ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ ΄΄Συστήματα Αυτοματισμού΄΄

Μεταπτυχιακή Εργασία

‘’Δομικός σχεδιασμός και κατασκευή drone για μεταφορά υλικών σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών ’’

Μεταπτυχιακός φοιτητής

Λεκάι Ευθύμιος

021-201-11

Επιβλέπων Καθηγητής

Γ. –Χ. Βοσνιάκος

Αθήνα

Φεβρουάριος 2022

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) Συστήματα Αυτοματισμού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Μέσα από την περάτωση της εργασίας δόθηκε η ευκαιρία για διεύρυνση των γνώσεων καθώς και εμβάθυνση των ήδη υπάρχοντων. Η επαφή με το αντικείμενο της διπλωματικής συνέβαλε στην ανάπτυξη δεξιοτήτων, και στην ικανότητα απόκτησης πιο σφαιρικής άποψης για την αντιμετώπιση προβλημάτων που καλείται να λύσει ένας Μηχανολόγος Μηχανικός.

Σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Γ.-Χ. Βοσνιάκο για την πολύτιμη συμβολή του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και την άμεση ανταπόκριση του στα όποια θέματα προέκυψαν. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Γεώργιο Παπαζέτη για τις χρήσιμες συμβουλές του και τον φοιτητή Θάνο Σάλτα για την υποστήριξη του στο κομμάτι CAM – CNC. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γεράσιμο Μαλτέζο για τις πληροφορίες που μου έδωσε σχετικά με την διπλωματική του, οι οποίες συνέβαλλαν στην καλύτερη κατανόηση και περάτωση της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξε καθόλη την διάρκεια συγγραφής της εργασίας.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε προσπάθεια βέλτιστου σχεδιασμού και κατασκευής ενός τετρακόπτερου drone με σκοπό την χρήση του για μεταφορά υλικών και εξαρτημάτων σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών.

Ο σχεδιασμός προσεγγίστηκε αρχικά με βάση τα δεδομένα που εξάχθηκαν από την διπλωματική εργασία του Γ. Μαλτέζου και υλοποιήθηκε με γνώμονα αφενός την ασφάλεια κατά την χρήση του drone και αφετέρου το υλικό, τη γεωμετρία και τη μηχανική αντοχή. Αρχικά σχεδιάστηκε η επιθυμητή γεωμετρία του πλαισίου η οποία είχε την μορφή δικτυώματος για εξασφάλιση μειωμένου βάρους. Στην συνέχεια χωρίστηκε η κατασκευή σε κομμάτια τόσο για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η κατασκευή τους από πλευράς διαστάσεων όσο και για να δοθεί η δυνατότητα επισκευής τμημάτων της κατασκευής και όχι αντικατάστασης ολόκληρου του πλαισίου σε περίπτωση ενδεχόμενης βλάβης. Επιπρόσθετα επιλέχθηκε λυόμενη σύνδεση μεταξύ των εξαρτημάτων και ποιο συγκεκριμένα, κοχλιοσύνδεση.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δύο αναλύσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την δομική ακεραιότητα της κατασκευής. Η πρώτη ανάλυση αφορούσε την δυσμενέστερη περίπτωση η οποία εμφανίζεται κατά την απογείωση του σκάφους με την μέγιστη ώση και το μοντέλο της ανάλυσης αποτελούνταν από τον βραχίονα του σκάφους και την κοχλιοσύνδεση. Το πάχος της πλάκας με την οποία έγινε η ανάλυση ήταν 10mm και αποδείχθηκε ότι η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στο μοντέλο ήταν κατά 10 περίπου φορές μικρότερη σε σχέση με το όριο διαρροής του κράματος 7075 T651 το οποίο επιλέχθηκε για την κατασκευή. Στην συνέχεια επαναλήφθηκε η μελέτη αφαιρώντας από το πάχος της πλάκας 1mm κάθε φορά έως το τελικό πάχος 7mm. Ποιο συγκεκριμένα η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στην ανάλυση ήταν 69.1 MPa, η μετατόπιση ήταν 2.64 mm ενώ η παραμόρφωση ήταν 0.00079.

Η δεύτερη ανάλυση πραγματοποιήθηκε στην συναρμογή της τελικής κατασκευής και αποτελούνταν από την βάση του σκάφους και τους τέσσερεις βραχίονες. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε ήταν 22.5 Mpa, η μέγιστη μετατόπιση έφτασε τα 2.52 mm ενώ η μέγιστη παραμόρφωση ήταν 0.00015.

Το βάρος του πλαισίου αγγίζει τα 2035 gr ενώ το βάρος των εξαρτημάτων σύμφωνα με τα δεδομένα των κατασκευαστών είναι 2551 gr. Το μεικτό βάρος το οποίο έχει υπολογιστεί να ανυψώνει το drone είναι 7727 gr το οποίο μας επιτρέπει την μεταφορά ωφέλιμου φορτίου 3.141 gr.

Εν συνεχεία αφού καθορίστηκε η τελική γεωμετρία που θα έχει το πλαίσιο, έγινε προγραμματισμός σε CAM για την κοπή των δέκα συνολικά εξαρτημάτων τα οποία απαρτίζουν την κατασκευή και έπειτα έγινε κατεργασία των τεμαχίων στην τριαξονική φρέζα HAAS TM1 που βρίσκεται στο χώρο του εργαστηρίου της Τεχνολογίας Κατεργασιών του ΕΜΠ και συναρμολόγησή τους.

Λέξεις κλειδιά: drones, UAV, CAM, CAD, μη γραμμική ανάλυση, φρέζα, Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών, SolidWorks, πεπερασμένα στοιχεία

Abstract

In the frame of this thesis, it was made an effort to optimize the design and manufacture of a quadcopter drone in order to use it for the transportation of materials and components to Flexible Manufacturing Systems.

The design was initially approached based on the data extracted from the thesis of G. Maltezos and was implemented on the one hand on safety when the drone is used and on the other hand the material, geometry and mechanical strength. Initially the desired geometry of the frame was designed as a truss to ensure reduced weight. Afterwards the construction was divided into parts, in order to be able to constructed and to give the chance of repairing parts of the construction and not replacing the entire frame in case of possible damage. Additionally, a detachable connection was selected between the components, and more specifically, a bolt connection.

After that, were performed two analyses with Finite Element Method for the structural integrity of the construction. The first analysis concerned the worst case scenario which occurs when the drone takes off with the maximum thrust and the model of the analysis consisted of the arm and the bolt connection.

The thickness of the plate with which the analysis was made was 10mm and it turned out that the maximum stress developed in the model was about 10 times smaller than the yielding stress of the alloy 7075 T651 which was chosen for the construction. The study was then repeated subtracting from the thickness of the plate 1mm each time to the final thickness of 7mm. Specifically the maximum stress developed in the analysis was 69.1 MPa, the displacement was 2.64 mm while the strain was 0.00079.

The second analysis was performed on the assembly of the final construction and consisted of the base of the drone and the four arms. The results of the analysis showed that the maximum stress developed was 22.5 MPa, the maximum displacement reached 2.52 mm while the maximum strain was 0.00015.

The weight of the frame was 2035 gr while the weight of the components according to the data of the manufacturers is 2551 gr. The gross weight that the drone is calculated to lift is 7727 gr which allows us to transport a payload of 3.141 gr.

Then, after determining the final geometry of the frame, the G-code of the components that constitute the frame structure was programmed on CAM and then the parts were machined on the three-axis milling machine HAAS TM1 located in NTUAs laboratory of Manufacturing Technology and the final assembly was completed.

Keywords: drones, UAV, CAM, CAD, non-linear analysis, Milling Machine, Flexible Manufacturing Systems, SolidWorks, Finite Elements

Περιεχόμενα

Πρόλογος iii

Περίληψη iv

Abstract vi

Κατάλογος Εικόνων x

Κατάλογος Πινάκων xiv

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή 1

1.1 Χρήση Drones σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών 1

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 2

1.3 Δομή εργασίας 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Σχεδιασμός Σκάφους 6

2.1 Σχεδιασμός επιμέρους εξαρτημάτων 7

2.2 Προκαταρκτικός σχεδιασμός πλαισίου σκάφους 9

2.2.1 Πρώτο Project σχεδιασμού 9

2.2.2 Δεύτερο Project σχεδιασμού 11

2.2.3 Τρίτο Project σχεδιασμού 13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δομική Ανάλυση Σκάφους 17

3.1 Κριτήρια αστοχίας 17

3.2 Επιλογή υλικού 17

3.2.1 Κράμα ΑΑ 2024 18

3.2.2 Κράμα ΑΑ 6061 18

3.2.3 Κράμα ΑΑ 7075 19

3.3 Μοντέλο προσομοίωσης 20

3.4 Ανάλυση 20

3.5 Αποτελέσματα 33

3.6 Τελική επιλογή σχεδιασμού του σκάφους 36
3.7 Ανάλυση Συναρμογής Σκάφους 38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κατασκευή πλαισίου 43
4.1 Επιλογή κοπτικών εργαλείων 44
4.2 Συνθήκες κοπής 45
4.3 Φασεολόγιο κοπής εξαρτημάτων 47
4.4 Προγραμματισμός τεμαχίων προς κατεργασία με CAM 51
4.5 Παρουσίαση κατασκευασμένων εξαρτημάτων 60
4.6 Συναρμολογημένο πλαίσιο drone 64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία 65
5.1 Συμπεράσματα 65
5.2 Μελλοντική εργασία 67
Βιβλιογραφία 68
Παράρτημα 72
Α. Προδιαγραφές εργαλείων 72
Β. G_Code βραχίονα σκάφους 75

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Δεδομένα eCalc για το drone 6

Εικόνα 2: Αποτελέσματα eCalc για το drone 6

Εικόνα 3: Ο ESC του σκάφους. 7

Εικόνα 4: Ο ελεγκτής του σκάφους. 7

Εικόνα 5: Ο κινητήρας του σκάφους. 8

Εικόνα 6: Η μπαταρία του σκάφους. 8

Εικόνα 7: Η έλικα του σκάφους. 8

Εικόνα 8: Αρχικός σχεδιασμός σκάφους. 10

Εικόνα 9: Αρχικός σχεδιασμός σκάφους με τοποθετημένα τα εξαρτήματα. 10

Εικόνα 10: Δικτυωτός σχεδιασμός του σκάφους. 11

Εικόνα 11: Γεωμετρία σκάφους με την μορφή δικτυώματος. 12

Εικόνα 12: Γεωμετρία σκάφους με την μορφή δικτυώματος και τοποθετημένα τα εξαρτήματα. 12

Εικόνα 13: Βάση σκάφους. 14

Εικόνα 14: Οροφή σκάφους. 14

Εικόνα 15: Βραχίονας σκάφους. 15

Εικόνα 16: Πέλμα σκάφους. 15

Εικόνα 17: Συναρμολογημένο πλαίσιο του σκάφους. 16

Εικόνα 18: Συναρμολογημένο σκάφος με τοποθετημένα όλα τα εξαρτήματα. 16

Εικόνα 19: Το μοντέλο της προσομοίωσης στο περιβάλλον του Solidworks. 20

Εικόνα 20: Καταπόνηση κοχλία σε εφελκυσμό 21

Εικόνα 21: Είδη ανάλυσης του SolidWorks. 26

Εικόνα 22: Βήματα της ανάλυσης. 26

Εικόνα 23: Βιβλιοθήκη υλικών του SolidWorks. 27

Εικόνα 24: Επιλογή είδους επαφής μεταξύ των εξαρτημάτων. 28

Εικόνα 25: Ρυθμίσεις στο μενού Contact Set. 28

Εικόνα 26: Ρυθμίσεις στο μενού Bolt Connectors. 29

Εικόνα 27: Τοποθέτηση κοχλιών στο μοντέλο. 30

Εικόνα 28: Επιλογή στηρίξεων του SolidWorks. 30

Εικόνα 29: Τοποθέτηση στήριξης στο μοντέλο. 31

Εικόνα 30: Επιλογή φορτίσεων του SolidWorks. 31

Εικόνα 31: Τοποθέτηση φόρτισης στο μοντέλο. 32

Εικόνα 32: Επιλογές πλέγματος του SolidWorks. 32

Εικόνα 33: Πεπερασμένα στοιχεία στο μοντέλο. 33

Εικόνα 34: Αρχικό διάγραμμα Τάσης - Ορίου διαρροής του μοντέλου ανάλυσης. ... 33

Εικόνα 35: Αρχικό διάγραμμα Μετατοπίσεων του μοντέλου ανάλυσης. 34

Εικόνα 36: Αρχικό διάγραμμα παραμορφώσεων του μοντέλου ανάλυσης. 35

Εικόνα 37: Αρχικός έλεγχος Κοχλιών του μοντέλου ανάλυσης. 35

Εικόνα 38: Τελικό διάγραμμα Τάσεων του μοντέλου ανάλυσης. 36

Εικόνα 39: Τελικό διάγραμμα Μετατοπίσεων του μοντέλου ανάλυσης. 36

Εικόνα 40: Τελικό διάγραμμα Παραμορφώσεων του μοντέλου ανάλυσης. 37

Εικόνα 41: Τελικός έλεγχος Κοχλιών του μοντέλου ανάλυσης. 37

Εικόνα 42: Γεωμετρία ανάλυσης συναρμογής. 38

Εικόνα 43: Στήριξη και φόρτιση ανάλυσης συναρμογής. 39

Εικόνα 44: Πλεγματοποίηση ανάλυσης συναρμογής. 39

Εικόνα 45: Τάση σε σχέση με το όριο διαρροής ανάλυσης συναρμογής. 40

Εικόνα 46: Μετατόπιση ανάλυσης συναρμογής. 40

Εικόνα 47: Παραμόρφωση ανάλυσης συναρμογής. 40

Εικόνα 48: Μηχανή κατεργασίας HAAS TM-1. 43

Εικόνα 49: Χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής HAAS TM-1 44

Εικόνα 50: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατεργασία. 45

Εικόνα 51: Ορισμός συστήματος συντεταγμένων, stock και τελικής γεωμετρίας. 52

Εικόνα 52: Σύστημα Συντεταγμένων. 53

Εικόνα 53: Ορισμός διαστάσεων block. 53

Εικόνα 54: Επιτυχής ολοκλήρωση καθορισμού αρχικών παραμέτρων. 54

Εικόνα 55: Διαδικασία εκχόνδρισης και φινιρίσματος προσώπου. 54

Εικόνα 56: Παραμετροποίηση κατεργασίας προσώπου. 55

Εικόνα 57: Διαθέσιμα κοπτικά εργαλεία του SolidCam για φρεζάρισμα. 55

Εικόνα 58: Η καρτέλα Tool του SolidCam. 56

Εικόνα 59: Διαστασιολόγηση φρεζοκεφαλής στο SolidCam. 56

Εικόνα 60: Δήλωση ταχύτητας περιστροφής ατράκτου και πρόωσης. 57

Εικόνα 61: Η καρτέλα Levels του SolidCam. 58

Εικόνα 62: Η καρτέλα Technology του SolidCam. 58

Εικόνα 63: Κίνηση του κοπτικού εργαλείου πάνω στο τεμάχιο: Α) hatch, Β) contour, Γ) spiral, Δ) one pass. 59

Εικόνα 64: Η καρτέλα Link του SolidCam. 59

Εικόνα 65: Διαδικασία κοπής βάσης σκάφους. 60

Εικόνα 66: Τελικό τεμάχιο βάσης σκάφους. 61

Εικόνα 67: Διαδικασία κοπής οροφής σκάφους. 61

Εικόνα 68: Τελικό τεμάχιο οροφής σκάφους. 62

Εικόνα 69: Διαδικασία κοπής πέλματος σκάφους. 62

Εικόνα 70: Τελικό τεμάχιο πέλματος σκάφους. 63

Εικόνα 71: Διαδικασία κοπής βραχίονα σκάφους. 63

Εικόνα 72: Τελικό τεμάχιο βραχίονα σκάφους. 63

Εικόνα 73: Συναρμολογημένο πλαίσιο. 64

Εικόνα 74: Χαρακτηριστικά για τα κονδύλια YG, Φ4 και Φ10 αντίστοιχα. 72

Εικόνα 75: Χαρακτηριστικά φρεζοκεφαλής SECO 80mm 73

Εικόνα 76: Χαρακτηριστικά τρυπανιών YG, 3, 5 και 6mm. 74

Εικόνα 77: Κεντροτρύπανο chamfer. 74

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 2024 (% wt).....18

Πίνακας 2: Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 6061 (% wt).....19

Πίνακας 3: Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 7075 (% wt).....19

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικές τιμές ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου.....19

Πίνακας 5: Μηχανικές ιδιότητες για χαλύβδινους κοχλίες μετρικού σπειρώματος...21

Πίνακας 6: Βάρος εξαρτημάτων κατασκευής. 41

Πίνακας 7: Εξαρτήματα κατασκευής. 42

Πίνακας 8: Φασεολόγιο κοπής Οροφής.....47

Πίνακας 9: Φασεολόγιο κοπής Βραχίονα.....48

Πίνακας 10: Φασεολόγιο κοπής Ποδιού στήριξης. 49

Πίνακας 11: Φασεολόγιο κοπής της Βάσης.....50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

Η ανάγκη για ολοένα και μεγαλύτερες απαιτήσεις καθώς και η ανταγωνιστικότητα της αγοράς στις μέρες μας, οδήγησε στην εισχώρηση νέων ιδεών για την ανάπτυξη και την βιωσιμότητα μιας βιομηχανίας. Από την άλλη η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των μη επανδρωμένων οχημάτων (UAVs) άνοιξε νέους δρόμους για την χρήση τους σε εμπορικούς σκοπούς.

Τα drones έγιναν αρκετά δημοφιλή εξαιτίας της ικανότητας τους να βρίσκονται ανεξάρτητα σε ένα περιβάλλον εργασίας, χωρίς όριο όσο αφορά τους βαθμούς ελευθερίας [1]. Ωστόσο η χρήση τους για την μεταφορά υλικών και εξαρτημάτων σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο και δεν υπάρχει εκτενής έρευνα που να καλύπτει αυτό το εύρος εφαρμογών.

