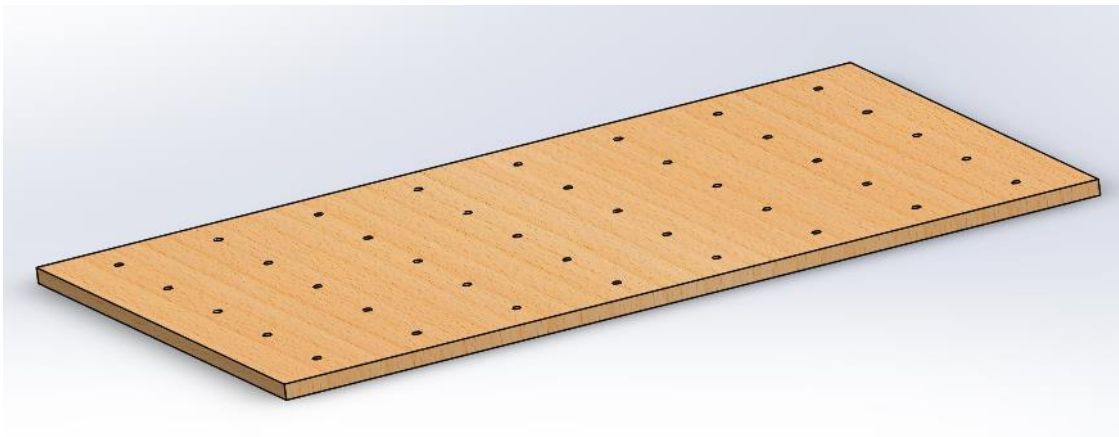
Πίνακας 1- 4 Κατάλογος εξαρτημάτων του z άξονα του συστήματος κατεργασίας

Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

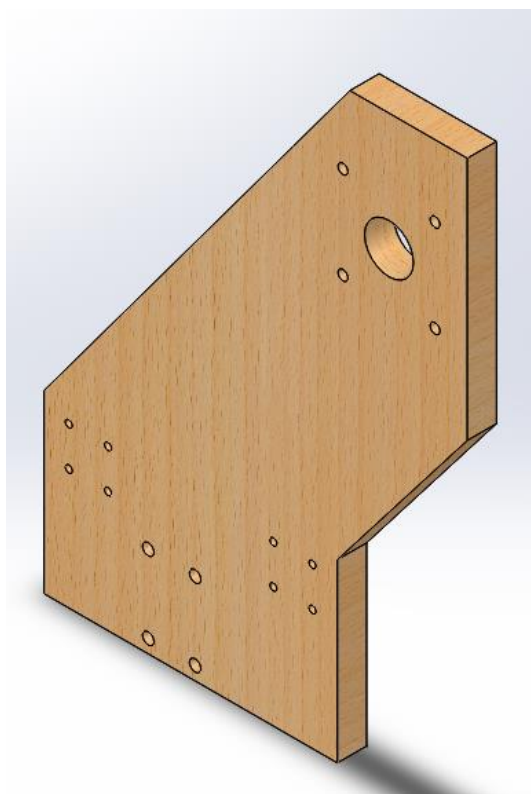
Εδώ αξίζει να δούμε τα μέρη του συστήματος από κοντά. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα επιμέρους εξαρτήματα και κομμάτια του συστήματος κατεργασίας όπως δημιουργήθηκαν προτού να συνδυαστούν στο Assembly και να δώσουν την τελική μορφή του συστήματος. Όλα τα σχέδια που ακολουθούν είναι της γραφούσης.



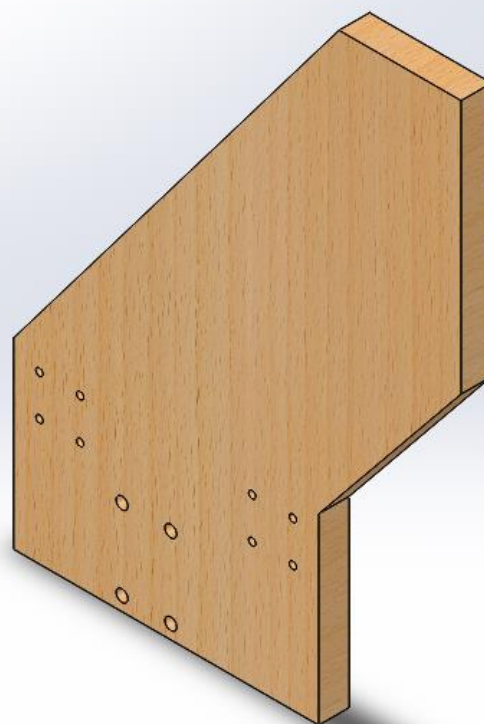
**Εικόνα 1-48 Η βάση του συστήματος, α.κ 1**



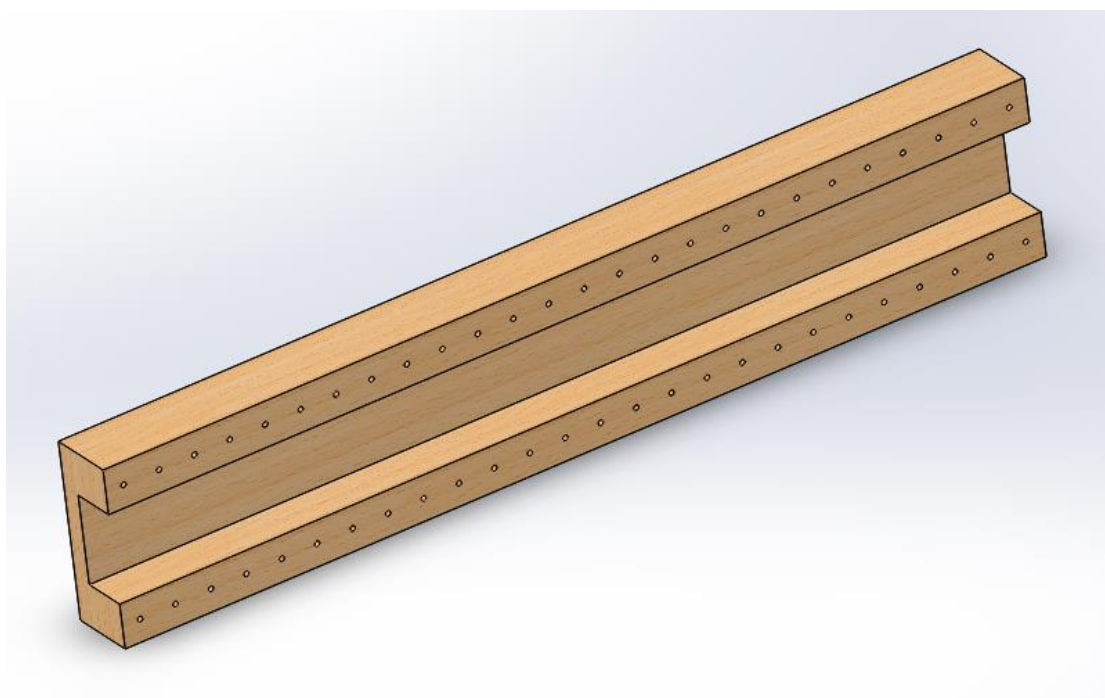
**Εικόνα 1-49 Το κρεβάτι του συστήματος (working bed), α.κ 2**



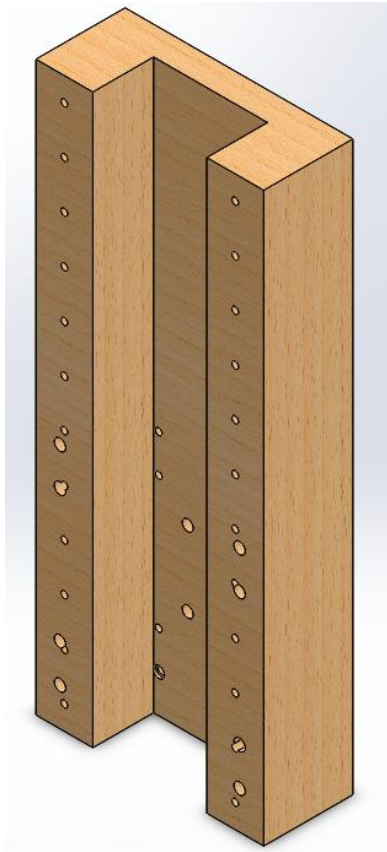
**Εικόνα 1-50** Αριστερό κομμάτι της γέφυρας, α.κ 4



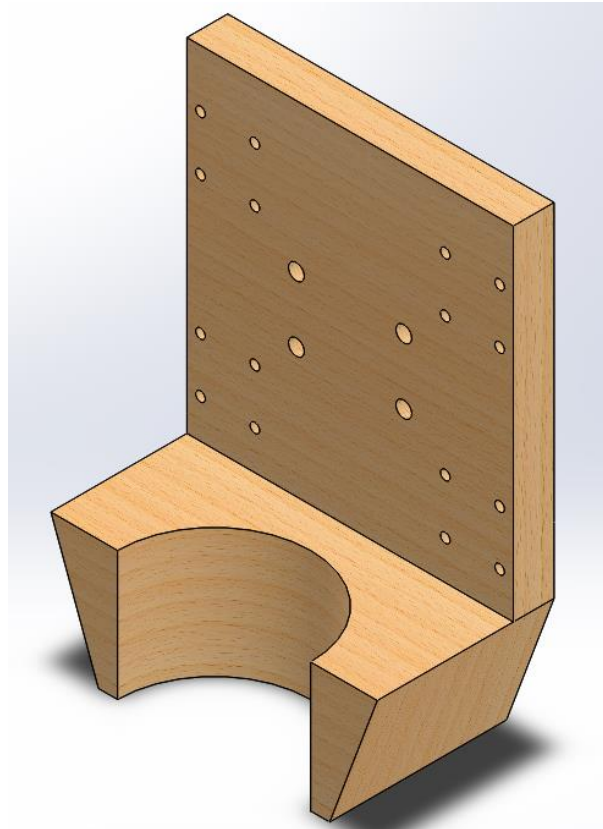
**Εικόνα 1-51** Δεξί κομμάτι της γέφυρας, α.κ 5



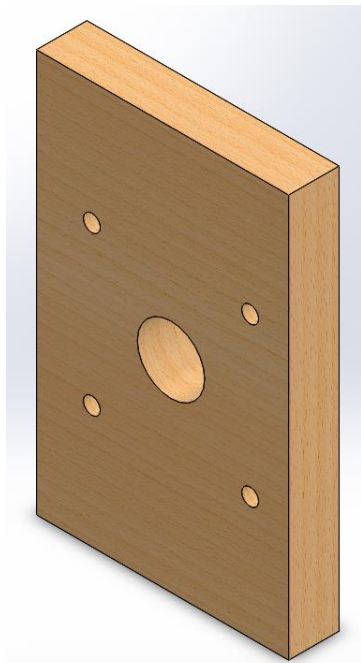
**Εικόνα 1-52** Βασικό τμήμα της γέφυρας – τραβέρσα x άξονα, α.κ 6



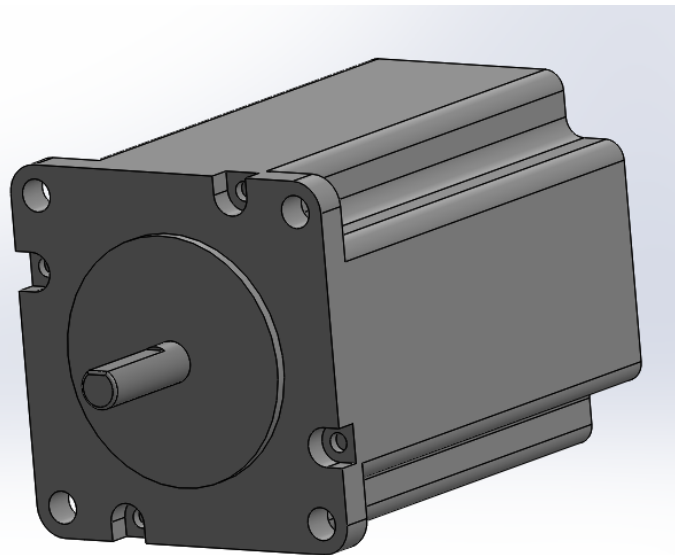
**Εικόνα 1-53** Τραβέρσα z άξονα, α.κ 9



**Εικόνα 1-54** Βάση στήριξης του Router στον z άξονα, α.κ 11

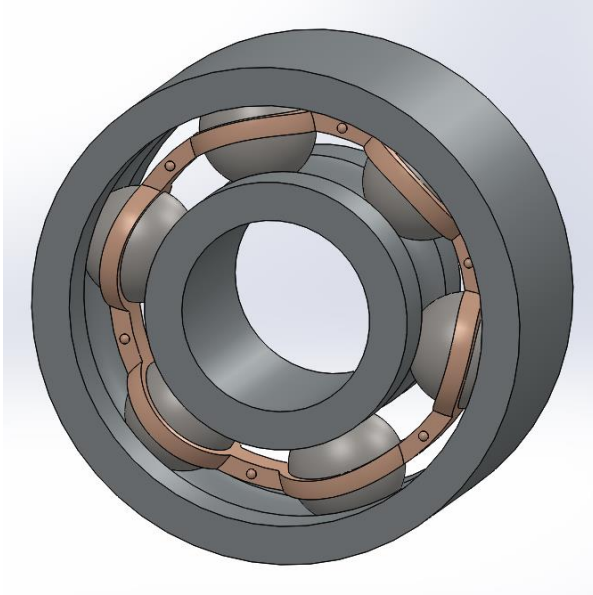


**Εικόνα 1-55** Κομμάτι στήριξης κινητήρα (για τη βάση), α.κ 12

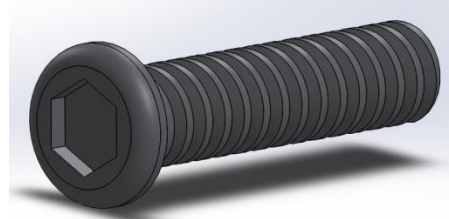


**Εικόνα 1-56** Βηματικός κινητήρας Nema 23, α.κ 13

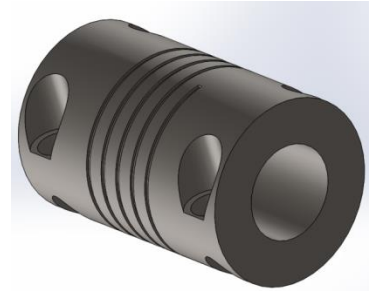




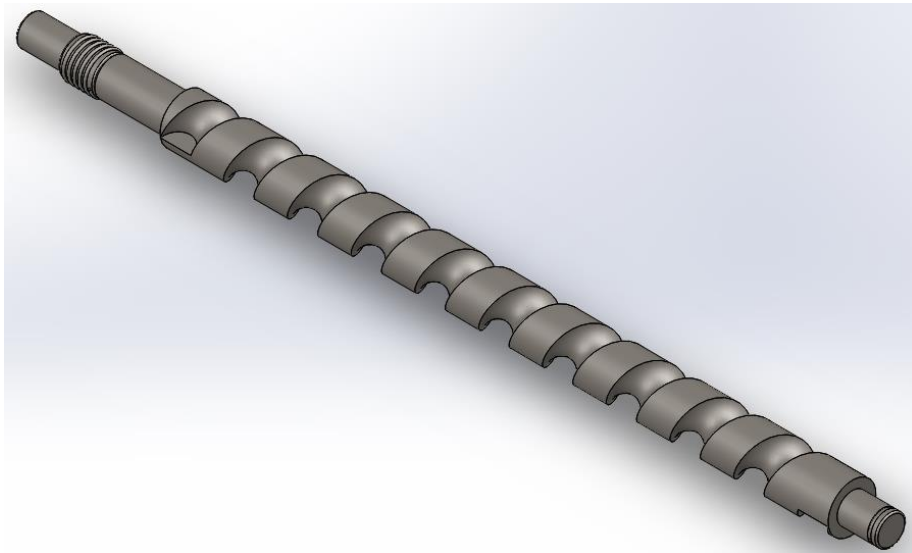
**Εικόνα 1-57 Ρουλεμάν, α.κ 17**



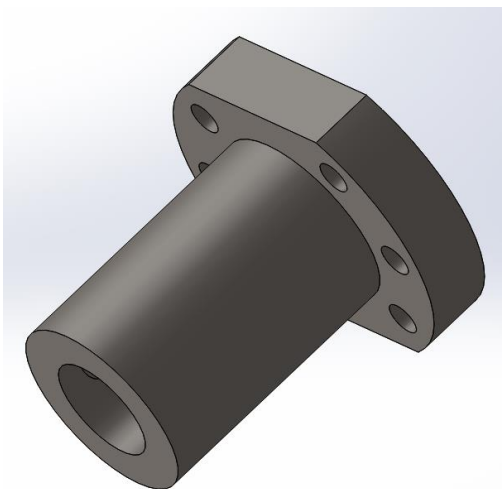
**Εικόνα 1-58 Βίδα άλεν  
στρογγυλοκέφαλη, α.κ 25**



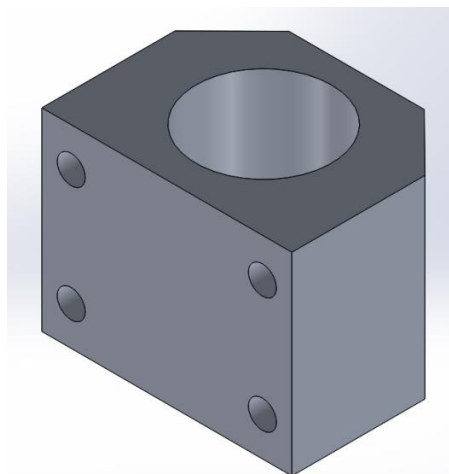
**Εικόνα 1-59 Coupler RM1605, α.κ 14**



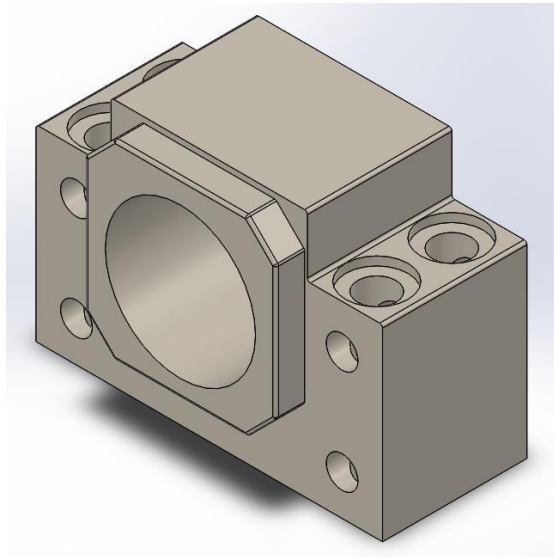
**Εικόνα 1-60 Γραμμικός κοχλίας-ατέρμονας, α.κ 23**



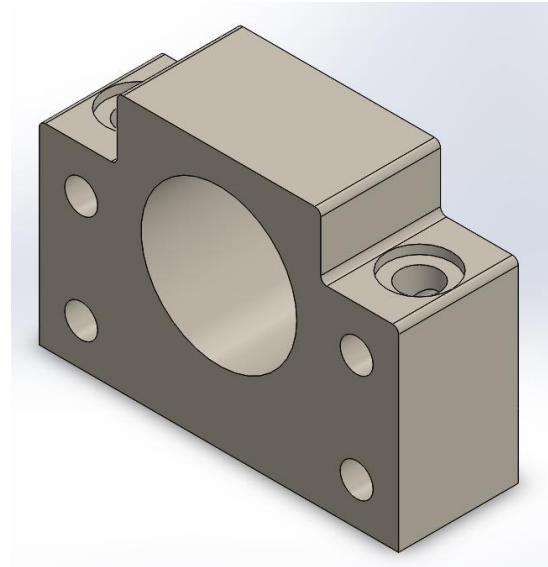
**Εικόνα 1-61 Περικόγλιο, α.κ 21**



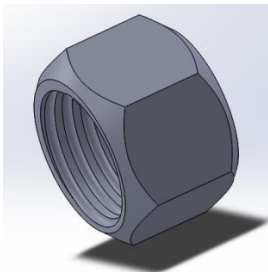
**Εικόνα 1-62 Φωλιά περικοχλίου HD16,  
α.κ 22**



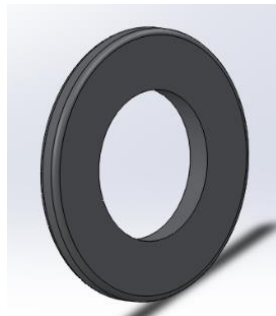
Εικόνα 1-63 BK12, α.κ 18



Εικόνα 1-64 Στήριγμα BF12, α.κ 16



Εικόνα 1-65 Παξιμάδι, α.κ 15



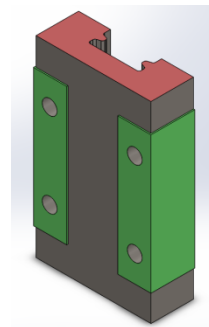
Εικόνα 1-66 Ροδέλα,  
α.κ 24



Εικόνα 1-67 Ασφάλεια, α.κ 19



Εικόνα 1-68 Γραμμικός άξονας, α.κ 10



Εικόνα 1-69 Φορείο, α.κ 3



Εικόνα 1-70 Τερματικός διακόπτης  
(Limit Switch), α.κ 30

## Κεφάλαιο 2 – Ανάλυση του συστήματος κατεργασίας με το SOLIDWORKS

### 2.1 Εισαγωγή

Το SOLIDWORKS [8] είναι ένα πολύ δυνατό λογισμικό σχεδίασης και διαθέτει πολλά υποπρογράμματα τα οποία διευκολύνουν τη διαδικασία της μελέτης ενός έργου. Ένα από αυτά τα υποπρογράμματα είναι το SOLIDWORKS Simulation. Το συγκεκριμένο εργαλείο ανάλυσης σχεδιασμού χρησιμοποιεί μια αριθμητική τεχνική που ονομάζεται Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA).

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων [9],[10] είναι μια μαθηματική τεχνική επίλυσης προβλημάτων που περιγράφονται από διαφορικές εξισώσεις. Τα βασικά στάδια της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι:

1. Η προσομοίωση της κατασκευής, που θα τεθεί υπό μελέτη, με ένα σύνολο αντικειμένων που συνδέονται μεταξύ τους. Αυτό το στάδιο αναφέρεται και ως στάδιο διακριτοποίησης.
2. Αναγνώριση και προσδιορισμός των άγνωστων μετατοπίσεων που θα επηρεάσουν τη συμπεριφορά της κατασκευής.
3. Η εξαγωγή των εξισώσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες μετατοπίσεις των στοιχείων της κατασκευής με βάση τις εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτήν και η επίλυση τους.
4. Ο υπολογισμός των εσωτερικών κατανομών των τάσεων στα στοιχεία της κατασκευής για γνωστές μετατοπίσεις.
5. Τέλος, η επεξήγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Γενικότερα υπάρχουν και άλλες αριθμητικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση συστημάτων, όμως η FEA είναι η πιο διαδεδομένη.

### 2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων και SOLIDWORKS

Η διαδικασία ανάλυσης ενός γεωμετρικού μοντέλου γίνεται πολύ εύκολη όταν ένα σχεδιαστικό λογισμικό, όπως το SOLIDWORKS, συνδυάζεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό συμβαίνει καθώς όλη η διαδικασία της αριθμητικής αποτύπωσης του προβλήματος και η επίλυση του γίνονται με ελάχιστη επέμβαση από μέρος του χρήστη η οποία στοχεύει κυρίως στην επιλογή των κρίσιμων παραγόντων και παραμέτρων (π.χ μέγεθος και αριθμός τριγώνων, τοπικές πυκνώσεις / αραιώσεις, αριθμός βημάτων ανάλυσης κ.τ.λ).

Για να μπορέσει το λογισμικό να μας δώσει αποτελέσματα για την ανάλυση ενός αντικειμένου, πρέπει πρώτα να ορίσουμε το αντικείμενο αυτό, το υλικό του και να προσδιορίσουμε την περιπλοκότητα του προβλήματος προς επίλυση. Με άλλα λόγια, πρέπει να περιγράψουμε στο λογισμικό ποιες είναι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες θα δοκιμάσουμε την αντοχή του αντικειμένου προς ανάλυση. Τα βήματα είναι τα εξής:

1. Προετοιμασία του γεωμετρικού μοντέλου. Για να ξεκινήσει μια ανάλυση απαραίτητο είναι να δημιουργηθεί πλήρες τρισδιάστατο σχέδιο του αντικειμένου που θα αναλυθεί (γεωμετρικό μοντέλο). Αυτό το σχέδιο πρέπει να είναι κατασκευάσιμο (manifold). Για να καταστεί δυνατή η ανάλυση ενός γεωμετρικού μοντέλου πρέπει απαραίτητως να είναι δυνατή η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Το

SOLIDWORKS Simulation χρησιμοποιεί πλέγμα με τετραεδρικά (quad) στοιχεία. Πολλές φορές για να δημιουργηθεί σωστό πλέγμα πρέπει να γίνουν μερικές μετατροπές στο γεωμετρικό μοντέλο. Κάποιες φορές πρέπει να απλοποιηθούν μερικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Δηλαδή πρέπει να ακυρωθούν ή να αφαιρεθούν κάποια τμήματα του γεωμετρικού μοντέλου που δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία για την ανάλυση. Άλλες φορές πρέπει να εξιδανικευτεί κάποια περιοχή του γεωμετρικού μοντέλου, δηλαδή να γίνουν αλλαγές στη γεωμετρία του, πχ αντικατάσταση μιας επιφάνειας.

2. Προεπεξεργασία. Σε αυτό το βήμα πρέπει να ορίσουμε τον τύπο της ανάλυσης που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε στο αντικείμενο μας. Έπειτα επιβεβαιώνουμε πως όλα τα τμήματα του γεωμετρικού μας μοντέλου διαθέτουν τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται. Εδώ να σημειωθεί πως εάν κάποιο υλικό δεν εμπεριέχεται στις βιβλιοθήκες του SOLIDWORKS, το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας νέων υλικών και την επεξεργασία ήδη υπαρχόντων υλικών. Κατόπιν θέτουμε τις συνοριακές (boundary) συνθήκες του προβλήματος προς ανάλυση, δηλαδή ορίζουμε τα σημεία, πάνω στο αντικείμενο της ανάλυσης, στα οποία θα ασκηθούν δυνάμεις καθώς και το μέγεθος και την φορά των δυνάμεων. Ακόμη ορίζουμε τα σημεία άκτωσης ή αλλιώς στήριξης του αντικειμένου στο χώρο. Τέλος αφού έχουμε δώσει στο SOLIDWORKS όλα τα παραπάνω εκείνο μας δημιουργεί το πολυπόθητο πλέγμα με τη πυκνότητα που του έχουμε ζητήσει, έτσι κατανέμονται οι κόμβοι και γεννιούνται τα πεπερασμένα στοιχεία. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα τόσο καλύτερη θα είναι και η ανάλυση στη συνέχεια.
3. Επίλυση. Σε αυτό το στάδιο το πρόγραμμα επιλύει όλες τις εξισώσεις που δημιούργησε για το πεδίο των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό το στάδιο μπορεί να διαρκέσει από μερικά λεπτά έως και αρκετή ώρα, ανάλογα με την πολυπλοκότητα, το μέγεθος και τη γεωμετρία του γεωμετρικού μοντέλου που αναλύεται.
4. Ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται επάνω στο αντικείμενο που αναλύθηκε με χρωματικό κώδικα ο οποίος επεξηγείται σε αντίστοιχη χρωματική κλίμακα. Ακόμα υπάρχουν και διαγράμματα τα οποία περιγράφουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ένας έμπειρος μηχανικός βασιζόμενος στις αναλύσεις αυτές μπορεί να αποφασίσει για το “Go / Non-go” του εκάστοτε γεωμετρικού μοντέλου.

### 2.3 Η πρώτη στατική ανάλυση για το σύστημα κατεργασίας

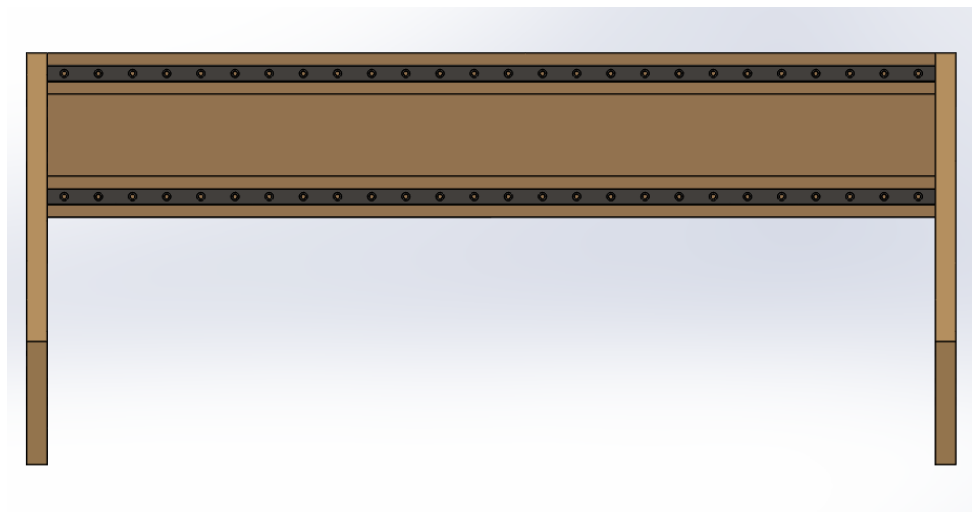
Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους το SOLIDWORKS είναι ένα αρκετά δυνατό λογισμικό και μπορεί να προσφέρει αρκετά αξιόπιστες και κοντά στη πραγματικότητα αναλύσεις.

Στο σύστημα κατεργασίας, εκτός από αυτά που κατασκευάστηκαν (custom) ιδίως για αυτό το σύστημα, χρησιμοποιήθηκαν εξαρτήματα και αντικείμενα τα οποία πωλούνται στην αγορά (off the shelf) και έχουν πιστοποίηση αντοχής. Για παράδειγμα ένας κατασκευαστής ρουλεμάν αυτοκινήτων μπορεί να πιστοποιήσει ότι αντέχουν βάρος αρκετών τόνων. Έτσι βασιζόμενοι στις προδιαγραφές των είδη υπαρχόντων υλικών δε χρειάζεται να πραγματοποιήσουμε αναλύσεις αντοχής προκειμένου να τα χρησιμοποιήσουμε αφού ο πιστοποιημένος κατασκευαστής μας βεβαιώνει ότι είναι κατάλληλα για το λόγο που τα θέλουμε. Αρκεί μονάχα να συμβουλευτούμε το φυλλάδιο του κατασκευαστή. Αυτό που είναι όμως απαραίτητο είναι να δοκιμάσουμε την αντοχή του συστήματος κατεργασίας (στο σύνολο του) στο πιο ευάλωτο τμήμα του ή σε αυτό που θα περιμέναμε να δούμε τις

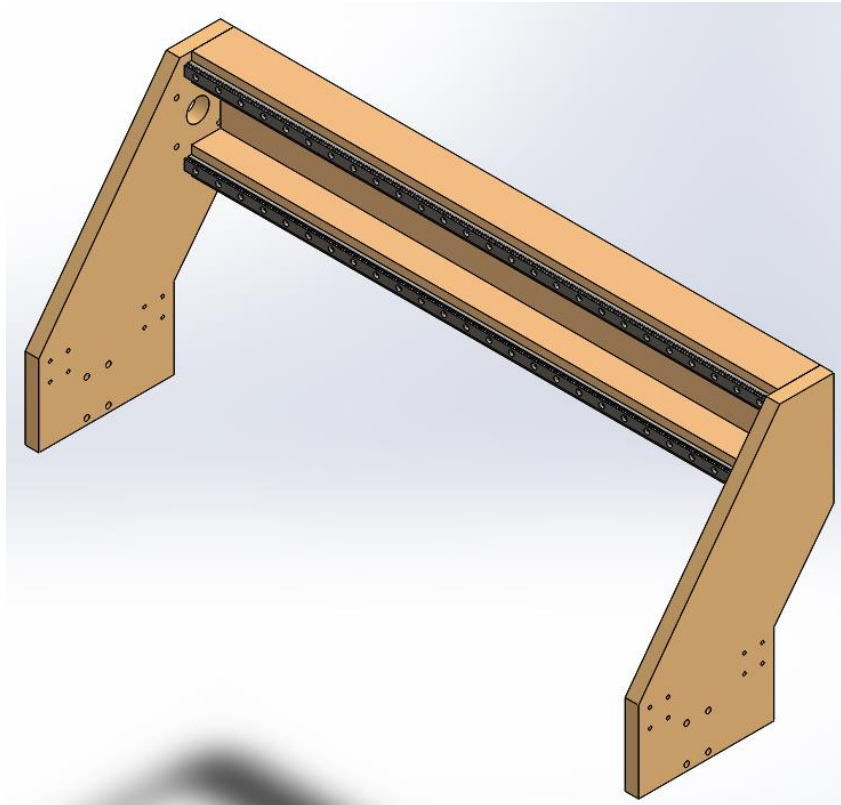
περισσότερες δυνάμεις. Παρατηρώντας το γεωμετρικό μοντέλο μπορούμε να καταλάβουμε ποιο κομμάτι του είναι εκείνο που καταπονείται περισσότερο κατά τη λειτουργία του. Στη περίπτωση λοιπόν του συστήματος κατεργασίας το πιο ευάλωτο τμήμα είναι η γέφυρα, δηλαδή τα πλάγια στηρίγματα και η τραβέρσα του x άξονα, που φέρει την κεφαλή επεξεργασίας. Έτσι για λόγους ασφαλείας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε αυτό το κομμάτι της κατασκευής ώστε να καθοριστεί το αν ο σχεδιασμός του συστήματος κατεργασίας θα ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για τις οποίες προορίζεται.

Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας την προετοιμασία της ανάλυσης απομονώθηκε από το τελικό Assembly αρχείο το τμήμα της γέφυρας και δημιουργήθηκε ένα δεύτερο αρχείο Assembly μόνο για τη γέφυρα. Παρακάτω στις εικόνες 2-1 και 2-2 φαίνεται το τμήμα της γέφυρας από το σύστημα κατεργασίας. Να σημειωθεί πώς οι σχέσεις (mates) των κομματιών από τα οποία αποτελείται το μοντέλο της γέφυρας είναι όλες ορισμένες όπως επίσης και τα υλικά (materials) από τα οποία αποτελούνται.

Το υλικό του ξύλου (σημύδα) που διέθετε το SOLIDWORKS, δεν ήταν διαθέσιμο για να χρησιμοποιηθεί σε αναλύσεις. Αυτό συμβαίνει με κάποια υλικά που διαθέτουν οι βιβλιοθήκες του SOLIDWORKS γιατί δεν είναι πλήρως ορισμένες οι ιδιότητες τους. Αν λοιπόν υπάρχει ανάγκη να χρησιμοποιηθεί ένα τέτοιο υλικό σε ανάλυση του SOLIDWORKS η λύση είναι να δημιουργηθεί ένα νέο υλικό. Αυτό που έγινε στην πράξη ήταν να αντιγραφεί το υλικό του ξύλου που υπήρχε στην βιβλιοθήκη του SOLIDWORKS, να αποθηκευτεί σε μια νέα βιβλιοθήκη που δημιουργήθηκε για αυτό το λόγο και ύστερα να γίνει επεξεργασία των ιδιοτήτων του υλικού αυτού. Μετά από αναζήτηση στο διαδίκτυο βρέθηκαν όλες οι ιδιότητες (χαρακτηριστικά) που χρειαζόταν το SOLIDWORKS (Elastic Modulus, Poisson's Ratio, Yield Strength κτλ) και δημιουργήθηκε ένα νέο υλικό, αντίστοιχο της ρωσικής σημύδας. Έπειτα εφαρμόστηκε το νέο υλικό σε όλα τα ξύλινα κομμάτια του μοντέλου και έτσι κατέστη δυνατή η διαδικασία ανάλυσης του. Το αποτέλεσμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

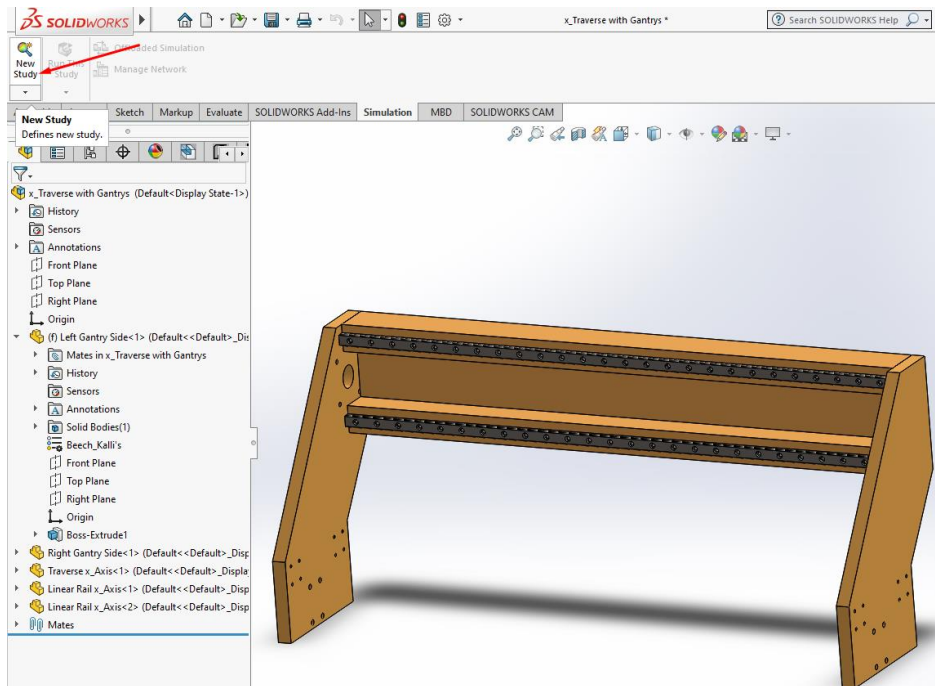


**Εικόνα 2-1 Μπροστινή άποψη της γέφυρας πριν την ανάλυση**



Εικόνα 2-2 Ισομετρική άποψη της γέφυρας πριν την ανάλυση

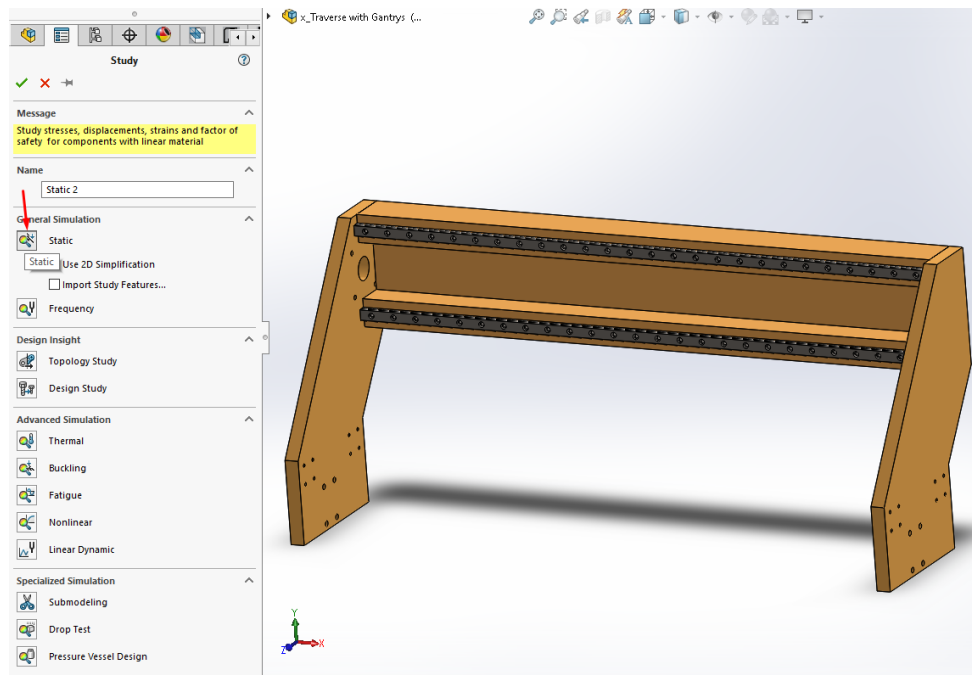
Για να ξεκινήσουμε μια ανάλυση στο SOLIDWORKS, αφού έχουμε ανοίξει το αρχείο με το γεωμετρικό μοντέλο που θέλουμε να αναλύσουμε, μεταβαίνουμε στην καρτέλα simulation. Έπειτα επιλέγουμε από το κεντρικό μενού New Study, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-3.



Εικόνα 2-3 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 1

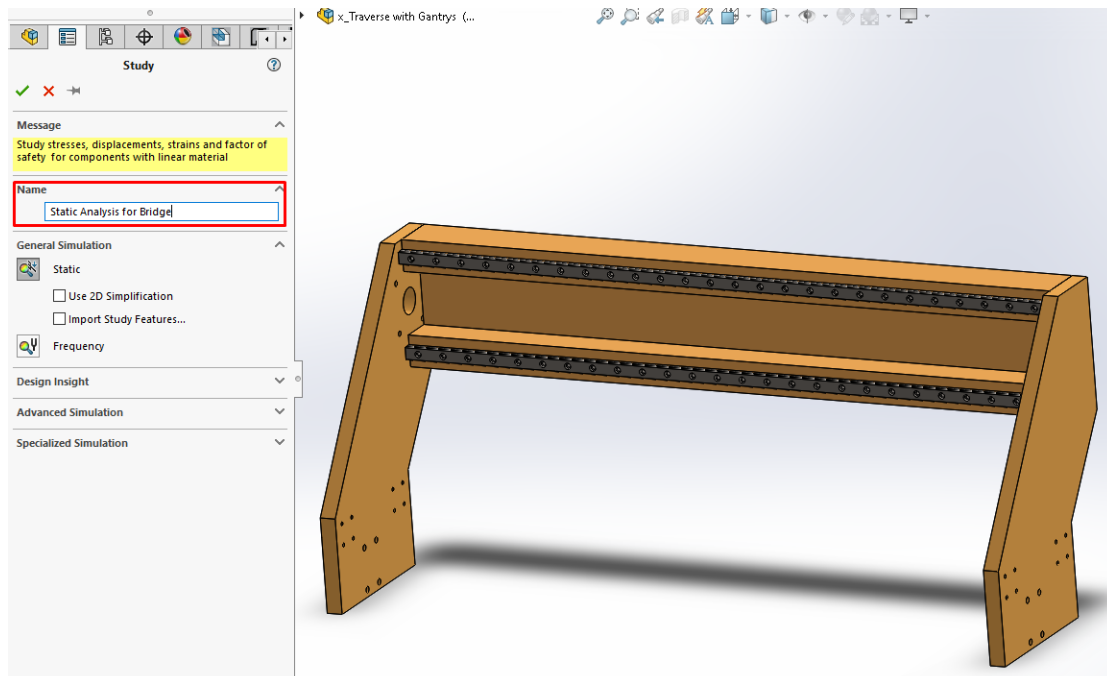
Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

Κατόπιν επιλέγουμε από το παράθυρο που ανοίγει στα αριστερά το είδος της ανάλυσης που θα εκτελέσουμε. Σε αυτό το παράδειγμα θα γίνει στατική ανάλυση.



Εικόνα 2-4 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 2

Αν θέλουμε μπορούμε να δώσουμε ένα όνομα στην ανάλυση που θα εκτελέσουμε.

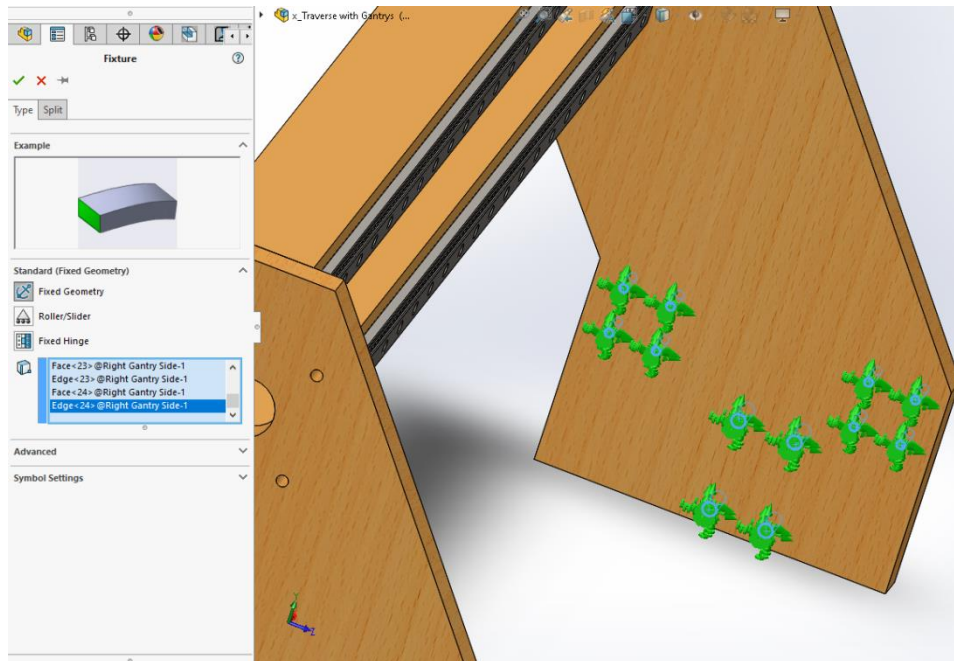


Εικόνα 2-5 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 3

Στη συνέχεια προετοιμάζουμε το περιβάλλον ορίζοντας τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα δοκιμαστεί το γεωμετρικό μοντέλο. Το πρώτο πράγμα που κάνουμε είναι να πούμε στο

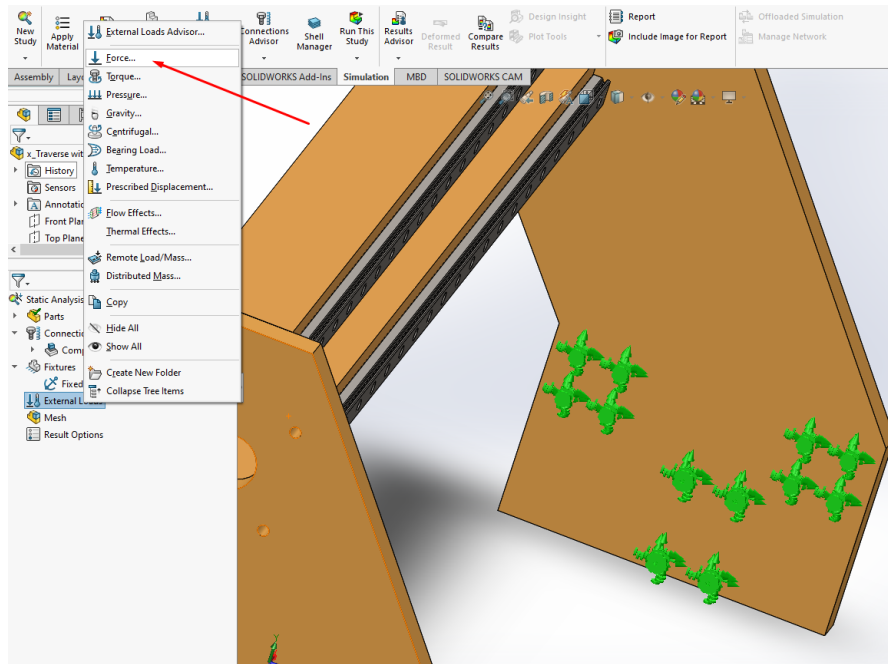
Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

SOLIDWORKS ποια είναι τα σημεία συγκράτησης του αντικειμένου. Στην εικόνα παρακάτω με πράσινο χρώμα φαίνονται τα σημεία συγκράτησης πάνω στο αντικείμενο και αριστερά φαίνεται η λίστα με τα ονόματα των επιφανειών αυτών.



Εικόνα 2-6 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 4

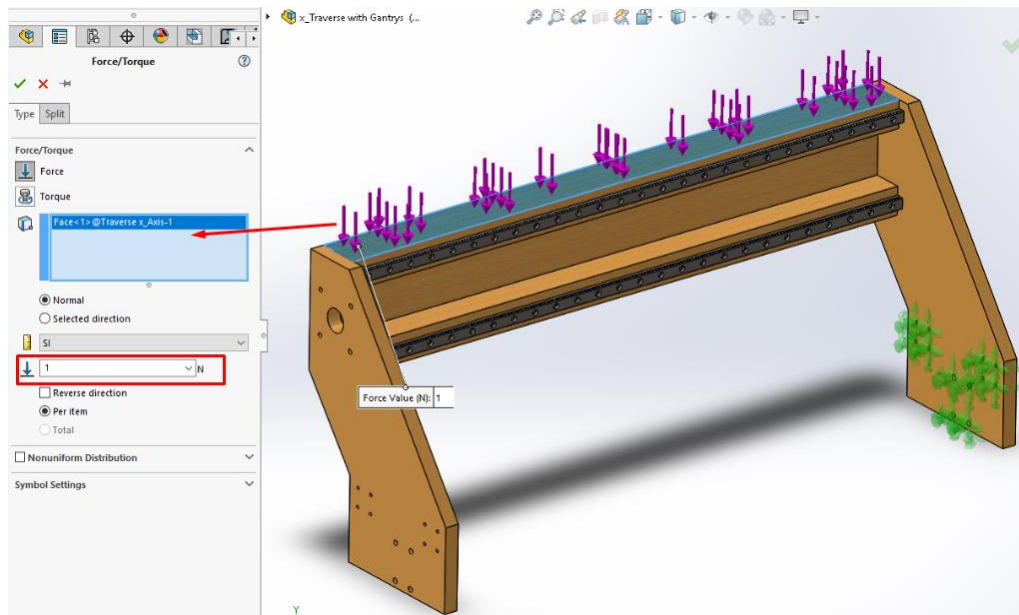
Αφού ορίσουμε τα σημεία πάκτωσης του αντικειμένου έρχεται η σειρά των εξωτερικών δυνάμεων. Ουσιαστικά θέτουμε την κατεύθυνση, το μέγεθος και το σημείο ή τα σημεία πάνω στο αντικείμενο, όπου θα ασκηθούν δυνάμεις. Παρακάτω φαίνεται η επιλογή και η εφαρμογή κάθετων δυνάμεων στο πάνω μέρος της γέφυρας.



Εικόνα 2-7 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 5

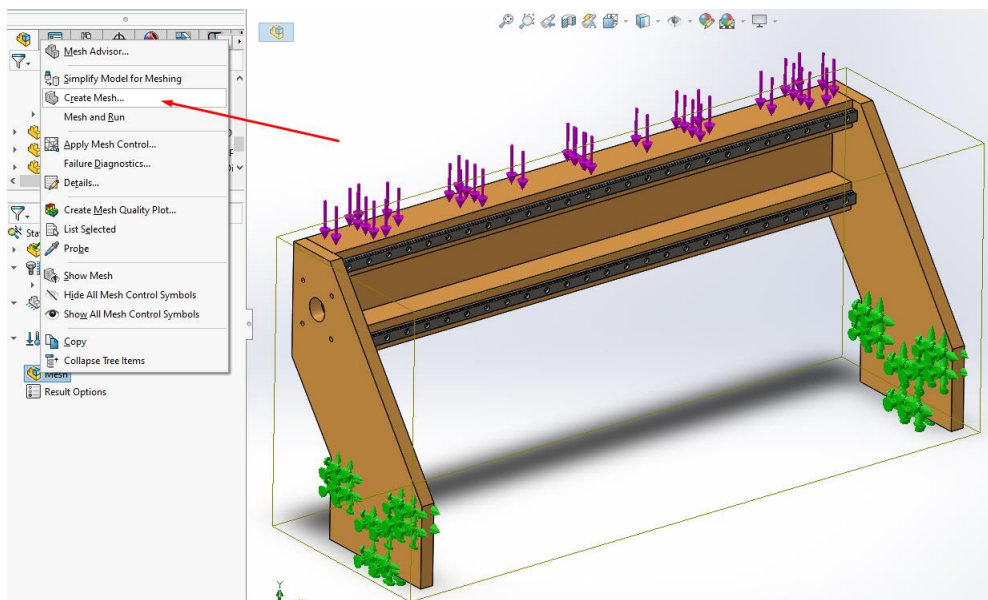


## Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή



Εικόνα 2-8 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 6

Στην εικόνα 2-8 βλέπουμε την εφαρμογή των εξωτερικών δυνάμεων στο αντικείμενο. Στα αριστερά, μέσα στο κόκκινο πλαίσιο είναι το σημείο από όπου μπορούμε να επιλέξουμε το μέγεθος των δυνάμεων. Οι τιμές των δυνάμεων μετριοούνται σε N (Newton). Σε αυτή την ανάλυση η τιμή που δόθηκε ήταν 20N τα οποία ισοδυναμούν με 2,039432426kg-f (kilogram-force, χιλιόγραμμα δύναμης). Στη συνέχεια, αφού πατήσουμε ok στο παράθυρο Force/Torque, κάνουμε δεξί κλικ στο Mesh και επιλέγουμε το Create Mesh.

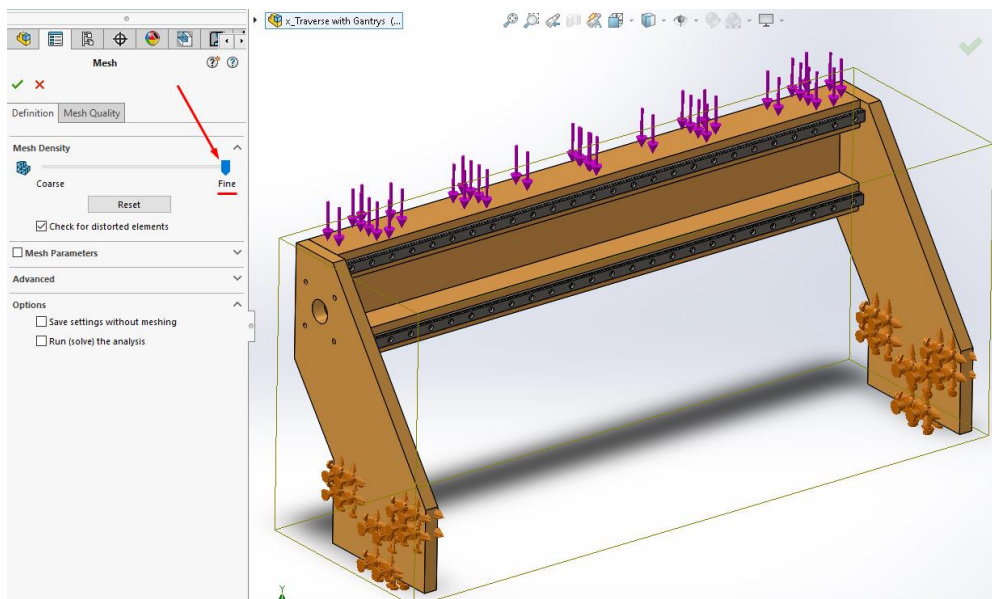


Εικόνα 2-9 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 7

Σε αυτό το βήμα δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε πόσο πυκνό ή όχι θέλουμε να είναι το πλέγμα που θα δημιουργήσει το SOLIDWORKS προκειμένου να προχωρήσει στην ανάλυση. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα τόσο καλύτερα και πιο κοντά στη πραγματικότητα αποτελέσματα θα πάρουμε στο τέλος της ανάλυσης. Βέβαια αυτό σημαίνει πως θα προκύψουν περισσότερες εξισώσεις προς επίλυση για το SOLIDWORKS άρα και

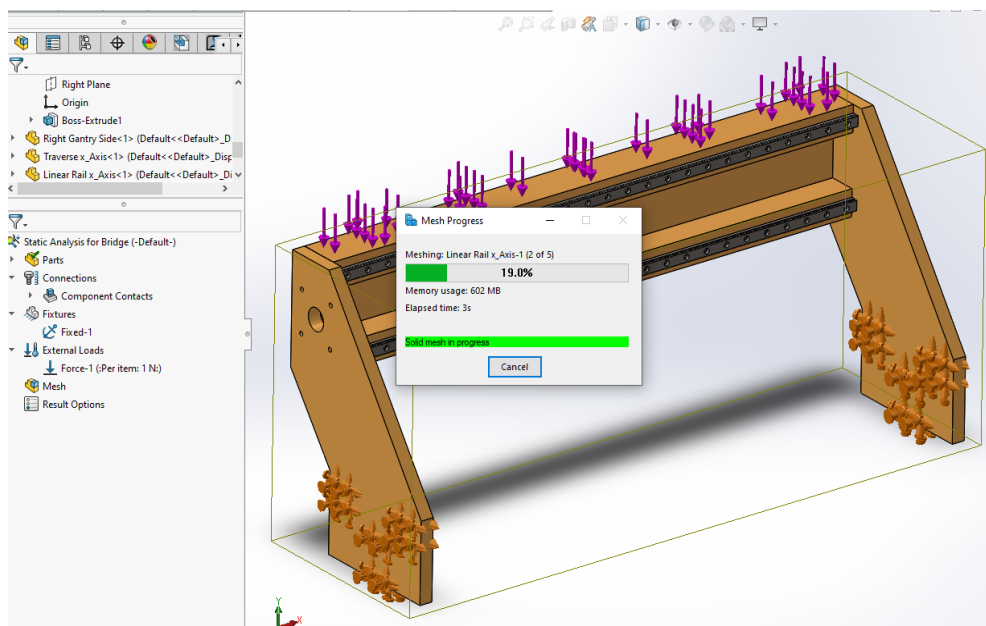
Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

περισσότερος χρόνος αναμονής για τη λήψη των αποτελεσμάτων και περισσότερη απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς. Η επιλογή της πυκνότητας του πλέγματος φαίνεται στην εικόνα 2-10.



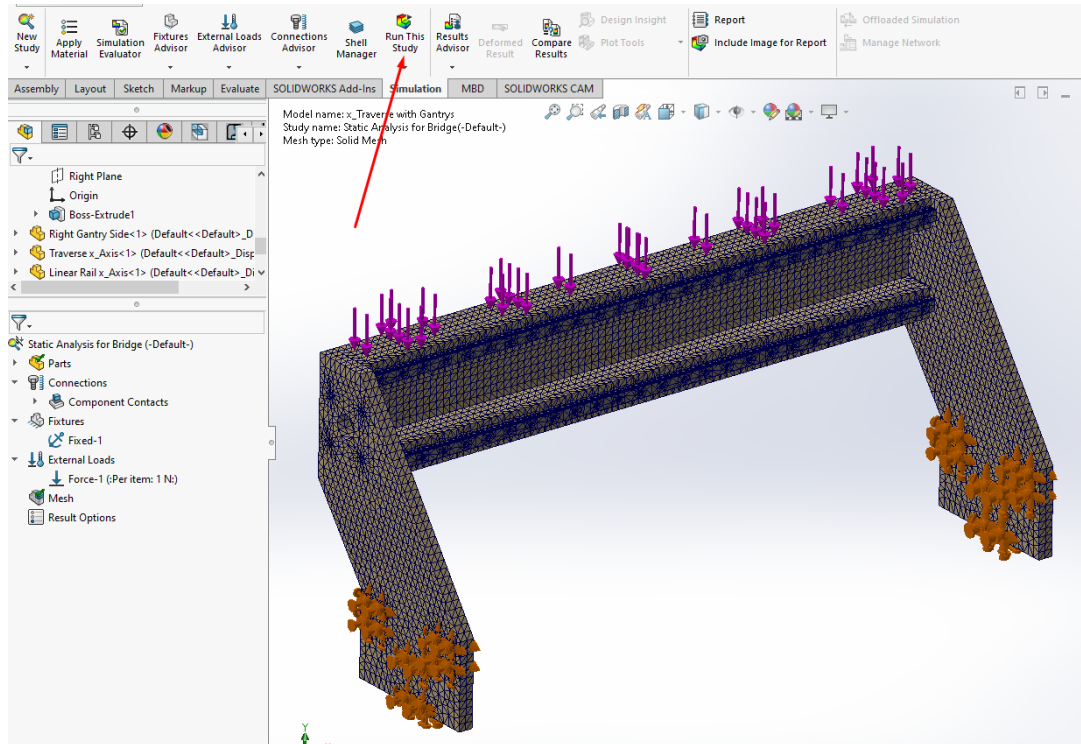
Εικόνα 2-10 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 8

Έπειτα από την επιλογή της πυκνότητας του πλέγματος το SOLIDWORKS ξεκινά να κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς ώστε να δημιουργήσει το επιθυμητό πλέγμα για τον υπολογισμό FEA (εικόνα 2-11). Σε αυτό το σημείο υπάρχει μια αναμονή ανάλογη του μεγέθους του αντικειμένου που πρέπει να καλυφτεί και της πυκνότητας του πλέγματος. Μόλις τελειώσει αυτό το στάδιο, το γεωμετρικό μοντέλο θα είναι καλυμμένο από το πλέγμα (εικόνα 2-12).



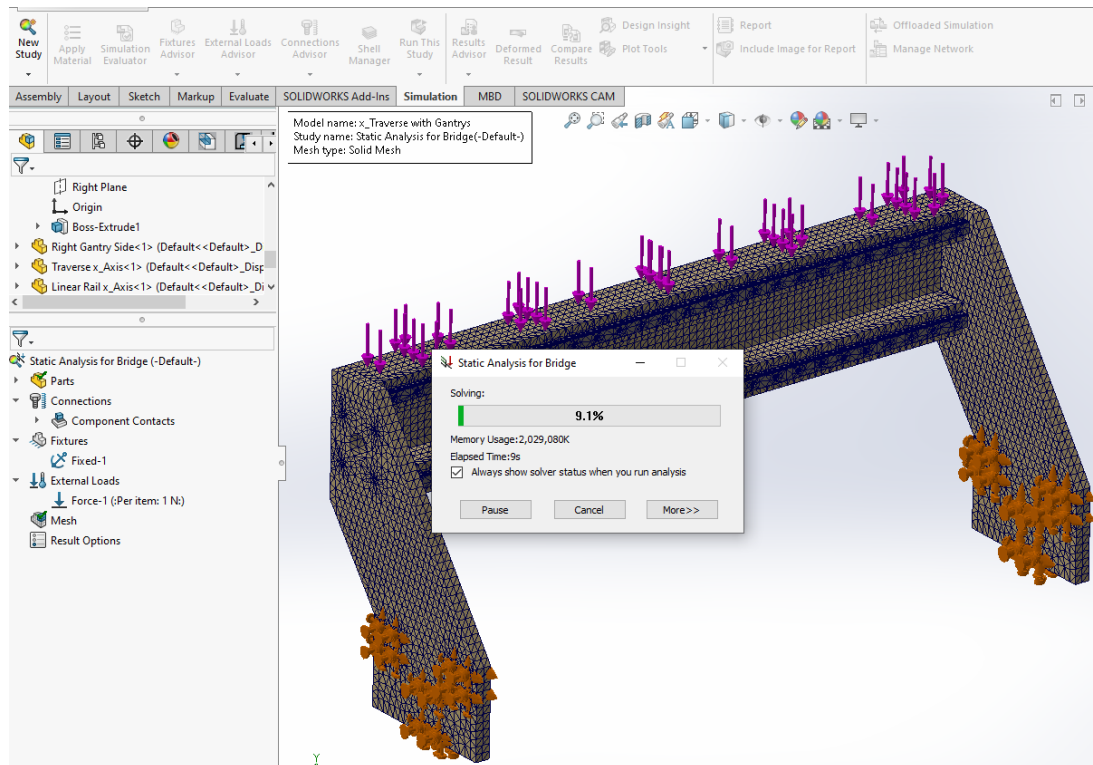
Εικόνα 2-11 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 9

## Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

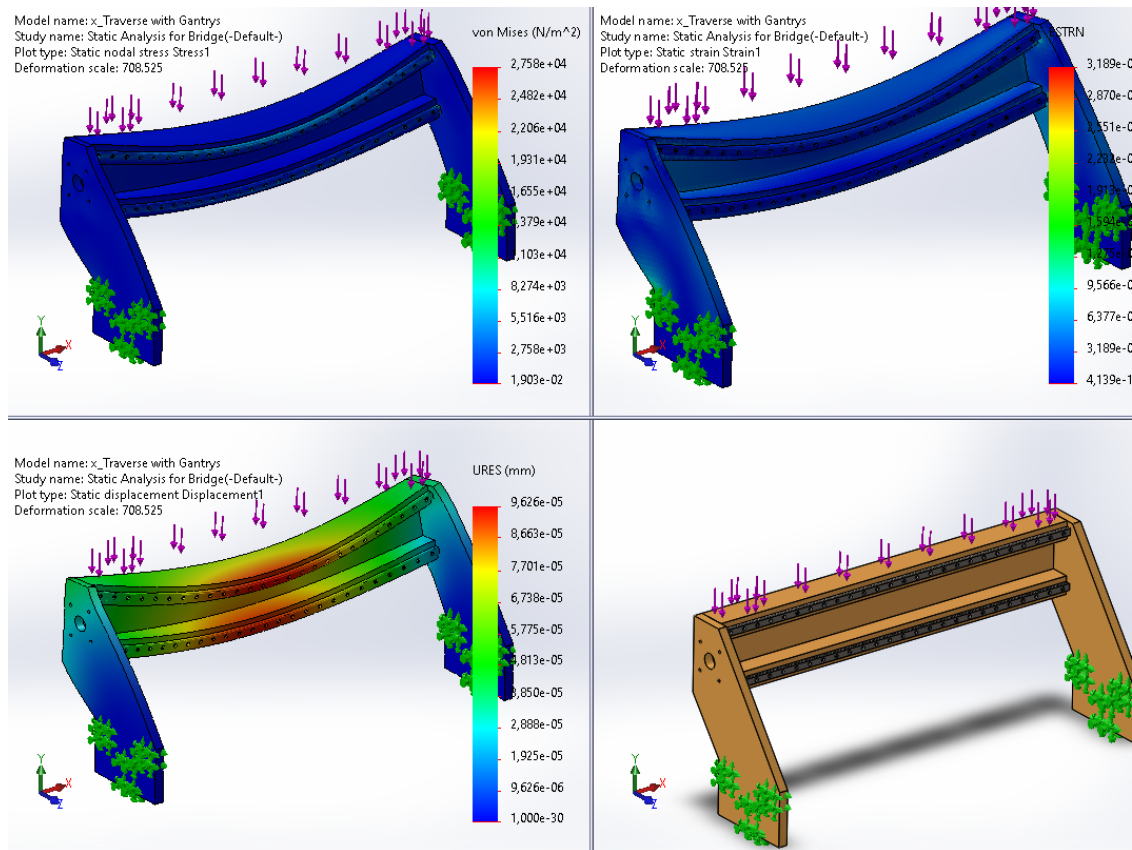


Εικόνα 2-12 Διαδικασία ανάλυσης βήμα 10

Το μόνο που μένει μετά την δημιουργία του πλέγματος είναι να επιλέξουμε Run This Study και να περιμένουμε μέχρι να τελειώσει το SOLIDWORKS τους υπολογισμούς του (εικόνα 2-13) και να μας δώσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης (εικόνα 2-14).



Εικόνα 2-13 Διαδικασία ανάλυσης, τελικό στάδιο



Εικόνα 2-14 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

### 2.3.1 Επεξήγηση των αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης του SOLIDWORKS

Για να μπορέσει κανείς να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα που δίνονται από το SOLIDWORKS μετά από μια στατική ανάλυση πρέπει πρώτα να κατανοήσει τι σημαίνει von Mises Stress, Equivalent Strain (ESTRN), Displacement Resultance (URES) (Θλιπτικές / Σχιστικές δυνάμεις) και Factor Of Safety (FOS) για ένα γεωμετρικό μοντέλο [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17].