1.1 Χρήση Drones σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών

Η μεταφορά υλικών και εξαρτημάτων σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών γίνεται κυρίως με ταινιόδρομους και AGVs. Οι ταινιόδρομοι είναι βαριές και ακριβές κατασκευές και καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο στην γραμμή παραγωγής. Επιπρόσθετα μπορούν να εκτελέσουν προδιαγεγραμμένη τροχιά χωρίς να μπορούν να εισχωρήσουν σε στενά σημεία. Τα AGVs έχουν την δυνατότητα να εκτελούν μη σταθερές τροχιές και να επικοινωνούν με τις μηχανές κατεργασίας, παρόλα αυτά και πάλι καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο και υπάρχει η πιθανότητα να προκληθούν ατυχήματα από ενδεχόμενη σύγκρουσή τους [2].

Η χρήση ενός στόλου drone με σκοπό την μεταφορά υλικών και εξαρτημάτων σε συστήματα κατεργασιών φαίνεται ελκυστική ιδέα καθώς μπορούν να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα των συμβατικών μέσων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα. Από την άλλη πλευρά όμως γεννιούνται ορισμένα νέα προβλήματα.

Η χρήση τους σε συστήματα κατεργασιών θα αφορά την λειτουργία τους σε κλειστούς χώρους, ενώ η μέχρι τώρα χρήση τους αφορούσε κυρίως εφαρμογές σε εξωτερικούς χώρους. Επίσης σε μία βιομηχανία υπάρχει σημαντικός περιορισμός λόγω των εμποδίων που βρίσκονται στο έδαφος καθώς και τον δυνητικό αριθμό του στόλου των drones που θα κινούνται στον εναέριο χώρο για να καλύψουν τις ανάγκες της

βιομηχανίας. Επιπρόσθετα σημαντικά ζητήματα που απασχολούν μια τέτοια χρήση είναι η μειωμένη ικανότητά τους για την μεταφορά μεγαλύτερων φορτίων καθώς και η μικρή αυτονομία που διαθέτουν. Τέλος προβλήματα εμφανίζονται και στον τρόπο με τον οποίο θα γίνεται η πρόσδεση των τεμαχίων καθώς και η τοποθέτηση τους στο επιθυμητό σημείο [1].

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες οι οποίες διαπραγματεύονται τον σχεδιασμό ενός τετρακόπτερου σκάφους είτε από ανθρακόνημα είτε από κράματα αλουμινίου. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού φαίνεται να είναι άμεσα συνυφασμένη με χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας του σκάφους όπως είναι η ώση, οι στροφές των κινητήρων και η ταχύτητα κίνησής του. Μερικές από τις πιο σημαντικές μελέτες που βρέθηκαν, παραθέτονται στις επόμενες παραγράφους.

Οι A. Martineli et al. [3] εξέτασαν τον σχεδιασμό ενός τετρακόπτερου UAV από ανθρακόνημα. Περιέγραψαν τα κύρια εξαρτήματα και χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει το σκάφος πραγματοποιώντας δομική ανάλυση στο πλαίσιό του με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι P. Sharma και A. Selvakumar [4] σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα τετρακόπτερο drone. Πραγματοποίησαν μη γραμμική ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συμπεριλαμβάνοντας τις φυσικές επαφές μεταξύ των εξαρτημάτων αλλά και της βαρύτητας. Έγιναν προσομοιώσεις αυξάνοντας το βάρος του ωφέλιμου φορτίου μέχρι να επέλθει αστοχία έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουν την κατασκευή. Τέλος έγιναν προσπάθειες οπτικοποίησης των μεγεθών ώσης, στροφών του κινητήρα και ταχύτητας κίνησης του σκάφους.

Οι E. Kuantama et al. [5] στην εργασία τους πραγματοποίησαν σχεδιασμό και ανάλυση ενός τετρακόπτερου drone. Επίσης εξέτασαν τα μεγέθη ώση και απόσταση μεταξύ των ελίκων με στόχο την βελτιστοποίηση του ωφέλιμου φορτίου. Ο σχεδιασμός του σκάφους έγινε με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της μάζας του συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου του οποίου καλούταν να ανυψώσει. Η ανάλυση έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε πλαίσιο διαστάσεων 560 x 560 και 406 x 127 αντίστοιχα.

Οι M. Anudeep et al. [6] στην μελέτη τους, σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα τετρακόπτερο drone που θα εντάσσεται στην κατηγορία micro UAV. Το υλικό κατασκευής που επιλέχθηκε για το πλαίσιο του σκάφους ήταν ανθρακόνημα ενώ η αρπάγη συγκράτησης για την μεταφορά εξαρτημάτων ήταν από κράμα αλουμινίου. Έγινε ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και ως κριτήριο αστοχία επιλέχθηκε το Von Mises. Η δυνατότητα μεταφοράς ωφέλιμου φορτίου ορίστηκε στο 1kg.

Οι P. Way et al. [7] πραγματοποίησαν σχεδιασμό ενός τετρακόπτερου σκάφους με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Το υλικό κατασκευής που επιλέχθηκε ήταν το ανθρακόνημα και εξετάστηκαν οι τάσεις, οι μετατοπίσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν στο μοντέλο της προσομοίωσης. Στόχος ήταν η βελτιστοποίηση και πρόβλεψη του σκάφους από πλευράς κόστους.

Οι A. Balachandran et al. [8] στην μελέτη τους εξέτασαν και σύγκριναν διάφορα υλικά με σκοπό να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή UAVs. Τα κριτήρια επιλογής των υλικών ήταν το όριο διαρροής, η ειδική αντοχή, η θερμική συμπεριφορά, η αντίσταση στους κραδασμούς, η αντίσταση στην οξείδωση και η αντίσταση στην κόπωση. Τα υλικά που επιλέχθηκαν ήταν ανθρακόνημα, ξύλο balsa, πολυστυρένιο, κράματα αλουμινίου (7068, 7075, 6061, 6063, 2024, 5052), χάλυβας και τιτάνιο. Τα τρία πιο ελκυστικά υλικά βρέθηκαν να είναι το ξύλο balsa, το ανθρακόνημα και τα κράματα αλουμινίου.

Οι P. Gadiya et al. [9] στην μελέτη τους πραγματεύονται τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός τετρακόπτερου drone για την μεταφορά φαρμάκων. Τα υλικά που ήταν υποψήφια για την κατασκευή ήταν το ανθρακόνημα, οι ίνες γυαλιού, ο χάλυβας και κράματα αλουμινίου. Η ανάλυση έγινε με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων και το υλικό που τελικά επιλέχθηκε για την κατασκευή ήταν οι ίνες γυαλιού λόγω της πολύ υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, το ιδιαίτερα χαμηλό βάρος του και της καλής συμπεριφορά του στους κραδασμούς, παρότι με αυτό προέκυψε υψηλότερο κόστος κατασκευής.

Οι K. N. Shah et al. [10] στην μελέτη τους εξέτασαν την ικανότητα μεταφοράς ωφέλιμου φορτίου ενός τετρακόπτερου UAV. Η μάζα η οποία ήθελαν να μεταφέρει το drone ήταν τα 4 kg με προορισμό την χρήση του για στρατιωτικές και βιομηχανικές

εφαρμογές. Δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη μέσω ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Οι R. Nallappan et al. [11] σχεδίασαν ένα τετρακόπτερο drone και έκαναν διαλογή των επιμέρους εξαρτημάτων του (μπαταρία, κινητήρες, έλικες, ESCs) με στόχο την ελαχιστοποίηση της μάζας του. Το σκάφος του drone επιλέχθηκε να είναι κράματος αλουμινίου 6061 εξαιτίας του χαμηλού βάρους του, της μεγάλης αντοχής του σε εφελκυσμό αλλά και το χαμηλό κόστος του. Τέλος έγινε δομική ανάλυση και ανάλυση σε κόπωση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι S. K. Phang et al. [12] σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα micro τετρακόπτερο UAV συνολικού βάρους 40 g ικανό για να πραγματοποιήσει πτήση 8 λεπτών. Στο πρώτο μέρος της μελέτης έγινε ο σχεδιασμός του σκάφους με κύριο γνώμονα την ελαχιστοποίηση της μάζας συναρτήσει της ώσης και των στροφών του κινητήρα. Στο δεύτερο μέρος έγινε ο έλεγχος των πτήσεων δίνοντας έμφαση στους ESCs του σκάφους. Στο τρίτο και τελευταίο μέρος αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο με βάση τον νόμο Newton – Euler.

Οι R. F. Alphonso et al. [13] σχεδίασαν και ανέπτυξαν ένα τετρακόπτερο UAV με την βοήθεια εργαλείων CAD και CAE. Στόχος τους ήταν να σχεδιαστεί ένα πρωτότυπο μοντέλο και στην συνέχεια να γίνει ανάλυση με αυτό σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Αρχικά έγινε ένας προσεγγιστικός σχεδιασμός του σκάφους και με βάση αυτόν, καθορίστηκαν τα επιμέρους εξαρτήματα της κατασκευής, δηλαδή οι κινητήρες, οι έλικες και τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά μέρη. Το υλικό κατασκευής του επιλέχθηκε να είναι κράμα αλουμινίου σειράς 6XXX λόγου του χαμηλού βάρους του, της αντοχής του και του χαμηλού του κόστους. Στην συνέχεια έγιναν δοκιμές πτήσης και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με παρόμοιες μελέτες.

Οι S. Kumar και K. Sankaralingam [14] σχεδίασαν ένα τετρακόπτερο UAV και πραγματοποίησαν δομική ανάλυση με σκοπό την βελτιστοποίηση του ωφέλιμου φορτίου. Έγινε επίσης μαθηματική μοντελοποίηση και εκτελέστηκαν προσομοιώσεις σε περιβάλλον Matlab με την προσθήκη ενός P.I.D ελεγκτή για την σωστή απόκριση του σκάφους κατά την διάρκεια των πτήσεων. Τέλος προτάθηκε σαν υλικό κατασκευής να είναι οι ίνες γυαλιού εξαιτίας της πολύ μεγάλης ειδικής αντοχής του αλλά και της καλής συμπεριφοράς του σε κραδασμούς.

1.3 Δομή εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια στα οποία γίνεται περιληπτική αναφορά στις παρακάτω παραγράφους.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή και αναφορά στα Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών και παρουσιάζεται εν συντομία η δυναμική των drones και η δυνητική τους χρήση σε μελλοντικές εφαρμογές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται σχεδιασμός των επιμέρους εξαρτημάτων της κατασκευής και προκαταρκτικός σχεδιασμός του πλαισίου του drone στο περιβάλλον του SolidWorks.

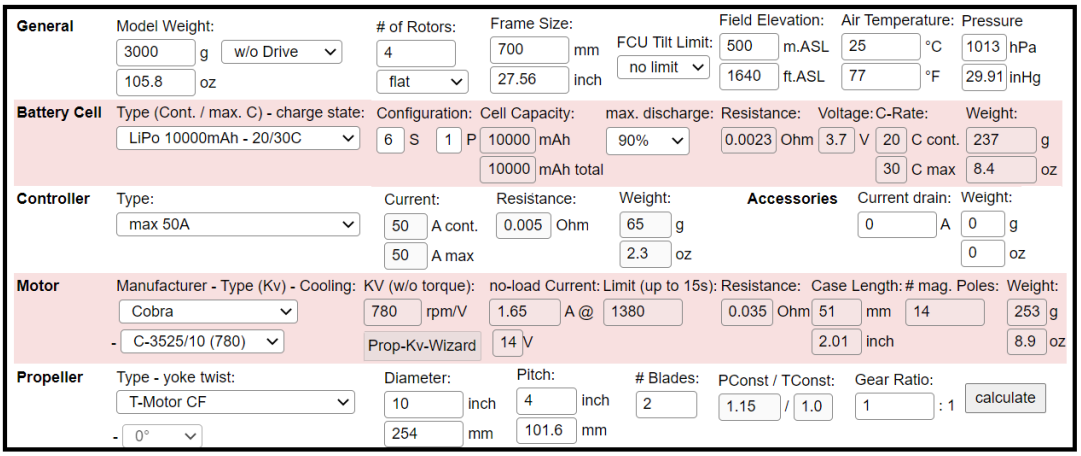
Το τρίτο κεφάλαιο αφορά την ανάλυση της κατασκευής με το SolidWorks Simulation. Αρχικά γίνεται εισαγωγή στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται περιληπτικά τα σημαντικότερα κριτήρια αστοχίας. Στην συνέχεια γίνεται επιλογή υλικού για την κατασκευή και παρουσιάζονται βήμα – βήμα δύο αναλύσεις οι οποίες αφορούν την δομική ακεραιότητα της κατασκευής στο περιβάλλον του SolidWorks και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο προγραμματισμός κοπής των τεμαχίων σε περιβάλλον CAM και η κατασκευή τους με την βοήθεια τριαξονικής φρέζας CNC στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Αναφέρονται επίσης οι συνθήκες κοπής και η επιλογή των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία. Τέλος, παρουσιάζεται η συναρμολόγηση των επιμέρους τεμαχίων ολοκληρώνοντας την κατασκευή.

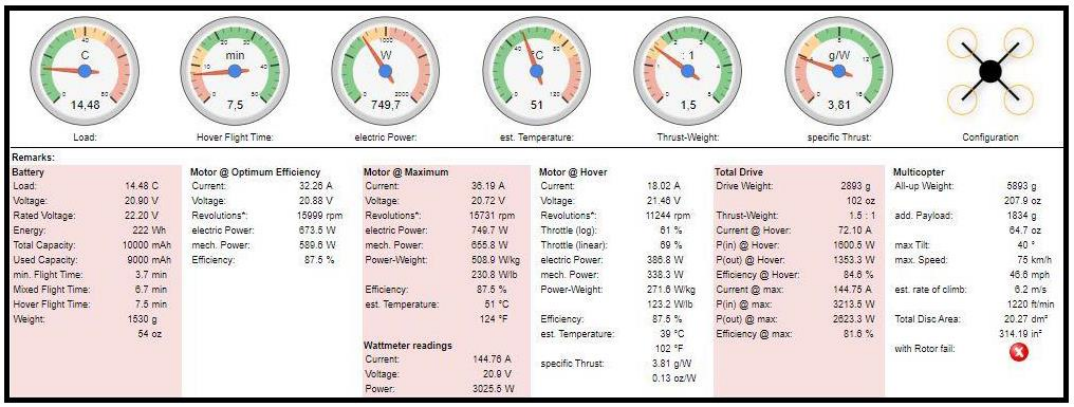
Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα της εργασίας και συστάσεις για μελλοντική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Σχεδιασμός Σκάφους

Ο αρχικός σχεδιασμός του σκάφους ξεκίνησε με βάση τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την διπλωματική του Γ. Μαλτέζου μέσα από το περιβάλλον του eCalc. Στην εικόνα 1 φαίνονται τα δεδομένα που εισάχθηκαν στο πρόγραμμα ενώ στην εικόνα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα με βάση τον αλγόριθμο του προγράμματος.



Εικόνα 1: *Δεδομένα eCalc για το drone [2].*



Εικόνα 2: *Αποτελέσματα eCalc για το drone [2].*

Με βάση τις παραπάνω εικόνες αντλήθηκαν πληροφορίες έτσι ώστε να ξεκινήσουμε τον σχεδιασμό. Οι εξωτερικές διαστάσεις της κατασκευής θα πρέπει να είναι 700 x 700 mm και το βάρος του πλαισίου του drone υπολογίζεται κατ' αρχήν στα 2893 gr. Επίσης η κατασκευή θα μπορεί να ανυψώσει 1834 gr φορτίου. Τέλος το συνολικό βάρος της κατασκευής θα ανέρχεται κατ' αρχήν στα 5893 gr. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά πραγματοποιήθηκε αρχικός σχεδιασμός σε περιβάλλον SolidWorks.

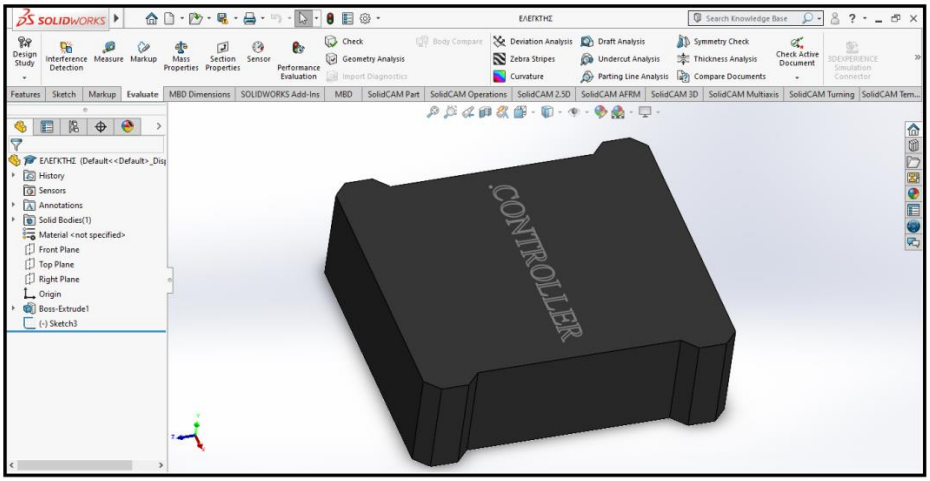
2.1 Σχεδιασμός επιμέρους εξαρτημάτων

Αρχικά συλλέχθηκαν οι διαστάσεις όλων των επιμέρους εξαρτημάτων που επιλέχθηκαν από την διπλωματική του Γ. Μαλτέζου έτσι ώστε να μπορεί να σχεδιαστεί στη συνέχεια με ακρίβεια το πλαίσιο. Τα εξαρτήματα αυτά είναι τα εξής:

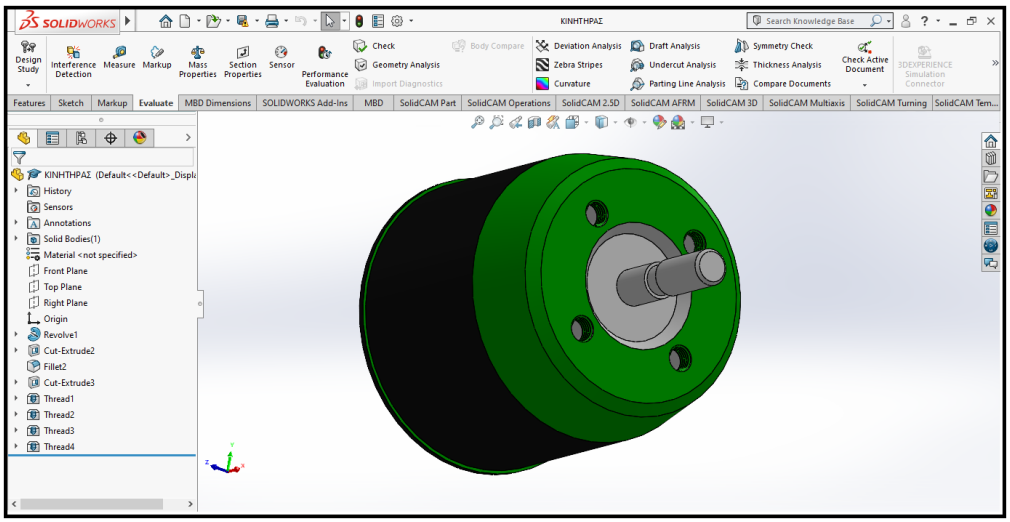
- κινητήρας
- ελεγκτής
- ESC
- μπαταρία
- έλικα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα μοντέλα των επιμέρους εξαρτημάτων που σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον SolidWorks.