Η τάση von Mises είναι μια τιμή που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί εάν ένα υλικό θα υποχωρήσει ή θα σπάσει. Χρησιμοποιείται κυρίως για όλκιμα υλικά, παραδείγματος χάρι τα μέταλλα. Το κριτήριο von Mises ορίζει ότι εάν η τάση von Mises ενός υλικού που βρίσκεται υπό φορτίο είναι ίση ή μεγαλύτερη από το όριο διαρραγής (yield limit) του υλικού αυτού, τότε το υλικό θα υποχωρήσει. Για να γίνει ακόμα πιο απλή η κατανόηση της τάσης von Mises ας σκεφτούμε ένα αγοράκι, το μικρό Μάριο και τον καναπέ του σπιτιού. Ο μικρός Μάριος είναι ελαφρύς και μπορεί να χοροπηδάει ώρες ατελείωτες επάνω στο καναπέ γιατί το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος αντέχει το βάρος του και έχει την απαιτούμενη ελαστικότητα ώστε να μην υποχωρήσει. Τι γίνεται όμως αν ο μικρός Μάριος καλέσει τον μπαμπά του να χοροπηδήσουν μαζί στο καναπέ; Οι πιθανότητες να αντέξει ο καναπές και τους δύο μαζί είναι μηδαμινές. Αυτό συμβαίνει γιατί η τάση von Mises του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένος ο καναπές έχει ένα όριο διαρραγής, δηλαδή ένα όριο ανοχής. Ο μπαμπάς του Μάριου είναι αρκετά κιλά παραπάνω από το Μάριο, δηλαδή ξεπερνά κατά πολύ το όριο ανοχής του υλικού και έτσι θέτοντας υπό υπερβολικό φορτίο τον καναπέ θα τον παραμορφώσει ή θα τον οδηγήσει στη κατάρρευση. Το φορτίο στο παράδειγμα μας είναι ο μικρός Μάριος με ή χωρίς το μπαμπά του και (για λόγους απλοποίησης) το υλικό είναι ο

καναπές. Όταν το υλικό βρίσκεται υπό φορτίο, δηλαδή χοροπηδάει ο μικρός Μάριος, και δεν παραμορφώνεται, τότε το όριο διαρραγής δεν έχει ξεπεραστεί άρα η τάση von Mises είναι εντός του ορίου αντοχής του υλικού. Αν όμως ο καναπές παραμορφωθεί, αυτό σημαίνει ότι η τάση von Mises του υλικού έχει ξεπεράσει το όριο διαρραγής. Γενικά όλα τα υλικά έχουν κάποια αντοχή και κάποια ελαστικότητα, μικρή ή μεγάλη. Η τάση von Mises είναι αυτή με βάση την οποία μπορούμε να καθορίσουμε αν ένα υλικό είναι ικανό να αντέξει την καταπόνηση και κάτω από ποιές συνθήκες συμπεριφέρεται όπως επιθυμούμε. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς μπορούν να γίνουν μελέτες που θα καθορίσουν αν ένα υπό ανάπτυξη έργο (development stage) έργο όπως π.χ μια γέφυρα, θα καταφέρει να ανταπεξέλθει στις απαραίτητες απαιτήσεις. Όλο αυτό πριν ακόμα ξεκινήσει η κατασκευή του έργου!

Ένα ακόμα σημαντικό μέγεθος είναι η ισοδύναμη τάση (Equivalent Strain) ή αλλιώς ισοδύναμη τάση von Mises. Αυτή η τιμή είναι στενά συνδεδεμένη με την τάση von Mises και περιγράφει το μέγεθος της παραμόρφωσης σε ένα υλικό. Θα μπορούσαμε να πούμε πως αυτή η τιμή μας δείχνει πόσο «πονάει» το υλικό κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Έπειτα υπάρχει και το URES που μας δείχνει την μετατόπιση που παρουσιάζει ένα υλικό σε κάθε σημείο του. Το URES είναι διανυσματικό μέγεθος και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$|\vec{U}| = \sqrt{(Ux)^2 + (Uy)^2 + (Uz)^2}$$

Το U αντιπροσωπεύει την συνολική μετατόπιση των σωματιδίων ενός αντικειμένου σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Αν πραγματοποιήσουμε μια ανάλυση και έχουμε μπροστά μας τα αποτελέσματα μπορούμε να κάνουμε κλικ σε ένα σημείο το γεωμετρικού μοντέλου και το SLIDWORKS θα μας εμφανίσει τις τιμές για κάθε μετατόπιση. Η γραφική αναπαράσταση του URES στο SOLIDWORKS γίνεται με χρωματική κλίμακα (φάσμα χρωμάτων), κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μια τιμή η οποία είναι απόσταση. Στη πράξη κοιτώντας μια τέτοια γραφική αναπαράσταση μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε αν το μοντέλο που αναλύσαμε είναι δεκτό ή όχι για την εφαρμογή που προορίζεται. Όταν οι τιμές τις παραμόρφωσης κυμαίνονται κοντά στα 0mm τότε δεν έχουμε σημαντική παραμόρφωση (το αντικείμενο δεν έχει υποστεί ζημιά), είναι αμελητέα. Η πραγματική παραμόρφωση εμφανίζεται από το 1mm και πάνω.

Η τελευταία έννοια που πρέπει να κατανοήσουμε είναι αυτή του συντελεστή ασφαλείας (Factor Of Safety, FOS). Κατά τον σχεδιασμό ενός οποιουδήποτε αντικειμένου η ασφάλεια είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα, ιδίως όταν το αντικείμενο αυτό προορίζεται να έρθει σε επαφή με ανθρώπους. Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια ενός αντικειμένου, σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να αντέξει περισσότερο φορτίο από αυτό που θα πρέπει να αντέχει στην πράξη. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η αντοχή του αντικειμένου σε ακραίες και απρόβλεπτες συνθήκες λειτουργίας ώστε να μην καταστραφεί. Ο βασικότερος τύπος που μας δίνει το FOS είναι ο παρακάτω:

$$FOS = \frac{F_{fail}}{F_{allow}}$$

Το F<sub>fail</sub> σημαίνει failure load και πρακτικά είναι το μέγεθος του φόρτου που αν ασκηθεί στο αντικείμενο θα το καταστρέψει. Το F<sub>allow</sub> σημαίνει allowable load και είναι το φορτίο που αντέχει ένα αντικείμενο. Για να υπολογίσουμε το FOS πρέπει να έχουμε και τις δύο τιμές στην ίδια μονάδα μέτρησης, συνήθως αυτή είναι τα N ή τα MPa. Είναι απαραίτητο να υπολογίζεται πάντοτε το Factor Of Safety για ένα νέο αντικείμενο ή ένα νέο έργο. Λόγω

αυτής της ανάγκης και του γεγονότος ότι το FOS συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα και το είδος του υλικού ή των υλικών που αποτελείται ένα αντικείμενο, υπάρχουν γενικοί πίνακες FOS [11]. Ανάλογα την κατηγορία του αντικειμένου που κατασκευάζεται και για ποιο λόγο κατασκευάζεται μας δίνουν τις τυπικές τιμές του FOS μέσα στις οποίες θα πρέπει να κυμαίνεται και το FOS του δικού μας αντικειμένου. Ένας τέτοιος πίνακας φαίνεται στη συνέχεια:

Εξοπλισμός	Factor Of Safety (FOS)
Εξαρτήματα για αεροσκάφη	1.5 – 2.5
Λέβητες	3.5 – 6
Ρόδες χυτοσιδήρου	20
Μπουλόνια	8.5
Εξαρτήματα κινητήρα	6 – 8
Βαρέως τύπου άξονες	10 – 12
Γάντζοι ανυψωτικού εξοπλισμού	8 - 9
Δοχεία πίεσης	3.5 – 6
Εξαρτήματα για στατικές τουρμπίνες	6 – 8
Εξαρτήματα για περιστρεφόμενες τουρμπίνες	2 – 3
Ελατήρια βαρέως τύπου	4.5
Υλικά χάλυβα για κατασκευή κτηρίων	4 - 6
Υλικά χάλυβα για κατασκευή γεφυρών	5 -7
Συρματόσχοινα	8 -9

**Πίνακας 2- 1 Factor Of Safety σε σχέση με τον εξοπλισμό**

Συνήθως το FOS ενός αντικειμένου δίνεται από τον κατασκευαστή του ενώ είναι απαραίτητο να υπάρχει στα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής ή ενός έργου (π.χ μιας γέφυρας). Για αυτό υπάρχουν και γενικοί πίνακες FOS [11] ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται ένα αντικείμενο, ένας τέτοιος πίνακας φαίνεται παρακάτω:

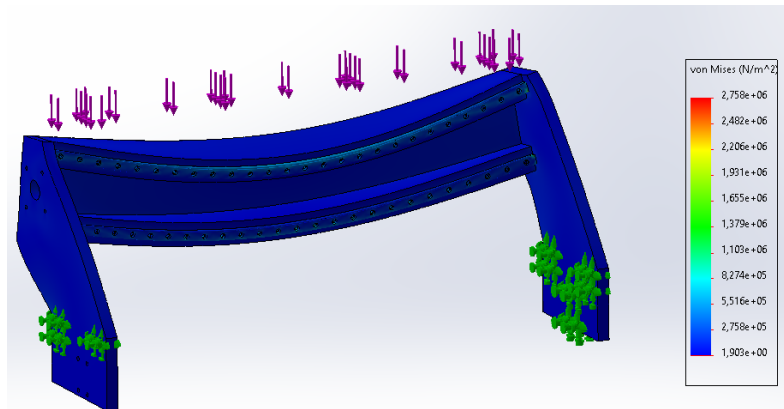
Εφαρμογή	Factor Of Safety (FOS)
Για χρήση με υλικά υψηλής αξιοπιστίας όπου η φόρτωση και οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι αυστηρές και όπου το βάρος αποτελεί σημαντικό παράγοντα	1.3 – 1.5
Για χρήση με αξιόπιστα υλικά όπου η φόρτωση και οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι αυστηρές	1.5 – 2
Για χρήση με συνηθισμένα υλικά όπου η φόρτωση και οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι αυστηρές	2 – 2.5
Για χρήση με λιγότερο δοκιμασμένα και για εύθραυστα υλικά όπου η φόρτωση και οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι αυστηρές	2.5 – 3
Για χρήση με υλικά όπου οι ιδιότητες δεν είναι αξιόπιστες και όπου η φόρτωση και οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι σοβαρές ή όπου αξιόπιστα υλικά χρησιμοποιούνται υπό δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες	3 - 4

**Πίνακας 2- 2 Factor Of Safety σε σχέση με το είδος της εφαρμογής**

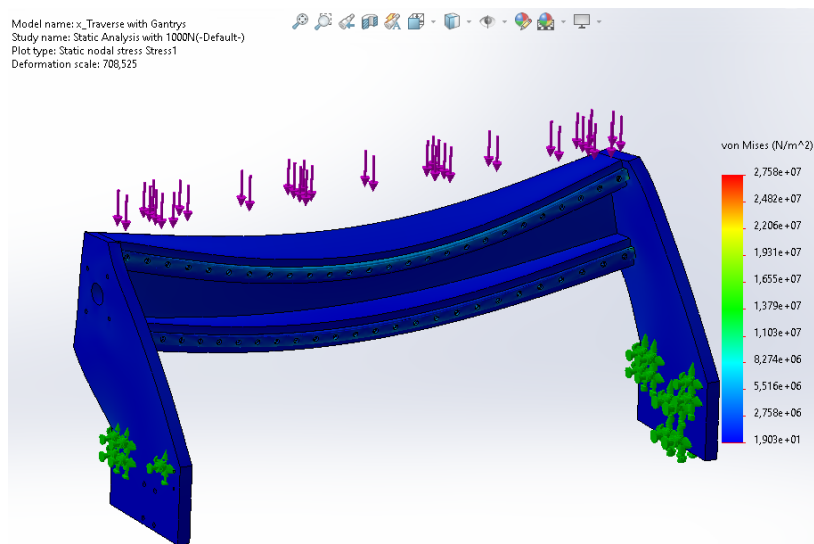
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τρεις διαφορετικές αναλύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για το κομμάτι του συστήματος κατεργασίας που δέχεται την μεγαλύτερη καταπόνηση, δηλαδή τη γέφυρα που φέρει την κεφαλή του συστήματος. Να σημειωθεί πως εκ πρώτης όψεως τα γραφικά αποτελέσματα που δίνει το SOLIDWORKS φαίνονται υπερβολικά παραμορφωμένα. Αυτό γίνεται για να δοθεί έμφαση. Για να

Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

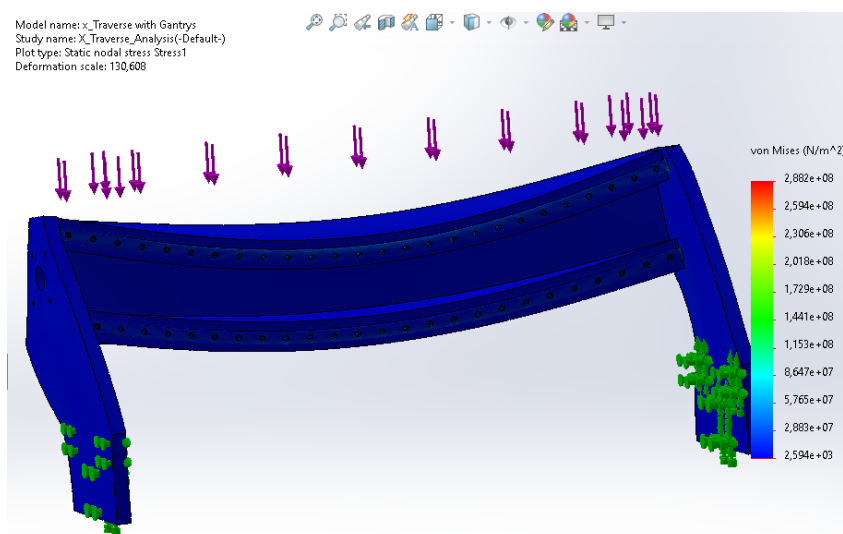
καταλάβουμε όμως την πραγματική παραμόρφωση πρέπει να παρατηρήσουμε τις τιμές σε συνδυασμό με το χρωματικό φάσμα που δίνεται στην απεικόνιση κάθε αποτελέσματος.



**Εικόνα 2-15 Αποτελέσματα von Mises Stress με φορτίο 100N (10kg) για τη γέφυρα**

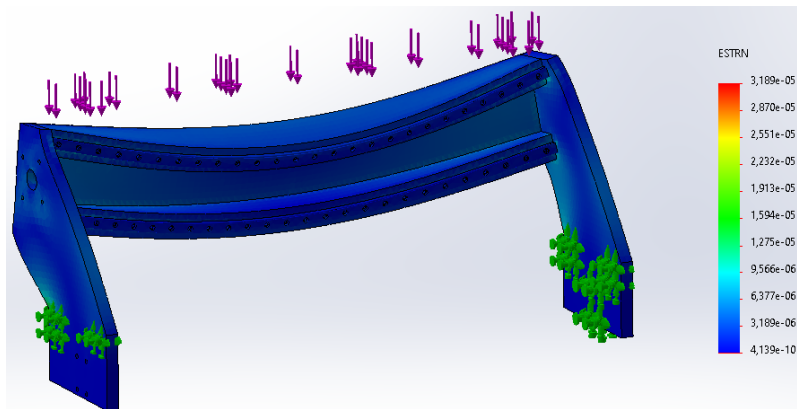


**Εικόνα 2-16 Αποτελέσματα von Mises Stress με φορτίο 1000N (101kg) για τη γέφυρα**

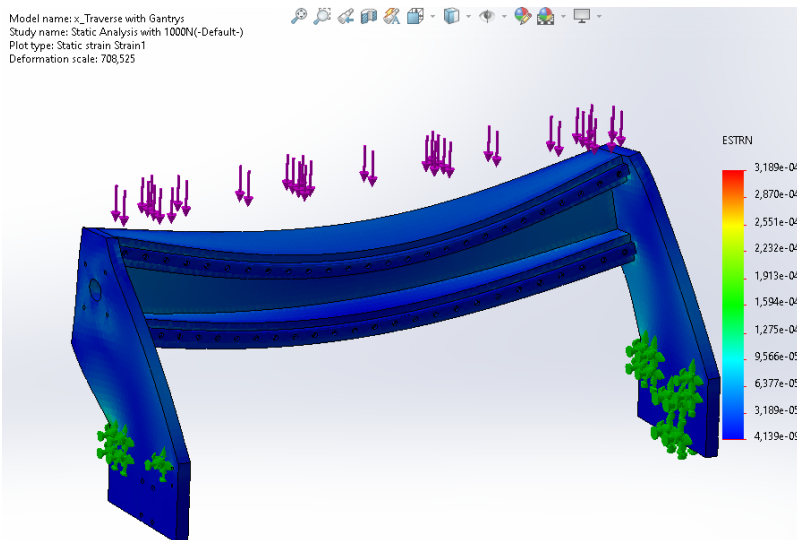


**Εικόνα 2-17 Αποτελέσματα von Mises Stress με φορτίο 5000N (509kg) για τη γέφυρα**

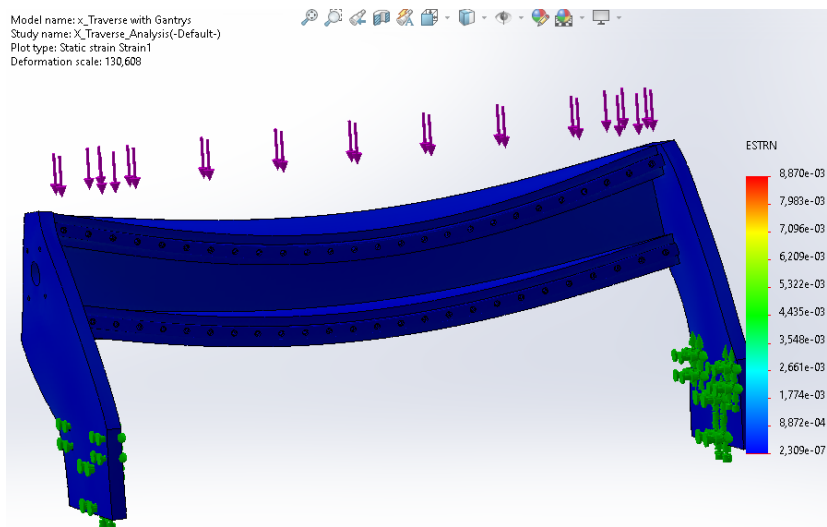
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα von Mises Stress που παρουσιάστηκαν στις εικόνες 2-15, 2-16 και 2-17 το κομμάτι της γέφυρας είναι αρκετά ανθεκτικό αφού ακόμα και όταν του ασκήθηκε φορτίο 5000N δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη μεταβολή στην κατασκευή.



**Εικόνα 2-18 Αποτελέσματα Equivalent Strain με φορτίο 100N (10kg) για τη γέφυρα**



**Εικόνα 2-19 Αποτελέσματα Equivalent Strain με φορτίο 1000N (101kg) για τη γέφυρα**

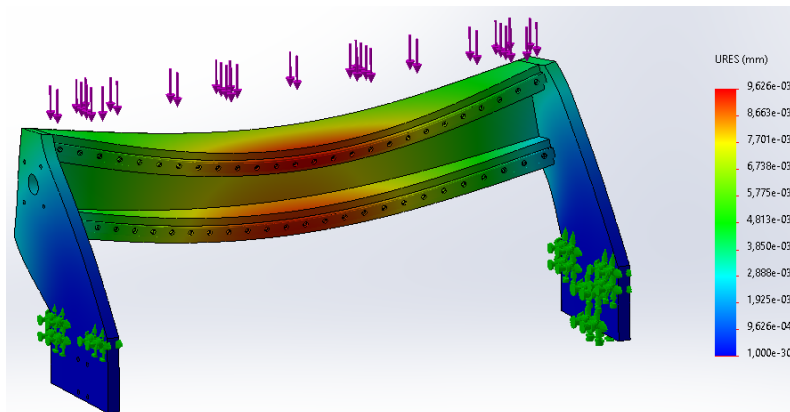


**Εικόνα 2-20 Αποτελέσματα Equivalent Strain με φορτίο 5000N (509kg) για τη γέφυρα**

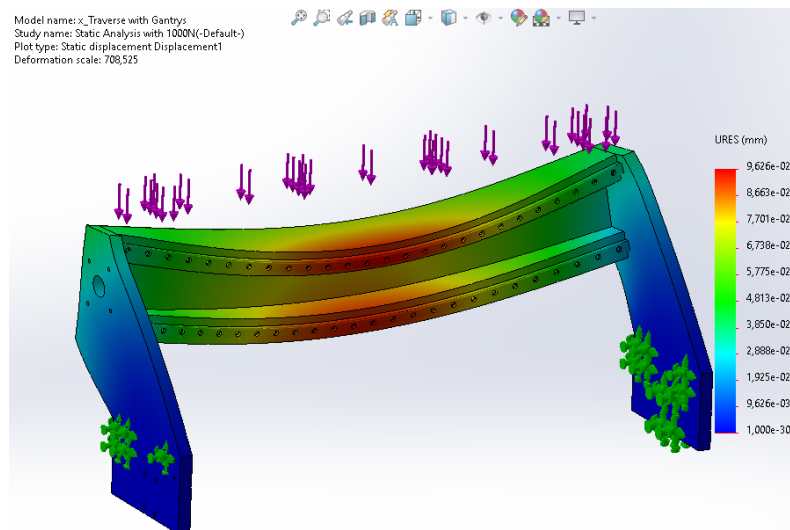


Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

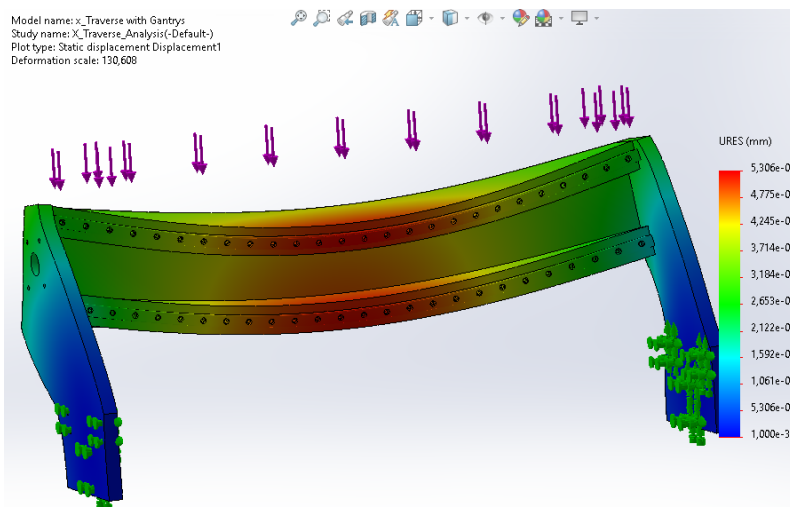
Στις εικόνες 2-18, 2-19 και 2-20 βλέπουμε τα Equivalent Strain διαγράμματα τα οποία μας δείχνουν ότι η κατασκευή δεν καταπονείται υπερβολικά σε κανένα σημείο αφού δεν παρατηρείται ιδιαίτερη παραμόρφωση.



**Εικόνα 2-21 Αποτελέσματα URES με φορτίο 100N (10kg) για τη γέφυρα**

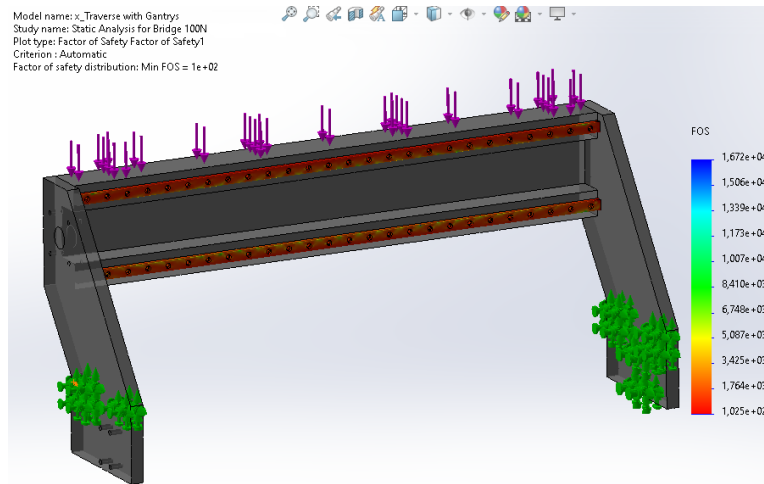


**Εικόνα 2-22 Αποτελέσματα URES με φορτίο 1000N (101kg) για τη γέφυρα**

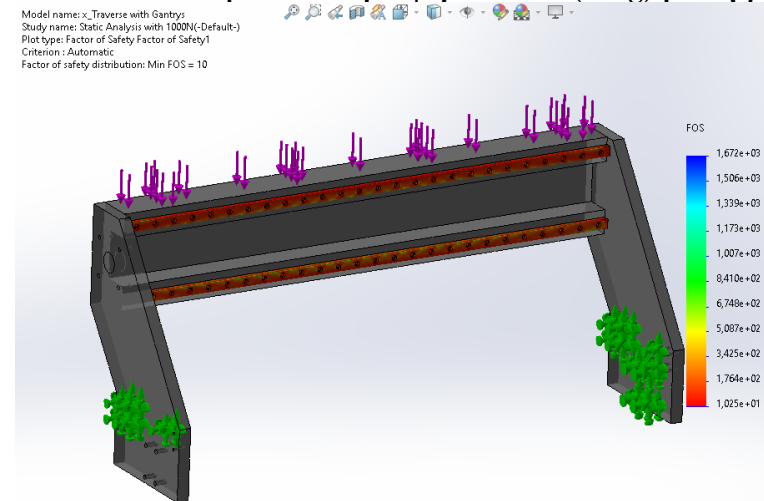


**Εικόνα 2-23 Αποτελέσματα URES με φορτίο 5000N (509kg) για τη γέφυρα**

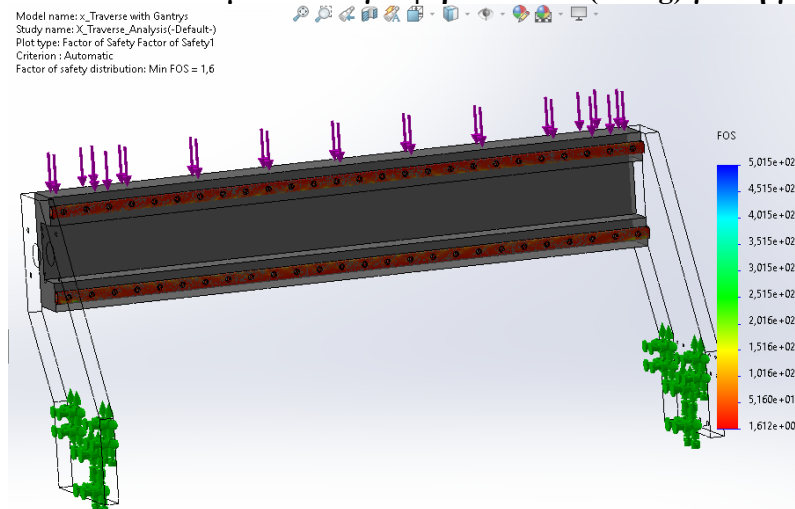
Στις εικόνες 2-21, 2-22 και 2-23 βλέπουμε το Displacement Resultance της γέφυρας που φαίνεται να είναι εντονότερο στο κέντρο του μοντέλου. Αυτό σημαίνει πως σε αυτή την περιοχή η μετατόπιση των σωματιδίων του υλικού της κατασκευής είναι εντονότερη. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει όμως την ορθή λειτουργία του κομματιού.



**Εικόνα 2-24 Αποτελέσματα FOS για φορτίο 100N (10kg) για τη γέφυρα**



**Εικόνα 2-25 Αποτελέσματα FOS για φορτίο 1000N (101kg) για τη γέφυρα**

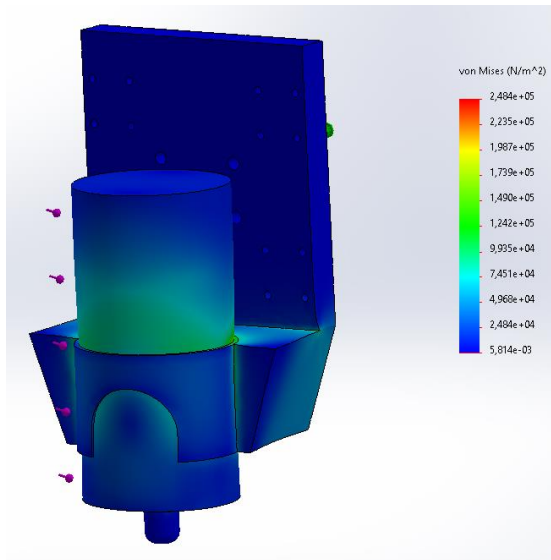


**Εικόνα 2-26 Αποτελέσματα FOS για φορτίο 5000N (509kg) για τη γέφυρα**

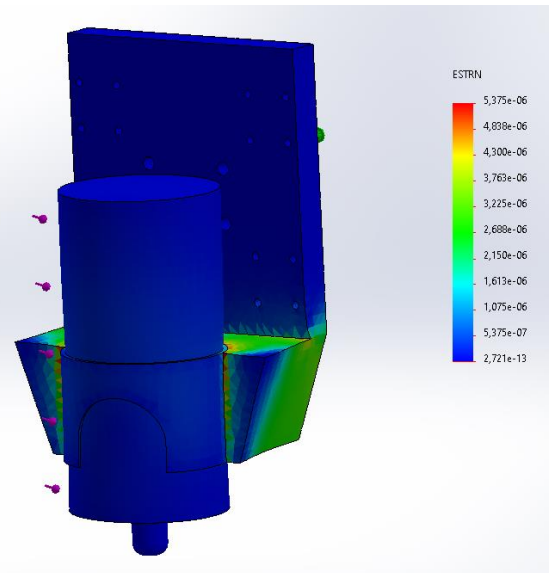
Στις εικόνες 2-24, 2-25 και 2-26 βλέπουμε το Factor Of Safety της γέφυρας υπό διαφορετικά φορτία. Θεωρώντας πως η κατασκευή μας εντάσσεται στην δεύτερη κατηγορία του πίνακα 2-2

μπορούμε να πούμε πως το γεωμετρικό μοντέλο είναι ασφαλές αφού το FOS του κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.5 με 2.

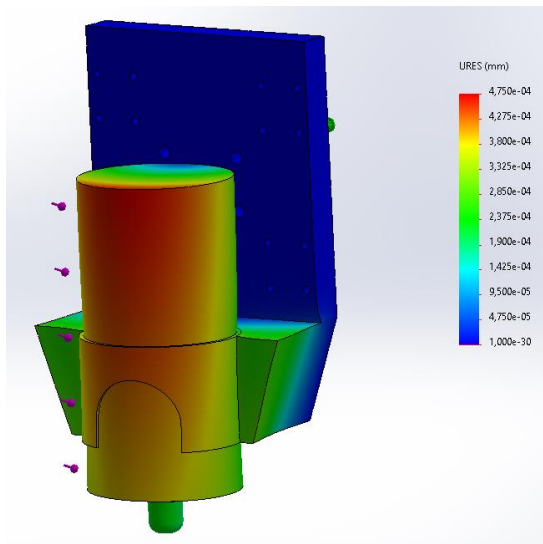
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από μια ανάλυση ροπής [18] που πραγματοποιήθηκε για το κομμάτι που στηρίζεται το router του συστήματος, δηλαδή η κεφαλή. Σκοπός της ανάλυσης αυτής ήταν να επιβεβαιωθεί πως το router θα παραμείνει σταθερό στο σημείο πρόσδεσης του.



Εικόνα 2-27 Ανάλυση ροπής, von Mises Stress για δύναμη 100N



Εικόνα 2-28 Ανάλυση ροπής, Equivalent Strain για δύναμη 100N



Εικόνα 2-29 Ανάλυση ροπής, URES για δύναμη 100N

Τα αποτελέσματα που μας έδωσε η ανάλυση ροπής (άσκηση περιστροφικής δύναμης στην περιφέρεια του router) μας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Φαίνεται στην απεικόνιση von Mises πως κανένα σημείο της κεφαλής δεν κινδυνεύει να καταρεύσει. Έπειτα βλέπουμε από την Equivalent Strain πως η καταπόνηση είναι σε ανεκτά επίπεδα για την κατασκευή, άρα το κομμάτι είναι κατάλληλο για την χρήση που προορίζεται. Γενικότερα, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τα κομμάτια του CNC μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα πως το σύστημα κατεργασίας είναι ασφαλές και μπορεί να κατασκευαστεί όπως ακριβώς σχεδιάστηκε.

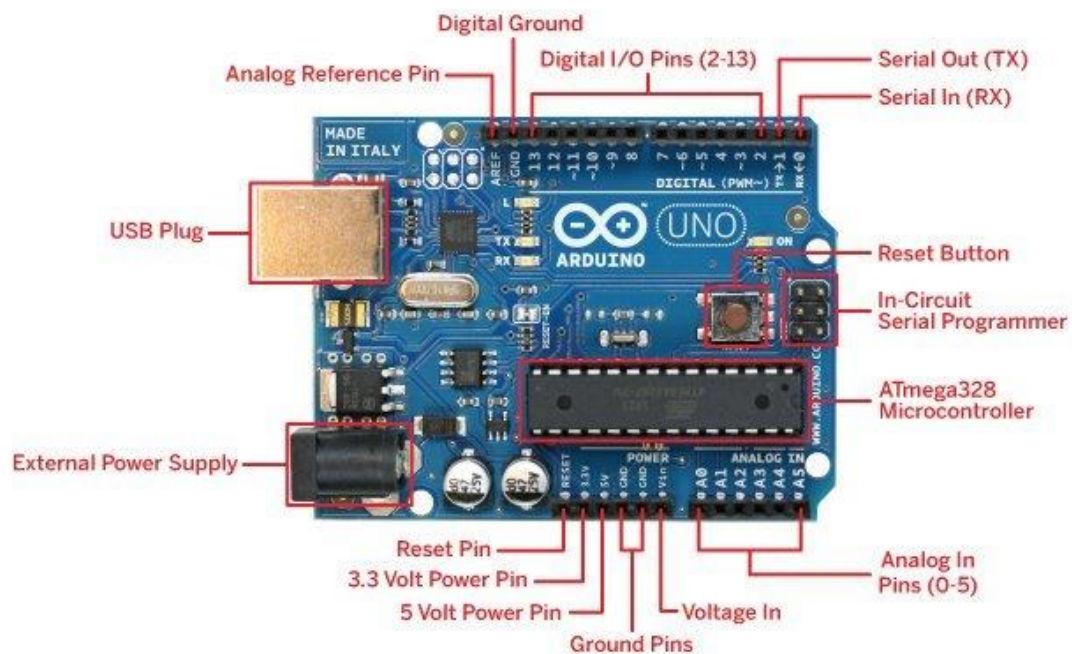
## Κεφάλαιο 3 - Ξεκινώντας τη κατασκευή του συστήματος κατεργασίας

### 3.1 Εισαγωγή

Για την κατασκευή και τη λειτουργία του συστήματος κατεργασίας, πέρα από την δημιουργία των ξύλινων τμημάτων του συστήματος και τα εξαρτήματα που είναι απαραίτητα, εξίσου σημαντικά είναι και το λογισμικό και το υλικό που απαιτούνται για να λειτουργήσει. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε τα διάφορα πακέτα λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για να λειτουργήσει το σύστημα κατεργασίας, το υλικό (hardware) με το οποίο συνεργάζονται καθώς επίσης και την κατασκευή του συστήματος κατεργασίας.