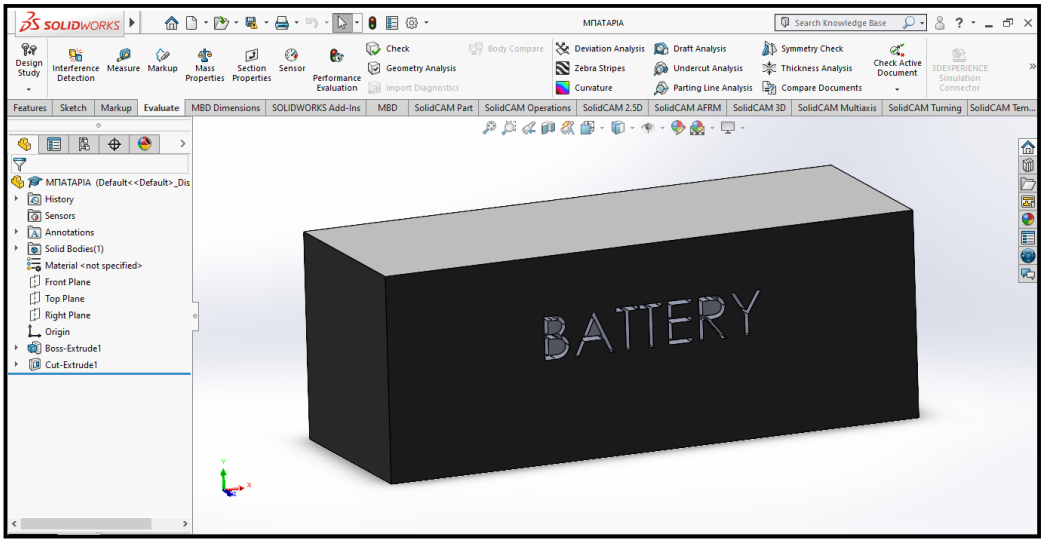
Εικόνα 3: *Ο ESC του σκάφους.*



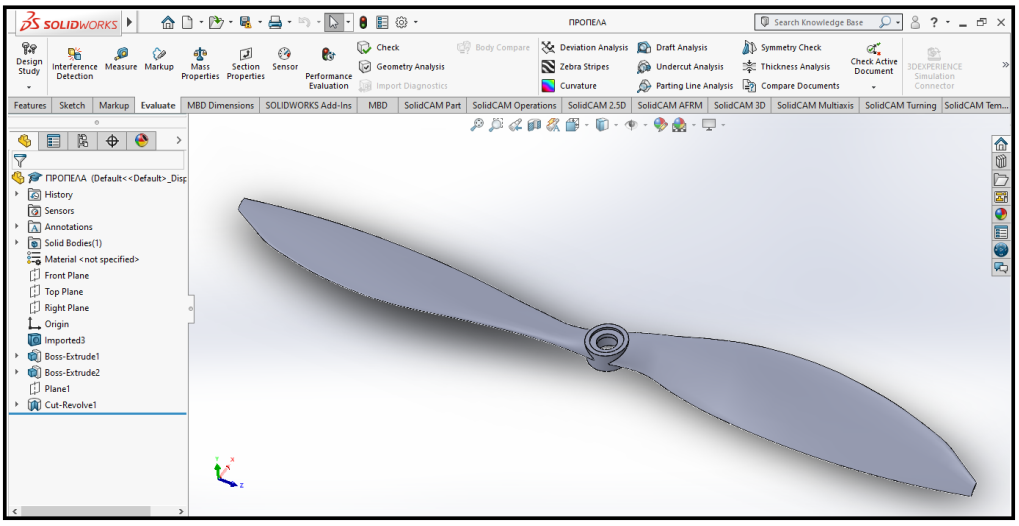
Εικόνα 4*: Ο ελεγκτής του σκάφους.*



Εικόνα 5: *Ο κινητήρας του σκάφους.*



Εικόνα 6: *Η μπαταρία του σκάφους.*



Εικόνα 7: *Η έλικα του σκάφους.*

2.2 Προκαταρκτικός σχεδιασμός πλαισίου σκάφους

Αφού σχεδιάστηκαν όλα τα επιμέρους εξαρτήματα σειρά είχε ο σχεδιασμός του πλαισίου ο οποίος θα υποδεχτεί όλα τα εξαρτήματα της κατασκευής. Κύριος γνώμονας για τον σωστό σχεδιασμό αποτελεί το κέντρο βάρους που είναι μείζονος σημασίας καθώς το σκάφος θα υπόκειται σε επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις καθώς και σε απότομες αλλαγές κατεύθυνσης. Με αυτόν το τρόπο ο έλεγχος του θα μπορεί να γίνει ευκολότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια χωρίς εκπλήξεις.

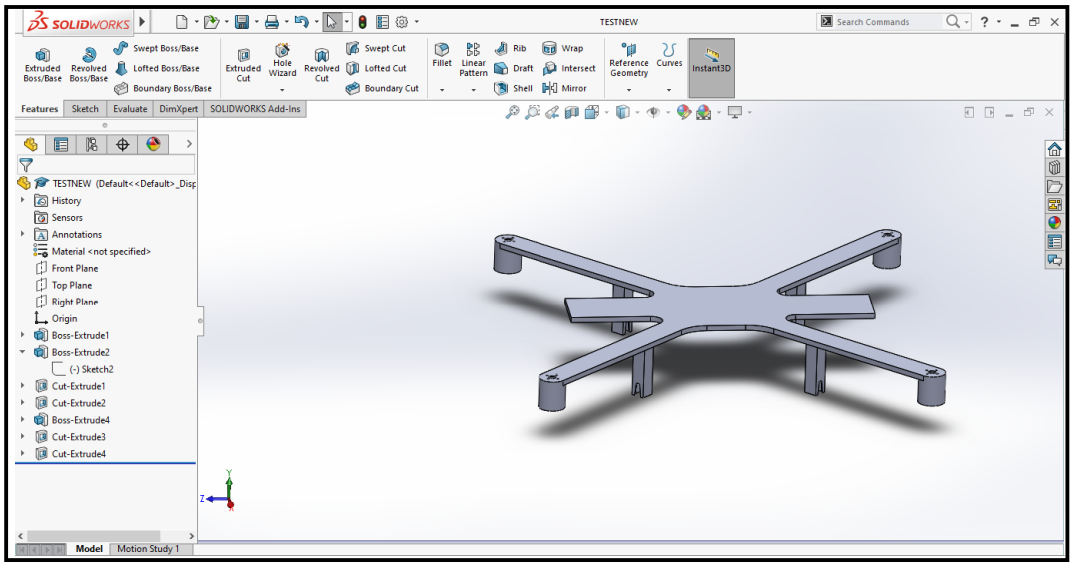
Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για τον σχεδιασμό και την κατασκευή του σκάφους αποτελεί το χαμηλό βάρος του. Εφόσον τα υπόλοιπα εξαρτήματα έχουν συγκεκριμένο βάρος, το μόνο κομμάτι της κατασκευής όπου μπορούμε να επέμβουμε είναι το πλαίσιο. Όσο χαμηλότερο βάρος έχει τόσο μεγαλύτερο θα είναι το ωφέλιμο φορτίο το οποίο θα μπορεί να ανυψώσει και να μεταφέρει με ασφάλεια. Επίσης το κόστος του εφόσον θα έχουμε λιγότερο υλικό, θα είναι μικρότερο. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι στις πτήσεις στις οποίες δε θα μεταφέρει αντικείμενα, η ώση των κινητήρων για να διατηρήσουν το σκάφος στον αέρα καθώς και κατά την διάρκεια της απογείωσης και της προσγείωσης θα είναι μικρότερη, αυξάνοντας με αυτόν το τρόπο το χρόνο ζωής των κινητήρων και μειώνοντας τις φθορές του. Τέλος η μείωση του βάρους συνεπάγεται και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη αυτονομία. Από την άλλη πλευρά, πολύ χαμηλό βάρος μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία της κατασκευής λόγω υπέρβασης της μηχανικής αντοχής σε κάποιες διατομές. Αυτό το κομμάτι θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα και στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα αναλυθεί η επιλογή του υλικού η οποία είναι υψίστης σημασίας για να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν τα διάφορα project που σχεδιάστηκαν για τις ανάγκες της εργασίας.

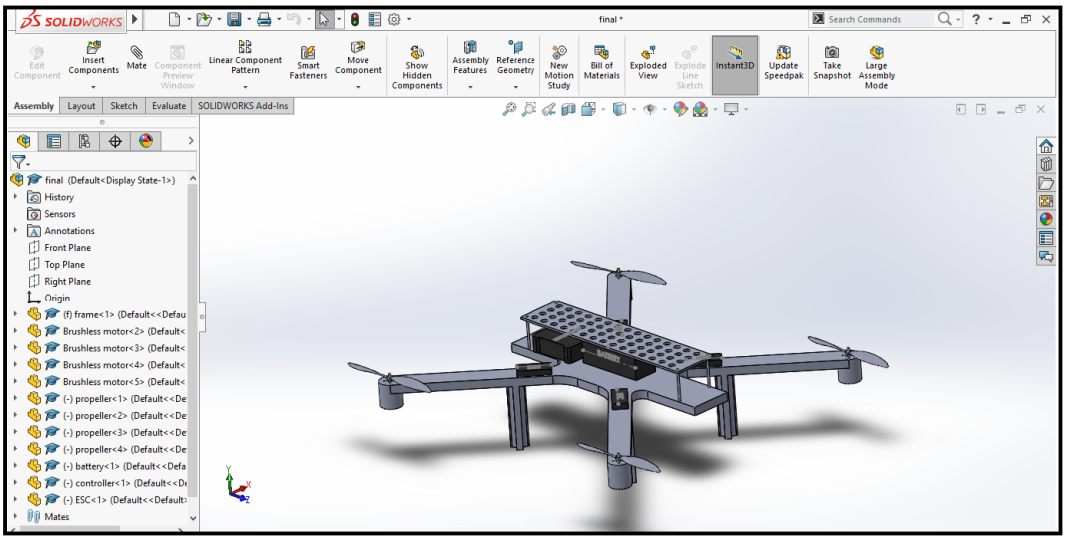
2.2.1 Πρώτο Project σχεδιασμού

Στην εικόνα 8 φαίνεται η πρώτη προσέγγιση σχεδιασμού του σκάφους σε περιβάλλον SolidWorks. Η κατασκευή αποτελείται από μία ενιαία μάζα η οποία όμως δεν είναι συμπαγής για μειωμένο βάρος. Στις τέσσερεις άκρες έχει σχεδιαστεί ειδική υποδοχή ώστε να τοποθετηθούν οι κινητήρες ενώ έχουν σχεδιαστεί αντίστοιχα τέσσερεις βάσεις (πόδια) ώστε να προσγειώνεται το σκάφος με ασφάλεια. Σε αυτό το

σημείο να τονίσουμε ότι η κατασκευή θα πρέπει να απορροφά ενδεχόμενους κραδασμούς που θα προέρχονται τόσο από την λειτουργία των κινητήρων όσο και κατά την διάρκεια της προσγείωσης. Τέλος ο χώρος που βρίσκεται στο κέντρο του σκάφους έχει σχεδιαστεί ώστε να τοποθετηθούν τα υπόλοιπα εξαρτήματα της κατασκευής δηλαδή ο ελεγκτής, τα ESC, η μπαταρία και η κάμερα.



Εικόνα 8: *Αρχικός σχεδιασμός σκάφους.*



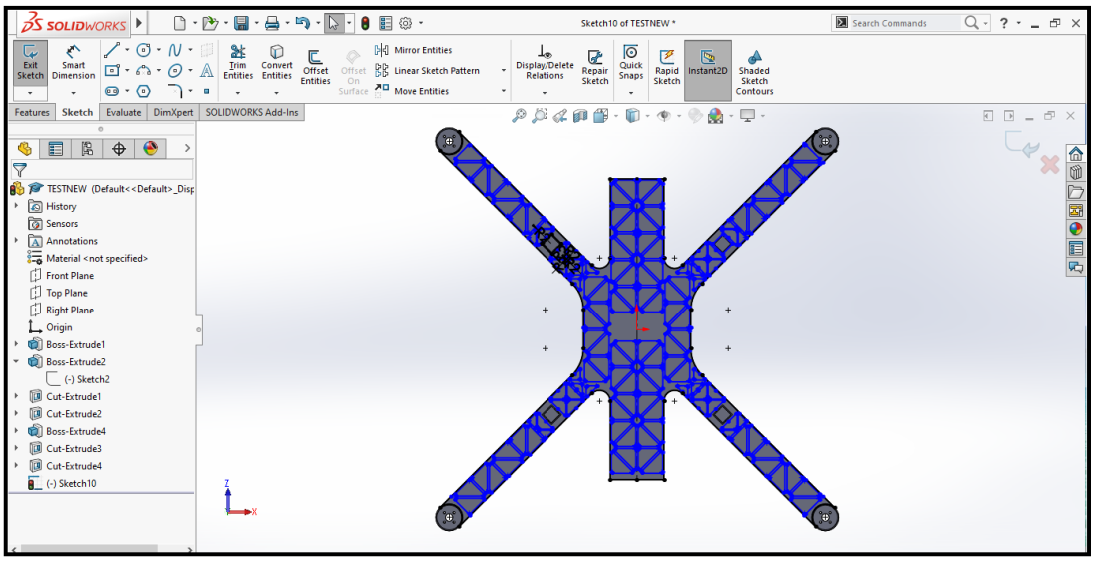
Εικόνα 9: *Αρχικός σχεδιασμός σκάφους με τοποθετημένα τα εξαρτήματα.*

Στην παραπάνω εικόνα η κατασκευή έχει προχωρήσει ένα βήμα παρακάτω καθώς φαίνονται τα επιμέρους εξαρτήματα τοποθετημένα. Επίσης έχει σχεδιαστεί οροφή για την προστασία των εξαρτημάτων σε περίπτωση εκτροπής και σύγκρουσης του σκάφους. Η οροφή όπως φαίνεται και στην εικόνα 9 είναι διάτρητη για μείωση του

βάρους και ευκολότερη αποβολή θερμοκρασίας των εξαρτημάτων που βρίσκονται κάτω από αυτή. Το βάρος του πλαισίου με αυτόν τον σχεδιασμό χωρίς τα εξαρτήματα, σύμφωνα με τα στοιχεία που μας δίνει το SolidWorks αγγίζει τα 3500 gr. Εφόσον είναι υψηλότερο από τον αρχικό μας στόχο, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί εκ νέου σχεδιασμός ώστε να γίνει προσπάθεια μείωσης του βάρους κατά το δυνατόν. Η παραπάνω έκφραση αντλείται από το γεγονός ότι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εξ αρχής εάν ο σχεδιασμός που έχουμε επιλέξει είναι κατάλληλος από θέμα αντοχής. Η αρχική προσέγγιση συνεπώς γίνεται με βάση το μέγιστο βάρος το οποίο έχουμε καθορίσει και αφού σχεδιαστικά πετύχουμε την επιθυμητή τιμή, τότε θα προχωρήσουμε σε ανάλυση έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε εάν θα αστοχήσει η κατασκευή ή όχι.