### 3.2 Το Arduino ως κομμάτι του συστήματος κατεργασίας

Γενικότερα το Arduino είναι μια πλατφόρμα που βοηθάει έναν απλό χρήστη να αναπτύξει κάποιο έργο στο φυσικό περιβάλλον [19]. Η πλατφόρμα αυτή είναι ανοικτού λογισμικού (open source) και περιλαμβάνει μία πλακέτα με έναν επεξεργαστή και ένα περιβάλλον ανάπτυξης προγραμμάτων για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή. Στην αγορά υπάρχουν πολλές εκδόσεις για το Arduino ανάλογα με τον μικροελεγκτή που «φοράνε» και τις δυνατότητες που προσφέρουν στο χρήστη. Όλα τα Arduino χρησιμοποιούν μικροελεγκτές Atmel AVR και η γλώσσα προγραμματισμού τους είναι η Wiring C που αποτελεί μια παραλλαγή της C++. Οι ακροδέκτες σε ένα board Arduino χωρίζονται σε ακροδέκτες εισόδου/εξόδου που είναι υπεύθυνοι για την ανταλλαγή σημάτων με εξωτερικά συστήματα, συσκευές και κυκλώματα και τους ακροδέκτες για την τροφοδοσία του. Το Arduino μπορεί να αναγνωρίσει και ψηφιακά και αναλογικά σήματα εισόδου όμως στις εξόδους του δίνει μόνο ψηφιακά.



Εικόνα 3-1 Arduino PIN Out διάγραμμα

Το ίδιο το Arduino μπορεί να τροφοδοτήσει εξωτερικές συσκευές με τάση που φτάνει ως και τα 5V αλλά δεν μπορεί να δώσει στις εξόδους του ρεύμα μεγαλύτερο από 40mA. Για αυτό το λόγο για παράδειγμα όταν θέλουμε να ελέγξουμε ένα μοτέρ χρησιμοποιούμε εξωτερική τροφοδοσία για το μοτέρ. Ακόμη το Arduino διαθέτει σύνδεση USB που του επιτρέπει να επικοινωνεί με τον υπολογιστή ώστε να προγραμματίζεται, να αλληλεπιδρά με το χρήστη και να τροφοδοτείται. Επίσης μπορεί να λειτουργήσει και αυτόνομα, αφού προγραμματιστεί, τροφοδοτούμενο από την ειδική είσοδο.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του Arduino, που το κάνουν και πιο ελκυστικό στο χρήστη είναι:

1. Το χαμηλό του κόστος, αφού κανείς μπορεί να το αγοράσει με κόστος μικρότερο από 15€. Επίσης, υπάρχουν διαθέσιμα και kit που περιέχουν διάφορα περιφερειακά όπως διακόπτες, αισθητήρες, οθόνες lcd, καλώδια κλπ τα οποία βοηθούν στην ανάπτυξη project μαζί με το Arduino και μπορούν να αγοραστούν σε χαμηλές σχετικά τιμές.
2. Η συμβατότητα του λογισμικού του, καθώς το λογισμικό του Arduino μπορεί να εκτελεστεί σε περιβάλλοντα Windows, Linux και Macintosh.
3. Η απλότητα του περιβάλλοντος ανάπτυξης, το οποίο είναι πολύ εύκολο και φιλικό στο χρήστη ακόμα και αν δεν το έχει ξανά χρησιμοποιήσει.
4. Τέλος το ότι είναι επεκτάσιμο λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Αυτό σημαίνει πως όποιος θέλει μπορεί να βρει στο διαδίκτυο πηγαίο κώδικα να τον τροποποιήσει ή να γράψει δικό του και να τον εκτελέσει με το Arduino. Επιπροσθέτως, με την προσθήκη βιβλιοθηκών C++ μπορούν να προστεθούν δυνατότητες στο περιβάλλον ανάπτυξης. Έτσι ένας χρήστης που δεν έχει ιδιαίτερη πείρα μπορεί να χρησιμοποιήσει έτοιμες βιβλιοθήκες για να υποστηρίξει την διαχείριση διατάξεων που σχετίζονται με το project του. Αντίστοιχα κάποιος έμπειρος χρήστης μπορεί να γράψει κώδικα χαμηλού επιπέδου και να τον διαθέσει μέσω βιβλιοθηκών.

Για τους προαναφερθέντες λόγους επιλέχθηκε το Arduino και για την κατασκευή του συστήματος κατεργασίας. Ποιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το Arduino UNO που «φοράει» τον μικροελεγκτή ATmega328.

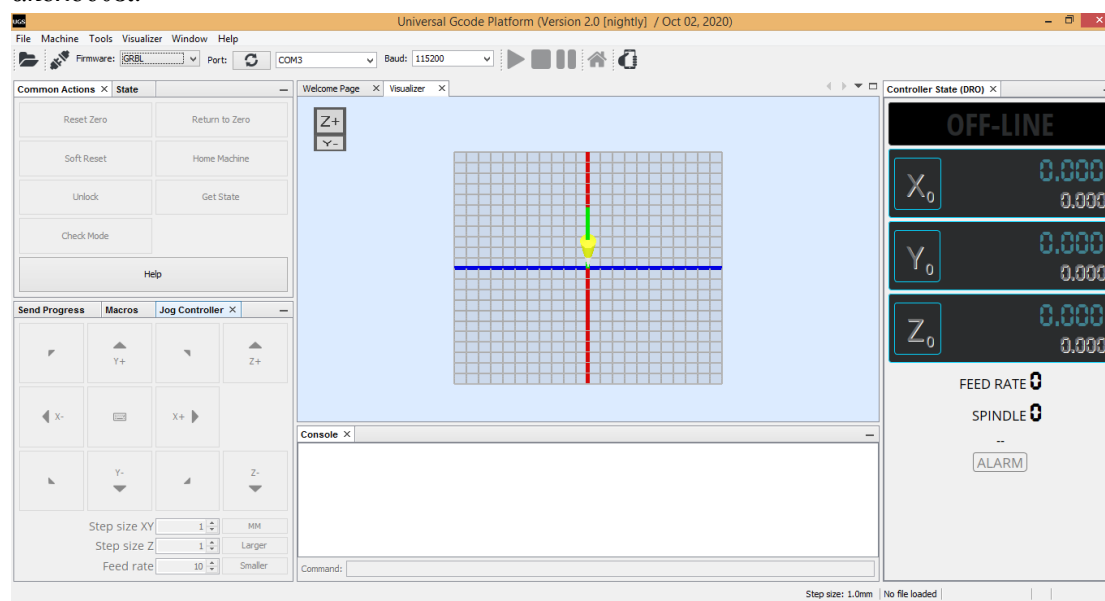
### 3.3 Το λογισμικό GRBL σε συνδυασμό με το UGS

Το GRBL είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που καθορίζει τον έλεγχο της κίνησης μιας CNC μηχανής [20], [21], [22], [23], [24]. Εγκαθιστώντας σε ένα Arduino το GRBL έχουμε έναν ελεγκτή CNC μηχανήματος, χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης. Το GRBL αυτό που ουσιαστικά κάνει είναι να λαμβάνει ως είσοδο G-code και να εξάγει τον έλεγχο κίνησης μέσω του Arduino. Με άλλα λόγια «μεταφράζει» τον G-code σε κίνηση για ένα CNC μηχανήμα. Το βασικό hardware που συνεργάζεται με το λογισμικό GRBL είναι οι βηματικοί κινητήρες και οι οδηγοί των κινητήρων, όπως επίσης και οι τερματικοί διακόπτες (limit switches).

Για να εγκαταστήσουμε το λογισμικό GRBL τα βήματα είναι πολύ απλά. Αρχικά πρέπει να κατεβάσουμε το λογισμικό στον υπολογιστή μας. Το λογισμικό είναι διαθέσιμο στο GitHub, από όπου μπορεί κανείς να το κατεβάσει σε μορφή zip αρχείου. Στη συνέχεια αφού αποσυμπιέσουμε το αρχείο που κατεβάσαμε ανοίγουμε το IDE περιβάλλον του Arduino και προσθέτουμε στις βιβλιοθήκες του το φάκελο με το λογισμικό GRBL. Τέλος το μόνο που μένει είναι να ανοίξουμε τον φάκελο-βιβλιοθήκη και να βρούμε το αρχείο με όνομα grblUpload. Το ανοίγουμε μέσα από το IDE του Arduino και το κάνουμε Upload στο Arduino

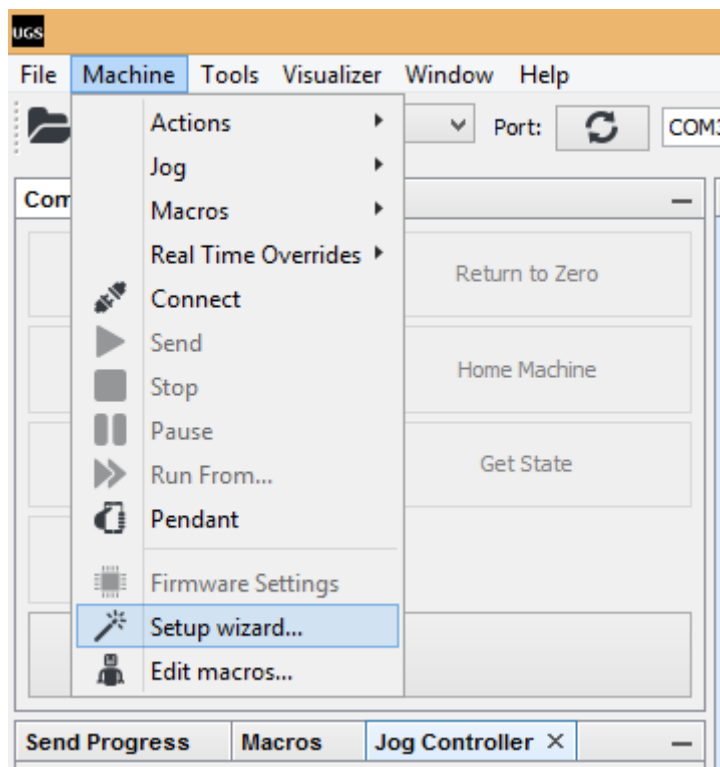
μας, αφού βέβαια το έχουμε συνδέσει με τον υπολογιστή μας. Τώρα το GRBL είναι έτοιμο για χρήση.

Για να συνεργαστεί σωστά όμως το GRBL με το σύστημα κατεργασίας πρέπει να του δώσουμε κάποιες αρχικές ρυθμίσεις που αφορούν τις διαστάσεις του λειτουργικού πεδίου (δηλαδή το χώρο στον οποίο θα κινείται η κεφαλή και θα πραγματοποιούνται οι κοπές) και το βηματισμό των κινητήρων του συστήματος. Για να γίνει αυτό στο GRBL πρέπει να δοθούν μία - μία οι απαραίτητες εντολές μέσω του serial monitor από το IDE του Arduino. Όμως υπάρχει και λιγότερο επίπονος τρόπος και αυτός είναι μέσω του Universal G-code Sender (UGS). Μέχρι εδώ έχουμε εξηγήσει πώς το Arduino δέχεται G-code και ελέγχει τις κινήσεις του συστήματος κατεργασίας (CNC) με το GRBL. Πώς όμως στέλνουμε τις εντολές G-code στο Arduino; Ένας τρόπος είναι να τις δίνουμε μία μια μέσω του serial monitor του Arduino, αυτός ο τρόπος όμως είναι αργός και είναι πολύ πιο εύκολο να κάνουμε κάποιο λάθος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ενός τεμαχίου. Ο δεύτερος τρόπος είναι να συνδυάσουμε το GRBL με κάποιο λογισμικό αλληλεπίδρασης με το σύστημα ή κάποιον έτοιμο controller που θα λέει στο Arduino τι να κάνει. Ένα τέτοιο λογισμικό είναι και το UGS το οποίο επιλέχθηκε για το σύστημα κατεργασίας. Το UGS είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα (open source) και χρειάζεται JAVA περιβάλλον για να εκτελεστεί. Αφού κατεβάσουμε και αποσυμπέσουμε το αρχείο για το UGS φτάνει να περιηγηθούμε στον φάκελο bin και να ανοίξουμε ένα από τα διαθέσιμα εκτελέσιμα αρχεία. Το περιβάλλον που θα ανοίξει φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



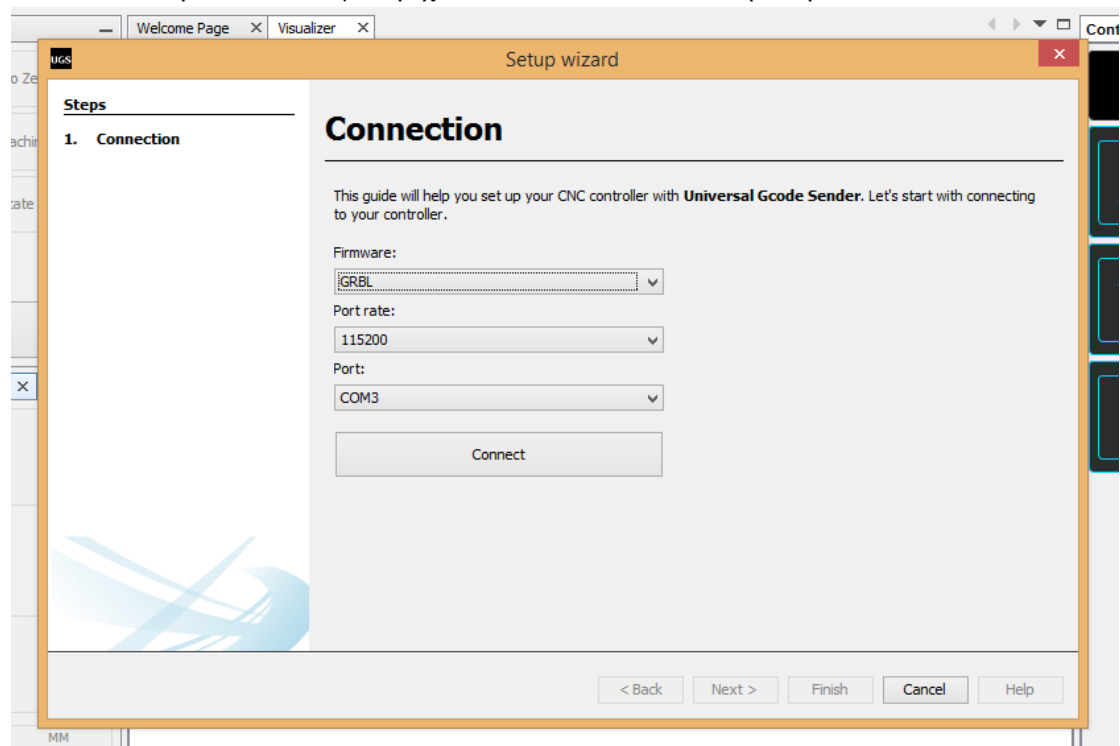
**Εικόνα 3-2 UGS περιβάλλον**

Ανοίγοντας το UGS πρέπει να το ρυθμίσουμε ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες του μηχανήματος μας. Για να το κάνουμε αυτό εύκολα το UGS διαθέτει setup wizard που είναι πολύ πιο βολικό από το να χρησιμοποιήσουμε το serial monitor του Arduino. Το πρώτο βήμα για να ρυθμίσουμε το περιβάλλον του UGS ώστε να συνεργάζεται με το GRBL και συνεπώς το Arduino είναι να εκτελέσουμε το setup wizard (εικόνα 3-3).



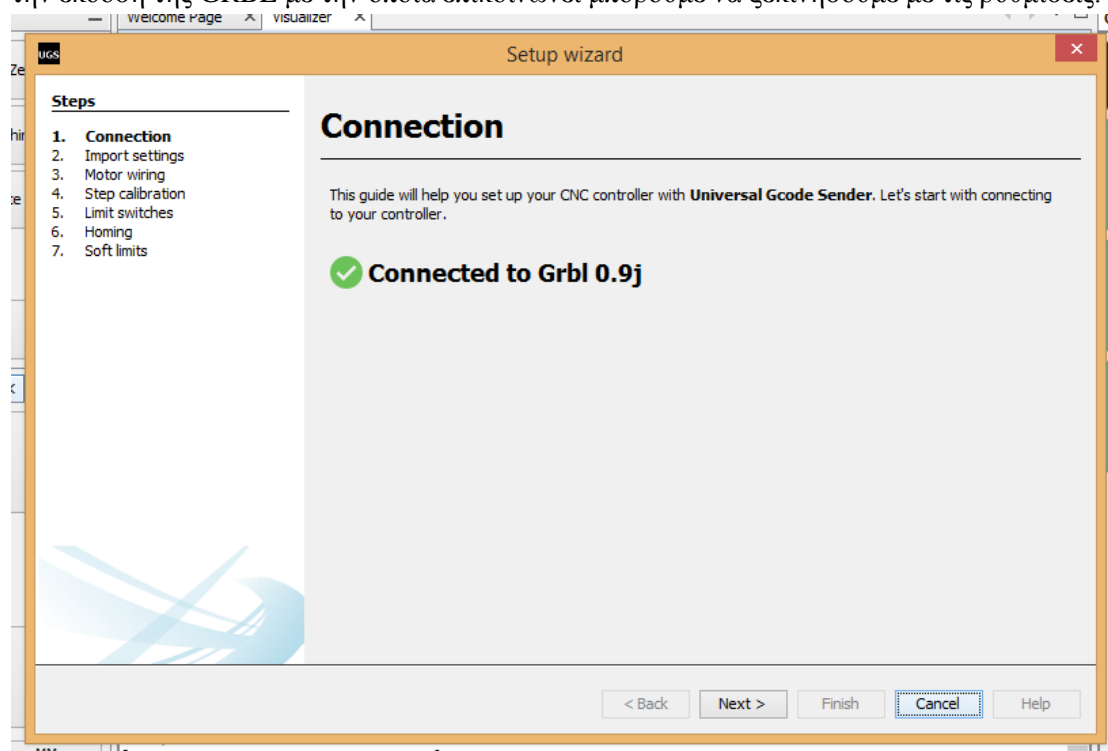
Εικόνα 3-3 Εκτέλεση του setup wizard στο UGS

Αρχικά το wizard θα ζητήσει να του πούμε με ποιο λογισμικό θα γίνεται η οδήγηση, σε αυτή τη περίπτωση είναι το GRBL, με τι ρυθμό μετάδοσης (baud rate – port rate) θα επικοινωνούν και σε ποια θύρα του υπολογιστή έχει συνδεθεί το hardware δηλαδή το Arduino.



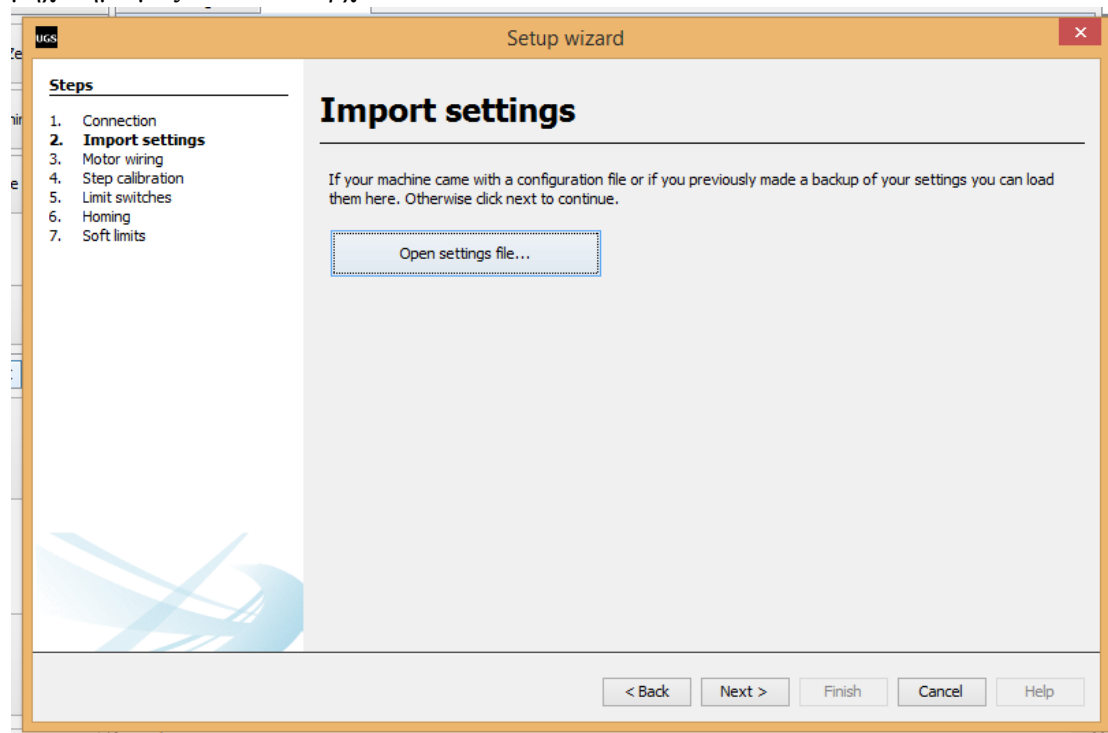
Εικόνα 3-4 UGS setup wizard, πρώτο βήμα

Στη συνέχεια αφού έχουμε συνδεθεί επιτυχώς με την GRBL και το UGS έχει αναγνωρίσει την έκδοση της GRBL με την οποία επικοινωνεί μπορούμε να ξεκινήσουμε με τις ρυθμίσεις.



Εικόνα 3-5 UGS setup wizard, επιτυχής σύνδεση της GRBL με το UGS

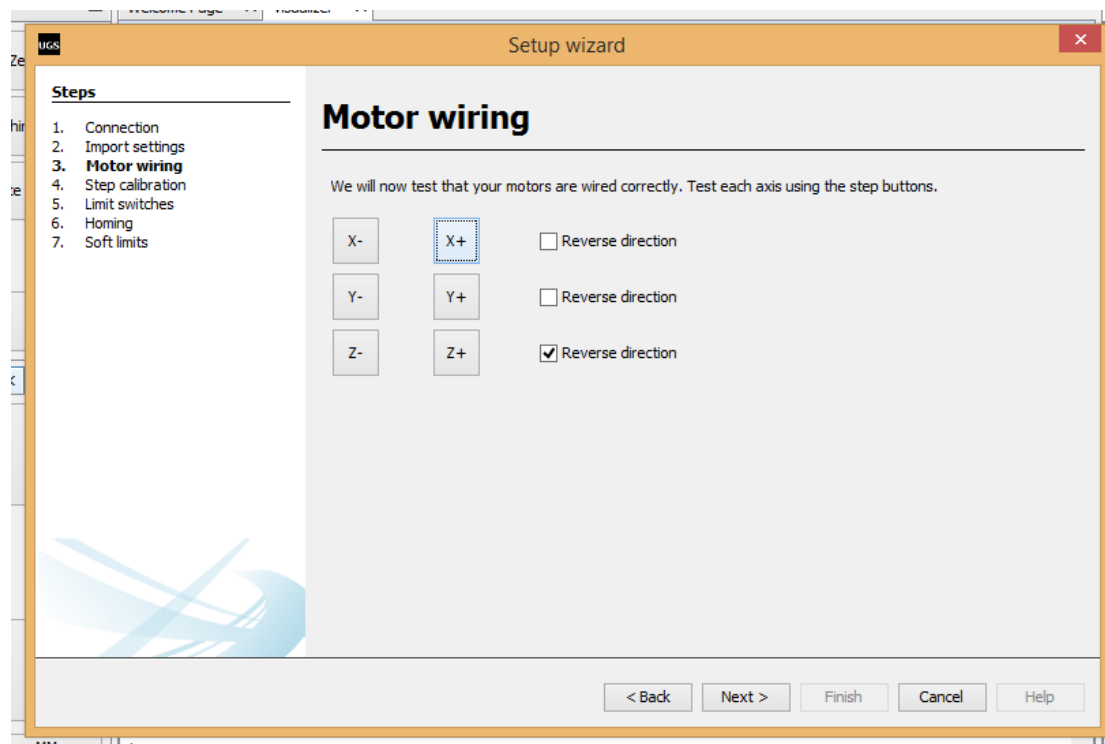
Εφόσον ρυθμίζουμε το περιβάλλον του UGS για πρώτη φορά περνάμε το βήμα δύο στο setup wizard το οποίο είναι χρήσιμο σε περίπτωση που έχουμε φυλάξει τις ρυθμίσεις για το μηχάνημα μας σε κάποιο αρχείο.



Εικόνα 3-6 UGS setup wizard, βήμα δεύτερο

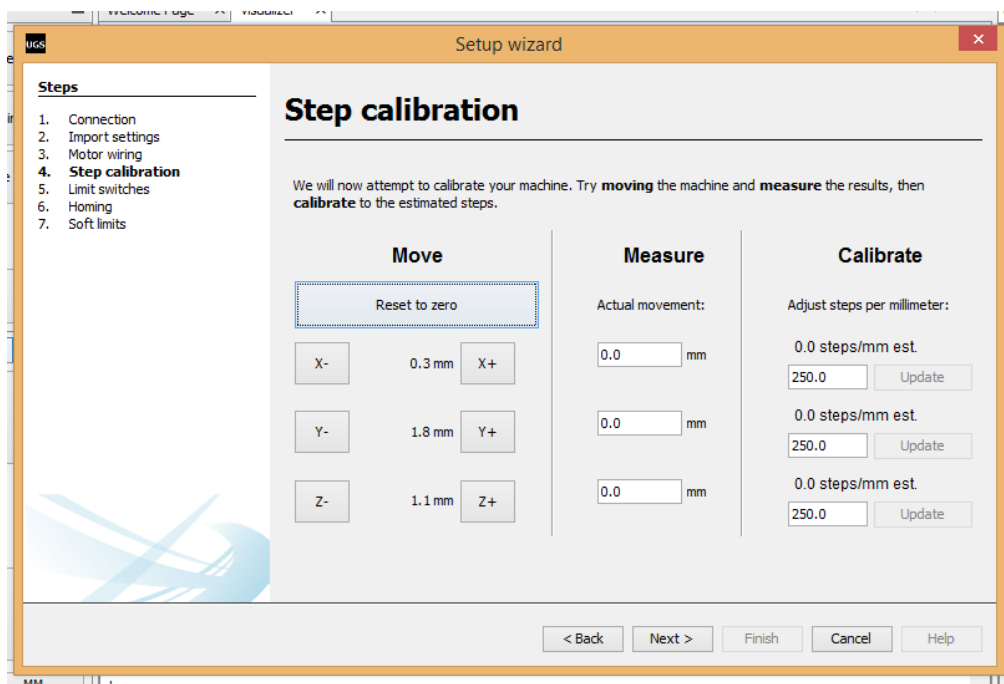


Στο τρίτο βήμα του setup wizard ελέγχουμε αν οι κινητήρες μας είναι συνδεδεμένοι σωστά. Στην οθόνη υπάρχουν έξι κουμπιά, δύο για κάθε άξονα (x, y, z). Πατώντας ένα από αυτά παρατηρούμε πως κινήθηκε το μηχάνημα μας και επιβεβαιώνουμε ότι η κίνηση που πήραμε είναι σύμφωνη με την ορθή κατεύθυνση των αξόνων. Αν κάποιος κινητήρας κινείται ανάστροφα έχουμε την επιλογή να τον αντιστρέψουμε μέσω του λογισμικού (εικόνα 3-7) αντί να αντιστρέφουμε τις συνδέσεις των καλωδίων επάνω στον κινητήρα.



Εικόνα 3-7 UGS setup wizard, έλεγχος καλωδίωσης κινητήρων

Στο τέταρτο βήμα πρέπει να καλιμπράρουμε τους βηματικούς κινητήρες του μηχανήματος. Πατώντας και πάλι στην οθόνη ένα από τα κουμπιά για τους άξονες x, y και z μπορούμε να κινήσουμε αντίστοιχα το μηχάνημα και με βάση την απόσταση που διένυσε η κεφαλή να μας δώσει το λογισμικό την τιμή στην οποία πρέπει να ρυθμίσουμε το GRBL για να κινείται σωστά.



**Εικόνα 3-8 UGS setup wizard, καλιμπράρισμα των βηματικών κινητήρων**

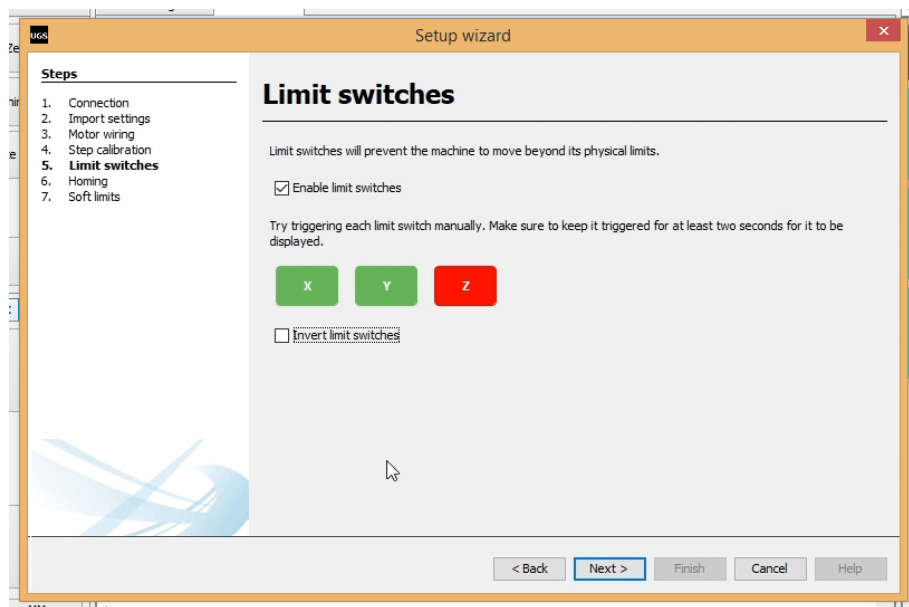
Παρατηρώντας την εικόνα 3-8 βλέπουμε δίπλα στα κουμπιά για την κίνηση των αξόνων έναν αριθμό σε χιλιοστά (mm). Αυτός ο αριθμός αντιπροσωπεύει τις τιμές που έχει το GRBL στις μεταβλητές του για την μετακίνηση σε κάθε άξονα. Αυτό που πρέπει να γίνει σε αυτό το βήμα είναι να δούμε κατά πόσο ταιριάζουν αυτές οι τιμές με το μηχάνημα μας. Με ένα χάρακα τοποθετημένο έτσι ώστε η μύτη της κεφαλής να δείχνει προς αυτόν, μετακινούμε με το κουμπί έναν από τους άξονες. Για παράδειγμα αν θέλουμε να καλιμπράρουμε τον κινητήρα του x άξονα τοποθετούμε τον χάρακα οριζόντια πάνω στο κρεβάτι του CNC κάτω από την κεφαλή και πατάμε το κουμπί x+ ή το x-. Έτσι μετράμε την πραγματική απόσταση που διένυσε η κεφαλή μας και εισάγουμε την τιμή που μετρήσαμε στο αντίστοιχο πλαίσιο της οθόνης στη στήλη Measure. Έπειτα επιλέγουμε το κουμπί Update στη στήλη Calibrate και το λογισμικό μας δίνει την τιμή που πρέπει να καλιμπράρουμε τον κινητήρα μας στον αντίστοιχο άξονα ώστε ένα χιλιοστό κίνησης στο λογισμικό να αναλογεί σε ένα χιλιοστό κίνησης και στο μηχάνημα μας. Στη πραγματικότητα ο υπολογισμός που πραγματοποιείται στο παρασκήνιο αντιστοιχεί στην παρακάτω εξίσωση.

$$steps\_per\_mm = \frac{steps\_per\_revolution * microsteps}{mm\_per\_revolution}$$

Τα βήματα ανα χιλιοστό είναι που μας ενδιαφέρουν στη πραγματικότητα για να καλιμπράρουμε τους κινητήρες μας. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κινητήρα που χρησιμοποιούμε και το microstepping της οδήγησης αυτού, το μόνο που χρειάζεται είναι η πραγματική κίνηση της κεφαλής σε χιλιοστά και μπορούμε να υπολογίσουμε και μόνοι μας το καλιμπράρισμα.

Στο επόμενο βήμα του setup wizard μπορούμε να ενεργοποιήσουμε και να ελέγξουμε την ορθή λειτουργία των τερματικών διακοπών (limit switches). Οι τερματικοί διακόπτες είναι πολύ σημαντικοί σε μια κατασκευή όπως αυτή ενός CNC μηχανήματος. Αυτό που κάνουν είναι να προστατεύουν το CNC από το να εκτελέσει κινήσεις πέρα από τα φυσικά όρια που μπορεί να κινηθεί. Τοποθετώντας λοιπόν δύο διακόπτες σε κάθε άξονα προστατεύουμε το

μηχάνημα από ανεπιθύμητες βλάβες. Για να ελέγξουμε στην πράξη τη λειτουργία τους ενεργοποιούμε τους διακόπτες με το χέρι και βλέπουμε στην οθόνη αν ανταποκρίνεται το λογισμικό ορθά. Για παράδειγμα αν ενεργοποιήσουμε έναν διακόπτη στον x άξονα θα πρέπει να δούμε στην οθόνη μας το κουτάκι με το γράμμα x από κόκκινο να γίνεται πράσινο. Έπειτα αν πατήσουμε έναν διακόπτη στον y άξονα θα πρέπει να γίνει πράσινο και το αντίστοιχο κουτάκι.