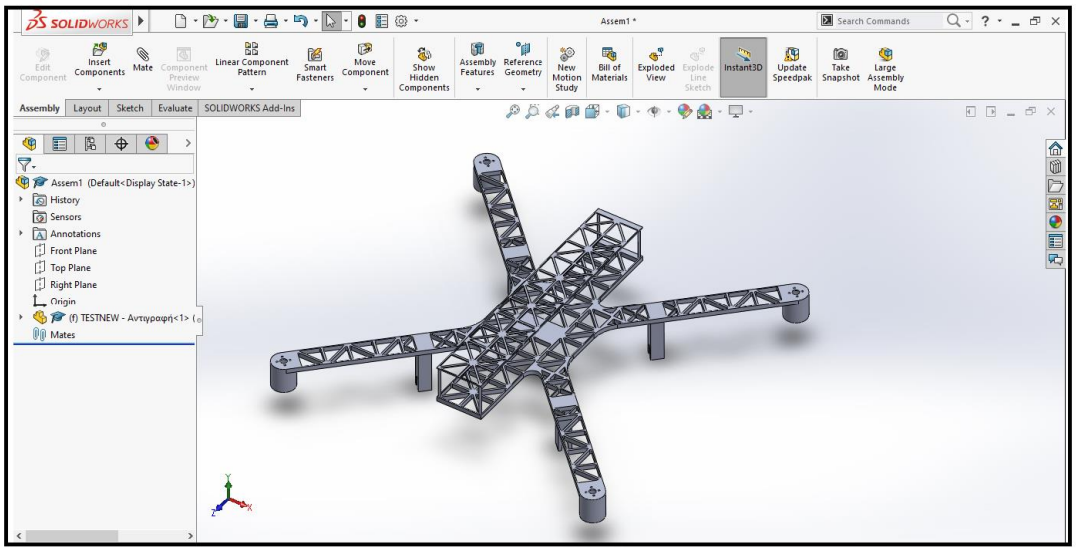
2.2.2 Δεύτερο Project σχεδιασμού

Η εναλλακτική λύση σχεδιασμού που δοκιμάστηκε στην συνέχεια ήταν η μορφή του δικτυώματος. Με αυτόν τον τρόπο θα μειωνόταν αισθητά το βάρος του σκάφους χωρίς να χάσει ιδανικά μεγάλο μέρος από την αντοχή του. Στην παρακάνω εικόνα φαίνεται η μορφή του δικτυώματος που σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του SolidWorks.



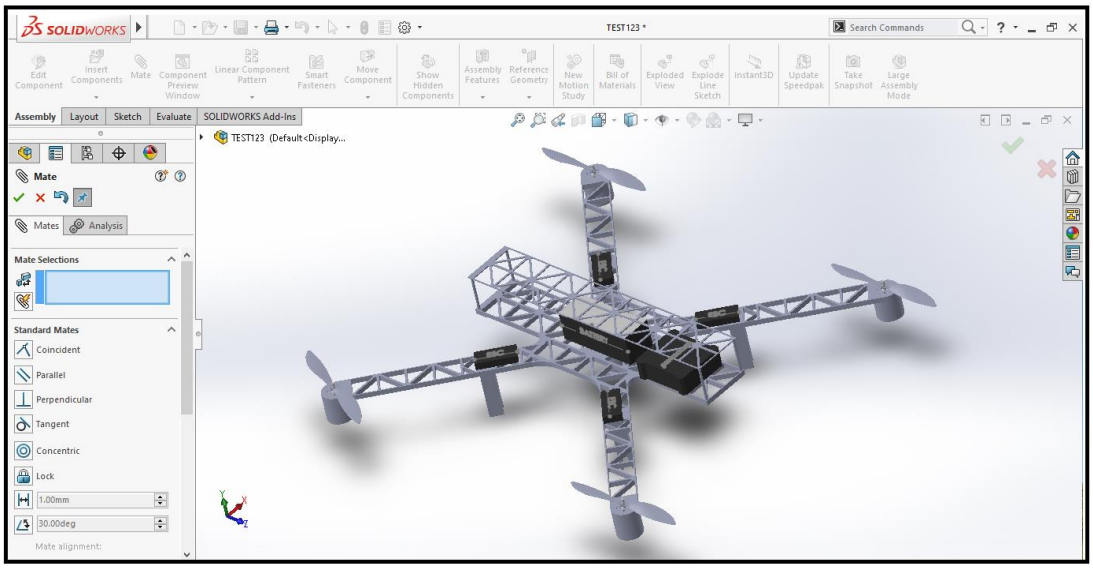
***Εικόνα 10**: Δικτυωτός σχεδιασμός του σκάφους.*

Στην συνέχεια με ανάλογο τρόπο σχεδιάστηκε εκ νέου και η οροφή του σκάφους. Αλλαγές έγιναν και στις βάσεις (πόδια) οι οποίες έχουν πλέον χαμηλότερο ύψος. Στην εικόνα 11 φαίνεται η καινούργια γεωμετρία του σκάφους.



Εικόνα 11: *Γεωμετρία σκάφους με την μορφή δικτυώματος.*

Αφού σχεδιάστηκε η συνολική γεωμετρία, όπως και πριν σειρά είχε να τοποθετηθούν τα επιμέρους εξαρτήματα της κατασκευής. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το drone με τοποθετημένα τα εξαρτήματα.



Εικόνα 12: *Γεωμετρία σκάφους με την μορφή δικτυώματος και τοποθετημένα τα εξαρτήματα.*

Το βάρος της νέας κατασκευής όσο αναφορά το πλαίσιο αγγίζει τα 2800 gr. Σε σχέση με την πρώτο σχεδιασμό έχουμε μείωση του βάρους κατά 20%, συνεπώς ο καινούργιος σχεδιασμός του σκάφους είναι σαφώς καλύτερος σε σχέση με τον αρχικό. Επίσης είμαστε πλέον μέσα στα επιτρεπτά όρια σύμφωνα με τα αποτελέσματα του eCalc.

Παρόλα αυτά επειδή η κατασκευή θα γίνει σε τριαξονική φρέζα CNC με περιορισμένο μέγεθος τραπεζιού και διαδρομές X και Y αξόνων θα ήταν σκόπιμο ο σχεδιασμός να αλλάξει ώστε να μην αποτελείται από ένα και μόνο εξάρτημα αλλά από περισσότερα εξαρτήματα. Επίσης μείωση του μεγέθους των εξαρτημάτων προς κατεργασία αποφέρει καλύτερη διαστασιακή ακρίβεια. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι η συνολική κατασκευή θα μπορεί να μεταφερθεί με μεγαλύτερη ευκολία καθώς θα καταλαμβάνει λιγότερο χώρο. Τέλος η κατασκευή προορίζεται να γίνει με λυόμενη σύνδεση, συνεπώς δίνεται η δυνατότητα επισκευής καθώς θα μπορεί να γίνει αλλαγή στο κομμάτι που ενδεχομένως αστόχησε.

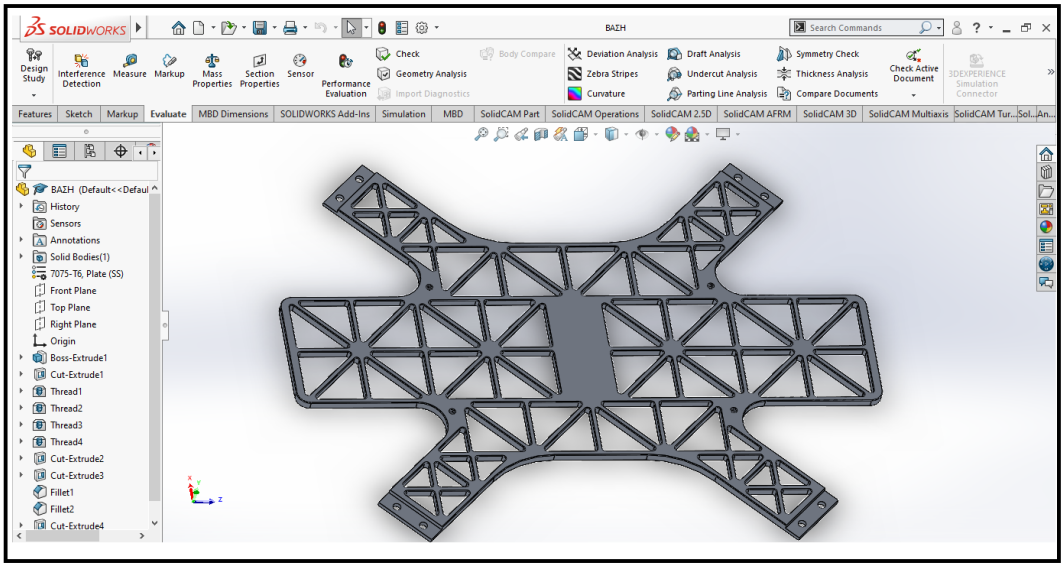
2.2.3 Τρίτο Project σχεδιασμού

Με βάση τα όρια της μηχανής κατεργασίας ως προς τους τρεις άξονες καθώς και από πλευράς κατεργασιμότητας, η κατασκευή αποφασίστηκε να χωριστεί στα παρακάτω εξαρτήματα:

- Βάση σκάφους
- Οροφή σκάφους
- βραχίονας
- Πέλμα
- Κοχλίες σύνδεσης

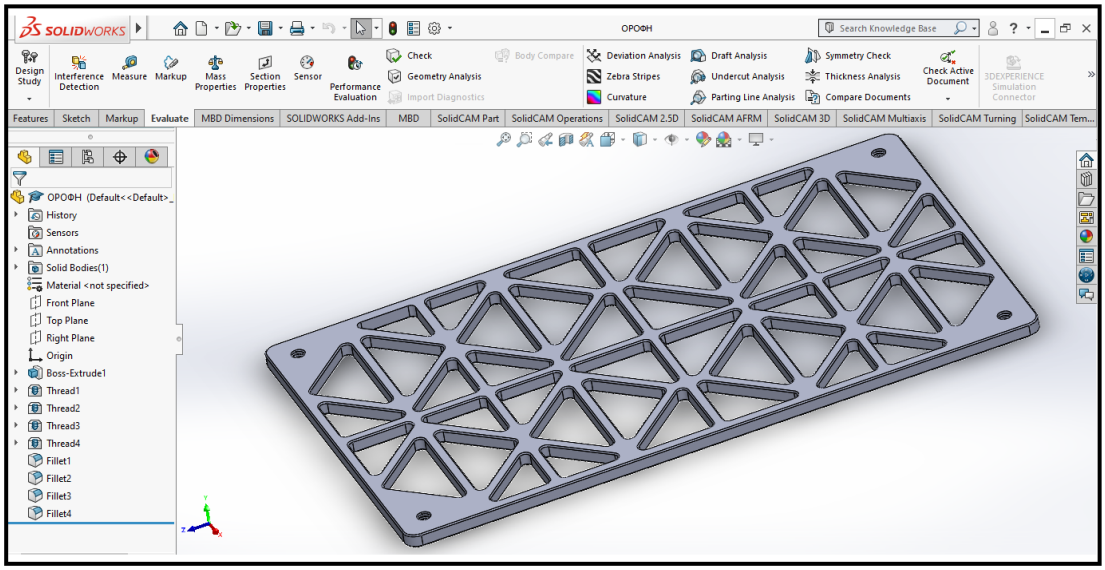
Σκοπός του νέου σχεδιασμού όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφό ήταν αρχικά να μπορεί να κατασκευαστεί το πλαίσιο σύμφωνα με τα όρια της μηχανής. Αυτό δημιούργησε κάποια νέα προβλήματα όπως η ορθή επιλογή των σημείων στων οποίων θα γινόταν η ένωση των επιμέρους κομματιών. Εφόσον η σύνδεση θα είναι λυόμενη συνεπάγεται ότι θα πρέπει να γίνουν οπές για την σύνδεση των τεμαχίων. Κάτι τέτοιο μπορεί να επηρεάσει την αντοχή της κατασκευής, ώστε θα πρέπει να γίνει εκτενέστερος έλεγχος στο σημείο της σύνδεσης. Επίσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλοι κοχλίες σύνδεσης έτσι ώστε ούτε να γίνει υπερδιαστασιολόγηση αλλά ούτε και να υπάρξει αστοχία σε εκείνο το σημείο.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα εξαρτήματα της κατασκευής που σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τους παραπάνω γνώμονες.



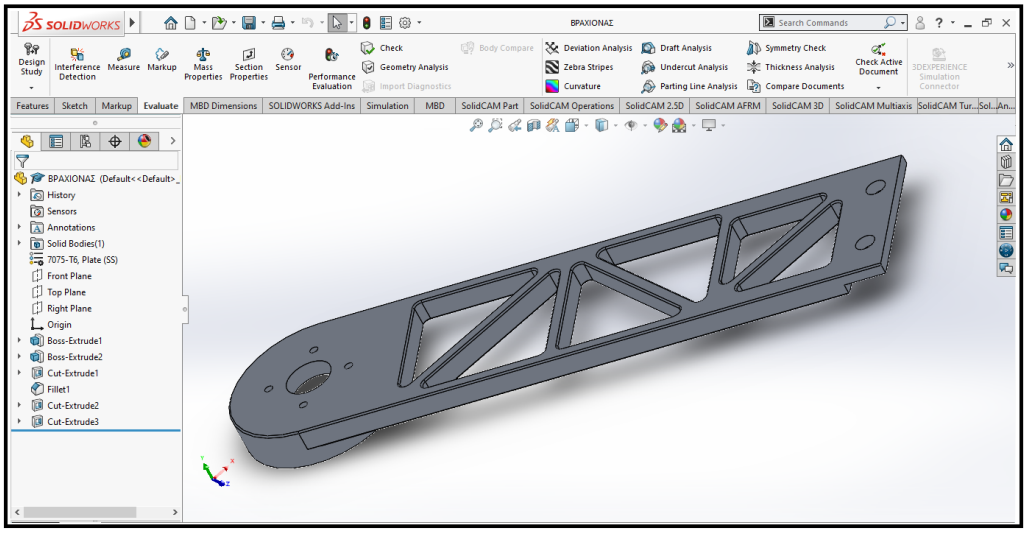
Εικόνα 13: *Βάση σκάφους.*

Στην εικόνα 13 βλέπουμε την γεωμετρία που απόκτησε η βάση του σκάφους. Αποτελείται ουσιαστικά από ένα επίπεδο δικτύωμα και τέσσερα άκρα σύνδεσης με τους βραχίονες που παρουσιάζονται στην εικόνα 15. Πάνω στα άκρα έχουν γίνει δύο οπές έτσι ώστε να συνδεθούν τα κομμάτια μεταξύ τους. Επιπρόσθετα υπάρχουν και τέσσερεις οπές που βρίσκονται κοντά στο κέντρο του τεμαχίου με σκοπό την σύνδεση της οροφής που παρουσιάζεται στην εικόνα 14. Οι οπές φέρουν σπείρωμα M6.



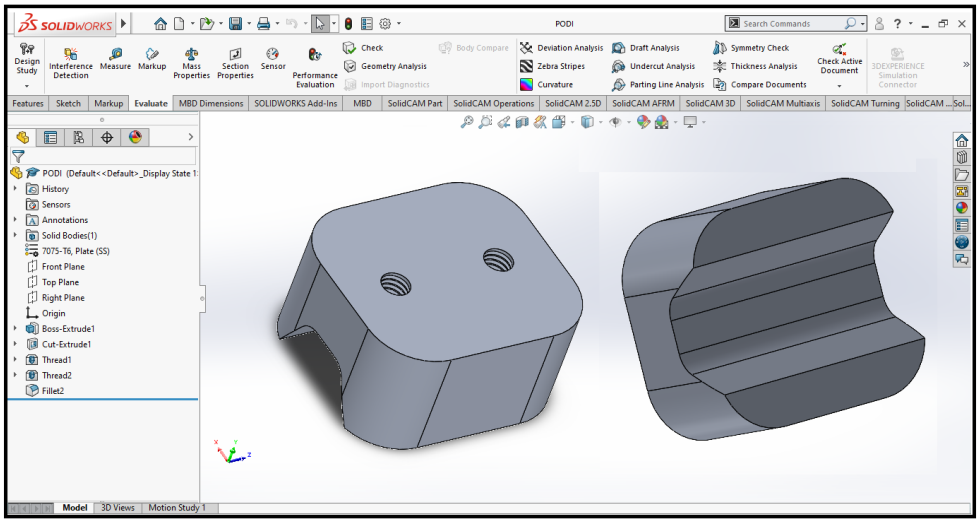
Εικόνα 14: *Οροφή σκάφους.*

Στην εικόνα 14 φαίνεται το σχέδιο της οροφής του σκάφους. Αποτελείται από ένα επίπεδο χωροδικτύωμα παρόμοιο με αυτό την βάσης του σκάφους και διαθέτει τέσσερεις οπές από όπου θα περνούν κοχλίες για την σύνδεση με την βάση.



***Εικόνα 15**: Βραχίονας σκάφους.*

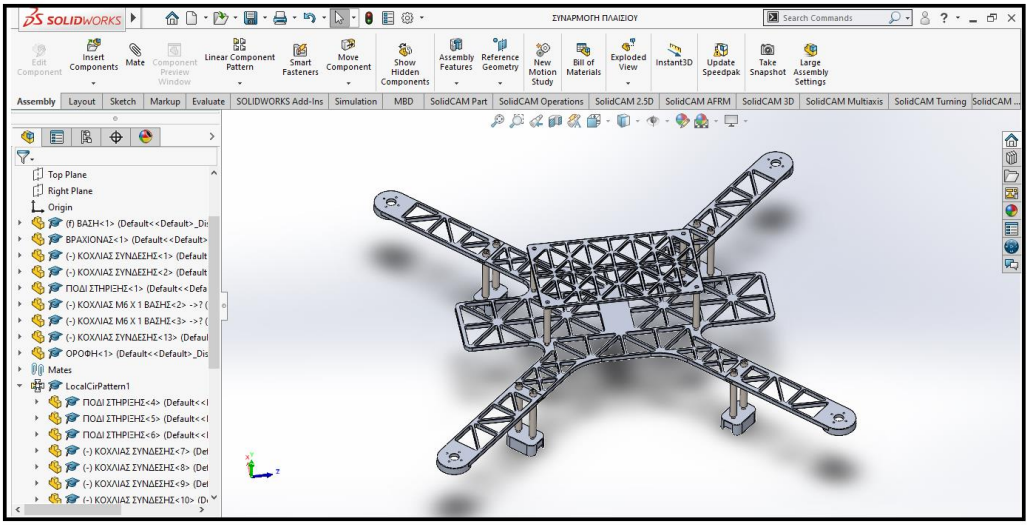
Στην εικόνα 15 βλέπουμε τον ένα εκ των τεσσάρων βραχιόνων που θα διαθέτει το σκάφος. Αποτελείται και αυτός από ένα επίπεδο χωροδικτύωμα και στα άκρα του έχει κατάλληλη διαμόρφωση για σύνδεση με επιμέρους εξαρτήματα. Πιο συγκεκριμένα στο δεξιό άκρο βλέπουμε την ειδική διαμόρφωση για σύνδεση με τη βάση του σκάφους, ενώ αντίστοιχα αριστερά θα τοποθετηθεί ο κινητήρας, ο οποίος θα συνδεθεί με τέσσερεις κοχλίες M3.



***Εικόνα 16:** Πέλμα σκάφους.*

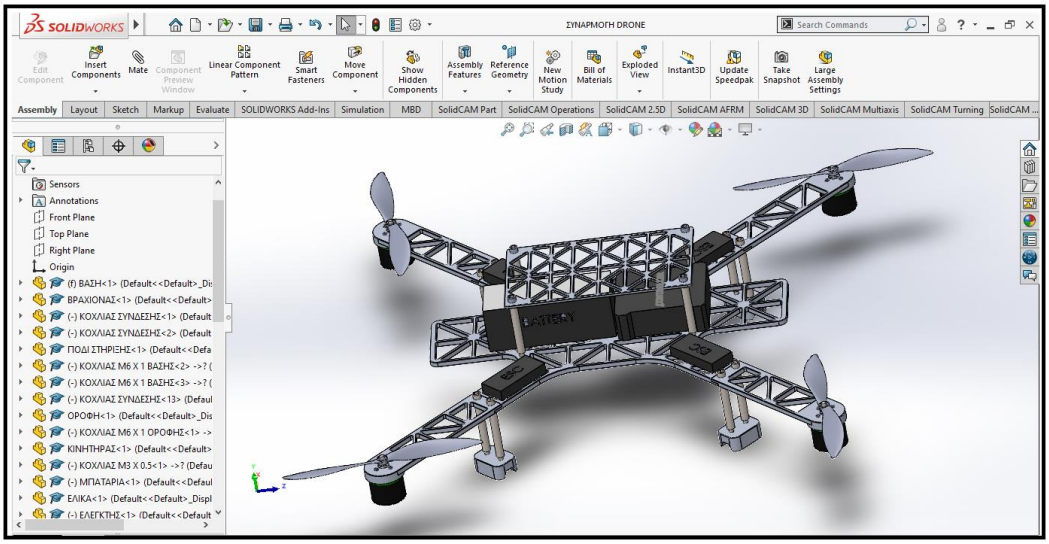
Στην εικόνα 16 βλέπουμε ένα εκ των τεσσάρων πελμάτων που θα διαθέτει το σκάφος. Στην πάνω επιφάνεια έχει δύο οπές με σπείρωμα M6 ώστε να υποδέχονται τους κοχλίες σύνδεσης με το σώμα του σκάφους. Από την κάτω πλευρά τους έχουν κοιλότητα της οποίας τα τοιχώματα δεν είναι κατακόρυφα, αλλά έχουν κλίση 60 μοιρών ώστε η προσγείωση να γίνεται στην επιθυμητή θέση ακριβώς.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το τρισδιάστατο σχέδιο του πλήρως συναρμολογημένου πλαισίου.



Εικόνα 17: *Συναρμολογημένο πλαίσιο του σκάφους.*

Τέλος στην παρακάτω εικόνα έχουμε την σχηματική απεικόνιση της συνολικής κατασκευής με τοποθέτηση και των υπόλοιπων εξαρτημάτων.



Εικόνα 18: *Συναρμολογημένο σκάφος με τοποθετημένα όλα τα εξαρτήματα.*

Το βάρος του τελικού σχεδίου του πλαισίου είναι 2400 gr υποθέτοντας υλικό κατασκευής κράμα αλουμινίου.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι ο σχεδιασμός βρίσκεται σε προκαταρκτικό στάδιο καθώς δεν έχει γίνει ακόμα μελέτη αντοχής ώστε να μη ξεπεραστούν τα επιτρεπτά όρια αντοχής του υλικού αλλά ούτε και να υπερδιαστασιολογηθεί η κατασκευή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δομική Ανάλυση Σκάφους

Μετά τον πλήρη σχεδιασμό του πλαισίου του drone θα πρέπει να γίνει δομική ανάλυση πριν προχωρήσουμε στην υλοποίηση της κατασκευή του. Επειδή τα drone αποτελούνται από πληθώρα εξαρτημάτων επιλέξαμε να μη το προσεγγίσουμε ως ένα ενιαίο τεμάχιο. Απόρροια της προσέγγισης αυτής είναι η χρήση ενός μη γραμμικού μοντέλου, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι μεταξύ των εξαρτημάτων επαφές. Επειδή η ανάλυση όλων των εξαρτημάτων ξεχωριστά και σε συνδιασμό μεταξύ τους θα αύξανε κατά πολύ την πολυπλοκότητα της μελέτης, θα πρέπει να συμβιβαστούμε σε μία απλοποιητική λύση η οποία θα κάνει την ανάλυση λιγότερο σύνθετη χωρίς όμως να θυσιάσει σε μεγάλο βαθμό την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων [4].

3.1 Κριτήρια αστοχίας

Για την ασφαλή χρήση των υλικών στις κατασκευές, έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια αστοχίας από τα οποία ορισμένα χρησιμοποιούν το όριο θραύσης ενώ άλλα χρησιμοποιούν το όριο διαρροής. Κάποια από τα πιο σημαντικά είναι:

- Κριτήριο θραύσης μέγιστης κύριας τάσης
- Κριτήριο διαρροής μέγιστης διατμητικής τάσης
- Κριτήριο διαρροής οκτάεδρης διατμητικής τάσης Von Mises
- Κριτήριο θραύσης Coulomb – Mohr

Για της ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας θα χρησιμοποιηθεί το κριτήριο Von Mises. Το κριτήριο Von Mises χρησιμοποιείται για όλκιμα υλικά όπου διαρροή συμβαίνει όταν η οκτάεδρη διατμητική τάση προσεγγίσει την κρίσιμη τιμή [15].

3.2 Επιλογή υλικού

Η επίτευξη απογείωσης κι εκτέλεσης πτήσης ενός drone προϋποθέτει την παραγωγή ικανοποιητικής ώσης έτσι ώστε να καταφέρει να υπερνικήσει το φορτίο που καλείται να ανυψώσει καθώς και το ίδιο το βάρος του. Έτσι, η επιλογή των υλικών σε ένα drone κυριαρχείται από την ελαχιστοποίηση της μάζας του. Η ελαχιστοποίηση της μάζας επιτυγχάνεται με την επιλογή υλικών χαμηλής πυκνότητας.

Το πλαίσιο ενός drone σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να συγκρατεί όλα τα υποσυστήματα στη θέση τους. Επειδή εξυπηρετεί μια μηχανική λειτουργία, η πιο

σημαντική ιδιότητα υλικού για το πλαίσιο είναι η ειδική αντοχή, δηλαδή η αντοχή σε εφελκυσμό προς το ειδικό βάρος. Τα κράματα αλουμινίου είναι ελκυστικά απο αυτή την άποψη. Τα πιο συνήθη εμπορικά κράματα αλουμινίου τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως, είναι το AA 2024-T3, το AA 6061-T6 και το AA 7075-T6.

3.2.1 Κράμα AA 2024

Το κράμα AA 2024 (**Πίνακας 1**) αποτελεί κράμα της σειράς 2XXX με κυρίαρχο στοιχείο τον χαλκό. Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο διότι έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. [16].

Το κράμα αλουμινίου 2024-T3 παρουσιάζει υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τις υπόλοιπες καταστάσεις (O/T4/351/851) και διαθέτει υψηλότερη ειδική αντοχή και όριο διαρροής από το κράμα αλουμινίου 6061-T6 καθώς και ικανοποιητική αντοχή σε κόπωση σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κράματα αλουμινίου. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι, το κράμα 2024-T3 εμφανίζει εξαιρετική αντίσταση σε κρούση σε σχέση με το 6061-T6 και 7075-T6 [17].

Ένα σημαντικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου κράματος είναι η χαμηλή αντίσταση σε διάβρωση σε αρκετά περιβάλλοντα εξαιτίας της παρουσίας χαλκού η οποία επιταχύνει τη διάβρωση του αλουμινίου σε τοπικά γαλβανικά κελιά με αποτέλεσμα την αστοχία του υλικού σε σύντομο χρονικό διάστημα [18].

Πίνακας 1: *Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 2024 (% wt) [18].*

Κράμα	**Cu**	**Si**	**Fe**	**Mn**	**Zn**	**Cr**	**Ti+Zi**	**Mg**	**Al**
AA 2024	3.8-4.8	0.5	0.5	0.3-0.9	0.25	0.1	0.15	1.2-1.8	Bal.

3.2.2 Κράμα AA 6061

Το κράμα αλουμινίου 6061 (**Πίνακας 2**) αποτελεί κράμα της σειράς 6XXX με κυρίαρχα στοιχεία το μαγνήσιο και το πυρίτιο. Πρόκειται για ένα υλικό το οποίο επιδέχεται θερμική κατεργασία με κυρίαρχη την κατάσταση T6 και την T651.

Γενικά, οι μηχανικές του ιδιότητες, είναι χειρότερες έναντι των άλλων δύο κραμάτων. Προτέρημα του κράματος αποτελεί η εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση

εξαιτίας των ενδομεταλλικών ενώσεων π.χ. Mg_2Si, για τα οποία συμβαίνει επιλεκτική διάλυση λόγω γαλβανικού κελιού [19].

Πίνακας 2: *Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 6061 (% wt) [20].*

Κράμα	**Mg**	**Si**	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Cr**	**Zn**	**Al**
AA 6061	0.99	0.66	0.25	0.31	0.08	0.16	0.01	Bal.

3.2.3 Κράμα AA 7075

Το κράμα αλουμινίου 7075 (**Πίνακας 3**) αποτελεί κράμα της σειράς 7XXX με κυρίαρχο στοιχείο τον ψευδάργυρο. Πρόκειται για ένα υλικό το οποίο επιδέχεται θερμική κατεργασία με κυρίαρχη την κατάσταση O, T6 και T651. Η ευρέως διαδεδομένη κατάσταση είναι η T6. Η ιδιότητα, που το χαρακτηρίζει είναι η υψηλή αντοχή σε κόπωση.

Πίνακας 3: *Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 7075 (% wt) [18].*

Κράμα	**Zn**	**Si**	**Fe**	**Mn**	**Cu**	**Cr**	**Ti+Zi**	**Mg**	**Al**
AA 7075	5.1-6.1	0.5	0.5	0.3	1.2-2.0	0.18	0.25	2.1-2.9	Bal.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των υλικών προς σύγκριση οι οποίες αποτελούν κριτήριο επιλογής για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

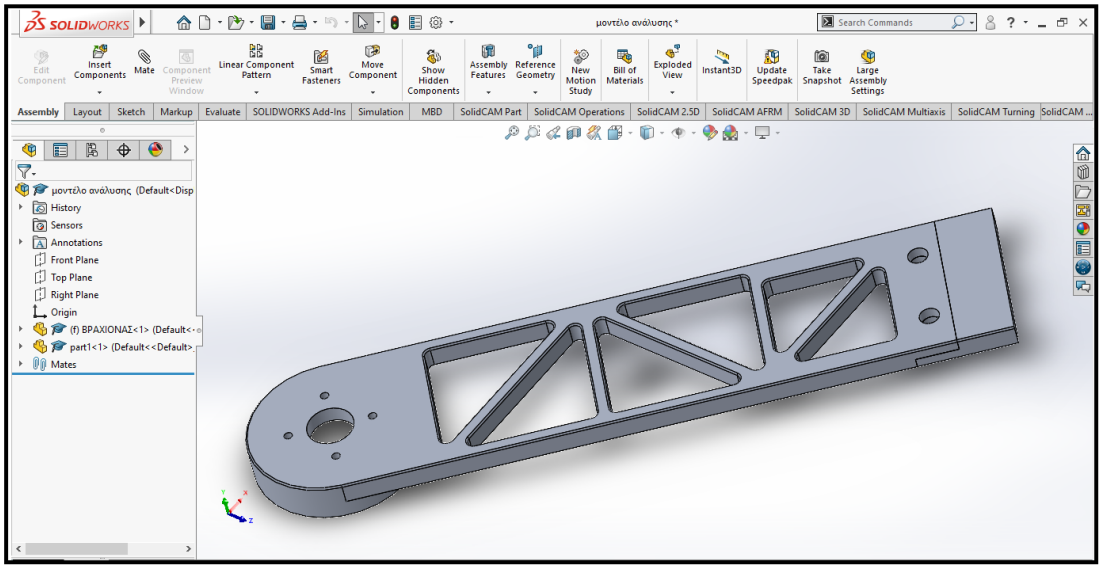
Πίνακας 4: *Συγκεντρωτικές τιμές ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου.*

Μηχανικές ιδιότητες	**AA 2024-T3**	**AA 6061-T6**	**AA 7075-T6**
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	483	310	572
Όριο διαρροής (MPa)	345	276	503
Αντοχή σε κόπωση (MPa)	138	97	159
Αντίσταση σε κρούση (J)	48	20	26
Αντίσταση σε διάβρωση	+	+++	++

Συμπερασματικά, το κράμα αλουμινίου 7075-T6 αποτελεί την πιο ελκυστική επιλογή υλικού για την εφαρμογή στο πλαίσιο του drone διότι παρουσιάζει υψηλή ειδική αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε κόπωση και ικανοποιητική αντίσταση σε διάβρωση έναντι των συγκρινόμενων υλικών.

3.3 Μοντέλο προσομοίωσης

Στην προσπάθεια να εξοικονομηθεί πρόσθετος υπολογιστικός χρόνος και να αποφευχθεί η ανάγκη για μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη, είναι εφικτό λόγω συμμετρίας να γίνει ανάλυση μόνο στο ¼ της κατασκευής και στην συνέχεια να αναχθούν τα αποτελέσματα στην ολική κατασκευή [4]. Σύμφωνα με την γεωμετρία που διαθέτουμε καθώς και την χρήση για την οποία προορίζεται, γίνεται προφανές ότι τα μεγαλύτερα φορτία εμφανίζονται κατά την απογείωση του σκάφους. Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε συμπεριφέρεται σαν πρόβολος όπου το φορτίο ασκείται στην άκρη της γεωμετρίας και προκαλείται από την ώση του κινητήρα [3]. Συνεπώς η μοντελοποίηση πραγματοποιείται εισάγοντας στο μοντέλο της προσομοίωσης μόνο τον βραχίονα του σκάφους και την σύνδεσή του με την βάση του σκάφους. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση.



Εικόνα 19: *Το μοντέλο της προσομοίωσης στο περιβάλλον του Solidworks.*

3.4 Ανάλυση

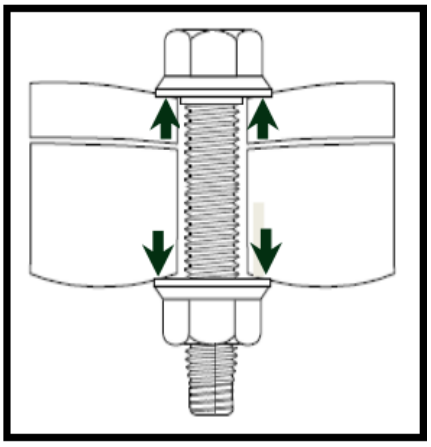
Η ανάλυση έγινε με την βοήθεια του SolidWorks Simulation. Θα πρέπει να τοποθετήσουμε στην γεωμετρία μας τις στηρίξεις και τα εξωτερικά φορτία που ασκούνται. Επίσης θα πρέπει να συμπεριλάβουμε στην ανάλυση και την κοχλιοσύνδεση καθώς επηρεάζει άμεσα την αντοχή της κατασκευής.

Κοχλιοσύνδεση

Η σύνδεση μεταξύ των βραχιόνων και της βάσης γίνεται με την χρήση δύο κοχλιών. Οι κοχλίες με βάση την διεύθυνση της δύναμης στην οποία καταπονούνται διακρίνονται σε συνδέσεις:

- Εφελκυσμού
- Διάτμησης
- Συνδυασμός εφελκυσμού – διάτμησης

Στην παρούσα κατασκευή η κοχλιοσύνδεση καταπονείται σε εφελκυσμό. Το παραπάνω είναι αναμενόμενο καθώς την στιγμή της απογείωσης το σκάφος τείνει να κινηθεί κατακόρυφα επομένως ο κοχλίας ο οποίος είναι τοποθετημένος παράλληλα με την κίνηση του σκάφους θα καταπονηθεί αξονικά. Οι πλάκες της σύνδεσης θα καταπονηθούν σε θλίψη λόγω της σύσφιξης του κοχλία ενώ αντίστοιχα ο κοχλίας λόγω δράσης – αντίδρασης θα καταπονηθεί σε εφελκυσμό. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο μηχανισμός της εφελκυστικής καταπόνησης της κοχλιοσύνδεσης.



Εικόνα 20: *Καταπόνηση κοχλία σε εφελκυσμό [21].*

Ανάλογα την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν, επιλέγονται κοχλίες διαφορετικής ποιότητας. Η επιλογή της ποιότητας εξαρτάται από την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο της σύνδεσης καθώς και από τον αριθμό των κοχλιών που θα χρησιμοποιηθούν. Οι μηχανικές ιδιότητες και οι διάφορες ποιότητες για χαλύβδινους κοχλίες μετρικού σπειρώματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [22].

Πίνακας 5: *Μηχανικές ιδιότητες για χαλύβδινους κοχλίες μετρικού σπειρώματος.*

Property Class	Nominal Size Range (mm)	Proof Strength (MPa)	Yield Strength, min(MPa)	Tensile Strength, min(MPa)	Material
4.6	5-100	225	240	400	Low or medium carbon steel
4.8	1.6-16	310	340	420	Low or medium carbon steel; fully or partially annealed
5.8	5-24	380	420	520	Low or medium carbon steel; cold worked
8.8	Under 16 (incl.)	660	640	800	Medium carbon steel; quenched and tempered
8.8	17-72	580	660	830	Medium carbon steel; quenched and tempered
9.8	1.6-16	650	720	900	Medium carbon steel; quenched and tempered
10.9	5-100	830	940	1040	Alloy steel; quenched and tempered
12.9	1.6-100	970	1100	1220	Alloy steel; quenched and tempered

Η ποιότητα του κοχλία χαρακτηρίζεται από κλάσεις οι οποίες αποτελούνται από έναν διψήφιο αριθμό χωρισμένος με μία τελεία. Το πρώτο ψηφίο ονομάζεται x και προκύπτει ως το 1/100 του ορίου θραύσης του κοχλία σε MPa ενώ το δεύτερο ψηφίο μας δίνει το όριο διαρροής ως ποσοστό του ορίου θραύσης. Για την κοχλιοσύνδεση θα επιλέξουμε κοχλίες ποιότητας 4.6, συνεπώς από τον πίνακα 7 έχουμε 400 MPa όριο θραύσης και 240 Mpa όριο διαρροής.