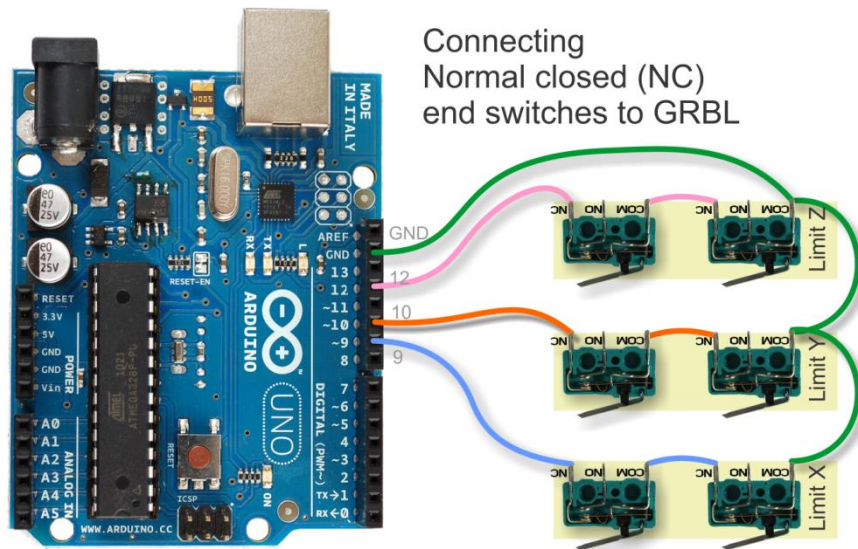


**Εικόνα 3-9 UGS setup wizard, έλεγχος limit switches**

Όπως και στο βήμα τρία έτσι και εδώ υπάρχει η δυνατότητα να αντιστρέψουμε τη συνδεσμολογία, αυτή τη φορά των τερματικών διακοπών, μέσω του λογισμικού. Αν δηλαδή έχουμε πραγματοποιήσει συνδεσμολογία Normaly Open στους διακόπτες μπορούμε μέσω του λογισμικού να την αλλάξουμε σε Normaly Closed και το ανάποδο.

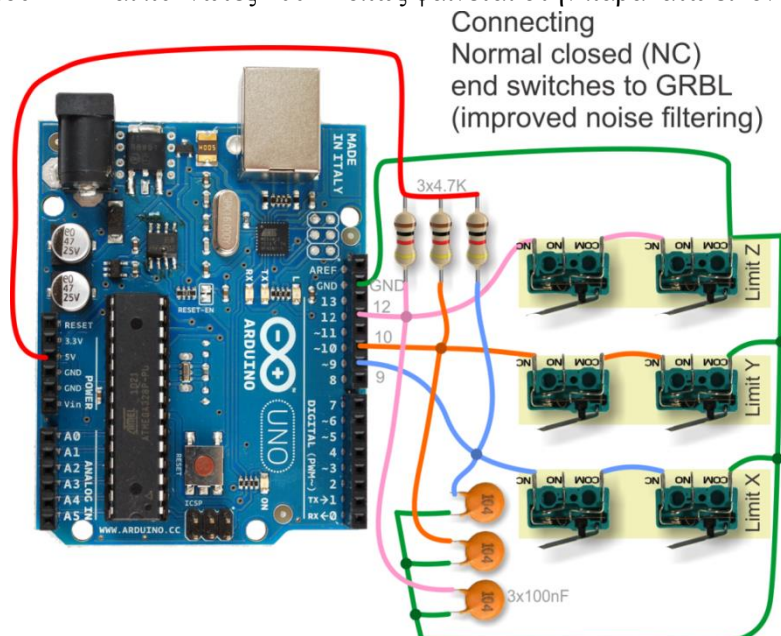
Στο σύστημα κατεργασίας η συνδεσμολογία που πραγματοποιήθηκε για τους τερματικούς διακόπτες είναι η Normal Closed. Σε αυτή τη συνδεσμολογία οι διακόπτες ανά άξονα συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους και με ένα ψηφιακό pin του Arduino. Αν ενεργοποιηθεί ένας από όλους, τότε η εσωτερική αντίσταση που διαθέτει το chip του ATmega328 γίνεται High, δηλαδή μεγαλύτερη από 1MΩ και δίνεται εντολή στο μηχάνημα να σταματήσει τη λειτουργία του. Με την συνδεσμολογία σε σειρά μπορούμε να ανιχνεύσουμε απευθείας αν κάποιος διακόπτης έχει πρόβλημα γιατί αν κάποιος για παράδειγμα έχει σπάσει τότε η «αλυσίδα» που έχουμε δημιουργήσει θα κοπή.

Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή



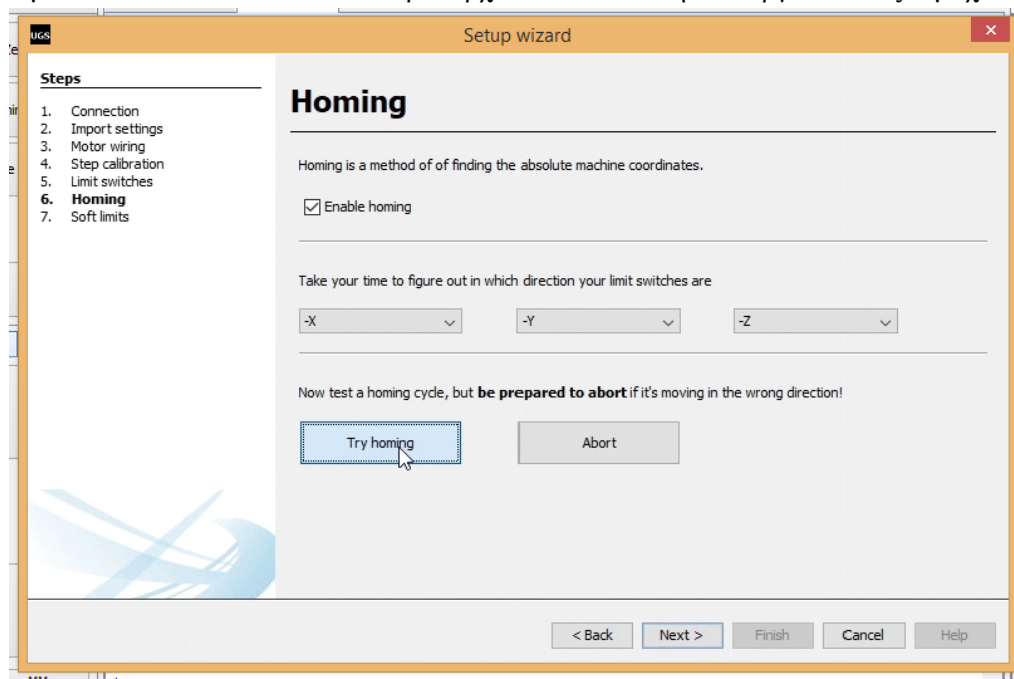
Εικόνα 3-10 Συνδεσμολογία Normal Closed για τους τερματικούς διακόπτες (εικόνα από github.com)

Κάτι ακόμα που πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο είναι το πρόβλημα του θορύβου. Κάποιες φορές μπορεί να πάρουμε σήμα σε κάποια είσοδο του Arduino που να προσκλήθηκε από το περιβάλλον στο οποίο δουλεύει το μηχάνημα ή από μια πτώση τάσης ή από κάποιο γειτονικό σήμα. Αυτό είναι κάτι που δε θέλουμε να συμβεί. Για αυτό το λόγο μπορούμε να βάλουμε κάποιο είδους «φίλτρο» κοντά στις εισόδους του Arduino ώστε να μειώσουμε το φαινόμενο αυτό. Με μια αναζήτηση στο διαδίκτυο μπορεί κανείς να βρει πολλούς τρόπους να φιλτράρει ένα σήμα, ο τρόπος που πραγματοποιήθηκε για το σύστημα κατεργασίας είναι με αντιστάσεις του 1kΩ και πυκνωτές 100nF όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3-11 Συνδεσμολογία Normal Closed για τους τερματικούς διακόπτες με φιλτράρισμα σημάτων (εικόνα από github.com)

Το προτελευταίο βήμα στο UGS setup wizard είναι να ορίσουμε το σημείο που το μηχάνημα θα έχει ως σημείο επίσημης εκκίνησης. Αυτό ονομάζεται αλλιώς και Homing και συνήθως είναι μια διαδικασία που εκτελείται πριν αρχίσει ένα CNC την κατεργασία ενός τεμαχίου.



Εικόνα 3-12 UGS setup wizard, επιλογή σημείου Home

Επιλέγουμε όποια θέση επιθυμούμε και πατάμε τα κουμπιά Try homing για να δούμε αν θα εκτελεστεί σωστά η διαδικασία. Το CNC θα κινηθεί προς τον ένα τερματικό διακόπτη κάθε άξονα σύμφωνα με την κατεύθυνση που επιλέξαμε από τις ρυθμίσεις. Αφού ενεργοποιήσει το διακόπτη μεταφέρεται προς την αντίστροφη κατεύθυνση μέχρι να απενεργοποιηθεί ο διακόπτης και μετά ξανά κινείται μερικά χιλιοστά προς το διακόπτη ώσπου να έρθει ακριβώς ένα χιλιοστό πριν την ενεργοποίησή του. Αυτό γίνεται πρώτα για τον y άξονα και μετά για τον x και τον z ταυτόχρονα. Όταν τελειώσει η διαδικασία του Homing το μηχάνημα βρίσκεται σε θέση τέτοια όπου μπορεί να λειτουργήσει αξιοποιώντας με απόλυτες συντεταγμένες όλο το διαθέσιμο φυσικό λειτουργικό του χώρο.

Στο σύστημα κατεργασίας δοκιμάστηκαν όλες οι διαθέσιμες θέσεις για το Home σημείο. Τελικά επιλέχθηκε η θέση x-, y- και z+.

Στο τελευταίο βήμα του setup wizard μπορούμε να ορίσουμε τα λεγόμενα soft limits. Με αυτό τον όρο αναφερόμαστε στον πραγματικό διαθέσιμο χώρο που μπορεί να κινηθεί η κεφαλή του μηχανήματος. Σαν soft limits λοιπόν μπορούμε να ορίσουμε τις διαστάσεις του κρεβατιού του CNC που είναι λειτουργικές στην πράξη. Με αυτό τον τρόπο το μηχάνημα δε θα κινηθεί πέρα από τα όρια αυτά προστατεύοντας έτσι τον εαυτό του από πιθανή πρόκληση βλάβης.

### 3.4 Λίγα λόγια για τους βηματικούς κινητήρες

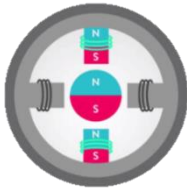
Ένας κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση. Μία βασική τους διαφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους κινητήρες (π.χ. AC) είναι ότι δεν περιστρέφονται συνεχώς, αλλά με βήματα των οποίων το μέγεθος εξαρτάται από τα μηχανικά μέρη του (μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος) και την μέθοδο οδήγησης. Επίσης μια μεγάλη διαφορά των βηματικών κινητήρων είναι ότι οδηγούνται με παλμούς και όχι με τάση AC ή DC [25], [26], [27].

Οι βηματικοί κινητήρες έχουν έναν μόνιμο μαγνητικό περιστρεφόμενο άξονα που ονομάζεται ρότορας και σταθερούς ηλεκτρομαγνήτες που περιβάλλουν τον ρότορα και ονομάζονται στάτες (πηνία). Οι βηματικοί κινητήρες έχουν 50 έως 100 ηλεκτρομαγνητικούς πόλους, δηλαδή ζευγάρια Νότιων και Βόριων πόλων. Κάθε μόνιμος μαγνητικός πόλος είναι και ένα σημείο στο οποίο μπορεί να σταματήσει ο ρότορας, άρα και ο άξονας του κινητήρα. Όσο περισσότερους πόλους έχει ένας βηματικός κινητήρας τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να προσφέρει στην κίνηση του άξονα του. Αυτό το χαρακτηριστικό των βηματικών κινητήρων τους επιτρέπει να τοποθετούν τον άξονα τους με ακρίβεια χωρίς να χρησιμοποιούν κάποιο κύκλωμα ανάδρασης (feedback). Με άλλα λόγια λειτουργούν σε συστήματα ελέγχου ανοιχτού βρόχου (open-loop system). Το σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου επιτρέπει η μετακίνηση του άξονα να οδηγείται από ηλεκτρικούς παλμούς που παράγει κατάλληλα ένας ελεγκτής, σε συγκεκριμένη θέση, χωρίς αυτός να χρειάζεται ανάδραση (πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος). Αυτό είναι ένα από τα οφέλη των βηματικών κινητήρων.

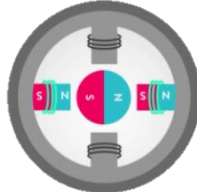
Όταν θέλουμε να αυξήσουμε την ανάλυση ή να επιτύχουμε την μικρότερη περιστροφική κίνηση, ο σχεδιασμός του βηματικού κινητήρα πρέπει να περιέχει μεγάλο αριθμό μαγνητικών πόλων. Το στοιχειώδες μέγεθος βήματος ενός βηματικού κινητήρα αντιστοιχεί σε ορισμένες μοίρες περιστροφής με βάση τον αριθμό των ηλεκτρομαγνητικών πόλων του. Επομένως, η μετάβαση σε μία συγκεκριμένη θέση καθορίζεται εξολοκλήρου από την αποστολή των σωστών παλμών προς τον κινητήρα.

Οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να έχουν από 200 έως και 400 δόντια στο ρότορα τους από τα οποία εξαρτάται η περιστροφή του άξονα τους. Για να προσδιορίσουμε την ανάλυση μιας πλήρους περιστροφής πρέπει να σκεφτούμε αρχικά πόσα δόντια (δηλαδή βήματα) έχει ένας βηματικός κινητήρας. Αν για παράδειγμα έχει 200 δόντια γνωρίζοντας πως μια πλήρης περιστροφή ισούται με έναν κύκλο, δηλαδή 360 μοίρες, διαιρούμε το 360 με το 200 και παίρνουμε 1,8 μοίρες. Δηλαδή σε 1,8 μοίρες αντιστοιχεί ένα πλήρες περιστροφικό βήμα του ρότορα. Αν είχαμε βηματικό κινητήρα με 400 δοντάκια κάνοντας την αντίστοιχη διαίρεση θα παίρναμε 0,9 μοίρες για ένα πλήρες περιστροφικό βήμα του κινητήρα.

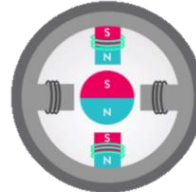
Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία ενός βηματικού κινητήρα θα περιγράψουμε μια πλήρη περιστροφή. Ας υποθέσουμε ότι ένας βηματικός κινητήρας έχει 4 πηνία με γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους. Αρχικά (εικόνα 3-13) ο ρότορας ξεκινάει από μία θέση, ας πούμε από τον επάνω ηλεκτρομαγνητικό πόλο, ο οποίος ενεργοποιείται με τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Έπειτα για να μετακινηθεί ο ρότορας δεξιόστροφα ο επάνω ηλεκτρομαγνητικός πόλος απενεργοποιείται και ενεργοποιείται ο σωστός πόλος, δηλαδή αυτός που βρίσκεται στα δεξιά του κεντρικού πόλου, προκαλώντας την κίνηση του ρότορα 90 μοίρες δεξιόστροφα και ευθυγραμμίζοντας τους ενεργούς μαγνήτες όπως φαίνεται στη δεύτερη θέση (εικόνα 3-14). Τώρα συνεχίζοντας να ενεργοποιούμε και να απενεργοποιούμε τους ηλεκτρομαγνητικούς πόλους όπως φαίνεται στην τρίτη και τέταρτη θέση (εικόνες 3-15 & 3-16) προκαλούμε την ευθυγράμμιση του ρότορα με κάθε νέο ηλεκτρομαγνητικό πόλο που ενεργοποιείται. Με αυτό τον τρόπο ολοκληρώνεται μια πλήρης περιστροφή 360 μοιρών.



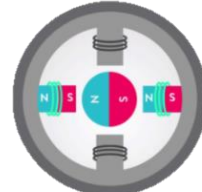
**Εικόνα 3-13 Αρχική θέση του ρότορα του βηματικού κινητήρα (εικόνα realpars)**



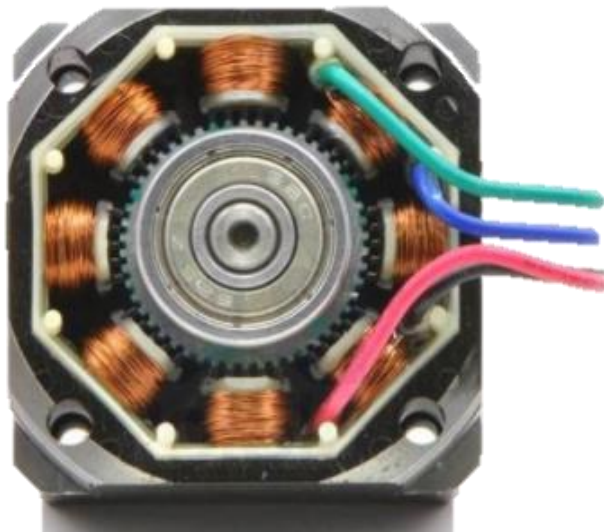
**Εικόνα 3-14 Δεύτερη θέση του ρότορα του βηματικού κινητήρα (εικόνα realpars)**



**Εικόνα 3-15 Τρίτη θέση του ρότορα του βηματικού κινητήρα (εικόνα realpars)**



**Εικόνα 3-16 Τέταρτη θέση του ρότορα του βηματικού κινητήρα (εικόνα realpars)**

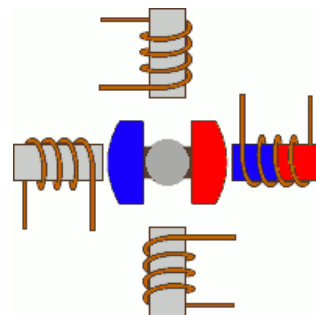


**Εικόνα 3-17 Εσωτερική μορφή ενός βηματικού κινητήρα (εικόνα από okeanis)**

Στον πραγματικό κόσμο οι βηματικοί κινητήρες διαθέτουν μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτρομαγνητικών πόλων και στο ρότορα και στους στάτορες ώστε να έχουν αυξημένη ανάλυση άρα και ακριβέστερη κίνηση στον άξονα τους. Με αυτή την αύξηση των ηλεκτρομαγνητικών πόλων η λειτουργία του κινητήρα μοιάζει με αυτή που περιγράφηκε στο προηγούμενο παράδειγμα με τη διαφορά ότι τώρα μια περιστροφική κίνηση θα ισούται με 1,8 ή 0,9 μοίρες ή γενικά με το αντίστοιχο βήμα (δόντια) του εκάστοτε κινητήρα. Στην εικόνα 3-17 φαίνεται ένα παράδειγμα για το πώς μοιάζει στο εσωτερικό του ένας βηματικός κινητήρας.

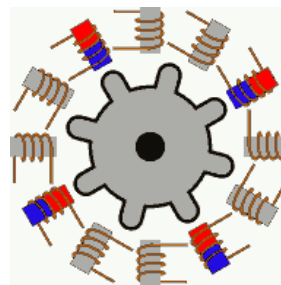
Γενικότερα υπάρχουν οι διπολικόι (bipolar) βηματικοί κινητήρες οι οποίοι διαθέτουν στο εσωτερικό τους ανεξάρτητα μεταξύ τους πηνία και υπάρχουν και οι μονοπολικόι (unipolar) βηματικοί κινητήρες των οποίων τα πηνία έχουν και μεσαία λήψη. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν οι παρακάτω τύποι βηματικών κινητήρων:

- Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Stepper Motor) που διαθέτει έναν μόνιμο μαγνήτη ο οποίος περιστρέφεται ανάλογα με το ρυθμό ενεργοποίησης των πηνίων του τα οποία τον έλκουν και τον απωθούν. Τέτοιου είδους κινητήρες έχουν χαμηλή ροπή, χαμηλή ταχύτητα και μικρό κόστος. Είναι ιδανικοί για μη βιομηχανικές εφαρμογές όπως για παράδειγμα εκτυπωτές και γενικά μηχανήματα γραφείου. Το βήμα περιστροφής τους κυμαίνεται από 45 έως 90 μοίρες (εικόνα 3-18).



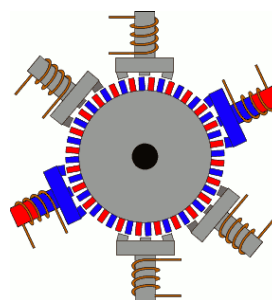
**Εικόνα 3-18 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (εικόνα από robotiki\_G)**

- Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης (Variable Reluctance Stepper Motor) του οποίου ο ρότορας αποτελείται από μαλακό σίδηρο με σχήμα γρاناζιού. Ο στάτορας έχει πολλά πηνία τα οποία ενεργοποιούνται σε αντιδιαμετρικά ζευγάρια. Το βήμα περιστροφής του είναι από 5 έως 15 μοίρες.



Εικόνα 3-19 Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης (εικόνα από robotiki\_G)

- Υβριδικός βηματικός κινητήρας (Hybrid Stepper Motor) είναι αυτός που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των δυο προηγούμενων τύπων κινητήρων με αποτέλεσμα να έχει υψηλή ροπή και πολύ μικρά βήματα περιστροφής από 0.9 έως 5 μοίρες.



Εικόνα 3-20 Υβριδικός βηματικός κινητήρας (εικόνα από robotiki\_G)

Όσον αφορά τώρα τους τρόπους οδήγησης των βηματικών κινητήρων έχουμε:

- Την wave drive ή single coil excitation οδήγηση κατά την οποία η κατεύθυνση περιστροφής του άξονα καθορίζεται μονάχα από ένα πηνίο για κάθε βήμα, το οποίο ενεργοποιείται και έλκει τον ρότορα. Δεν χρησιμοποιείται πολύ γιατί προσφέρει το ήμισυ της ροπής του κινητήρα, με αποτέλεσμα αυτός ο τρόπος οδήγησης να μπορεί να κατευθύνει μόνο χαμηλά φορτία.
- Την οδήγηση πλήρους βήματος, full-step drive, κατά την οποία τα πηνία ενεργοποιούνται ανά ζεύγη είτε σε σειρά ή παράλληλα. Αυτός ο τύπος οδήγησης καταναλώνει περισσότερη ενέργεια όμως αποδίδει πλήρως την ροπή του κινητήρα.
- Την οδήγηση μισού βήματος, half-stepping, η οποία είναι μια βελτιωμένη εκδοχή της οδήγησης πλήρους βήματος. Δεν αλλάζει κάτι στο υλικό του κινητήρα όμως επιτυγχάνεται διπλάσια ακρίβεια στην κίνηση του κινητήρα, κάνοντας τον να κινείται σε μισά βήματα από ότι στην full-step οδήγηση.
- Την microstepping οδήγηση, όπου στα πηνία στέλνονται κυματομορφές παρόμοιες με ημιτονοειδείς κυματομορφές, αντί για παλμούς. Αυτός ο τρόπος οδήγησης δίνει ομαλότερη και ακριβέστερη κίνηση στον κινητήρα και του επιτρέπει να περιστρέφεται συνεχώς, όπως ένας DC κινητήρας.

Στο σύστημα κατεργασίας χρησιμοποιήθηκαν βηματικοί κινητήρες αντί για σερβοκινητήρες. Οι παράγοντες που λήφθηκαν υπόψη για να αποφασιστεί τι είναι καλύτερο για την κατασκευή είναι πολλοί, όπως για παράδειγμα θέματα κόστους, ταχύτητας, ροπής κτλ. Στη συνέχεια θα αναφερθούν μερικοί ορισμοί που χρησιμοποιούνται με τους βηματικούς κινητήρες αλλά και μερικά πλεονεκτήματά τους και με βάση αυτά θα αιτιολογηθεί η επιλογή των βηματικών κινητήρων για τη συγκεκριμένη κατασκευή.



### Ροπή

Ροπή είναι η τάση μιας δύναμης που περιστρέφει ένα αντικείμενο γύρω από έναν άξονα στον οποίο στηρίζεται το αντικείμενο. Η ροπή είναι διανυσματικό μέγεθος και μετρείται σε Νιουτόμετρα (Nm). Στους βηματικούς κινητήρες διακρίνουμε:

- Την μέγιστη ροπή εκκίνησης. Είναι η ροπή που μπορεί να αναπτυχθεί στον άξονα του κινητήρα, όταν αυτός εκκινεί, χωρίς να χάσει βήματα.
- Την μέγιστη ροπή λειτουργίας. Είναι η ροπή που μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του υπό φορτίο χωρίς να χάσει βήματα.
- Την ροπή συγκράτησης. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται η δυνατότητα ενός βηματικού κινητήρα να αναπτύσσει ροπή όταν είναι ακίνητος. Η μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοστεί εξωτερικά στον κινητήρα (όταν αυτός είναι ακίνητος) χωρίς να τον κινήσει είναι η ροπή συγκράτησης.

### Επαναληψιμότητα και ακρίβεια

Η επαναληψιμότητα είναι η ικανότητα ενός μηχανισμού κίνησης να επιστρέφει στην ίδια ακριβώς θέση κάθε φορά που βρίσκεται υπό τις ίδιες συνθήκες. Ακρίβεια από την άλλη, είναι το πόσο σωστά ανταποκρίνεται η κίνηση του κινητήρα σύμφωνα με την εντολή που λαμβάνει. Για παράδειγμα, αν σε μια εφαρμογή θεωρούνται ικανοποιητικά αποτελέσματα των  $45\text{mm} \pm 2\text{mm}$ , τότε αν με την κίνηση του άξονα επιτυγχάνεται μια θέση μεταξύ 43mm και 47mm θεωρείται ακριβής. Ένα σύστημα με κενά στους συνδέσμους κίνησης του (joins) μπορεί να έχει ακρίβεια αλλά όχι επαναληψιμότητα.

### Υπερφόρτωση

Η υπερφόρτωση του κινητήρα παρατηρείται όταν βάλουμε τον κινητήρα να οδηγήσει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που μπορεί να αντέξει. Όταν υπερφορτωθεί ένας κινητήρας συνήθως τραβάει περισσότερο ρεύμα από αυτό που χρειάζεται για να λειτουργήσει υπό φυσιολογικές συνθήκες και έτσι υπερθερμαίνεται. Παρατεταμένη υπερφόρτωση συνήθως οδηγεί σε καταστροφή των τυλιγμάτων μέσω βραχυκυκλώματος. Ένα ακόμα φαινόμενο που μπορεί να παρατηρηθεί είναι ανεπαρκής ροπή.

### Αποδοτικότητα

Η αποδοτικότητα είναι το ποσοστό της μηχανικής εργασίας που αποδίδει ο κινητήρας σε σχέση με την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει για να την εκτελέσει. Μερικές φορές κατά τη λειτουργία του ένας κινητήρας «σκαλώνει». Στο ανθρώπινο μάτι αυτό το «σκάλωμα» φαίνεται σαν να δονείται ο άξονας του κινητήρα στο ίδιο σημείο και συνήθως ταυτόχρονα ακούγεται ένας έντονος θόρυβος. Αυτό το φαινόμενο προφανώς και είναι ανεπιθύμητο και αντίθετο της αποδοτικότητας.

Συμπέρασμα, το να καταλήξει κανείς στην επιλογή βηματικών κινητήρων για την κατασκευή του είναι εύκολο καθώς τα πλεονεκτήματά τους είναι πολλά. Οι βηματικοί κινητήρες προσφέρουν ευελιξία στην εφαρμογή για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Λόγω του σχεδιασμού τους παρέχουν μια σταθερή ροπή συγκράτησης χωρίς να χρειάζονται ενεργοποίηση. Επιπλέον σε θέματα ροπής ένας βηματικός κινητήρας αποδίδει πολύ καλά σε χαμηλές ταχύτητες. Επίσης όσο μεγαλύτερη ροπή έχει ένας κινητήρας τόσο πιο πολύ φορτίο μπορεί να οδηγήσει χωρίς επιπλέον βοηθητικούς μηχανισμούς, πχ μειωτές.

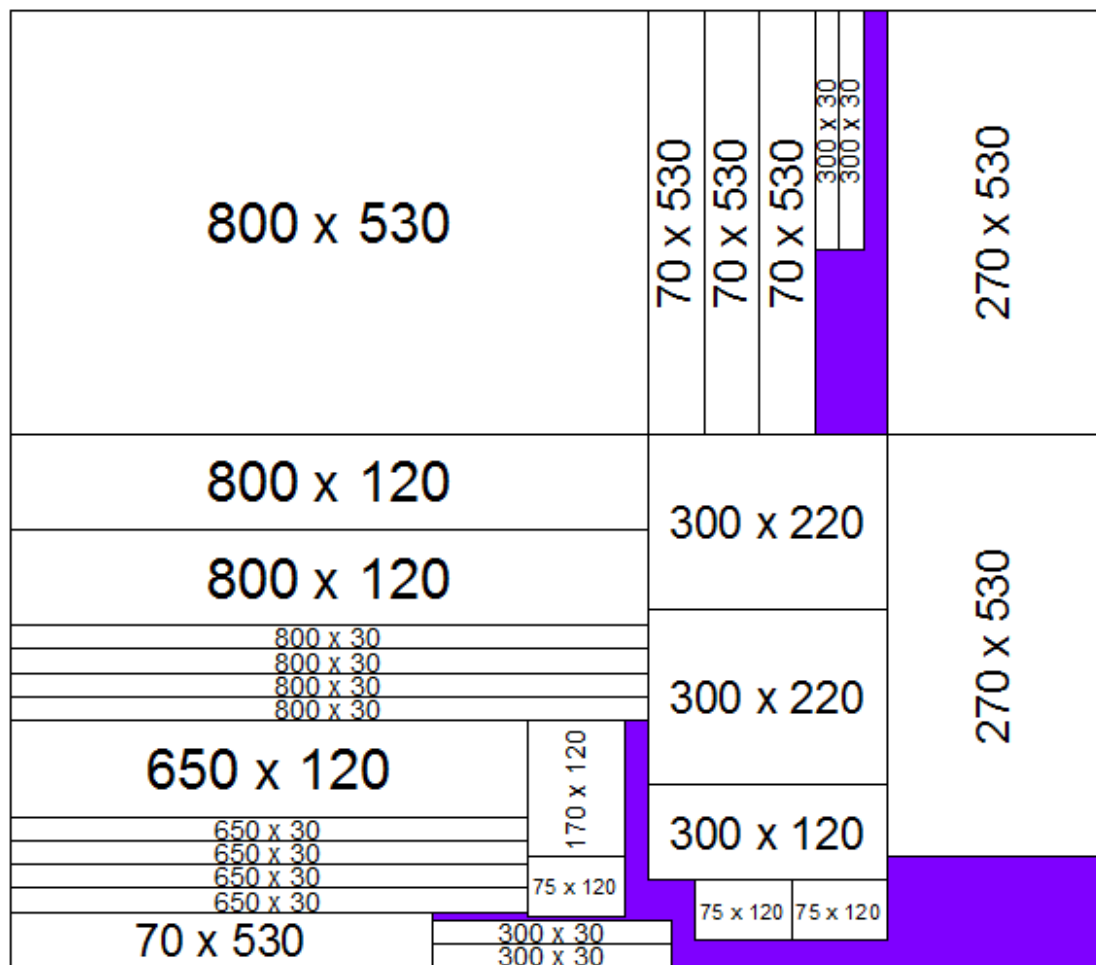
Έπειτα οι βηματικοί κινητήρες είναι οικονομικότεροι. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι βηματικοί κινητήρες δουλεύουν σε συστήματα ανοιχτού βρόχου όπου δεν απαιτείται ανατροφοδότηση για τον έλεγχο του κινητήρα. Αυτός είναι και ένας λόγος που κάνει τους βηματικούς κινητήρες φθηνούς καθώς δε χρειάζονται κάποιο περίπλοκο κύκλωμα στην κατασκευή τους..

Όπως προαναφέρθηκε οι βηματικοί κινητήρες επιτρέπουν στον άξονα τους να επιστρέφει στην ίδια θέση με ακρίβεια αποδίδοντας έτσι και εξαιρετική επαναληψιμότητα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των βηματικών είναι πως είναι ασφαλείς σε περιπτώσεις υπερφόρτωσης. Ο κινητήρας δε μπορεί να υποστεί ζημιά από μηχανική υπερφόρτωση, τα ενδεχόμενα είναι να σταματήσει η λειτουργία του ή να προκληθεί απώλεια θέσης. Κάτι τέτοιο φυσικά είναι πιθανό να συμβεί όταν το φορτίο που αναλαμβάνει να οδηγήσει ο κινητήρας είναι μεγαλύτερο από τις δυνατότητες του. Για αυτό οι βηματικοί κινητήρες είναι καλύτεροι για εφαρμογές όπου το φορτίο προς οδήγηση είναι σταθερό.

Συνοψίζοντας, οι βηματικοί κινητήρες είναι εύκολοι στην εγκατάσταση και τη χρήση τους συνολικά (plug and play). Είναι μια πολύ καλή επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές ταχύτητες και υψηλή ακρίβεια. Είναι αρκετά ανθεκτικοί, απλοί στην κατασκευή, δε χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση, ανταποκρίνονται άμεσα στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και την αναστροφή (αλλαγή κατεύθυνσης). Έτσι λοιπόν για όλους αυτούς τους λόγους επιλέχθηκε η χρήση βηματικών κινητήρων στο σύστημα κατεργασίας, καθώς τα χαρακτηριστικά τους καλύπτουν τις ανάγκες του συστήματος.

### **3.5 Η κατασκευή του σκελετού του συστήματος κατεργασίας**

Τα ξύλινα τμήματα του συστήματος κατεργασίας κατασκευάστηκαν όλα στο ξυουργείο του πατέρα μου όπου είχαμε πρόσβαση. Την ξυλεία την προμηθευτήκαμε από τοπικό μαγαζί στο οποίο παραγγείλαμε ένα φύλο σημύδας διαστάσεων 2,50 x 1,20m. Το κομμάτι που χρειαστήκαμε για την κατασκευή του σκελετού του μηχανήματος κόπηκε σε διαστάσεις 1,37 x 1,20m. Το υπόλοιπο κομμάτι φυλάχτηκε για τις δοκιμές του CNC. Για να κόψουμε από το φύλο 1,37 x 1,20m τα κομμάτια που χρειαζόμασταν κάναμε ένα σχέδιο στο οποίο τοποθετήσαμε τα κομμάτια έτσι ώστε να αφήσουμε όσο το δυνατόν λιγότερο κενό χώρο. Έτσι αξιοποιήσαμε το υλικό μας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Το σχέδιο με την τοποθέτηση των κομματιών φαίνεται παρακάτω.



**Εικόνα 3-21 Βοηθητική διάταξη για την κοπή των ξύλινων κομματιών της κατασκευής (σχέδιο της γραφούσης)**

Με μωβ χρώμα στην εικόνα 3-21 φαίνονται τα κομμάτια που περίσσεψαν από την κοπή, ενώ για κάθε ωφέλιμο κομμάτι αναγράφεται το πλάτος και το ύψος του σε χιλιοστά (mm). Το πάχος ολόκληρου του φύλου και συνεπώς όλων των κομματιών είναι 15mm.