Οι κοχλιωτές συνδέσεις είναι σημαντικό να μένουν σε σύσφιξη καθόλη την διάρκεια έτσι ώστε να μην προκαλείται ολίσθηση. Μια χαλαρή σύνδεση κατά την διάρκεια της φόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία. Για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της σύνδεσης θα πρέπει η δύναμη τριβής που προκαλείται στα συνδεόμενα μέρη από την σύσφιξη του κοχλία, να υπερβαίνει την τάση που αναπτύσσεται στην σύνδεση [21]. Όλα τα παραπάνω συνδέονται με τον όρο της προφόρτισης. Η προφόρτιση του κοχλία αποτελείται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ποσοστό προφόρτισης
- Δύναμη προφόρτισης
- Ροπή σύσφιξης

Το ποσοστό της προφόρτισης στην βιβλιογραφία αναφέρεται ώς το 75% της τάσης διαρροής του κοχλία όταν αυτός θα ξαναχρησιμοποιηθεί εάν λυθεί η σύνδεση. Σε περιπτώσεις όπου θα γίνει αντικατάσταση των κοχλιών τότε το ποσοστό αυτό

φτάνει στο 90% [23]. Στην δική μας περίπτωση θα έχουμε το πρώτο σενάριο συνεπώς θα υπολογίσουμε τους κοχλίες με το 75% της τάσης διαρροής.

Η δύναμη προφόρτισης υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_P = S_P \cdot A_t$$

Όπου

A_t επιφάνεια εφελκυστικής τάσης mm^2 και προκύπτει από την σχέση [23]:

$$A_t = \frac{\pi}{4}(D - 0.9382P)^2$$

με D την ονομαστική διάμετρο του κοχλία που στην περίπτωσή μας είναι 6mm και P το βήμα του κοχλία που είναι 1. Συνεπώς έχουμε:

$$A_t = \frac{\pi}{4}(6 - 0.9382)^2 = 20.12\ mm^2$$

Ο όρος S_P υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_y = 0.75 \cdot S_Y$$

Όπου S_Y είναι το όριο διαρροής του κοχλία και από τον πίνακα 7 για ποιότητα 4.6 είναι 240 Mpa. Άρα: $S_P = 0.75 \cdot 240 = 180\ MPa$

Επομένως η δύναμης προφόρτισης τελικά θα είναι: $F_P = 180 \cdot 20.12 = 3.62\ KN$

Η ροπή σύσφιξης μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$T_P = K_T \cdot D \cdot F_P$$

Όπου

K_T είναι συντελεστής ροπής και συνήθως λαμβάνεται 0.2

Συνεπώς προκύπτει ροπή σύσφιξης : $T_P = 0.2 \cdot 6 \cdot 3.62 = 4.34\ Nm$

Το μήκος του κοχλία υπολογίζεται με βάση το πάχος των συνδεόμενων τεμαχίων καθώς και το πάχος του περικοχλίου. Τα τεμάχια έχουν πάχος 10mm συνολικά ενώ το πάχος του περικοχλίου είναι 5.20 mm. Αφήνοντας και ένα περιθώριο 3mm ώστε να μπορεί να βιδωθεί το περικόχλιο και τυποποιώντας την τιμή [23], επιλέγουμε μήκος κοχλία 20mm.

Φόρτιση Γεωμετρίας

Η ώση είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα συνεπώς μπορεί να μεταβάλλεται με βάση τις συνθήκες λειτουργίας του [24]. Επειδή το φαινόμενο είναι αρκετά σύνθετο λόγω των πολλών παραμέτρων καθώς επίσης και μεταβατικό, ο προσεγγιστικός υπολογισμός της ώσης γίνεται με την παρακάτω απλουστευμένη σχέση η οποία έχει προκύψει εμπειρικά [25]:

$$T = (m_d \cdot 2)/n_m$$

Όπου

T: ώση (g)

m_d : βάρος drone (g)

n_m : αριθμός κινητήρων

οπότε προκύπτει: $T = (5000 \cdot 2)/4 = 2500\ g$

Συνεπώς η ώση που θα εφαρμόσουμε για τον κάθε κινητήρα υπολογίζεται περίπου 25N. Ορίζοντας και μια προσαύξηση 20% ως συντελεστή ασφαλείας, προκύπτει φορτίο 30N ανά βραχίονα.

Στο μοντέλο δεν έχει συμπεριληφθεί το βάρος του κινητήρα το οποίο συνεπώς θα πρέπει να εφαρμοστεί στην άκρη της γεωμετρίας και με βάση τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή ορίζεται στα 2.2N. Επίσης θα πρέπει να συμπεριληφθεί και η επιτάχυνση της βαρύτητας η οποία επενεργεί κατά την απογείωση του σκάφους.

Στήριξη Γεωμετρίας

Το μοντέλο μας αφορά το ¼ της ολικής κατασκευής και αυτό όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο είναι αρκετό έτσι ώστε να εξάγουμε ρεαλιστικά αποτελέσματα και να λάβουμε ασφαλή συμπεράσματα. Δυσμενέστερη περίπτωση της λειτουργίας του σκάφους κρίθηκε η διαδικασία απογείωσης κατά την οποία θα έχουμε και την μέγιστη ώση. Στο μοντέλο της ανάλυσης συμπεριλήφθηκε και η κοχλιοσύνδεση μεταξύ του βραχίονα και της βάσης για την καλύτερη προσέγγιση της προσομοίωσης. Στην βάση ωστόσο έγινε μία τομή έτσι ώστε να μη χρειάζεται να συμπεριλάβουμε ολόκληρη την γεωμετρία της στο μοντέλο και να επιβαρύνουμε την διαδικασία της ανάλυσης από πλευράς υπολογιστικού χρόνου. Η στήριξη που

προσομοιάζει μία πρόβολο είναι η πάκτωση η οποία και τοποθετείται στη βάση, ακριβώς στην επιφάνεια όπου και έγινε η τομή.

Διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων

Αυτό το βήμα είναι ένα από τα σημαντικότερα της διαδικασίας και απαιτεί γνώση και εμπειρία από τον μελετητή. Η πυκνότητα του πλέγματος συνδέεται με το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και με την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα όσο το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων μεγαλώνει, τόσο η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μικραίνει. Επίσης η πυκνότητα των πεπερασμένων στοιχείων συσχετίζεται και με τον χρόνο λήψης των αποτελεσμάτων. Όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα τόσο αυξάνει ο υπολογιστικός χρόνος. Επιπρόσθετα πυκνότερο πλέγμα χρειάζεται και μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη. Όλα τα παραπάνω συνδέονται και με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του μοντέλου. Όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις και η πολυπλοκότητα του μοντέλου προς ανάλυση, αυξάνεται η ανάγκη για μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη και χρόνο υπολογισμού. Τέλος ανάλογα με την γεωμετρία του μοντέλου κρίνεται σκόπιμο οι διαστάσεις του πλέγματος να μην είναι ίδιου μεγέθους σε όλο το μοντέλο. Ο γενικός κανόνας είναι ότι στα σημεία στα οποία περιμένουμε μεγαλύτερες μεταβολές στις τάσεις θα πρέπει να μειώσουμε το μέγεθος των στοιχείων έτσι ώστε να έχουμε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

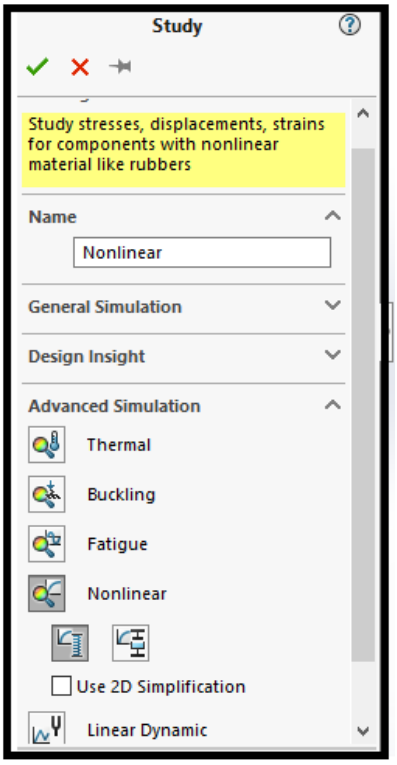
Η επιλογή της πυκνότητας του πλέγματος μπορεί στο περιβάλλον του SolidWorks να γίνεται με το πάτημα ενός κουμπιού, ο σωστός καθορισμός του όμως βασίζεται σε όλα αυτά που προαναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει μια συμβιβαστική λύση ανάμεσα στην ακρίβεια και στον χρόνο περάτωσης της ανάλυσης σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες της εφαρμογής. Στην δική μας περίπτωση θα επιλέξουμε πυκνό πλέγμα έτσι ώστε να πάρουμε εγκυρότερα αποτελέσματα.

Το τελευταίο βήμα της ανάλυσης είναι η επίλυση του προβλήματος στον υπολογιστή. Τα αποτελέσματα που παίρνουμε από το SolidWorks Simulation είναι:

- Τάση (συγκρινόμενη με το όριο διαρροής του υλικού)
- Μετατόπιση (συγκρινόμενη με ένα αποδεκτό όριο λειτουργίας)
- Παραμόρφωση

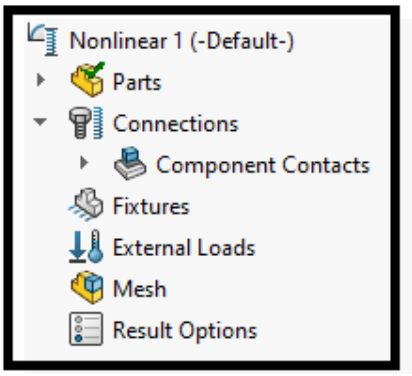
Προετοιμασία ανάλυσης

Αφού επιλέξουμε την καρτέλα Simulation και στην συνέχεια New study στο SolidWorks ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο μπορούμε να διαλέξουμε το είδος της ανάλυσης που μας ενδιαφέρει μέσα από μια πληθώρα επιλογών όπως στατική, θερμική, μη γραμμική, κόπωσης κ.α. Για τις ανάγκες της εργασίας επιλέγεται μη γραμμική ανάλυση.



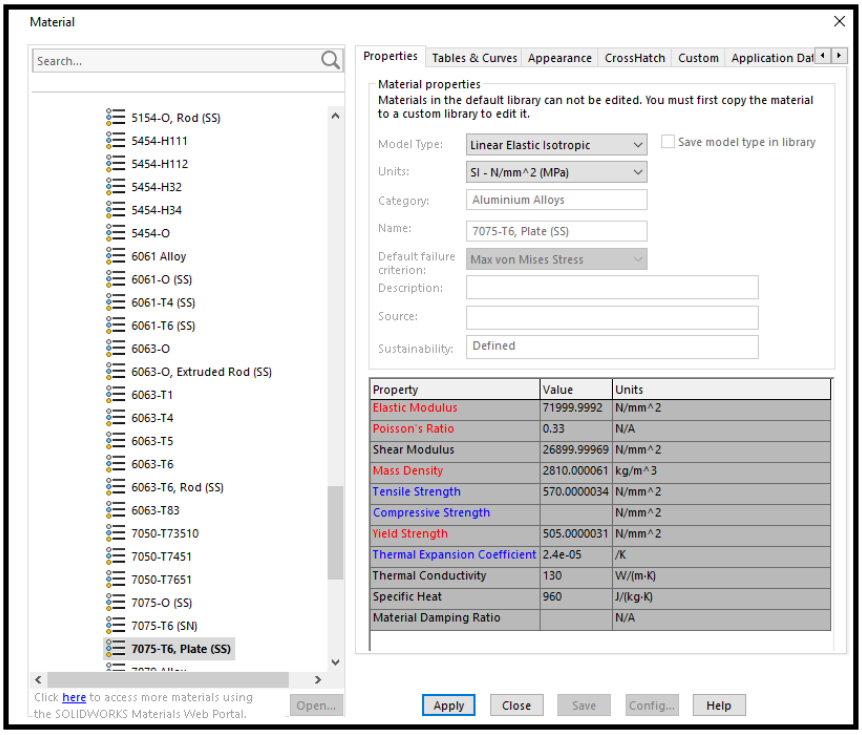
***Εικόνα 21**: Είδη ανάλυσης του SolidWorks.*

Στην συνέχεια εμφανίζεται ένα άλλο παράθυρο στο οποίο ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία βήμα προς βήμα φτάνοντας με αυτόν τον τρόπο στην περάτωση της ανάλυσης και της έκδοσης των αποτελεσμάτων.



***Εικόνα 22:** Βήματα της ανάλυσης.*

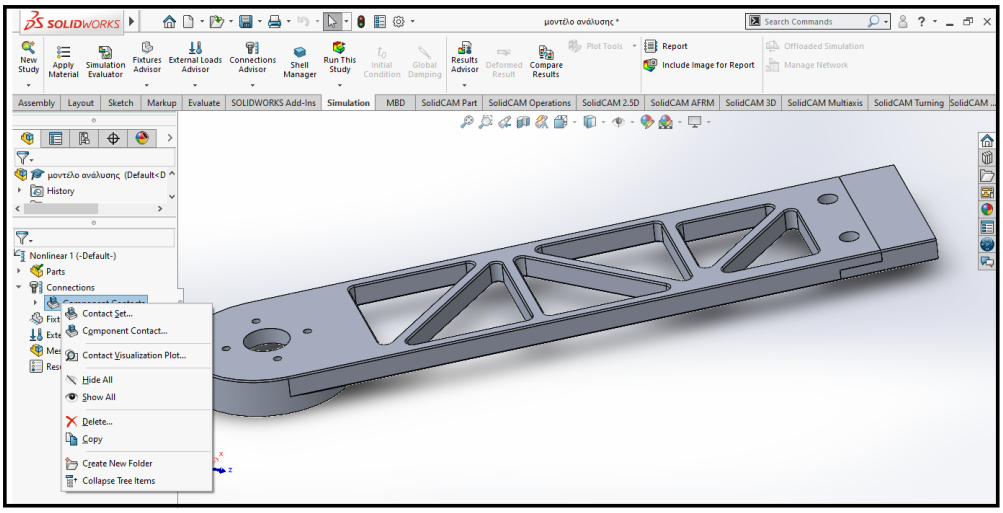
Πατώντας δεξί κλικ στο εικονίδιο parts, επιλέγεται apply/edit material με σκοπό την επιλογή υλικού στο μοντέλο μας, εν προκειμένω, στην καρτέλα aluminium alloys επιλέγεται κράμα αλουμινίου 7075 – T6 από την βιβλιοθήκη του SolidWorks.



***Εικόνα 23**: Βιβλιοθήκη υλικών του SolidWorks.*

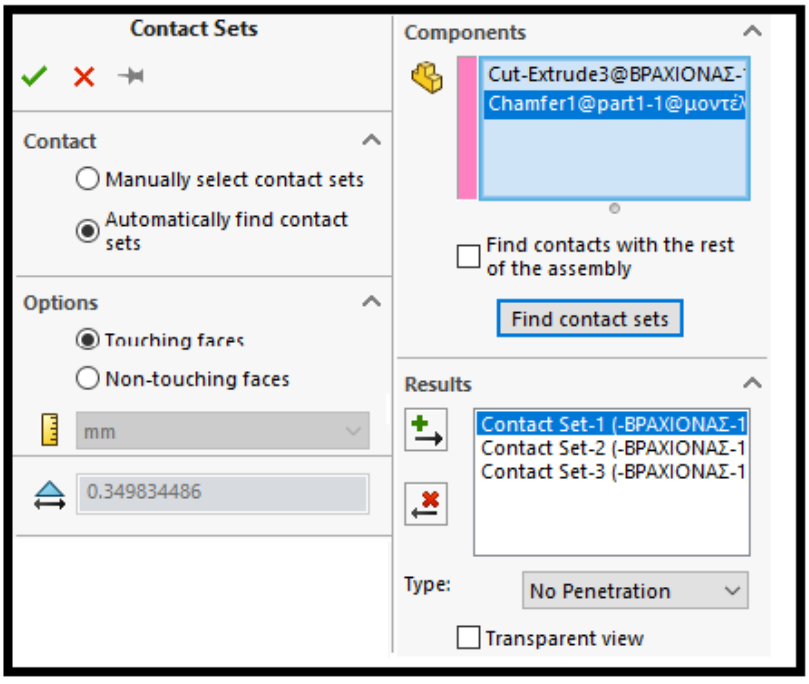
Επιλέγοντας το υλικό, εμφανίζεται το παράθυρο που βλέπουμε στην εικόνα 23. Πάνω δεξιά επιλέγεται τύπος μοντέλου το οποίο αφορά την συμπεριφορά του υλικού. Το αλουμίνιο και τα κράματά του ανήκει στα γραμμικά ελαστικά ισότροπα υλικά επομένως κάνουμε αυτή την επιλογή. Παρατηρούμε επίσης ότι είναι προκαθορισμένο το κριτήριο αστοχίας το οποίο επιλέχθηκε στην παράγραφο 3.1 δηλαδή το von Mises. Τέλος κάτω δεξιά παρουσιάζονται οι σημαντικότερες ιδιότητες του υλικού. Πατώντας apply επιστρέφουμε στο προηγούμενο κατάλογο όπου πλέον φαίνεται και το υλικό που επιλέξαμε.

Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή της κοχλιοσύνδεσης. Το πρώτο βήμα που θα πρέπει να ακολουθήσουμε είναι η εισαγωγή δεδομένων σχετικά με τις επαφές που θα έχουν τα διαφορετικά εξαρτήματα του μοντέλου. Το SolidWorks αναγνωρίζει το μοντέλο σαν μία ενιαία μάζα εάν παραλείψουμε αυτό το βήμα και πολύ πιθανόν να μην μπορεί να βρει και την λύση κατά της διαδικασία της επίλυσης. Επιλέγοντας με δεξί κλικ το εικονίδιο connections, εμφανίζεται μία λίστα από την οποία επιλέγουμε το contact set.



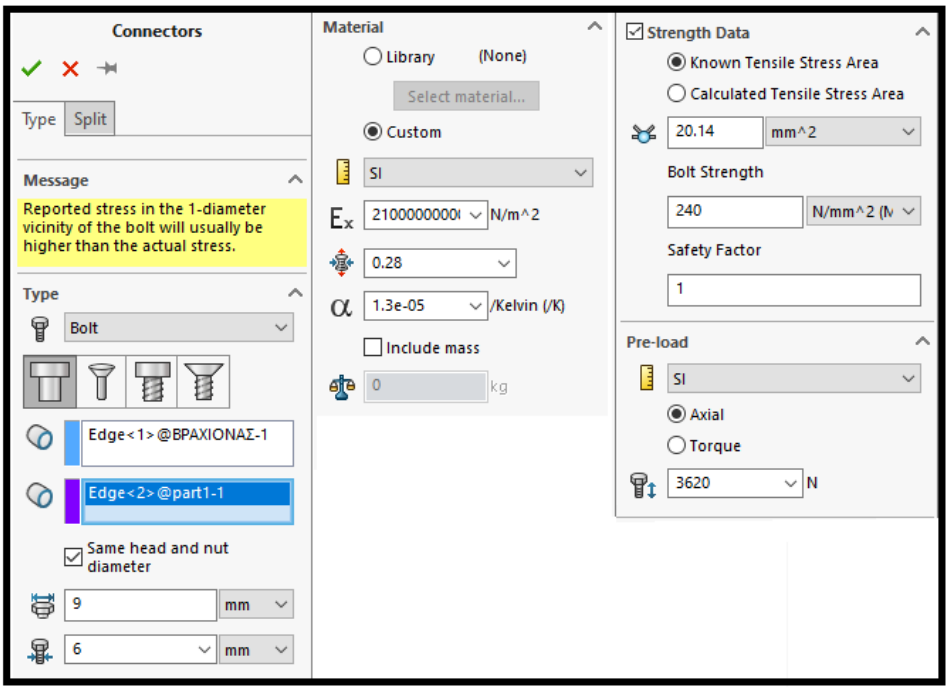
Εικόνα 24: *Επιλογή είδους επαφής μεταξύ των εξαρτημάτων.*

Στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε automatically find contact sets ώστε να αναζητήσει τα σημεία στα οποία υπάρχει επαφή, επιλέγουμε στα components όλα τα εξαρτήματα και κλικάρουμε το παράθυρο find contact sets. Τέλος κλικάρουμε τύπο no penetration ώστε να μην έχουμε είσοδο του ενός τεμαχίου στο άλλο. Όσα προαναφέρθηκαν σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται και στην εικόνα 25.



Εικόνα 25: *Ρυθμίσεις στο μενού Contact Set.*

Αφού προσαρμόσαμε τις επαφές που θα υπάρχουν στο μοντέλο σειρά έχει η εισαγωγή των κοχλιών σύνδεσης. Με δεξί κλικ στην επιλογή connections, επιλέγουμε bolt και εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο.

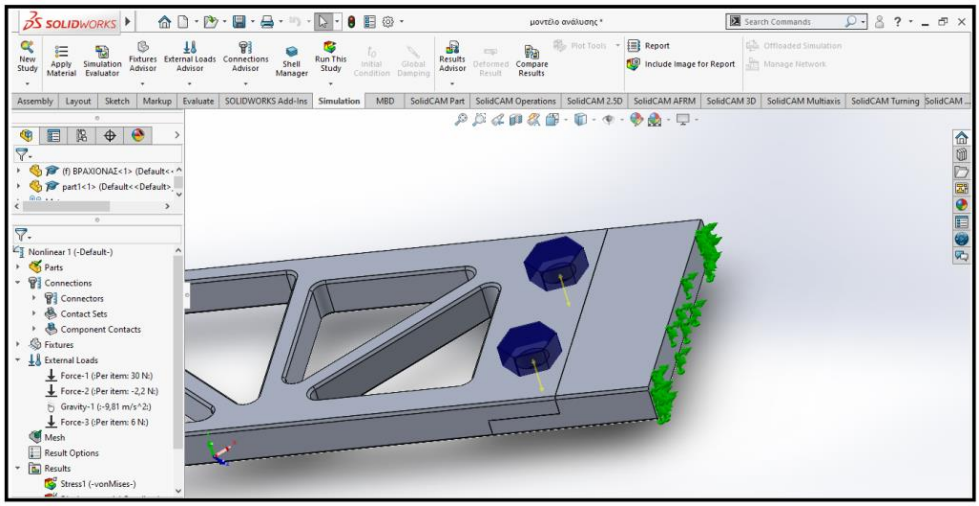


Εικόνα 26: *Ρυθμίσεις στο μενού Bolt Connectors.*

Επιλέγεται τύπος κοχλιοσύνδεσης bolt δηλαδή περαστός κοχλίας με περικόχλιο. Στην συνέχεια επιλέγοντας από το μοντέλο την κυκλική επιφάνεια που θα περαστεί ο κοχλίας και αντίστοιχα την κυκλική επιφάνεια όπου θα τερματίζει το περικόχλιο, εμφανίζεται αυτόματα η διάμετρος που θα έχει η κεφαλή του κοχλία. Κλικάροντας την επιλογή same head and nut diameter, επιλέγουμε ίδια διάμετρο κεφαλής κοχλία και περικόχλιου. Υπάρχει η δυνατότητα να διαλέξουμε από μία βιβλιοθήκη υλικών κοχλία την οποία διαθέτει το SolidWorks όπως επίσης και η custom επιλογή εάν γνωρίζουμε τις μηχανικές ιδιότητες του κοχλία, όπως εκτέθηκε αναλυτικά παραπάνω.

Κλικάροντας πάνω στο custom παράθυρο εμφανίζονται περισσότερα δεδομένα όπως φαίνεται και στην εικόνα 26. Πατώντας την επιλογή known Tensile Stress Area μας δίνεται η δυνατότητα να καθορίσουμε την εφελκυστική επιφάνεια του κοχλία που όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Ως Bolt Strength επιλέχθηκε το όριο διαρροής. Ως Safety factor δηλαδή συντελεστής ασφαλείας του κοχλία, επιλέγεται η τιμή 1 έτσι ώστε να μην έχουμε υπερδιαστασιολόγηση του.

Τέλος στην προένταση του κοχλία το SolidWorks μας δίνει την δυνατότητα να καθορίσουμε την προφόρτισή του είτε καθορίζοντας την φόρτιση του κοχλία είτε καθορίζοντας την ροπή σύσφιξής του. Επιλέγουμε, χωρίς κάποιον ιδιαίτερο λόγο, να δώσουμε την τιμή της φόρτισης.

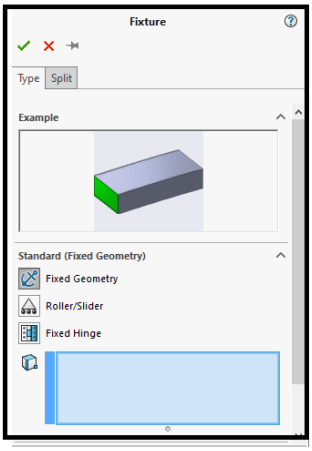


Εικόνα 27: *Τοποθέτηση κοχλιών στο μοντέλο.*

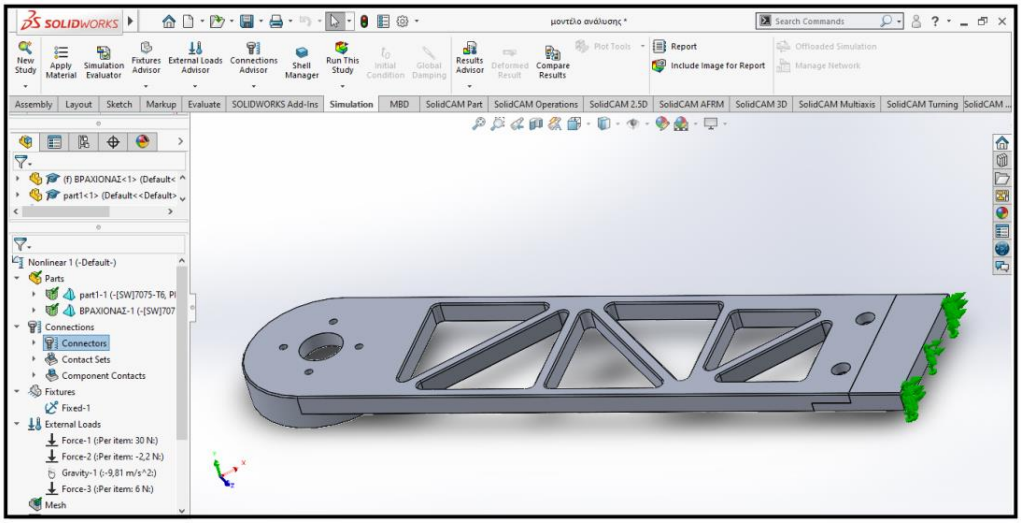
Επόμενο βήμα είναι η επιλογή στηρίξεων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μοντέλο μας συμπεριφέρεται σαν πρόβολος όπου το φορτίο ασκείται στην άκρη του και προκαλείται από την ώση του κινητήρα. Πατώντας δεξί κλικ στην επιλογή fixtures, διαλέγουμε fixed geometry και εμφανίζεται το παράθυρο που βλέπουμε στην εικόνα 28. Εκεί εμφανίζονται τρεις επιλογές:

- Fixed geometry (πάκτωση)
- Roller/slider (κύλιση)
- Fixed hinge (άρθρωση)

Το πρόγραμμα έχει προεπιλεγμένο το fixed geometry από την προηγούμενή μας επιλογή και σε αυτό το βήμα μας ζητάει να ορίσουμε την επιφάνεια ή τις επιφάνειες τις οποίες θέλουμε να πακτώσουμε. Στην εικόνα 29 βλέπουμε το μοντέλο της ανάλυσης με τοποθετημένες τις στηρίξεις.

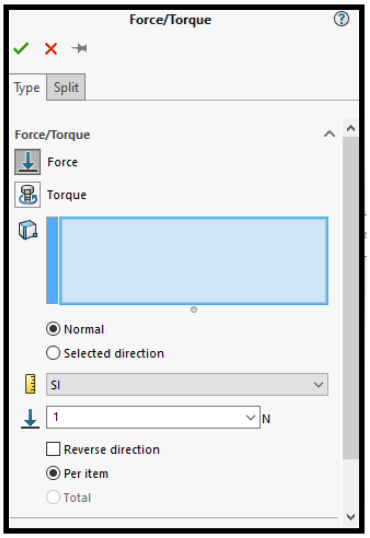


Εικόνα 28: *Επιλογή στηρίξεων του SolidWorks.*



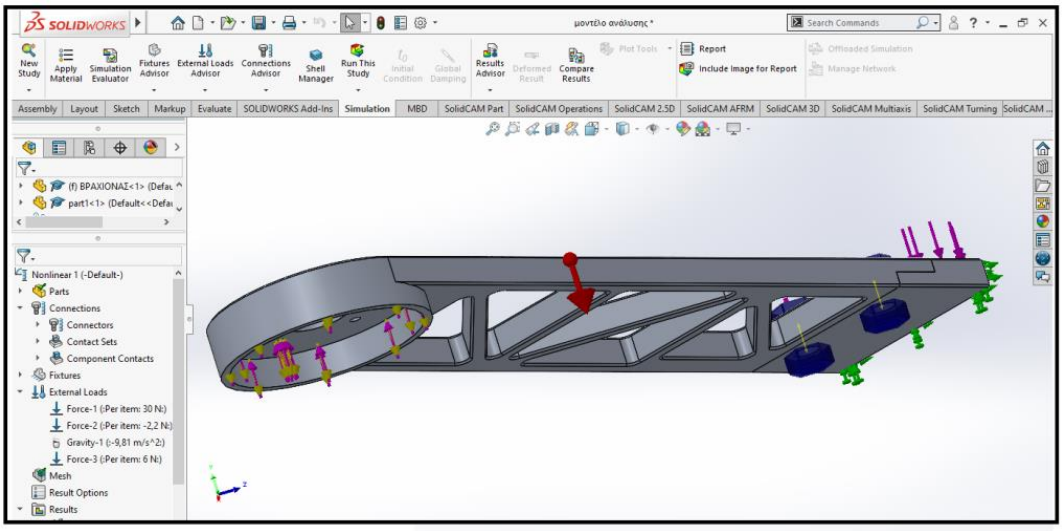
Εικόνα 29: *Τοποθέτηση στήριξης στο μοντέλο.*

Επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση εξωτερικών φορτίων. Πατώντας δεξί κλικ στο external loads, επιλέγουμε force και εμφανίζεται το παράθυρο που βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα.



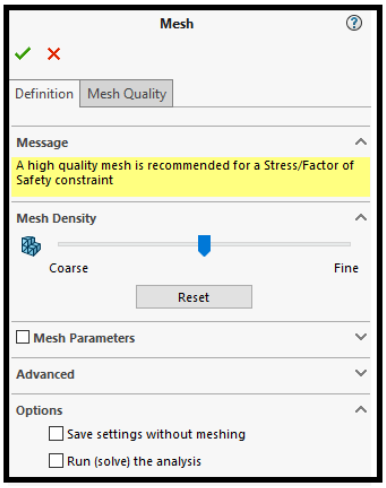
Εικόνα 30: *Επιλογή φορτίσεων του SolidWorks.*

Εδώ έχουμε δύο επιλογές φόρτισης, είτε δύναμη είτε ροπή. Στην περίπτωσή μας προκαλείται κάθετη δύναμη από το ζεύγος δυνάμεων ώσης – εδάφους οι οποίες λειτουργούν με δράση – αντίδραση. Το SolidWorks στην συνέχεια μας ζητάει να του ορίσουμε την επιφάνεια που αφορά η φόρτιση καθώς και το μέτρο της. Η δύναμη της ώσης εμφανίζεται στην εικόνα 31 με μοβ χρώμα. Εκτός από την ώση εφαρμόζουμε και το βάρος του κινητήρα, αυτή τη φορά με αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της ώσης (κίτρινο χρώμα). Επίσης στο μοντέλου τοποθετείται και η επιτάχυνση της βαρύτητας η οποία επιλέγεται πολύ εύκολα από το μενού του external loads.



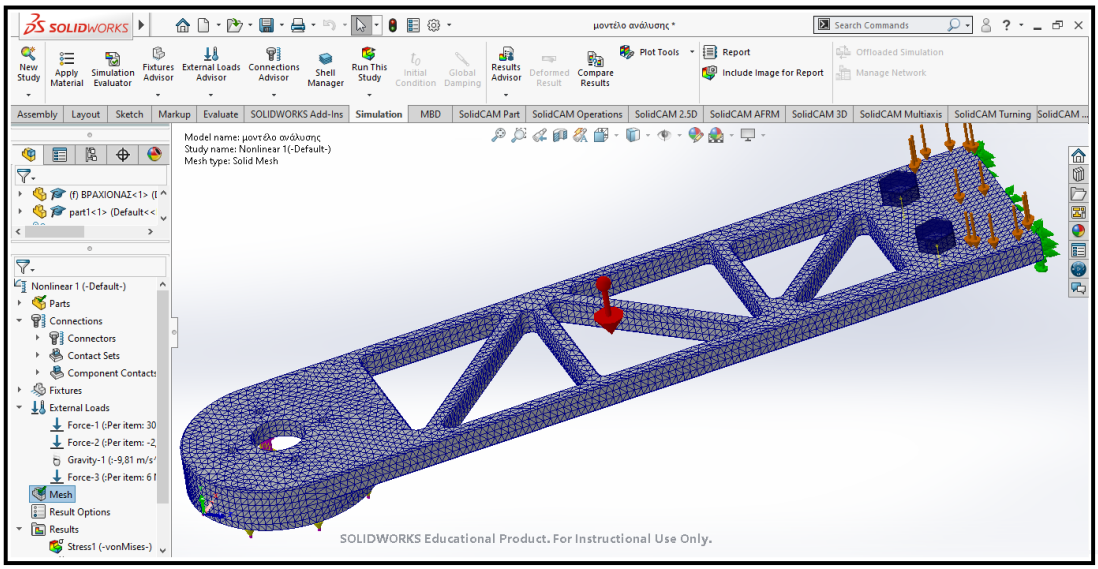
Εικόνα 31: *Τοποθέτηση φόρτισης στο μοντέλο.*

Εφόσον επιλέχθηκαν οι στηρίξεις, τα φορτία και η κοχλιοσύνδεση, επόμενο βήμα είναι να χωριστεί το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία. Έχοντας επιστρέψει στον αρχικό κατάλογο επιλέγουμε με δεξί κλικ το εικονίδιο mesh και πατάμε create mesh. Στην οθόνη μας εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 32 και μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε την πυκνότητα του πλέγματος. Όσο προχωρούμε τον κέρσορα προς τα αριστερά δηλαδή προς της επιλογή coarse, αυτό συνεπάγεται μείωση της πυκνότητας του πλέγματος που θα δημιουργήσει στην συνέχεια το SolidWorks στο μοντέλο. Αντίστοιχα όσο προχωρούμε τον κέρσορα προς τα δεξιά δηλαδή προς την επιλογή fine, αυτό συνεπάγεται αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος.