Για να δώσουμε μια πλήρη εικόνα του τι υλικά χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή στη συνέχεια δίνεται ένας πίνακας που συνοψίζει όλα τα υλικά-εξαρτήματα που αγοράστηκαν για το σύστημα κατεργασίας.

Όνομα	Κωδικός	Ποσότητα
Γραμμικός άξονας	MGN12 x 800	2 τεμ.
Γραμμικός άξονας	MGN12 x 650	2 τεμ.
Γραμμικός άξονας	MGN12 x 300	2 τεμ.
Φορεία	MNG12H	12 τεμ.
Σετ ατέρμονα άξονα με φορείο (περικόχλιο), ασφάλεια άξονα & παξιμάδι	SFU1605 x 700	2 τεμ.
Σετ ατέρμονα άξονα με φορείο (περικόχλιο), ασφάλεια άξονα & παξιμάδι	SFU1605 x 550	1 τεμ.
Σετ ατέρμονα άξονα με φορείο (περικόχλιο), ασφάλεια άξονα & παξιμάδι	SFU1605 x 200	1 τεμ.
Πρωτεύων στήριγμα ατέρμονα άξονα	BK12	4 τεμ.
Δευτερεύων στήριγμα ατέρμονα άξονα	BF12	4 τεμ.

Φωλιά περικογλίου ατέρμονα	HD16	4 τεμ.
Συνδέτης (Coupler)	RM1605	4 τεμ.
Βηματικοί κινητήρες Nema 23	23H55628	4 τεμ.
Κύκλωμα οδήγησης βηματικού κινητήρα	TB6600	4τεμ.
Καλωδιοφορέας	1M (10x20x1000mm)	2 τεμ.
Διακόπτες (Latching Rocket Switch)	KCD4	2 τεμ.
Τροφοδοτικό 12V 15A 180W	S-360-12	1τεμ.
Τερματικοί διακόπτες (Limit Switches)	V-156-1C25	6 τεμ.
Ρούτερ (Trimmer)	Makita RT0700C	1 τεμ.
Πλακέτα Arduino	Arduino UNO	1 τεμ.
Καλώδιο USB Panel Mount B – Αρσενικό σε B θηλυκό	19 19-00011907	1 τεμ.
Καλώδιο USB A σε B	05-00085102	1 τεμ.
Χρωματιστά καρούλια καλωδίων 0.34<> καρέ (σημάτων)	PRT-11375	8 τεμ.
Καλώδια κόκκινα & μαύρα (τροφοδοσίας)	1.5<>	
Καλώδια πολύχρωμα (σημάτων)	1<>	
Ξυλόβιδες		
Βίδες allen		
Ροδέλες μεταλλικές		16 τεμ.
Λευκές ηλεκτρολογικές κλέμες		
Ανεμιστήρες		2 τεμ.

**Πίνακας 3- 1 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του συστήματος κατεργασίας**

Εν συνεχεία παρατίθεται μία λίστα με τα εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε για να επεξεργαστούμε το ξύλο και να συναρμολογήσουμε το σύστημα κατεργασίας.

- Κατσαβίδια σταυρός (Philips) και ίσια
- Πάγκος κοπής ξύλων
- Τροχός
- Πριόνι
- Ρούτερ
- Ξυλόκολλα
- Βιδολόγος με μπαταρία
- Ποτηροτρύπανα
- Συλλογή allen
- Τρυπάνια και ηλεκτρικό τρυπάνι
- Δράπανο
- Χάρακας
- Μέτρο
- Αλφάδι
- Παχύμετρο
- Σφικτήρες

Αφού κόψαμε όλα τα ξύλινα τεμάχια που χρειαζόμασταν, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-21, συνεχίσαμε με την συναρμολόγηση τους και την τοποθέτηση των εξαρτημάτων. Το πρώτο τμήμα που συναρμολογήσαμε ήταν η βάση του συστήματος ή αλλιώς το κρεβάτι. Τα ξύλινα τεμάχια που αναλογούν στη βάση του συστήματος είναι 1τεμάχιο 800 x 530mm, 4 τεμάχια 800 x 30mm, 2 τεμάχια 75 x 120mm, 2 τεμάχια 800 x 120mm, 4 τεμάχια 70 x 530mm και 2 τεμάχια 530 x 270mm. Με τα 8 τελευταία τεμάχια κατασκευάστηκαν τα δύο τελάρα που στηρίζουν το κρεβάτι του συστήματος. Για να τα ενώσουμε μεταξύ τους χρησιμοποιήσαμε ξυλόκολλα, ηλεκτρικό τρυπάνι και ξυλόβιδες. Μερικά στάδια της διαδικασίας αυτής φαίνονται παρακάτω.



**Εικόνα 3-22 Στιγμιότυπο από τη κατασκευή της βάσης του συστήματος (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-23 Στιγμιότυπο από τη κατασκευή της βάσης του συστήματος κατεργασίας (εικόνα της γραφούσης)**

Κατόπιν ακολούθησε η προετοιμασία των κομματιών που θα στηρίζουν τους γραμμικούς άξονες της βάσης. Αυτά είναι τα 4 τεμάχια 800 x 30mm. Πριν να τα συνδέσουμε στην υπόλοιπη κατασκευή τα ενώσαμε μεταξύ τους ανά δύο χρησιμοποιώντας ξυλόκολλα. Τα σφίξαμε με σφικτήρες και τα αφήσαμε στην άκρη ώσπου να στεγνώσει η κόλλα. Αυτό το κάναμε και στα αντίστοιχα κομμάτια των άλλων δύο αξόνων (4 τεμάχια 650 x 30mm και 4 τεμάχια 300 x 30mm) ώστε να τα έχουμε έτοιμα για αργότερα. Αυτό το στάδιο φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.



**Εικόνα 3-24 Στιγμιότυπο από την ένωση των στηριγμάτων των γραμμικών αξόνων του Z άξονα (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-25 Στιγμιότυπο από την ένωση των στηριγμάτων των γραμμικών αξόνων του X και του Y άξονα (εικόνα της γραφούσης)**

Έπειτα, μέχρι να στεγνώσει η κόλλα στα παραπάνω κομμάτια, ετοιμάσαμε τα δύο στηρίγματα για τους κινητήρες της βάσης. Τα κομμάτια αυτά είναι διαστάσεων 75 x 120mm και χρειάστηκε να κάνουμε μια τρύπα στο καθένα ώστε να περνάει το coupler που θα ενώνει τον άξονα του κινητήρα με τον ατέρμονα άξονα (κοχλία). Για να κάνουμε αυτές τις τρύπες χρησιμοποιήσαμε το δρέπανο και ένα ποτηροτρύπανο με διάμετρο 25mm. Παρακάτω ακολουθούν στιγμιότυπα από το τρύπημα των τεμαχίων αυτών καθώς και από την τοποθέτησή τους στη βάση του συστήματος μαζί με τα στηρίγματα και τους γραμμικούς άξονες.

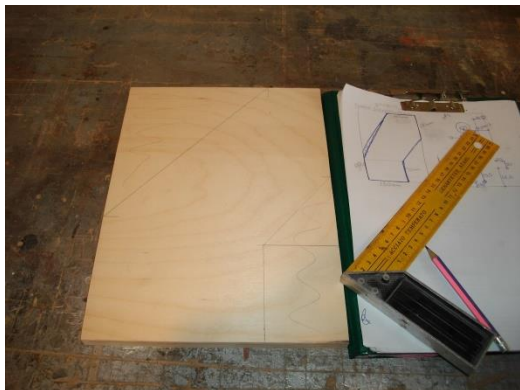


**Εικόνα 3-26 Στιγμιότυπο από το τρύπημα των στηριγμάτων των βηματικών κινητήρων (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-27 Στιγμιότυπο από τη συναρμογή της βάσης (εικόνα της γραφούσης)**

Η διαδικασία της κατασκευής συνεχίστηκε με το κομμάτι της γέφυρας για το οποίο αναλογούν τα 2 ξύλινα τεμάχια 300 x 220mm, 4 τεμάχια 650 x 30mm και 1 τεμάχιο 650 x 120mm. Με τα 2 τεμάχια 300 x 220mm φτιάξαμε τα στηρίγματα που ενώνουν τη γέφυρα με τη βάση του συστήματος. Σχεδιάσαμε πάνω στο ένα τεμάχιο το σχήμα που θέλαμε να πάρουμε και στη συνέχεια κόψαμε (επάνω στα σημάδια) και τα δύο τεμάχια μαζί στο σχήμα που θέλαμε με τη βοήθεια ενός ρούτερ.



**Εικόνα 3- 28 Βοηθητικό σημάδεμα για την κοπή των στηριγμάτων της γέφυρας (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-29 Κοπή των στηριγμάτων της γέφυρας με τη χρήση ρούτερ (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-30 Τρύπημα του αριστερού στηρίγματος της γέφυρας (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3- 31 Τρίψιμο ακμών με γυαλόχαρτο μετά την κοπή με το ρούτερ (εικόνα της γραφούσης)**

Αφού κόψαμε και τα δύο κομμάτια μαζί, για να είναι ολόδια, κάναμε μια τρύπα στο αριστερό κομμάτι. Το τρύπημα έγινε, όπως και πριν, με το δρέπανο και ένα ποτηροτρύπανο διαμέτρου 25mm. Η τρύπα αυτή έγινε για να περνάει το coupler που θα συνδέει τον άξονα του κινητήρα της γέφυρας με τον αντίστοιχο ατέρμονα (κοχλία). Το επόμενο βήμα ήταν να βιδώσουμε τα στηρίγματα των γραμμικών αξόνων (650 x 30mm που προηγουμένως είχαμε κολλήσει ανά δύο) στην τραβέρσα της γέφυρας (650 x 120mm).

Έπειτα προσαρμόσαμε στην τραβέρσα το αριστερό στηρίγμα (αυτό με τη τρύπα) και τοποθετήσαμε τους γραμμικούς άξονες, τον κινητήρα και το σετ του ατέρμονα άξονα. Το δεξί στηρίγμα της γέφυρας δεν το τοποθετήσαμε ακόμα για να μας είναι εύκολη στη συνέχεια η σύνδεση της γέφυρας με τη τραβέρσα του Z άξονα με την οποία και συνεχίσαμε την πορεία της κατασκευής.



**Εικόνα 3-32 Συναρμογή της γέφυρας του συστήματος κατεργασίας (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-33 Συναρμογή Z τραβέρσας με γραμμικούς άξονες και φορεία (εικόνα της γραφούσης)**

Τα ξύλινα κομμάτια που χρησιμοποιήθηκαν για το τμήμα του Z άξονα είναι τα εξής, 4 τεμάχια 300 x 30mm, 1 τεμάχιο 300 x 120mm, 1 τεμάχιο 75 x 120mm και 1 τεμάχιο 170 x 120mm. Το κομμάτι 75 x 120mm τρυπήθηκε στο δρέπανο με ποτηροτρύπανο 25mm για να περνάει το coupler που θα συνδέει τον άξονα του κινητήρα με τον ατέρμονα (κοχλία) για τη τραβέρσα του Z άξονα. Έπειτα βιδώσαμε τα στηρίγματα των γραμμικών αξόνων καθώς και τους ίδιους τους άξονες στην τραβέρσα του Z.

Στη συνέχεια συνδέσαμε την τραβέρσα της γέφυρας με την τραβέρσα του Z άξονα και προσθέσαμε το σετ του ατέρμονα άξονα στον Z, τον κινητήρα του και το κομμάτι που στηρίζει τη συγκράτηση της κεφαλής. Για αυτό το κομμάτι που στηρίζει τη συγκράτηση της κεφαλής πήραμε το τεμάχιο 170 x 120mm και του κόψαμε τις δύο κάτω γωνίες στο δισκοπρίονο. Ο λόγος που το κάναμε αυτό ήταν απλά για να είναι πιο κομψή η εμφάνιση του κομματιού. Παρακάτω στην εικόνα 3-34 φαίνεται ένα στιγμιότυπο από την διαδικασία σύνδεσης της γέφυρας με το Z άξονα.



**Εικόνα 3-34 Στιγμιότυπο από τη σύνδεση του τμήματος της γέφυρας με το τμήμα του Z άξονα (εικόνα της γραφούσης)**

Εν συνεχεία αφού τελειώσαμε με τη σύνδεση της γέφυρας με τη τραβέρσα του Z άξονα και βάλουμε και το δεξί στηρίγμα της γέφυρας, ήρθε η ώρα όλη αυτή η συναρμογή να ενωθεί με τη βάση του συστήματος. Για να γίνει σωστά η ένωση αυτή, βάλουμε στα δεξιά και στα αριστερά της βάσης ξύλινους τάκους που είχαν το ίδιο ύψος. Επάνω σε αυτούς τους τάκους ακουμπήσαμε προσωρινά την υπόλοιπη κατασκευή και βιδώσαμε τα ξύλινα στηρίγματα της γέφυρας με τα φορεία των ατέρμονων και των γραμμικών αξόνων της βάσης. Πριν βιδώσουμε τα φορεία μετρήσαμε τις μεταξύ τους αποστάσεις ώστε να είναι ίδιες και από τις δύο πλευρές του συστήματος. Επίσης μετρήσαμε την απόσταση του πίσω μέρους των ξύλινων στηριγμάτων της γέφυρας με το πίσω μέρος της βάσης ώστε να είναι στο ίδιο ακριβώς σημείο και τα δύο στηρίγματα και να μην κινηθεί στραβά η γέφυρα στη συνέχεια.



**Εικόνα 3-35 Μπροστινή άποψη του συστήματος κατεργασίας (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-36 Πλάγια άποψη του συστήματος κατεργασίας (εικόνα της γραφούσης)**



Το τελευταίο κομμάτι που κατασκευάσαμε ήταν αυτό της συγκράτησης της κεφαλής. Η αρχική ιδέα ήταν να χρησιμοποιήσουμε το μεταλλικό μάνταλο (λαιμός) που είχε το ίδιο το ρούτερ όταν το αγοράσαμε. Αυτό το μάνταλο είναι ειδικά κατασκευασμένο για το συγκεκριμένο ρούτερ και χρησιμοποιείται σαν οδηγός όταν θέλουμε να κόψουμε χειροκίνητα με το ρούτερ. Έτσι για να μην το χαλάσουμε φτιάξαμε μία ξύλινη προσαρμογή για την συγκράτηση του ρούτερ πάνω στο σύστημα κατεργασίας. Από τα κομμάτια ξύλου που μας είχαν περισσέψει κόψαμε δύο κομμάτια, ένα 170 x 100mm και ένα 100 x 100mm. Τα ταιριάξαμε μεταξύ τους ώστε το μικρό κομμάτι να είναι στο κέντρο σε σχέση με το μεγάλο κομμάτι και τους κάναμε μια μεγάλη τρύπα στο κέντρο. Η τρύπα έγινε στο δράπανο με ποτηροτρύπανο διαμέτρου 90mm. Στη συνέχεια με ένα πριόνι χειρός αφαιρέσαμε ένα μικρό κομμάτι από την περιφέρεια των δύο κύκλων και κόψαμε τις δύο εξωτερικές γωνίες των κομματιών διαγώνια. Κατόπιν τρυπήσαμε κατά μήκος της εγκοπής και περάσαμε μια βίδα με δύο ροδέλες και ένα παξιμάδι σε κάθε κομμάτι, που λειτουργούν σαν σφικτήρες. Όσο βιδώνουμε τη βίδα στο παξιμάδι τόσο πιο πολύ μικραίνουμε τη διάμετρο του τρυπημένου κύκλου, έτσι σφίγγουμε το λαιμό του ρούτερ και το συγκρατούμε στη θέση που θέλουμε.



**Εικόνα 3-37 Τρύπημα των στηριγμάτων του ρούτερ (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-38 Λείανση των στηριγμάτων του ρούτερ με γυαλόχαρτο (εικόνα της γραφούσης)**



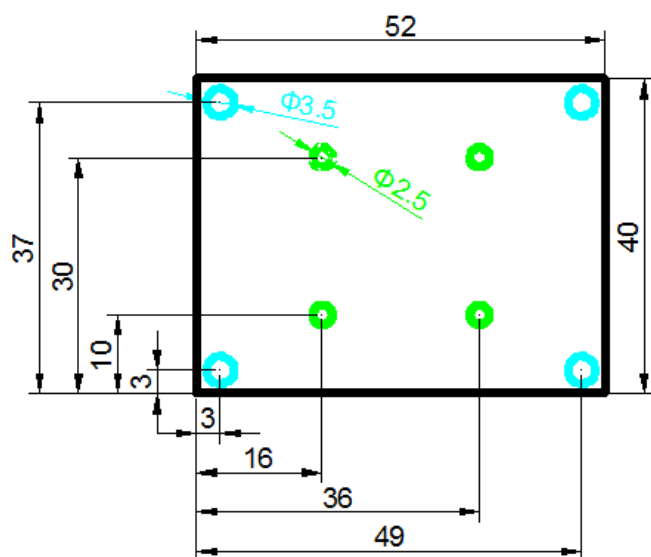
**Εικόνα 3-39 Επιβεβαίωση ότι το ρούτερ ταιριάζει με τα στηρίγματα που του κάναμε (εικόνα της γραφούσης)**



**Εικόνα 3-40 Τοποθέτηση των στηριγμάτων για τη συγκράτηση του ρούτερ στη κατασκευή (εικόνα της γραφούσης)**

Κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης του συστήματος προέκυψε ένα μικρό πρόβλημα στην προσαρμογή των φορέων με τα ξύλινα τεμάχια που έπρεπε να συνδεθούν. Τα φορεία διαθέτουν τέσσερις τρύπες από τη μεριά πρόσδεσης, εμείς έπρεπε να βιδώσουμε το κομμάτι ξύλου σε αυτές τις βίδες χωρίς να βλέπουμε το που ακριβώς βρίσκονται αφού ακουμπούσε η

επιφάνεια του ξύλου στην πλευρά αυτή και τις κάλυπτε. Η λύση στο πρόβλημα αυτό δόθηκε με μια ιδική κατασκευή από λάμα αλουμινίου. Για την παραγωγή ατόν των κομματιών επισκευτήκαμε μηχανουργείο της Stakam AEBE, όπου εργάζομαι, και χρησιμοποιήσαμε φρέζα και δισκοπρίονο. Πρώτα από μια λάμα αλουμινίου 40x500x5mm κόψαμε στο δισκοπρίονο 12 τεμάχια μήκους 52mm. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη φρέζα και τα κατάλληλα τρυπάνια κάναμε τις τρύπες όπως φαίνονται στην εικόνα 3-41. Η φρέζα είναι ένα εργαλείο που επιτρέπει πολύ λεπτομερή κατεργασία μέχρι δέκατο του χιλιοστού και είναι ιδανική για να φτιάξει κανείς αντικείμενα που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια. Τα λαμάκια που κατασκευάσαμε χρειάζονταν μεγάλη ακρίβεια γιατί οι αποστάσεις που έχουν οι τρύπες πρόσδεσης του φορείου είναι συγκεκριμένες και αν τα λαμάκια δεν έχουν τις ίδιες τρύπες τότε δεν θα γίνει σωστή προσαρμογή. Ένα παράδειγμα της λάμας σε χρήση φαίνεται στην εικόνα 3-42, όπου αριστερά είναι το κομμάτι ξύλου που θέλαμε να στηρίξουμε, στη μέση είναι το λαμάκι και στα δεξιά είναι το φορείο. Πρακτικά πρώτα βιδώσαμε το λαμάκι πάνω στο φορείο (4 μικρές τρύπες, εικόνα 3-41) και ύστερα το λαμάκι στην επιφάνεια του ξύλου (4 μεγάλες τρύπες, εικόνα 3-41).



**Εικόνα 3-41 Κατασκευαστικό σκαρίφημα βοηθητικής λάμας (σχέδιο της γραφούσης)**



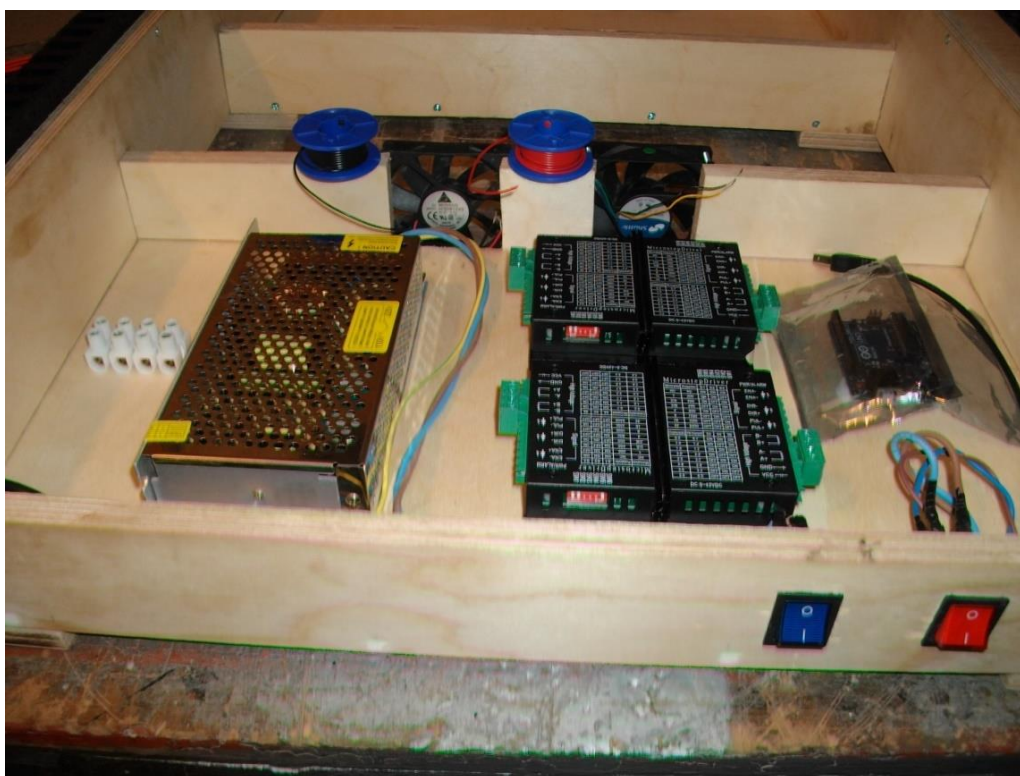
**Εικόνα 3-42 Παράδειγμα προσαρμογής της λάμας (φωτογραφία της γραφούσης)**

Το εικονιζόμενο σχέδιο της εικόνας 3-41 είναι μηχανολογικό και δημιουργήθηκε στο AutoCAD για να μας καθοδηγήσει για το που πρέπει να τρυπήσουμε τη λάμα με τη φρέζα. Η φρέζα έχει ένα σημείο που αποκαλείται σημείο μηδέν και από αυτό το σημείο υπολογίζουμε την απόσταση που θα μετακινήσουμε τον X και τον Y άξονα σε σχέση με τον Z άξονα που είναι αυτός που φέρει το εργαλείο κοπής. Για αυτό το λόγο οι διαστάσεις στο σχέδιο μας σχετίζονται με τη θέση κάθε τρύπας έχουν κοινό σημείο την κάτω αριστερή γωνία της λάμας μας, γιατί αυτό θεωρήσαμε ως σημείο μηδέν της φρέζας. Όπως είπαμε, χρειάστηκε να φτιάξουμε 12 τέτοια λαμάκια, έτσι για να καταφέρουμε να τα κάνουμε όλα ίδια ακολουθήσαμε τον εξής αλγόριθμο για το τρύπημα κάθε λάμας. Φτιάξαμε μια στοίβα με όλα μας τα λαμάκια και τοποθετούσαμε την πρώτη μας λάμα στη μέγερη της φρέζας. Στη συνέχεια μετακινήσαμε στο επιθυμητό σημείο τους άξονες X και Y της φρέζας πχ στο 3, 3 και τρυπούσαμε την πρώτη λάμα στο σημείο αυτό. Κατόπιν αφαιρούσαμε την λάμα την τοποθετούσαμε σε μια νέα στοίβα και συνεχίσαμε το τρύπημα στα υπόλοιπα λαμάκια της αρχικής στοίβας. Μόλις τελειώναμε το τρύπημα σε μια θέση για όλα τα λαμάκια

προχωρούσαμε στην επόμενη θέση τρύπας. Με αυτό τον τρόπο αποφύγαμε να κάνουμε κάποιο λάθος, τα λαμάκια βγήκαν όλα ίδια και επισπεύθηκε ο χρόνος παραγωγής τους. Οι τρύπες που φαίνονται στην εικόνα 3-41 με γαλάζιο χρώμα τρυπήθηκαν με τρυπάνι διαμέτρου 3,5mm (διαμετρής τρύπημα) ώστε να μπορέσουν να περάσουν οι ξυλόβιδες αργότερα που θα κρατάνε το ξύλο πάνω στη λάμα. Οι τρύπες που φαίνονται στην εικόνα 3-41 με πράσινο χρώμα έγιναν με τρυπάνι διαμέτρου 2,5mm (διαμετρής τρύπες) και από τη μια πλευρά κάθε λάμας σε αυτές τις τρύπες κάναμε και φρέζα (κωνική τρύπα) χρησιμοποιώντας ιδικό εργαλείο που ονομάζεται ξυλόφρεζα (κωνικό, μυτερό και αιχμηρό εργαλείο). Οι φρέζες έγιναν γιατί θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε φρεζάτες βίδες (βίδες με κωνικό κεφάλι) για να στερεώσουμε κάθε λαμάκι στο αντίστοιχο φορείο και να μην εξέχουν από την επιφάνεια της λάμας τα κεφάλια από τις βίδες.

### 3.6 Η σύνδεση των ηλεκτρονικών τμημάτων του συστήματος κατεργασίας

Μετά την κατασκευή του σκελετού του μηχανήματος και την τοποθέτηση των μηχανικών τμημάτων ακολούθησε η τοποθέτηση και σύνδεση των ηλεκτρονικών τμημάτων. Για να δώσουμε κίνηση στο σύστημα μας χρησιμοποιήσαμε βηματικούς κινητήρες με κύκλωμα οδήγησης το Microstep Driver TB6600 [28]. Κάθε βηματικός κινητήρας έχει το δικό του Driver, όλοι οι Drivers ρυθμίστηκαν ώστε να δίνουν στους κινητήρες 200 παλμούς ανα περιστροφή και το ρεύμα να είναι σύμφωνα και με τα χαρακτηριστικά των κινητήρων στα 2,8A. Για να συντονίσουμε την κίνηση των κινητήρων συνδύασαμε τα κυκλώματα οδήγησης των βηματικών κινητήρων με το Arduino. Ξεκινώντας λοιπόν τη διαδικασία τις συνδεσμολογίας των ηλεκτρονικών το πρώτο πράγμα που κάναμε ήταν να τοποθετήσουμε το 12V τροφοδοτικό μας, τους τέσσερις οδηγούς TB6600, την πλακέτα του Arduino, τους διακόπτες ON/OFF, τους ανεμιστήρες και μερικές βοηθητικές ηλεκτρολογικές κλέμες στο μπροστινό τελάρο του σκελετού του μηχανήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 3-43 (βλέπε παράγραφο 1.5.3).



Εικόνα 3-43 Διάταξη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (φωτογραφία της γραφούσης)

Το τροφοδοτικό των 12V δέχεται από οικιακή μπρίζα ρεύμα 230V (μια φάση Line, έναν ουδέτερο Neutral και γείωση GND) και μας δίνει στις εξόδους του +12V και 0V. Για να μπορούμε να ανάβουμε και να σβήνουμε το τροφοδοτικό χωρίς να παρεμβαίνουμε στις καλωδιώσεις διακόψαμε τη φάση και τον ουδέτερο της παροχής με τον κόκκινο διακόπτη ON/OFF που φαίνεται στην εικόνα 3-43. Έτσι όταν θέλουμε να σβήσουμε το μηχάνημα για τον οποιοδήποτε λόγο απλά ανοίγουμε το διακόπτη. Τα 12V που μας δίνει το τροφοδοτικό εμείς τα χρειαζόμαστε για να τροφοδοτήσουμε τα κυκλώματα οδήγησης των κινητήρων και τους ανεμιστήρες που θα ψύχουν τα ηλεκτρονικά μας μέσα στο πλαίσιο. Με κόκκινο και μαύρο καλώδιο 1<> καρέ μεταφέραμε τα +12V και τα 0V από το τροφοδοτικό μας στις ηλεκτρολογικές κλέμες και από εκεί δώσαμε +12V στο pin VCC κάθε Driver (κόκκινο καλώδιο 1<>) και 0V (μαύρο καλώδιο 1<>) στο pin GND. Επίσης με κόκκινο και μαύρο καλώδιο 0.34<> καρέ ματίσαμε τα αντίστοιχα καλώδια των ανεμιστήρων και τα τροφοδοτήσαμε.

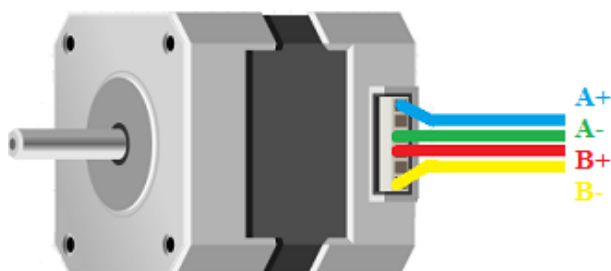
Η τροφοδοσία του Arduino είναι ξεχωριστή από τα υπόλοιπα μέρη του κυκλώματος και προέρχεται από τον υπολογιστή μας. Όπως είδαμε στην παράγραφο 3.2 το Arduino μπορεί να τροφοδοτείται με δύο τρόπους, είτε από την ειδική θύρα είτε από τη θύρα USB με την οποία επικοινωνεί και με τον υπολογιστή. Για την δική μας εφαρμογή τα 5V που παρέχει στο Arduino η θύρα USB μας είναι αρκετά, επίσης η επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή είναι υποχρεωτική για τη λειτουργία του CNC. Για αυτό το λόγο τοποθετήσαμε στο



**Εικόνα 3- 44 USB Panel Mount B – Αρσενικό σε B θηλυκό (εικόνα από skroutz.gr**

μπροστινό μέρος του τελάρου (που φιλοξενεί τα ηλεκτρονικά) ένα καλώδιο USB Panel Mount B – Αρσενικό σε B θηλυκό και το συνδέσαμε στη θύρα USB του Arduino. Όταν λοιπόν το μηχάνημα θα τίθεται σε λειτουργία, και ο χρήστης θα πρέπει να συνδέσει τον υπολογιστή του με το Arduino θα έχει άμεση και εύκολη πρόσβαση στη θύρα USB του χωρίς να παρεμβαίνει στο τελάρο με τα ηλεκτρονικά.

Επόμενο στάδιο είναι η συνδεσμολογία των Drivers (TB6600) με το Arduino και τους βηματικούς κινητήρες (Stepper Motors Nema 23). Οι βηματικοί κινητήρες μας έχουν τέσσερα καλώδια τα οποία πάνε ανά δύο ζεύγη, ένα ζεύγος για κάθε τυλίγμα (εικόνα 3-45).



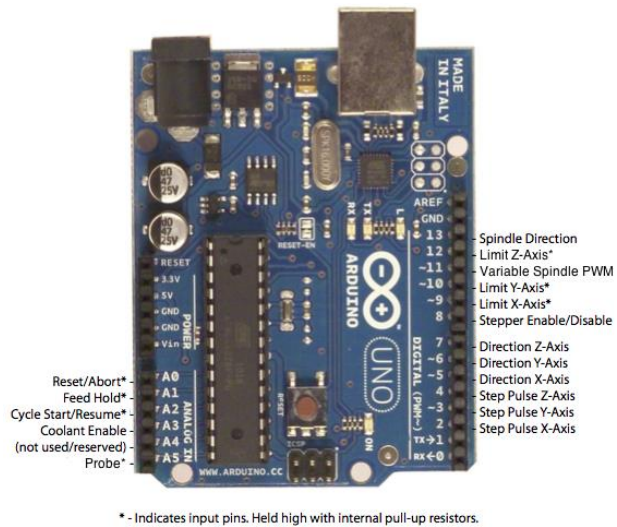
**Εικόνα 3-45 Ζεύγη τυλιγμάτων κινητήρα (εικόνα της γραφούσης)**

Για να βρούμε ποια καλώδια του κινητήρα είναι ζεύγος, δηλαδή είναι οι δύο άκρες του ίδιου τυλίγματος στο εσωτερικό του κινητήρα, ο ασφαλέστερος τρόπος είναι έχοντας τον κινητήρα ασύνδετο να χρησιμοποιήσουμε ένα πολύμετρο. Τοποθετούμε τον επιλογέα του πολύμετρου στην ένδειξη της συνέχειας και δοκιμάζουμε δύο άκρες μεταξύ τους, αν το πολύμετρο ηχήσει,

αυτό σημαίνει πως βρήκαμε το ένα ζευγάρι (στην πραγματικότητα υπάρχει ελάχιστη αντίσταση του σύρματος του πηνίου). Αφού κάνουμε αυτό τον έλεγχο για όλους τους κινητήρες είμαστε έτοιμοι να συνδέσουμε τις άκρες τους στους Drivers. Για να φτάσουν τα καλώδια των κινητήρων από τα σημεία που στηρίζονται να «ταξιδέψουν» μέχρι το τελάρο των ηλεκτρονικών χρειάστηκε να τα ματίσουμε για να επεκτείνουμε το μήκος τους. Οι

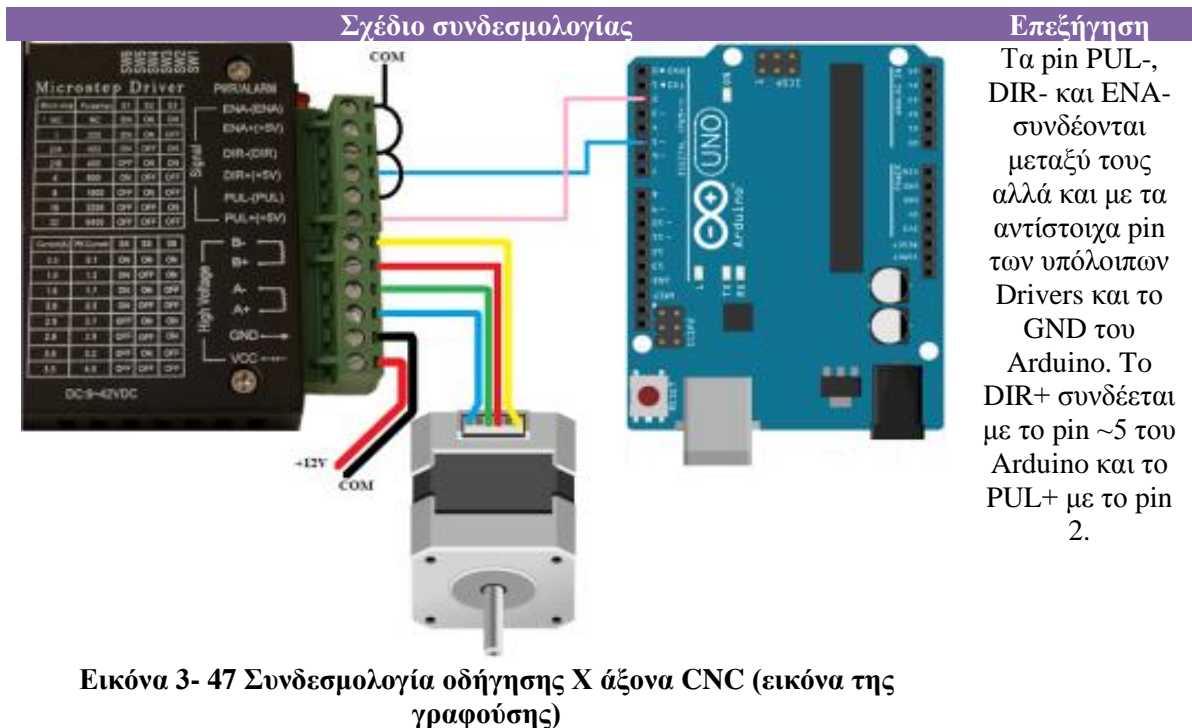
Drivers διαθέτουν τέσσερα pin με ονόματα A+, A-, B+ και B-. Εμείς συνδέσαμε το ένα ζευγάρι του κινητήρα στο A+ και στο A- και το άλλο ζευγάρι στο B+ και στο B-.

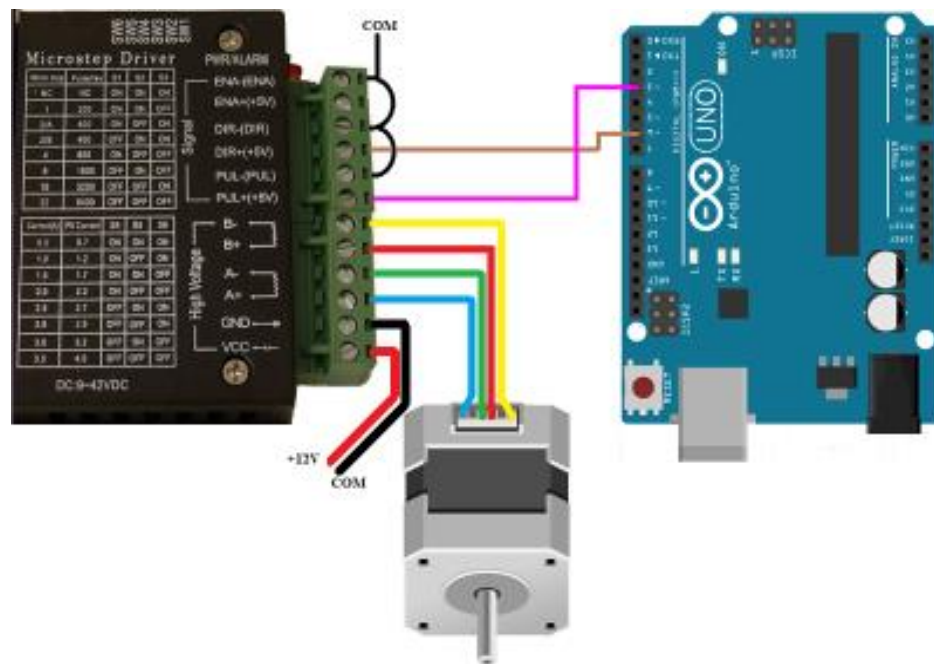
Έπειτα κάθε Driver ανάλογα τον άξονα που ελέγχει συνδέθηκε κατάλληλα στο Arduino. Το pin των Drivers που δίνει την κατεύθυνση στο κινητήρα είναι το DIR+ και το pin που δίνει τους παλμούς για την οδήγηση είναι το PUL+. Το ποια pin του Arduino αντιστοιχούν σε καθένα από αυτά (DIR+, PUL+) εξαρτάται από το λογισμικό GRBL, οι αντιστοιχίσεις στα pin του Arduino σύμφωνα με την GRBL [29] φαίνονται στην εικόνα 3-46. Με οδηγό τις πληροφορίες που μας δίνει το pin out του Arduino σύμφωνα με το GRBL προχωρήσαμε στην συνδεσμολογία των Drivers με το Arduino.



\* - Indicates input pins. Held high with internal pull-up resistors.  
**Εικόνα 3-46 Pin out του Arduino σύμφωνα με το GRBL (εικόνα από github.com)**

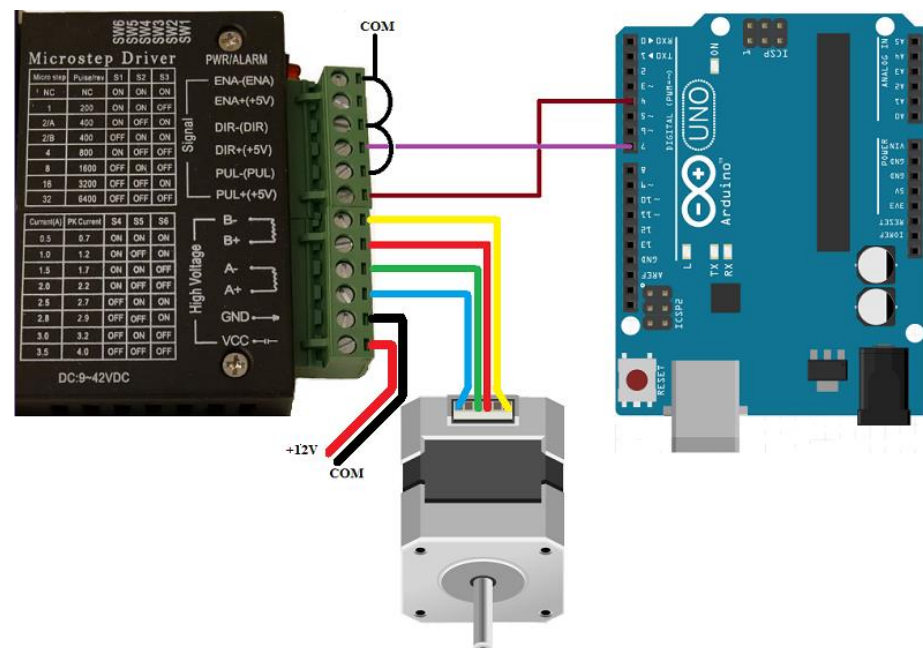
Πιο συγκεκριμένα οι συνδέσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί.





Εικόνα 3- 48 Συνδεσμολογία οδήγησης Y άξονα CNC (εικόνα της γραφούσης)

Τα pin PUL-, DIR- και ENA- συνδέονται μεταξύ τους αλλά και με τα αντίστοιχα pin των υπόλοιπων Drivers και το GND του Arduino. Το DIR+ συνδέεται με το pin ~6 του Arduino και το PUL+ με το pin ~3. Να σημειωθεί πως για την κίνηση του Y άξονα τοποθετήσαμε δύο κινητήρες, συνεπώς το κύκλωμα της εικόνας 3-48 είναι επί δύο επί του πρακτέου.



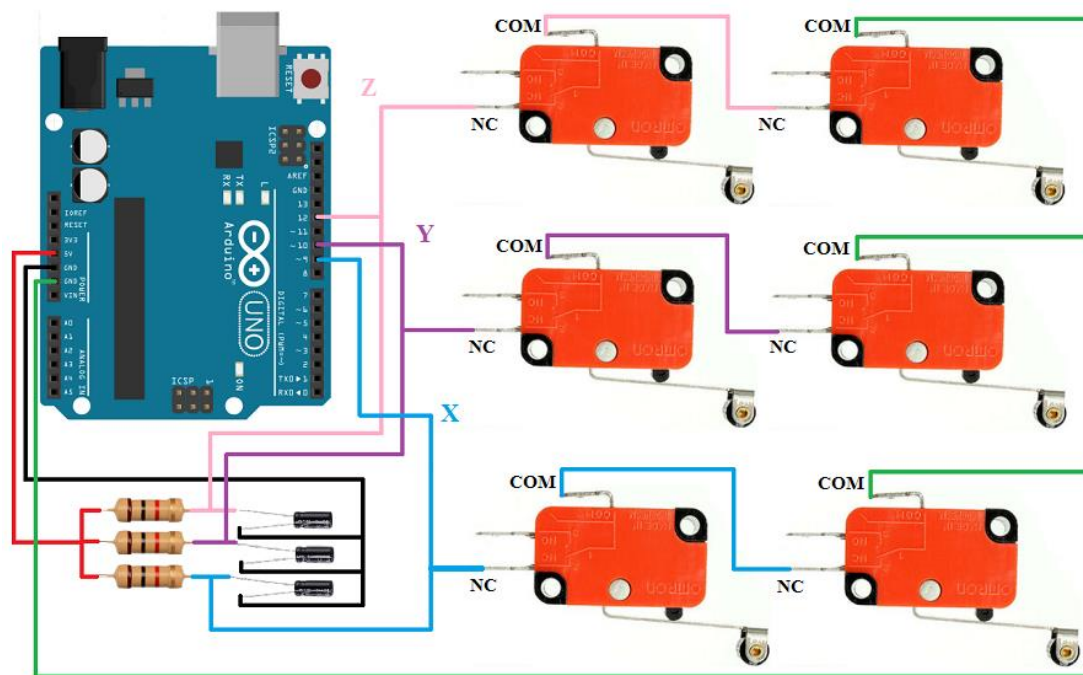
Εικόνα 3- 49 Συνδεσμολογία οδήγησης Y άξονα CNC (εικόνα της γραφούσης)

Πίνακας 3- 2 Συνδεσμολογίες κινητήρων, drivers και Arduino

Τα pin PUL-, DIR- και ENA- συνδέονται μεταξύ τους αλλά και με τα αντίστοιχα pin των υπόλοιπων Drivers και το GND του Arduino. Το DIR+ συνδέεται με το pin 7 του Arduino και το PUL+ με το pin 4.

Στη συνέχεια σειρά είχαν οι τερματικοί διακόπτες. Για κάθε άξονα κίνησης του CNC τοποθετήθηκαν δύο τερματικοί διακόπτες (Limit Switches), ένας σε κάθε άκρο. Η συνδεσμολογία που επιλέχθηκε (βλέπε και παράγραφο 3.3) ήταν σε Normal Close Loop [24] και τα pin στα οποία ανατέθηκαν οι εντολές των τερματικών είναι σύμφωνα με τις

πληροφορίες που μας δίνει το GRBL (εικόνα 3-46). Επίσης για να μειώσουμε το φαινόμενο του θορύβου στις εντολές των τερματικών, παρεμβάλαμε μεταξύ των +5V και του GND του Arduino μια αντίσταση 1kΩ και έναν πυκνωτή 100nF. Έπειτα από το μέσω τους συνεχίσαμε στις εντολές, στο pin NC του ενός από τα δύο τερματικά κάθε άξονα. Το τελικό κύκλωμα φαίνεται στην εικόνα 3-50. Με γαλάζιο χρώμα φαίνεται η σύνδεση της εντολής του x άξονα, με μώβ χρώμα του y άξονα και με ροζ του z.



Εικόνα 3-50 Συνδεσμολογία Normal Closed Loop τερματικών διακοπών (εικόνα της γραφούσης)

Το τελευταίο κομμάτι που συνδέθηκε ήταν το ρούτερ. Η τροφοδοσία του έρχεται απευθείας από οικιακή πρίζα (220V). Εκτός από το διακόπτη ON/OFF που διαθέτει επάνω στο σκελετό του το ίδιο το ρούτερ, παρεμβάλαμε επιπλέον ένα μπλέ διακόπτη ON/OFF. Τοποθετήσαμε τον διακόπτη επάνω στο τελάρο όπως φαίνεται στην εικόνα 3-43 και διακόψαμε τον ουδέτερο και τη φάση του καλωδίου που τροφοδοτεί το ρούτερ. Έτσι είναι εύκολο να σβήσουμε και να ανάψουμε το ρούτερ όποτε το θέλουμε.

### 3.7 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή γεωμετρικού κώδικα

Σε προηγούμενες ενότητες έχουμε αναφερθεί στα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό και την λειτουργία του συστήματος κατεργασίας. Ένα βασικό συστατικό της λειτουργίας του συστήματος είναι ο G-code (Geometrical code) για τη παραγωγή του οποίου δοκιμάστηκαν πολλά προγράμματα αλλά γράφτηκε και κώδικας απευθείας από εμάς.

Ο Geometric Code [30] είναι απαραίτητος για τη λειτουργία ενός CNC μηχανήματος. Αν παρομοιάσουμε ένα CNC με ένα φαντάρο, ο διοικητής του είναι ο G-code που του λέει που να κινηθεί, πόσο γρήγορα να κινηθεί και τι μονοπάτια να ακολουθήσει για κάθε κίνηση του. Ένα παράδειγμα γραμμής G-code είναι τις μορφής  $G## X## Y## Z## F##$ , όπου ## αντιστοιχεί σε κάποιον αριθμό. Παραδείγματος χάριν το G01 για το CNC σημαίνει ότι πρέπει να κινηθεί απευθείας σε μια συγκεκριμένη θέση της οποίας οι καρτεσιανές συντεταγμένες καθορίζονται από τις τιμές του X του Y και του Z. Το F σημαίνει feed rate και είναι η

ταχύτητα με την οποία πρέπει να εκτελεστεί η συγκεκριμένη κίνηση. Μερικές βασικές εντολές γεωμετρικού κώδικα περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

Εντολή	Επεξήγηση εντολής
<b>G20</b>	Καθορίζει την μονάδα μέτρησης του μηχανήματος σε ίντσες (in) πριν ξεκινήσει την λειτουργία κατεργασίας
<b>G21</b>	Καθορίζει την μονάδα μέτρησης του μηχανήματος σε ίντσες (in) πριν ξεκινήσει την λειτουργία κατεργασίας
<b>G00 (Rapid Positioning)</b>	Μετακινεί την κεφαλή, με την υψηλότερη ταχύτητα που μπορεί να κινηθεί το μηχάνημα, σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η εντολή αυτή δεν είναι για κατεργασίας (πχ κοπή), ο σκοπός της είναι να μεταφέρει γρήγορα την κεφαλή στο επιθυμητό σημείο για να ξεκινήσει κάποια κατεργασία.
<b>G01 (Linear Interpolation)</b>	Καθοδηγεί το μηχάνημα να κινηθεί απευθείας σε ένα σημείο με καθορισμένο ρυθμό κίνησης (feed rate). Ο controller της μηχανής υπολογίζει στο παρασκήνιο τα ενδιάμεσα σημεία από τα οποία θα περάσει η κεφαλή για να φτάσει στο επιθυμητό X, Y, Z σημείο. Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για κατεργασία σε ευθείες κατευθύνσεις.
<b>G02 (Circular Interpolation Clockwise)</b>	Καθοδηγεί τη μηχανή ώστε να κινηθεί δεξιόστροφα σε ένα κυκλικό μονοπάτι. Έχει παρόμοια χρήση με την εντολή G01 μόνο που εκτός από το να οριστούν οι τελικές συντεταγμένες προορισμού πρέπει να οριστεί το κέντρο περιστροφής και η απόσταση του σημείου εκκίνησης του τόξου.
<b>G03 (Circular Interpolation Counterclockwise)</b>	Η εντολή αυτή είναι παρόμοια με την G02 μόνο που αντί για δεξιόστροφη κίνηση εκτελεί αριστερόστροφη. Οι απαιτήσεις της σε πληροφορία είναι οι ίδιες με της G02.
<b>G28 (Return Home)</b>	Αυτή η εντολή συνήθως εμφανίζεται σε ένα πρόγραμμα g-code όταν έχει τελειώσει η κατεργασία ενός τεμαχίου (ή σε κάποια μηχανήματα, όταν θέλουμε να αλλάξουμε εργαλείο κοπής) και πρέπει η κεφαλή να μεταφερθεί στο σημείο αναφοράς ή αλλιώς home position.
<b>G90 (Positioning G-code Command)</b>	Η εντολή αυτή καθορίζει τον τρόπο που θα υπολογίζει το μηχάνημα τις συντεταγμένες που θα κινηθεί. Ποιο συγκεκριμένα η G90 χρησιμοποιείται για Absolute Mode, δηλαδή για ακριβής συντεταγμένες (κάθε σημείο στην επιφάνεια κατεργασίας έχει μοναδικό X, Y και Z σημείο).
<b>G91 (Positioning G-code Command)</b>	Η εντολή αυτή είναι σαν την G90 μόνο που αντιστοιχεί σε Relative Mode, δηλαδή η κίνηση του μηχανήματος υπολογίζεται με σχετικές συντεταγμένες (η επόμενη θέση που θα μεταφερθεί η κεφαλή εξαρτάτε από την προηγούμενη της).

**Πίνακας 3- 3 Οι βασικές εντολές G-code**

Κατά τη διάρκεια δοκιμών του συστήματος κατεργασίας οι πρώτες προσπάθειες κατεργασίας τεμαχίων έγιναν με κώδικα που δημιουργήθηκε εξολοκλήρου από εμάς. Ενδεικτικά ακολουθούν οι G κώδικες μας και μερικές φωτογραφίες από τα αποτελέσματα που πήραμε δοκιμάζοντας τους στο σύστημα κατεργασίας.

Η πρώτη δοκιμή ήταν να σκαλίσουμε ένα ορθογώνιο διαστάσεων 150 x 270 χιλιοστών με βάθος σκαλίσματος 5 mm μέσα στην επιφάνεια ενός ορθογώνιου ξύλινου τεμαχίου διαστάσεων 250 x 370 x 15 χιλιοστά. Πριν ξεκινήσουμε την κατεργασία ορίσαμε το σημείο



εκκίνησης της κεφαλής να είναι στην κάτω αριστερή γωνία και το ύψος (δηλαδή ο Z άξονας) να έχει ως σημείο μηδέν το ύψος του τεμαχίου προς κατεργασία συν ένα χιλιοστό πιο πάνω. Έπειτα φορτώσαμε στο UGS τον παρακάτω κώδικα που γράψαμε και τα αποτελέσματα αυτού φαίνονται στην εικόνα 3-51.

- 1 (TEM 250x370) //σχόλια
- 2 G21 //μονάδα μέτρησης σε mm
- 3 G90 //απόλυτες συντεταγμένες
- 4
- 5 G00 X50 Y50 //γρήγορη μετακίνηση κεφαλής
- 6 G01 Z-6 F100 //κίνηση κοπής
- 7 G01 X50 Y320 F100 //κίνηση κοπής
- 8 G01 X200 Y320 F100 //κίνηση κοπής
- 9 G01 X200 Y50 F100 //κίνηση κοπής
- 10 G01 X50 Y50 F100 //κίνηση κοπής
- 11 G00 Z10 //γρήγορη μετακίνηση κεφαλής
- 12 G00 X0 Y0 //γρήγορη μετακίνηση κεφαλής



**Εικόνα 3-51 Το πρώτο κατεργασμένο κομμάτι από το σύστημα κατεργασίας**

Ακολουθούν εικόνες από ένα τεμάχιο στο οποίο δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικοί G-codes που γράψαμε.



**Εικόνα 3-52 Παράδειγμα τεμαχίου μετά από κατεργασία**



**Εικόνα 3-53 Παράδειγμα τεμαχίου μετά από κατεργασία**



**Εικόνα 3-54 Παράδειγμα τεμαχίου μετά από κατεργασία**

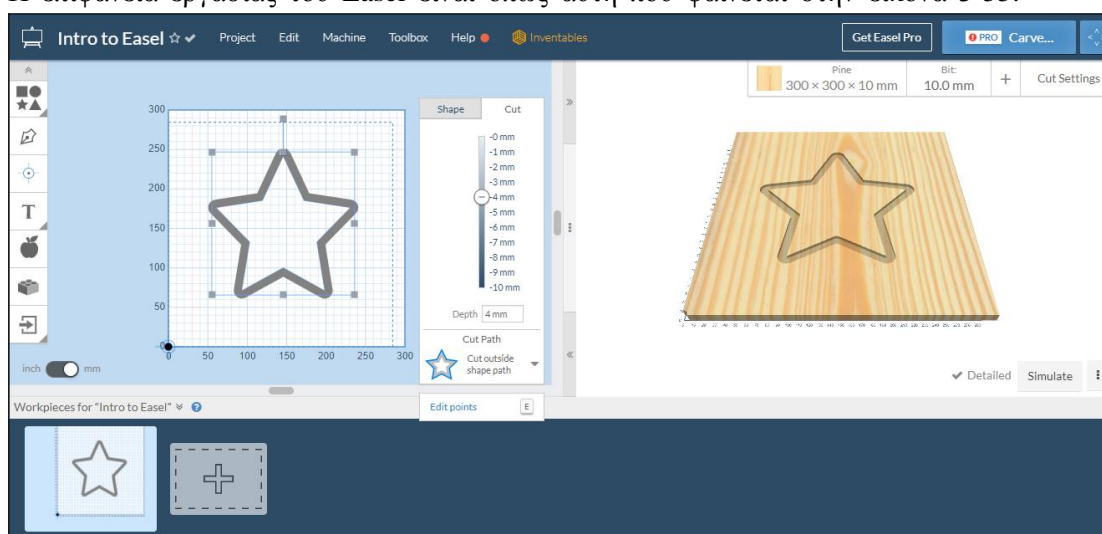
Εκτός όμως από τη συγγραφή δικού μας G-code δοκιμάσαμε να εξάγουμε κώδικα και με τη χρήση έτοιμων λογισμικών. Στη συνέχεια παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με όσα λογισμικά παραγωγής G-code δοκιμάστηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών του συστήματος.

A/A	Όνομα Λογισμικού	Έκδοση	Κατασκευαστής
1	Easel	lite	Inventables Team
2	EstlCAM	V11	Christian Knull
3	Fusion360	Student edition	Autodesk
4	SOLIDWORKS	2020	Dassault Systems
5	Carbide Create	Simplified 2D	Carbide Create Team

**Πίνακας 3-4 Λογισμικά παραγωγής G-code**

Λίγα λόγια για κάθε λογισμικό του πίνακα 3-3:

1. Το Easel είναι ένα web-based λογισμικό που έχει σχεδιαστεί από την ομάδα Inventables την οποία δημιούργησε ο Zach Kaplan το 2002 και εδρεύει στο Σικάγο. Η επιφάνεια εργασίας του Easel είναι όπως αυτή που φαίνεται στην εικόνα 3-55.

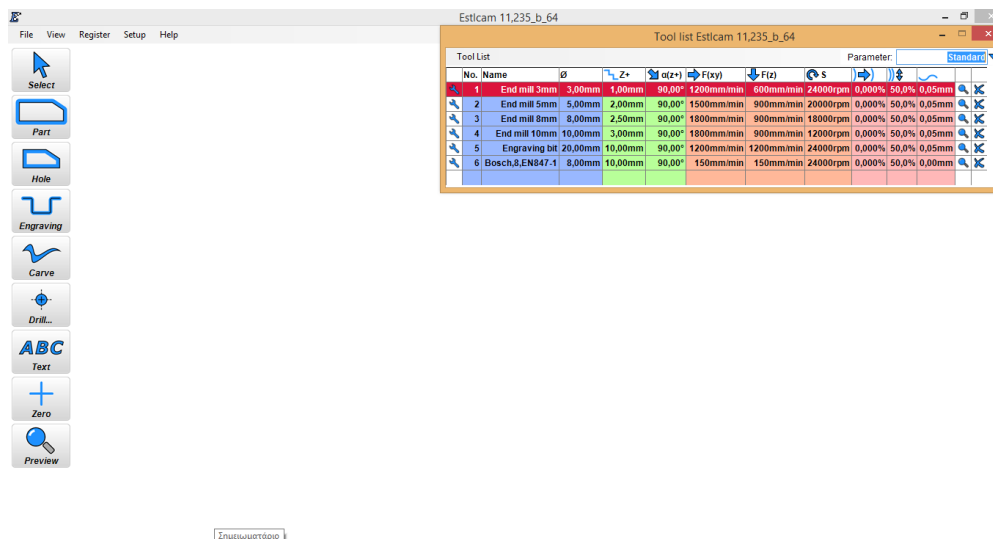


**Εικόνα 3-55 Επιφάνεια εργασίας Easel (εικόνα της γραφούσης)**

Στην αριστερή μεριά είναι ο «καμβάς» όπου μπορούμε να σχεδιάσουμε ότι επιθυμούμε να δημιουργήσουμε με το μηχάνημα μας. Μας δίνει κάποιες παλέτες βασικών σχεδίων που μπορούμε να τα κάνουμε drag and drop, να τους αλλάξουμε τις διαστάσεις, να τα τοποθετήσουμε όπου θέλουμε αλλά μπορούμε να κάνουμε import και SVG αρχεία. Επίσης γίνεται να ορίσουμε τον τρόπο που θα γίνει η κοπή (cut path) του σχεδίου μας και πόσο βαθιά θα είναι αυτή. Στα δεξιά μπορούμε να επιλέξουμε τις διαστάσεις του τεμαχίου προς κατεργασία και το μέγεθος του εργαλείου κοπής. Ακόμη κάθε φορά που κάνουμε μια αλλαγή στο «καμβά» σχεδίασης αυτή εμφανίζεται ταυτόχρονα και στο εικονικό τεμάχιο. Αφού έχουμε φτιάξει το επιθυμητό σχέδιο, πριν κατεβάσουμε τον g-code μπορούμε να δούμε μια προσημείωση της κατεργασίας που θα εκτελέσει ο κώδικας (τι διαδρομές θα ακολουθήσει η κεφαλή, πόση ώρα θα χρειαστεί). Η απλή του έκδοση είναι διαθέσιμη δωρεάν.

2. Το EstlCAM είναι ένα πολύ ευέλικτο λογισμικό για κατεργασίες κοπής και χάραξης που πέρα από την παραγωγή G-code διαθέτει και δικό του controller. Ο δημιουργός του λογισμικού είναι ο Christian Knull ο οποίος διαθέτει προσωπικό κανάλι στο YouTube και δίνει χρήσιμες συμβουλές σε όσους ασχολούνται με CNC εργαλειομηχανές. Η επιφάνεια εργασίας του λογισμικού είναι όπως αυτή στην εικόνα

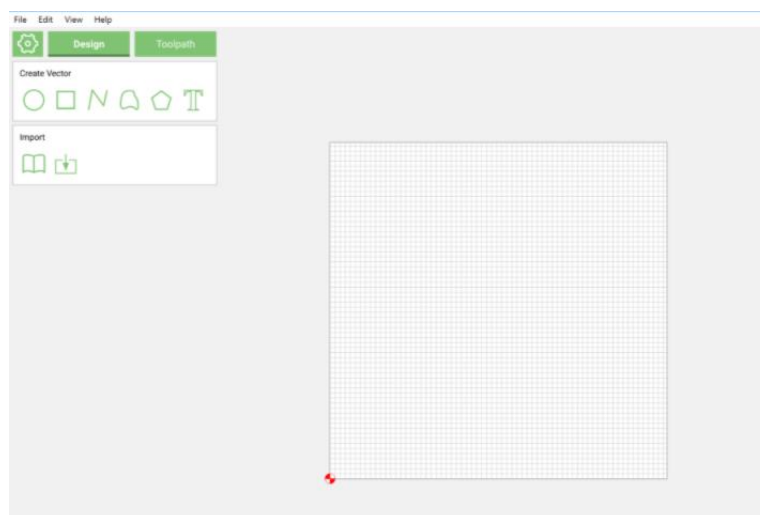
3-56.



**Εικόνα 3-56 Επιφάνεια εργασίας EstlCAM (εικόνα της γραφούσης)**

Δίνει τη δυνατότητα να επεξεργαστούμε με λεπτομέρεια τα σχέδια που θέλουμε να δημιουργήσουμε και να καθορίσουμε την διαδικασία κοπής (feed rate, plunge rate, plunge angle, stepover κτλ). Ακόμη μπορούμε να φτιάξουμε τη δική μας εργαλειοθήκη. Το καλύτερο από όλα τα χαρακτηριστικά του όμως είναι ότι μπορεί να επεξεργαστεί πολλούς τύπους αρχείων όπως DXF, SVG, PNG, STL, PLT, JPG. Είναι διαθέσιμο δωρεάν για να το κατεβάσει και να το εγκαταστήσει κανείς.

3. Το Fusion 360 είναι μια cloud-based πλατφόρμα λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης CAD, CAM, CAE αλλά και PCB. Είναι από τα πιο δυνατά λογισμικά του είδους του και μέσα στις πολλές δυνατότητες που παρέχει είναι και η παραγωγή G-code και η προσομοίωση του. Το λογισμικό ανήκει στην εταιρία Autodesk και δεν είναι δωρεάν, εμείς το χρησιμοποιήσαμε με φοιτητική άδεια που διαρκεί για ένα χρόνο από την ενεργοποίηση της.
4. Το SOLIDWORKS όπως είδαμε και σε προηγούμενες ενότητες έχει πολλές δυνατότητες και θα μπορούσαμε να πούμε πως είναι ανταγωνιστικό λογισμικό με το Fusion 360 αφού οι ικανότητες τους μοιάζουν πολύ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξολοκλήρου ανάπτυξη ενός συστήματος (πχ μηχανικού) και φυσικά μπορεί να εξάγει και G-code αν και δεν είναι διάσιμο για αυτό. Το λογισμικό ανήκει στην γνωστή εταιρεία Dassault Systems και δεν διατίθεται δωρεάν.
5. Το Carbide Create έχει δημιουργηθεί από μια ομάδα ανθρώπων που ασχολούνται με την ανάπτυξη CNC μηχανημάτων και δραστηριοποιούνται κυρίως στην Καλιφόρνια και το Ιλινόις. Το λογισμικό είναι διαθέσιμο για δωρεάν κατέβασμα. Ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει γρήγορα τα βασικά σχήματα (πχ κύκλους, τετράγωνα, πολύγωνα) καθώς είναι διαθέσιμα στο βασικό μενού. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιήσει ένα έτοιμο σχέδιο σαν background εικόνα και να πατήσει πάνω σε αυτό για να φτιάξει το δικό του σχέδιο. Ακόμα μπορεί να κάνει import αρχεία τύπου DXF και SVG και να μας δώσει τον αντίστοιχο G-code. Η επιφάνεια εργασίας του είναι όπως αυτή στην εικόνα 3-57.



**Εικόνα 3-57** Επιφάνεια εργασίας Carbide Creator (εικόνα της γραφούσης)

## Παραρτήματα

### Παράρτημα 1

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής του συστήματος κατεργασίας αλλά και καθ' όλο το διάστημα λειτουργίας του αναζητήθηκαν αρκετά λογισμικά που είτε τελικά επιλέξαμε να τα χρησιμοποιήσουμε είτε τα απορρίψαμε. Επίσης για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας χρειάστηκαν μερικά λογισμικά. Παρακάτω δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με όλα αυτά τα λογισμικά.

A/A	Όνομα	Κατασκευαστής	Έκδοση	Λόγος χρήσης
1	AutoCAD	Autodesk	2010	2D & 3D σχεδίαση
2	SOLIDWORKS	Dassault Systems	2020	3D σχεδίαση, αναλύσεις αντοχής & παραγωγή G-code
3	Arduino IDE	Massimo Banzi	1.8.13	Προγραμματισμός Arduino
4	UGS	(on NetBeans)	2.0.9	Αποστολή G-code στο Arduino
5	GRBL	Simen Svale Skogsrud	0.9	Μετατροπή G-code σε κίνηση των αξόνων του συστήματος κατεργασίας
6	Fusion360	Autodesk	Student Edision	3D σχεδίαση & παραγωγή G-code
7	Estlcam	Christian Knul	V11	Παραγωγή G-code
8	Easel	Inventables Team	Lite	Παραγωγή G-code
9	Carbide Create	Carbide Create Team	Simplified 2D	Παραγωγή G-code
10	Vectric Vcarve	Vcarve Team	Desktop	Παραγωγή G-code
11	Notepad++	Don Ho	7.3.3	Συγγραφή G-code
12	TinkerCAD	Autodesk		Προσομοίωση κυκλωμάτων με το Arduino & βηματικούς κινητήρες
13	Paint	Windows		Σχεδίαση εικόνων
14	Fritzing	Interaction Design Lab Potsdam	0.8.7b	Σχεδίαση κυκλωμάτων
15	Cura	Ultimaker	4.13.1	Παραγωγή G-code για 3D Printer
16	Word	Windows	2010	Συγγραφή της διπλωματικής εργασίας
17	Power Point	Windows	2010	Δημιουργία της παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας

Πίνακας Π- 1 Συγκεντρωτικός πίνακας λογισμικών

## Παράρτημα 2

SWOT Ανάλυση για το σύστημα κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή.

Τα αρχικά SWOT αναφέρονται στις λέξεις Strengths (S), Weaknesses (W), Opportunities (O) και Threats (T). Είναι ένα εργαλείο για την τεκμηρίωση των δυνατοτήτων, δηλαδή των πλεονεκτημάτων και των μοναδικών χαρακτηριστικών που κάνουν ένα σύστημα να είναι καλύτερο από άλλα. Γνωστοποιεί πιθανές αδυναμίες και περιορισμούς δυνατοτήτων με σκοπό να γίνουν βελτιώσεις στο μέλλον.

Αυτό που εμείς επιδιώκουμε μέσω της ανάλυσης SWOT είναι να δώσουμε μια εικόνα για την αποδοτικότητα του συστήματος, το αν είναι ασφαλές και τι παραπάνω μπορεί να γίνει για να βελτιωθεί κάποια πιθανή αδυναμία ή να επεκταθεί η γκάμα λειτουργιών του συστήματος με κάποια τροποποίηση. Τι τελικά καταφέραμε σε σχέση με το τι είχαμε αρχικά υπολογίσει.

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"><li>• Στιβαρός σκελετός μηχανήματος</li><li>• Λειτουργεί χωρίς την παρέμβαση του χρήστη, πέρα από την αλλαγή εργαλείων (plug and play)</li><li>• Όμορφος σχεδιασμός</li><li>• Μεγάλη επιφάνεια κατεργασίας τεμαχίων (700x550mm)</li><li>• Ποικιλία στη χρήση κοπτικών εργαλείων (προσαρμοστικότητα)</li><li>• Σκελετός ανθεκτικός στην υγρασία</li><li>• Εύκολο στη χρήση</li><li>• Σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής</li><li>• Απλή συντήρηση</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Η κατασκευή του απαιτεί πρόσβαση σε ειδικό εξοπλισμό</li><li>• Δε διαθέτει σύστημα απορρόφησης για το υλικό που αφαιρείται κατά τη κατεργασία τεμαχίων</li><li>• Το τραπέζι δεν έχει επαγγελματικό σύστημα συγκράτησης τεμαχίων</li></ul>
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"><li>• Αποσπώμενη κεφαλή επεξεργασίας που μπορεί να υποστηρίξει διαφόρων τύπων κεφαλές (π.χ λέιζερ)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Τα επαγγελματικά CNC μηχανήματα που κυκλοφορούν στην αγορά</li></ul>

Πίνακας Π- 2 SWOT Ανάλυση για το σύστημα κατεργασίας

Στην αρχή του σχεδιασμού του συστήματος κατεργασίας τέθηκαν κάποιοι στόχοι, ένας εκ των οποίων ήταν η **ασφάλεια**. Το πόσο ασφαλές είναι το σύστημα μας τελικά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες ταυτόχρονα. Εμείς καταφέραμε με το συγκεκριμένο σχεδιασμό του συστήματος αλλά και τη χρήση ποιοτικών υλικών να δημιουργήσουμε ένα στιβαρό σκελετό (βλέπε παράγραφο 2.3.1). Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει φόβος ξαφνικά το σύστημα να καταρρεύσει. Ένα μείον του συστήματος μας είναι ότι δεν χρησιμοποιήσαμε κάποιον επίσημο τρόπο συγκράτησης των τεμαχίων στο τραπέζι μας (βλέπε παράγραφο 1.5.2). Αυτό βέβαια δεν είναι μεγάλο μειονέκτημα καθώς αν ο χρήστης είναι προσεκτικός και υπομονετικός κατά την πρόσδεση του τεμαχίου (λευκή κόλλα και χαρτοταινία) στο κρεβάτι δεν υπάρχει φόβος να γίνει ζημιά. Έχουμε λοιπόν ένα CNC που κατά τη διάρκεια της κατεργασίας τεμαχίων δεν χρειάζεται να επεμβαίνει ο χρήστης εκτός εάν θελήσει να αλλάξει το εργαλείο κοπής, τότε είναι η μόνη περίπτωση που ο χρήστης θα πρέπει να σταματήσει τη διαδικασία της κατεργασίας, να αλλάξει το εργαλείο στο ρούτερ του συστήματος και να συνεχίσει την κατεργασία. Σε περίπτωση που κάτι πάει στραβά ο χρήστης έχει άμεση πρόσβαση στους διακόπτες On/Off, που λειτουργούν και σαν emergency stop αλλά μπορεί

επίσης να σταματήσει τη λειτουργία του μηχανήματος και μέσα από το interface του UGS. Ακόμη υπάρχει η προστασία των limit switches που σε περίπτωση που η κεφαλή από λανθασμένη εντολή πάει να κινηθεί εκτός των ορίων κάποιου άξονα, τότε σταματάει ακαριαία η διαδικασία κατεργασίας και στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζεται αντίστοιχο μήνυμα λάθους. Με όλα τα προαναφερθέντα έχουμε εξασφαλίσει ένα υψηλό επίπεδο ασφάλειας.

Η **αποδοτικότητα** και η **ακρίβεια** είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες. Όσον αφορά το σύστημα μας μπορούμε να πούμε πως καταφέραμε να φτάσουμε την επιθυμητή ακρίβεια στην κίνηση. Όταν ρυθμίσαμε για πρώτη φορά το μηχάνημα μας επιλέξαμε να το ρυθμίσουμε έτσι ώστε 1mm στο εκάστοτε σχέδιο που θα παράξει το μηχάνημα να είναι και 1mm στην πραγματική κίνηση της κεφαλής. Αυτή η ρύθμιση ήταν η πρώτη ένδειξη πως η κεφαλή κινείται σωστά, αφού δίνοντας εντολή στο μηχάνημα να μετακινηθεί 1mm μετρούσαμε και με το χάρακα μας ότι αυτό όντως συνέβη. Έπειτα όταν κατασκευάσαμε τα πρώτα τεμάχια στο CNC μας είδαμε στην πράξη την ακρίβειά του αφού τα σχέδια συμφωνούσαν με τα παραγόμενα τεμάχια. Η μεγαλύτερη ταχύτητα λειτουργίας με την οποία δεν έχανε βήματα στην κίνηση το μηχάνημα ήταν F200 (feed rate). Αυτό που παρατηρήσαμε όμως ήταν πως οι κινητήρες ζεσταίνονταν πιο γρήγορα, έτσι αποφασίσαμε να μειώσουμε την ταχύτητα στο F150 με F100. Το συμπέρασμα εδώ είναι πως η αποδοτικότητα είναι σε ικανοποιητικό επίπεδο (λόγω της μέτριας ταχύτητας στη κίνηση) αλλά καταφέραμε να φτάσουμε την ακρίβεια που θέλαμε. Μια μελλοντική βελτιστοποίηση λοιπόν θα ήταν να αυξήσουμε την ταχύτητα κατεργασίας. Επίσης άλλη μια βελτιστοποίηση που θα μπορούσε να γίνει στο μέλλον είναι να ορίσουμε στο τραπέζι μας ένα μοναδικό σημείο μηδέν και από αυτό το σημείο να ξεκινάει πάντα η κεφαλή τη διαδικασία της κατεργασίας. Ως τώρα το σημείο εκκίνησης ορίζεται κάθε φορά σύμφωνα με το τεμάχιο προς κατεργασία και την κρίση του χρήστη. Αν οριστεί μοναδικό σημείο μηδέν θα είναι ακόμα πιο γρήγορη και εύκολη η φάση της αρχικοποίησης του συστήματος.

Για την διατήρηση της λειτουργικότητας του μηχανήματος το σύστημα κατεργασίας δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις. Το μόνο που χρειάζεται είναι να απομακρύνουμε την σκόνη και τα ροκανίδια από όλες τις επιφάνειες του μηχανήματος και να λαδώνουμε τους γραμμικούς και τους ατέρμονες άξονες μια φορά το δίμηνο (κατά προσέγγιση, εξαρτάται και από τη συχνότητα χρήσης της μηχανής). Ο χώρος που βρίσκονται τα ηλεκτρονικά του μηχανήματος ψύχεται αρκετά καλά όποτε έχουμε εξασφαλίσει την «μακροζωία» των ηλεκτρονικών μας εξαρτημάτων. Αν λοιπόν γίνεται σωστή χρήση του συστήματος κατεργασίας (πχ δεν βραχούν οι γραμμικοί άξονες και τα ηλεκτρονικά) τότε αυτό θα συνεχίσει να μας αποδίδει καρπούς για πολλά χρόνια.

Ένα ακόμα θετικό χαρακτηριστικό του συστήματος κατεργασίας είναι ότι το κομμάτι που συγκρατεί την κεφαλή (στην περίπτωση μας ρούτερ) μπορεί εύκολα να αλλάξει και στη θέση του να μπει μια διαφορετική κεφαλή, παραδείγματος χάριν λείζερ. Επίσης το ίδιο το ρούτερ που χρησιμοποιούμε εμείς στο CNC μας, μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε πολλά και διαφορετικά εργαλεία κοπής. Συμπέρασμα, έχουμε πολλές επιλογές ως προς τον τρόπο κοπής και μπορούμε εύκολα να προσαρμόσουμε τον εξοπλισμό του μηχανήματος ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες μας.

Κάποιες μελλοντικές επεκτάσεις στο σύστημα κατεργασίας θα μπορούσαν να είναι:

1. Η προσθήκη συστήματος απορρόφησης. Παραδείγματος χάριν με μια ηλεκτρική σκούπα και μια μικρή προσαρμογή στην κεφαλή του συστήματος θα μπορούσαμε να μαζεύουμε μεγάλο ποσοστό από τα ροκανίδια που βγαίνουν κατά τη διάρκεια κατεργασίας τεμαχίων.
2. Η προσθήκη ενός καλύτερου τρόπου συγκράτησης των τεμαχίων στο τραπέζι. Μερικοί τρόποι για το πώς να σταθεροποιήσουμε τα τεμάχια έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 1.5.3.
3. Να βάλουμε ισχυρότερους κινητήρες ώστε να αυξήσουμε την ταχύτητα στην κίνηση του συστήματος.

Όπως είδαμε η κατασκευή του συστήματος κατεργασίας χρειάστηκε πολλά εργαλεία και εξαρτήματα. Αν κάποιος προσπαθήσει να φτιάξει ένα αντίστοιχο CNC όπως το δικό μας, θα διαπιστώσει πως αν διαθέτει τον απαιτούμενο εξοπλισμό (εργαλεία κοπής ξύλου, κατσαβίδια, τρυπάνι, άλεν κ.τ.λ) και κάνει μια καλή έρευνα αγοράς για τα εξαρτήματα (γραμμικοί άξονες, ατέρμονες, φορεία, βίδες κ.τ.λ) το κόστος είναι σχετικά χαμηλό σε σχέση με την αποδοτικότητα που προσφέρει το μηχάνημα.

Σαν τελικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε πως το σύστημα κατεργασίας που κατασκευάσαμε κατάφερε να εκπληρώσει σχεδόν όλους τους αρχικούς στόχους που είχαν τεθεί. Έτσι καθίσταται κατάλληλο για οικιακή χρήση από ερασιτέχνες χρήστες αλλά και μερικώς για επαγγελματική χρήση (όταν η ταχύτητα δεν είναι σημαντικός παράγοντας).

### Παράρτημα 3

Κατασκευή ενός επιτραπέζιου παιχνιδιού ονόματι SOLO ή αλλιώς SOLITAIRE

Σε αυτό το παράρτημα θα περιγράψουμε πως δημιουργήσαμε το δικό μας επιτραπέζιο SOLO με το σύστημα κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή. Η αρχική ιδέα προήλθε από ένα αγορασμένο παιχνίδι που είχαμε στην κατοχή μας και θελήσαμε να του κάνουμε κάποιες αλλαγές. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται το επιτραπέζιο που είχαμε όπως είναι κλειστό, ανοιχτό και στημένο για να αρχίσει το παιχνίδι.



**Εικόνα Π- 1 Το αγορασμένο επιτραπέζιο παιχνίδι SOLO κλειστό**



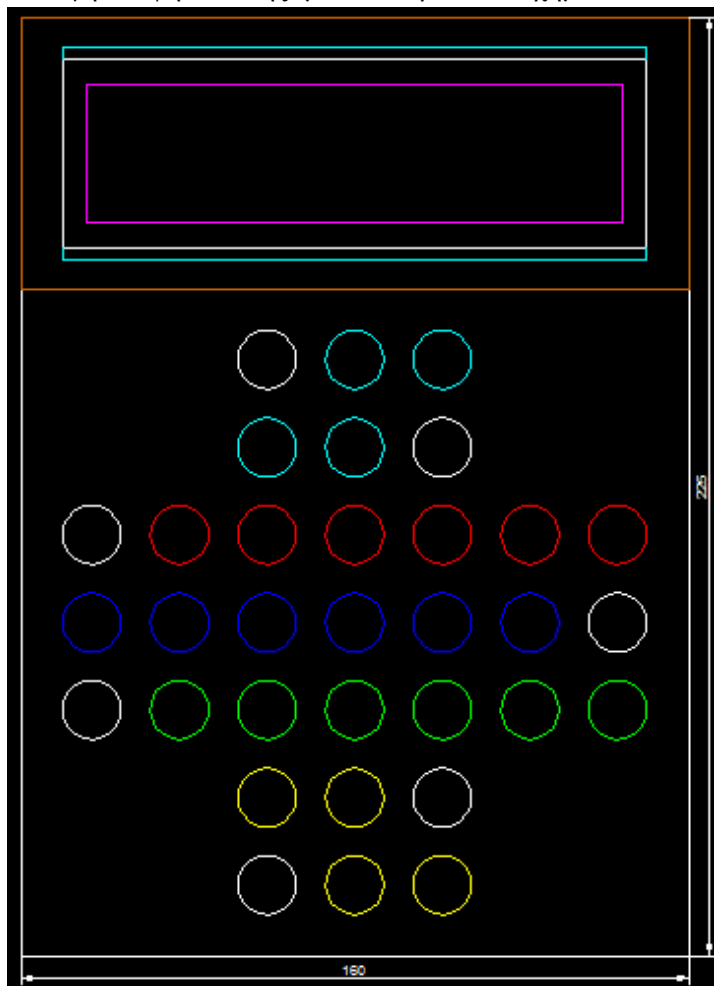
**Εικόνα Π- 2 Το αγορασμένο επιτραπέζιο παιχνίδι SOLO ανοιχτό**



**Εικόνα Π- 3 Το αγορασμένο επιτραπέζιο παιχνίδι SOLO έτοιμο για παιχνίδι**



Το πρώτο μας βήμα ήταν αφού φανταστούμε πως θα θέλαμε να μοιάζει να φτιάξουμε ένα αντίστοιχο σχέδιο στο AutoCAD. Το σκεπτικό ήταν να γίνει μια ενιαία πλάκα πάνω στην οποία θα υπάρχει το κυρίως κομμάτι που παίζεται το παιχνίδι, αυτό δηλαδή με τις τρύπες σε σχήμα σταυρού, αλλά και χώρος όπου θα αποθηκεύονται οι ξύλινες μπίλιες του. Έτσι μετά από λίγη σκέψη καταλήξαμε στο παρακάτω σχήμα. Οι διαστάσεις του αρχικού τεμαχίου που



θα κατεργαστούμε για να φτιάξουμε το παιχνίδι μας είναι 160x225mm και βάθους 25mm, όπως φαίνεται και στη διπλανή εικόνα. Το κυρίως τμήμα όπου παίζεται το παιχνίδι είναι ένα τετράγωνο 160x160mm (λευκό περίγραμμα στην εικόνα Π-4). Στο πάνω μέρος αυτού του τετραγώνου προσθέσαμε ένα ορθογώνιο κομμάτι 160x65mm (καφέ περίγραμμα στην εικόνα Π-4). Μέσα σε αυτό το ορθογώνιο τμήμα θα σκάσουμε με το μηχάνημα μας ένα μικρότερο ορθογώνιο 140x45mm (λευκό ορθογώνιο στην εικόνα Π-4) και βάθους 20mm. Έπειτα σε αυτό το ορθογώνιο θα σκάσουμε στο πάνω και στο κάτω άκρο από μια μικρή λωρίδα, σαν ένα σκαλοπάτι (γαλάζια περιγράμματα στην εικόνα Π-4). Αυτό θα χρησιμεύσει ως άπτημα για

**Εικόνα Π- 4 Σχέδιο του δικού μας SOLO στο AutoCAD**  
το καπάκι που θα κλείνει την ορθογώνια τρύπα όπου θα αποθηκεύονται οι ξύλινες μπίλιες του παιχνιδιού.

Ο γεωμετρικός κώδικας (G-code) που δώσαμε στο μηχάνημα μας για την κατασκευή του παιχνιδιού γράφτηκε από εμάς. Το γεγονός ότι φτιάξαμε πρώτα το σχέδιο στο AutoCAD μας βοήθησε πολύ στη συγγραφή του G-code γιατί μπορούσαμε με τη βοήθεια της διαστασιολόγησης από το AutoCAD να βρούμε τις συντεταγμένες για κάθε σημείο που έπρεπε να στείλουμε την κεφαλή του μηχανήματος. Τα χρώματα στο περίγραμμα κάθε κύκλου που φαίνονται στην εικόνα Π-4 τα βάλαμε για δική μας ευκολία, καθώς όταν γράφαμε τον G-code ήταν χρήσιμο να διακρίνουμε που «βρισκόμαστε». Για να κατασκευάσουμε το κομμάτι μας χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικά κοπτικά εργαλεία. Το πρώτο είχε στρογγυλή μύτη με τη μεγαλύτερη διάμετρο να φτάνει τα 12mm και το δεύτερο είχε ορθογώνια μορφή με τις δύο πλευρές να έχουν απόσταση 12mm. Λόγω του ότι χρησιμοποιήσαμε δυο κοπτικά εργαλεία χωρίσαμε και τον G-code μας σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος της κατεργασίας του τεμαχίου εκτελέστηκε με το στρογγυλό κοπτικό εργαλείο που έκανε όλες τις τρύπες του κεντρικού τμήματος του ταμπλό (σχήμα σταυρού). Έπειτα σταματήσαμε την πορεία της κοπής χωρίς να χάσουμε την τρέχουσα θέση της κεφαλής και

αλλάξαμε εργαλείο. Κατόπιν συνεχίσαμε την πορεία της κατεργασίας με το δεύτερο εργαλείο κοπής που χρησιμοποιήθηκε για να αφαιρέσουμε το απαιτούμενο υλικό από το λευκό ορθογώνιο που φαίνεται στην εικόνα Π-4. Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως για να σκάψουμε το ορθογώνιο (140x45mm) υπολογίσαμε και το πάχος του εργαλείου κοπής. Οπότε αφού το εργαλείο μας είχε πλάτος 12mm, για να πάρουμε το ορθογώνιο που θέλαμε υπολογίσαμε ένα offset 6mm προς τα μέσα από το επιθυμητό ορθογώνιο και με βάση αυτό δώσαμε τις συντεταγμένες κοπής στο μηχάνημα.

Πάμε τώρα να δούμε τα πρακτικά βήματα για τη κατασκευή του παιχνιδιού. Το πρώτο πράγμα που κάναμε ήταν να βρούμε κομμάτι ξύλου με πάχος 25mm. Αφού βρήκαμε το κομμάτι το κόψαμε στο τραπέζι κοπής ώστε να πάρουμε ένα ορθογώνιο 160x225mm. Τα βήματα αυτά φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



**Εικόνα Π- 5 Ρύθμιση τραπεζιού κοπής**



**Εικόνα Π- 6 Ξεκινώντας την κοπή του ξύλου**

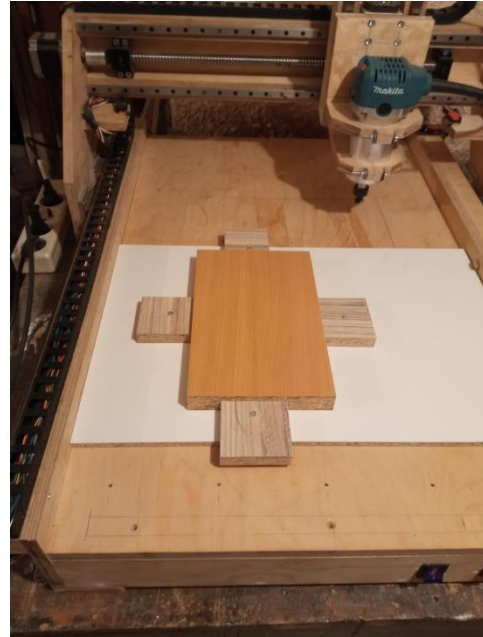


**Εικόνα Π- 7 Μετά την κοπή του ξύλου**



**Εικόνα Π- 8 Καμαρώνοντας τα αποτελέσματα**

Στη συνέχεια στερεώσαμε το κομμάτι που κόψαμε πάνω στο κρεβάτι του συστήματος κατεργασίας. Αυτή τη φορά ο τρόπος συγκράτησης που επιλέξαμε ήταν με θυσιαζόμενο κομμάτι ξύλου. Τοποθετήσαμε πάνω στο κρεβάτι του συστήματος ένα κομμάτι ξύλου (λευκό κομμάτι στην εικόνα Π-9) το οποίο πρακτικά θυσιάστηκε για να μας βοηθήσει να συγκρατήσουμε το τεμάχιο προς κατεργασία. Έπειτα ακουμπήσαμε το τεμάχιο μας πάνω στο θυσιαζόμενο ξύλο και το αιχμαλωτίσαμε βιδώνοντας περιμετρικά ξύλινους τάκους. Στη συνέχεια βάλουμε στο ρούτερ το πρώτο εργαλείο με τη στρογγυλή μύτη και ορίσαμε το σημείο μηδέν της κεφαλής του συστήματος να είναι στην κάτω αριστερή γωνία του ξύλου μας. Σε αυτή τη φάση είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε την κατεργασία του τεμαχίου μας. Ανοίξαμε στο UGS το πρώτο μέρος του G-code και το στείλαμε στο μηχάνημα μας ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία κατεργασίας. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται στιγμιότυπα από τη διάρκεια κατεργασίας του πρώτου μέρους.



**Εικόνα Π- 9 Στερέωση του τεμαχίου προς κατεργασία στο κρεβάτι του συστήματος**



**Εικόνα Π- 10 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας**



**Εικόνα Π- 11 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας**



**Εικόνα Π- 12 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας**



**Εικόνα Π- 13 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας**



**Εικόνα Π- 14 Στιγμιότυπο από τη πρώτη φάση κατεργασίας**

Αφού τελείωσε το πρώτο στάδιο κάναμε μια μικρή παύση στη διαδικασία της κατεργασίας, ανεβάσαμε ποιο ψηλά την κεφαλή και αλλάξαμε το εργαλείο κοπής στο ρούτερ. Έπειτα ξανά φέραμε τον Z άξονα εκεί που ήταν και συνεχίσαμε στο δεύτερο μέρος της κατεργασίας, στιγμιότυπα του οποίου φαίνονται στη συνέχεια.



**Εικόνα Π- 15**  
Στιγμιότυπο από τη  
δεύτερη φάση  
κατεργασίας



**Εικόνα Π- 16 Στιγμιότυπο**  
από τη δεύτερη φάση  
κατεργασίας



**Εικόνα Π- 17 Στιγμιότυπο από**  
τη δεύτερη φάση κατεργασίας

Στην εικόνα Π-17 βλέπουμε το τελικό αποτέλεσμα μετά από την κατεργασία που δέχτηκε το τεμάχιο από το μηχάνημα μας. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι το περιθώριο στο πάνω μέρος του ξύλου μας έδωσε την ευκαιρία να δοκιμάσουμε να κάνουμε μια μικρή καλλιτεχνία στο γείσο, μιας και είχαμε παραπάνω ξύλο στο ταμπλό.



**Εικόνα Π- 18 Στιγμιότυπο από την δοκιμή**  
που κάναμε στο πάνω μέρος του ταμπλό

Διαθέτουμε μερικά εργαλεία κοπής τα οποία είναι για να «γλυκαίνουν» τις ακμές ενός ξύλου. Ένα τέτοιο εργαλείο χρησιμοποιήσαμε και εμείς και φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Αφαιρέσαμε τον πάνω ξύλινο τάκο που είχαμε για να συγκρατούμε το τεμάχιο μας ώστε να μη χτυπήσει το εργαλείο μας. Έπειτα δώσαμε εντολή στο μηχάνημα μας να εκτελέσει ευθεία πορεία κατά μήκος της πάνω ακμής του τεμαχίου. Το αποτέλεσμα φαίνεται στη διπλανή εικόνα.



Στη διπλανή εικόνα βλέπουμε το ταμπλό του δικού μας SOLITAIRE στημένο για να ξεκινήσει το παιχνίδι. Οι ξύλινες μπίλιες είναι αγορασμένες. Τώρα το μόνο που μας λείπει είναι το καπάκι για τον ορθογώνιο χώρο που βάζουμε τις μπίλιες, το οποίο θα γίνει με την πρώτη ευκαιρία.

**Εικόνα Π- 19 Το ταμπλό του επιτραπέζιου έτοιμο για παιχνίδι**

G-code πρώτου μέρους για την κατασκευή του SOLITAIRE	G-code δεύτερου μέρους για την κατασκευή του SOLITAIRE
(TEM 225X160, 23/2/22)	(TEM 225X160, 23/2/22)
G21	G21
G90	G90
(First 6 circles from Down-Right corner)	
G01 X59 Y17 F100	G01 X16 Y176 F100
G01 Z-7 F100	G01 Z-10 F100
G01 Z0 F100	G01 X144 Y176 F100
G01 X80 Y17 F100	G01 X144 Y186 F100
G01 Z-7 F100	G01 X16 Y186 F100
G01 Z0 F100	G01 X16 Y196 F100
G01 X101 Y17 F100	G01 X144 Y196 F100
G01 Z-7 F100	G01 X144 Y206 F100
G01 Z0 F100	G01 X16 Y206 F100
G01 X101 Y38 F100	
G01 Z-7 F100	G01 Z-20 F100
G01 Z0 F100	G01 X144 Y206 F100
G01 X80 Y38 F100	G01 X144 Y196 F100
G01 Z-7 F100	G01 X16 Y196 F100
G01 Z0 F100	G01 X16 Y186 F100
G01 X59 Y38 F100	G01 X144 Y186 F100
G01 Z-7 F100	G01 X144 Y176 F100
G01 Z0 F100	G01 X16 Y176 F100
(First 7 circles from Right to Left)	
G01 X17 Y59 F100	G01 Z-3 F100
G01 Z-7 F100	G01 X16 Y171 F100
G01 Z0 F100	G01 X144 Y171 F100
G01 X38 Y59 F100	G00 X144 Y206 F100
G01 Z-7 F100	G01 X144 Y211 F100
G01 Z0 F100	G01 X16 Y211 F100

G01 X59 Y59 F100	G00 Z0 F100
G01 Z-7 F100	G00 X0 Y0 F100
G01 Z0 F100	
G01 X80 Y59 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X101 Y59 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X122 Y59 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X143 Y59 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
(Second 7 circles from Left to Right)	
G01 X143 Y80 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X122 Y80 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X101 Y80 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X80 Y80 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X59 Y80 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X38 Y80 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X17 Y80 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
(Third 7 circles from Right to Left)	
G01 X17 Y101 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X38 Y101 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X59 Y101 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X80 Y101 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X101 Y101 F100	
G01 Z-7 F100	
G01 Z0 F100	
G01 X122 Y101 F100	
G01 Z-7 F100	

```
G01 Z0 F100
G01 X143 Y101 F100
G01 Z-7 F100
G01 Z0 F100
(Last 6 circles from Down-Left corner)
G00 X101 Y122 F100
G01 Z-7 F100
G01 Z0 F100
G01 X80 Y122 F100
G01 Z-7 F100
G01 Z0 F100
G01 X59 Y122 F100
G01 Z-7 F100
G01 Z0 F100
G01 X59 Y143 F100
G01 Z-7 F100
G01 Z0 F100
G01 X80 Y143 F100
G01 Z-7 F100
G01 Z0 F100
G01 X101 Y143 F100
G01 Z-7 F100
G01 Z0 F100
```

## Βιβλιογραφία

- [1].CNC ROUTER SOURCE, (2007) **The CNC Router Everything You Need to Know**, [online] Διαθέσιμο από <http://www.cncroutersource.com>, [Προσπέλαση 12 Φεβρουαρίου 2021]
- [2].Maki K.Habib, (2019), **Advanced Robotics and Intelligent Automation in Manufacturing**, [e-book], IGI Global, Available at [https://books.google.gr/books?id=-BPFdWAAQBAJ&dq=constructor+Nema+23&hl=el&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.gr/books?id=-BPFdWAAQBAJ&dq=constructor+Nema+23&hl=el&source=gbs_navlinks_s), [Accessed 4 Μαρτίου 2021]
- [3].Γιώργος Μαλιώτης, elecotec, (2014), **Εργαλειομηχανές: Τα βασικά είδη μηχανουργικών κατεργασιών**, [online] Διαθέσιμο από <http://www.cncroutersource.com>, [Προσπέλαση 10 Ιανουαρίου 2021]
- [4].Εκπαιδευτικά site Google, <https://sites.google.com/site/ergaleiomechanescnc/cnc-mill/eide-phrezon>
- [5].Ν.Μπιλάλης και Ε.Μαραβελάκης (2014), **Συστήματα CAD/CAM & τρισδιάστατη μοντελοποίηση**, Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, Νευροκοπίου 8 Αθήνα, ISBN 978-960-218-953-5
- [6].Thomas Derdak and Paula Kepos, (1995), **International Directory of Company Histories**, Τόμος 10, Εκδόσεις St.James Press, ISBN 978-155-862-325-5
- [7].Α.Θ.Αντωνιάδης (2017), **Μηχανολογικό σχέδιο**, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Φιλίππου 91 Θεσσαλονίκη, ISBN 978-960-418-434-7
- [8].Dassault Systems, (2002-2021), **Solidworks**, [online] Διαθέσιμο από <https://www.solidworks.com>, [Προσπέλαση 3 Νοεμβρίου 2020]
- [9].Simscale, (2021), **What Is FEA | Finite Element Analysis?**, [online] Διαθέσιμο από <https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-fea-finite-element-analysis/>, [Προσπέλαση 15 Σεπτεμβρίου 2021]
- [10].The Efficient Engineer, (2021), **Understanding the Finite Element Method**, [YouTube video] Διαθέσιμο από <https://youtu.be/GHjopp47vvQ>, [Προσπέλαση 6 Μαΐου 2021]
- [11].The Engineering ToolBox, **Factor of Safety**, [online] Διαθέσιμο από [https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d\\_1624.html](https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html), [Προσπέλαση 9 Ιανουαρίου 2021]
- [12].Ajay Harish, Simscale, (2021), **What Is the Meaning of the Von Mises Stress and the Yield Criterion?**, [online] Διαθέσιμο από <https://www.simscale.com/blog/2017/04/von-mises-stress/>, [Προσπέλαση 12 Ιανουαρίου 2022]
- [13].The Efficient Engineer, (2021), **Understanding Failure Theories (Tresca, von Mises etc.)**, [YouTube video] Διαθέσιμο από <https://youtu.be/xkbQnBAOFeg>, [Προσπέλαση 11 Ιανουαρίου 2021]
- [14].The Efficient Engineer, (2020), **Understanding Shear Force and Bending Moment Diagrams**, [YouTube video] Διαθέσιμο από <https://youtu.be/C-FEVzI8oe8>, [Προσπέλαση 11 Ιανουαρίου 2021]
- [15].The Efficient Engineer, (2020), **An Introduction to Stress and Strain**, [YouTube video] Διαθέσιμο από <https://youtu.be/aQf6Q8t1FOE>, [Προσπέλαση 11 Ιανουαρίου 2021]



- [16].The Efficient Engineer, (2020), **Understanding Material Strength, Ductility and Toughness**, [YouTube video] Διαθέσιμο από <https://youtu.be/WSRqJdT2COE>, [Προσπέλαση 11 Ιανουαρίου 2021]
- [17].The Efficient Engineer, (2020), **Understanding Poisson's Ratio**, [YouTube video] Διαθέσιμο από <https://youtu.be/tuOIM3P7ygA>, [Προσπέλαση 11 Ιανουαρίου 2021]
- [18].The Efficient Engineer, (2021), **Understanding Torsion**, [YouTube video] Διαθέσιμο από <https://youtu.be/1YTKedLQOa0>, [Προσπέλαση 11 Ιανουαρίου 2021]
- [19].Π.Παπάζογλου, Σπ.Π.Λιώνης (2018), **Ανάπτυξη εφαρμογών με το Arduino**, Εκδόσεις TZIOΛΑ, Φιλίππου 91 Θεσσαλονίκη, ISBN 978-960-418-550-4
- [20].Dejan, How To Mechatronics, (2020), **How to Setup GRBL & Control CNC Machine with Arduino**, [online] Διαθέσιμο από <https://howtomechatronics.com/tutorials/how-to-setup-grbl-control-cnc-machine-with-arduino/>, [Προσπέλαση 2 Ιανουαρίου 2021]
- [21].JAY'S custom creations, **CNC Workflow: SketchUp, MakerCam, Universal Gcode Sender**, [online] Διαθέσιμο από <https://jayscustomcreations.com/2015/02/cnc-workflow-sketchup-makercam-universal-gcode-sender/>, [Προσπέλαση 4 Ιανουαρίου 2022]
- [22].Devan Metz, Craftcloud, (2020), **How to Build a CNC Router from Scratch**, [online] Διαθέσιμο από <https://all3dp.com/2/build-cnc-router-from-scratch/>, [Προσπέλαση 5 Ιανουαρίου 2021]
- [23].Benne, Instructables workshop, **Building a CNC Router**, [online] Διαθέσιμο από <https://www.instructables.com/id/Building-a-CNC-router/>, [Προσπέλαση 13 Φεβρουαρίου 2021]
- [24].Jolly Green, GitHub, (2021), **Grbl v1.1 Configuration**, [online] Διαθέσιμο από <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Grbl-v1.1-Configuration>, [Προσπελάστηκε 25 Νοεμβρίου 2021]
- [25].Wallay Gastreich, (2018), **WHAT IS A STEPPER MOTOR AND HOW IT WORKS**, [online] Διαθέσιμο από <https://realpars.com/stepper-motor/>, [Προσπελάστηκε 22 Δεκεμβρίου 2020]
- [26].Αμπατζόγλου Γιάννης, **Έλεγχος βηματικού κινητήρα**, [e-book] Διαθέσιμο από [http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/live%20ebooks/robotiki\\_G\\_2018\\_final/\\_2.html](http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/live%20ebooks/robotiki_G_2018_final/_2.html), [Προσπελάστηκε 22 Δεκεμβρίου 2020]
- [27].COMPONENTS 101, (2021), **NEMA 23 Stepper Motor**, [online] Διαθέσιμο από <https://components101.com/motors/nema-23-stepper-motor-datasheet-specs>, [Προσπελάστηκε 10 Απριλίου 2021]
- [28].Makerguides, (2019), **TB6600 Stepper Motor Driver with Arduino Tutorial**, [online] Διαθέσιμο από <https://www.makerguides.com/tb6600-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>, [Προσπέλαση 5 Ιανουαρίου 2020]
- [29].Friedemann Stoffreger, GitHub, (2019), **Grbl's Pins**, [online] Διαθέσιμο από <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Connecting-Grbl>, [Προσπέλαση 19 Ιανουαρίου 2021]
- [30].Dejan, How To Mechatronics, (2020), **G-code Explained | List of Most Important G-code Commands**, [online] Διαθέσιμο από <https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/>, [Προσπέλαση 7 Ιουλίου 2021]

Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος κατεργασίας ελεγχόμενο από υπολογιστή

**Τεχνικά εγχειρίδια που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία**

- A. Technical Information RT0700C Trimmer, Makita
- B. High Torque Hybrid Stepping Motor Specifications, CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS NEW TECHNIC INSTITUTE
- C. BALL SCREWS, AluFlexGroup
- D. Ball Screw and Related Products Technical Catalog