Εικόνα 32: *Επιλογές πλέγματος του SolidWorks.*

Στην εικόνα 33 βλέπουμε το μοντέλο μας με την προσθήκη των πεπερασμένων στοιχείων που υπολόγισε ο αλγόριθμος πλεγματοποίησης του SolidWorks.

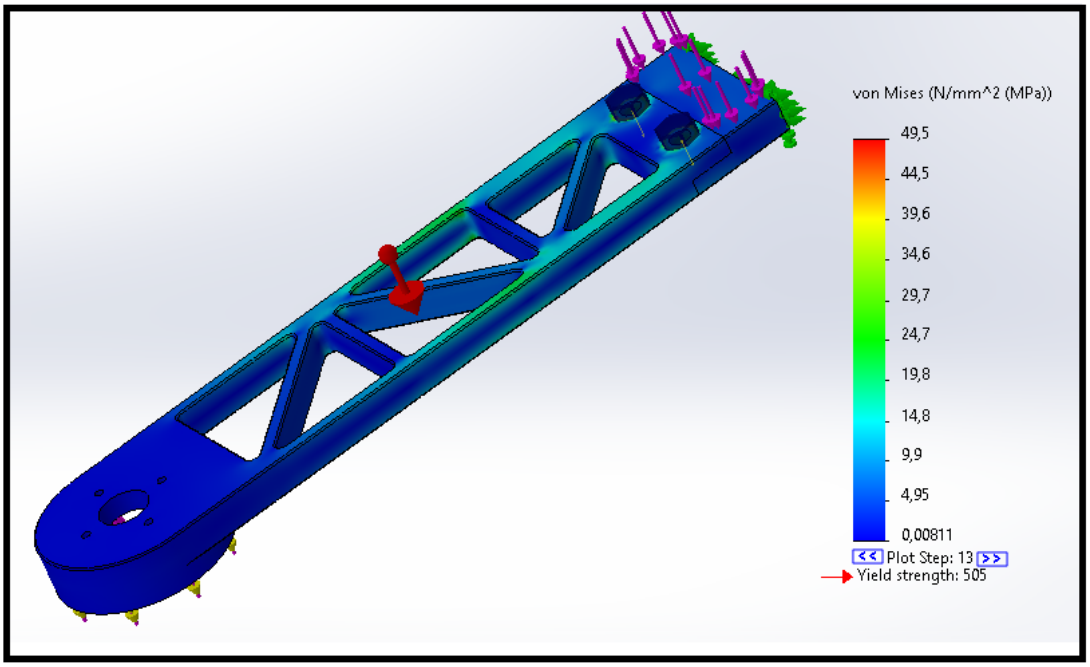


Εικόνα 33: *Πεπερασμένα στοιχεία στο μοντέλο.*

Επόμενο και τελευταίο βήμα είναι η επίλυση της ανάλυσης μέσω του solver του SolidWorks ώστε να πάρουμε τα αποτελέσματα και να τα αξιολογήσουμε.

3.5 Αποτελέσματα

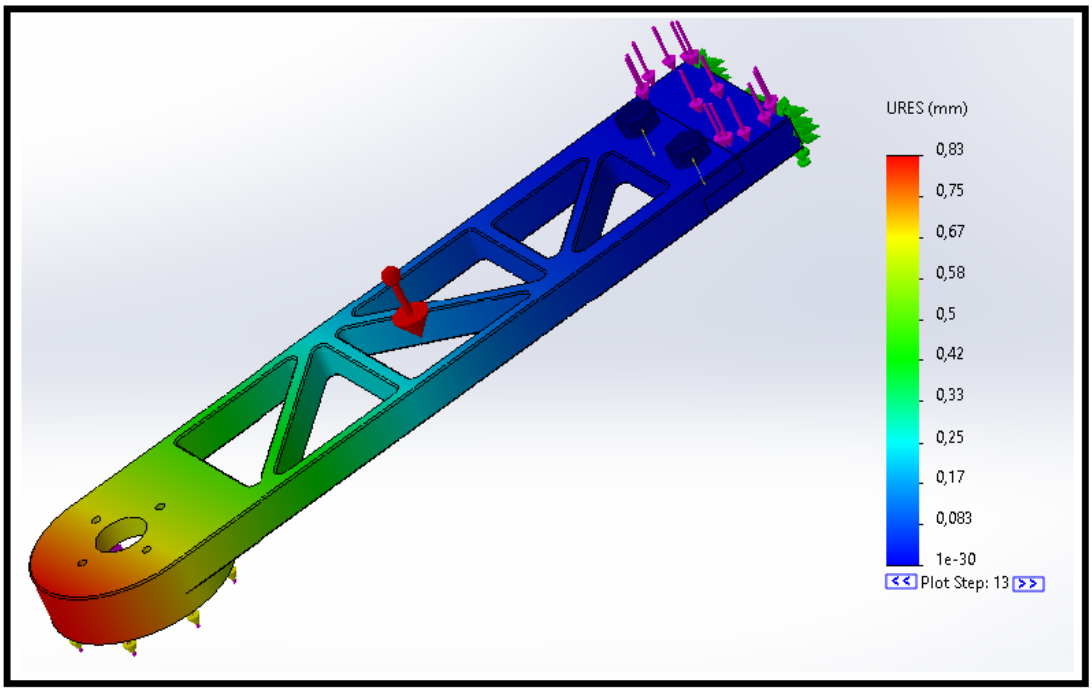
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα τρία αυτά διαγράμματα του μοντέλου προς ανάλυση. Ο χρόνος εκτέλεσης της ανάλυσης διήρκησε 28 ώρες σε υπολογιστή i3 με μνήμη RAM 6 GB.



Εικόνα 34: *Αρχικό διάγραμμα Τάσης - Ορίου διαρροής του μοντέλου ανάλυσης.*

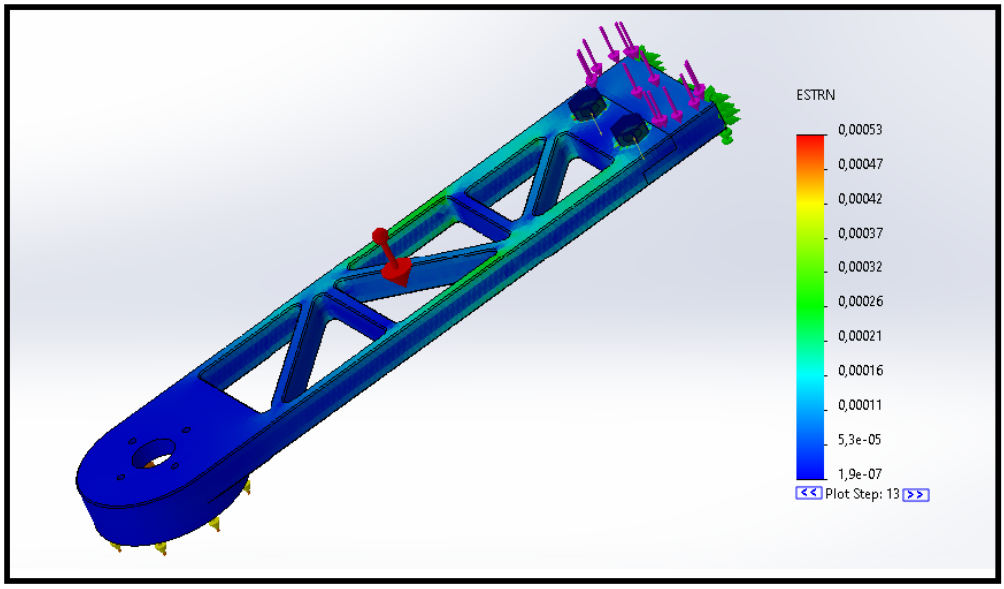
Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο σε σχέση με το όριο διαρροής. Το SolidWorks απεικονίζει με διαφορετικά χρώματα τα διαφορετικά επίπεδα της τάσης όπου το μπλε αφορά τα σημεία που δέχονται χαμηλές τάσεις ενώ το κόκκινο αφορά τα σημεία που δέχονται υψηλές τάσεις.

Όπως ήταν αναμενόμενο μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται μακριά από το σημείο της φόρτισης καθώς το μοντέλο μας συμπεριφέρεται σαν πρόβολος. Όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο της φόρτισης, αναπτύσσεται μεγαλύτερη ροπή και συνεπώς μεγαλύτερη τάση. Στην δεξιά πλευρά της εικόνας δίνονται οι τιμές της τάσης στα διάφορα σημεία του μοντέλου καθώς επίσης και το όριο διαρροής του υλικού που επιλέχθηκε. Το όριο διαρροής για το κράμα αλουμινίου 7076-T6 είναι 505 MPa ενώ η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι 49.5 MPa. Δηλαδή μόλις το 1/10 της επιτρεπόμενης.



Εικόνα 35: *Αρχικό διάγραμμα Μετατοπίσεων του μοντέλου ανάλυσης.*

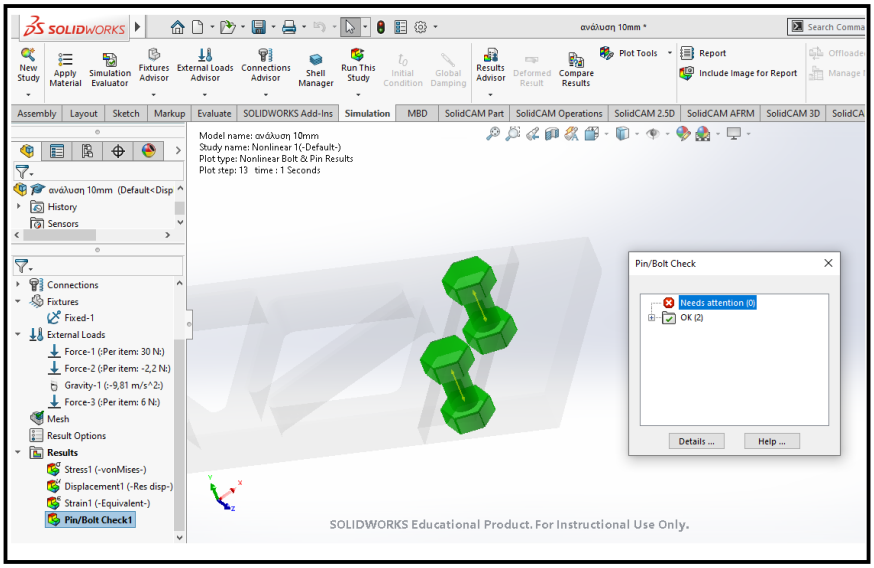
Στην εικόνα 35 βλέπουμε τα αποτελέσματα σχετικά με την μετατόπιση του μοντέλου. Η μέγιστη τιμή της φτάνει στα 0.83mm και εμφανίζεται στην αριστερή άκρη του μοντέλου.



***Εικόνα 36**: Αρχικό διάγραμμα παραμορφώσεων του μοντέλου ανάλυσης.*

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την παραμόρφωση που υφίσταται το μοντέλο. Η μεγαλύτερη παραμόρφωση η όποια εμφανίζεται είναι 0.00053 και βρίσκεται στο σημείο της κοχλιοσύνδεσης.

Τέλος το τελευταίο κομμάτι του ελέγχου αφορά την αντοχή των κοχλιών. Επιλέγοντας δεξί κλικ στα results και στην συνέχεια pin/bolt check, εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο αναγράφονται οι μέγιστες τιμές φόρτισης που δέχονται οι κοχλίες και το αν αυτές είναι αποδεκτές σύμφωνα με τον συντελεστή ασφαλείας τον οποίο έχουμε επιλέξει. Σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα, οι κοχλίες ανταπεξέρχονται επαρκώς στα φορτία.



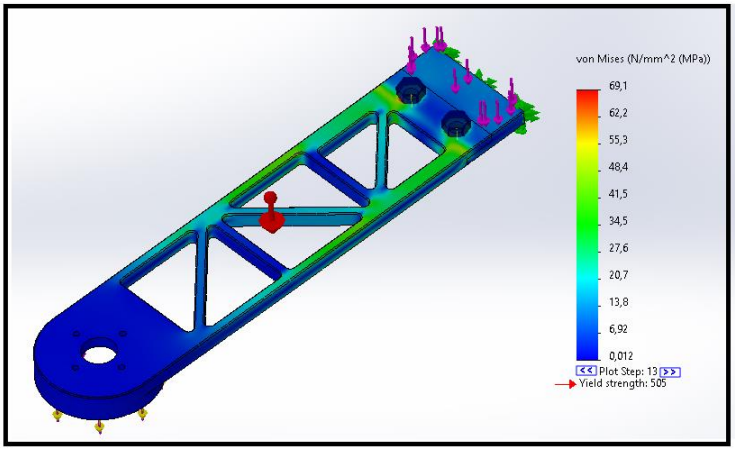
***Εικόνα 37:** Αρχικός έλεγχος Κοχλιών του μοντέλου ανάλυσης.*

3.6 Τελική επιλογή σχεδιασμού του σκάφους

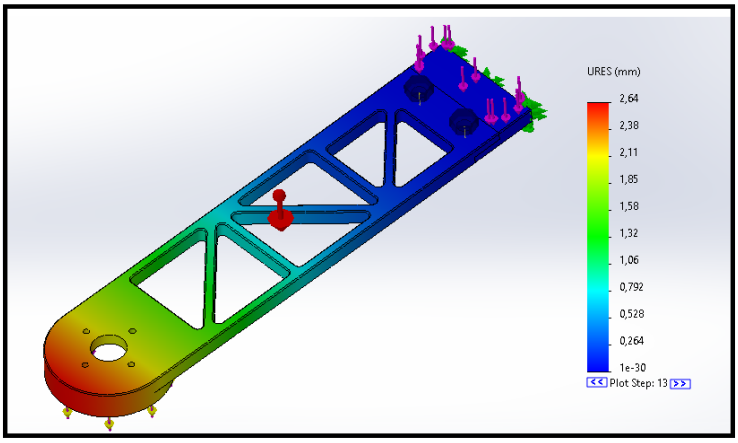
Όπως παρατηρήσαμε στα παραπάνω διαγράμματα, το όριο διαρροής του υλικού που επιλέξαμε είναι κατά δέκα περίπου φορές μεγαλύτερο από τη μέγιστη τάση που αναπτύσσεται.

Συμπερασματικά, προκύπτει η ανάγκη για τροποποίηση του σχεδιασμού του σκάφους με σκοπό να ελαττωθεί πλεονάζον υλικό. Εφόσον η γεωμετρία δικτυώματος που σχεδιάστηκε καλύπτει τις ανάγκες της εφαρμογής, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μείωση στο πάχος του υλικού από τα 10 mm που ήταν αρχικά.

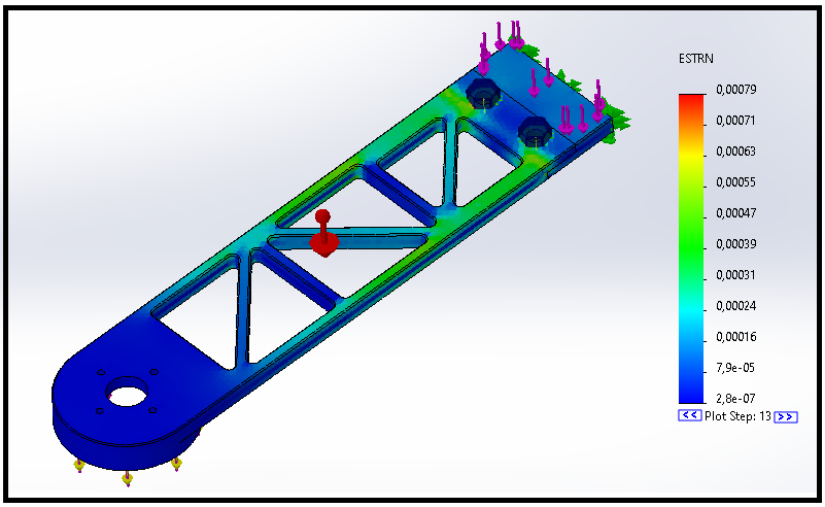
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στη συνέχεια είναι η ίδια όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.4. Η κάθε ανάλυση έγινε αφαιρώντας κάθε φορά 1 mm από το προηγούμενο πάχος. Το μοντέλο που τελικά πληρούσε τα κριτήριά μας, προέκυψε να είναι 7 mm. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης, μετατόπισης και παραμόρφωσης.



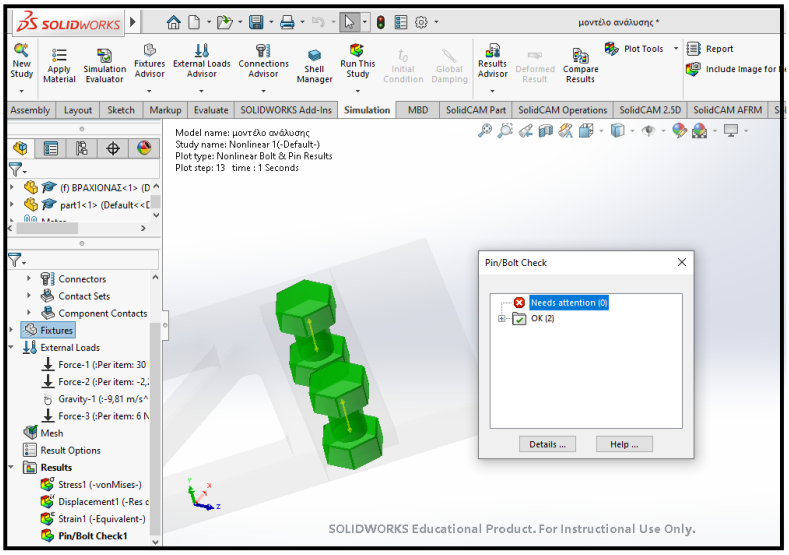
***Εικόνα 38**: Τελικό διάγραμμα Τάσεων του μοντέλου ανάλυσης.*



***Εικόνα 39:** Τελικό διάγραμμα Μετατοπίσεων του μοντέλου ανάλυσης.*



Εικόνα 40: *Τελικό διάγραμμα Παραμορφώσεων του μοντέλου ανάλυσης.*



Εικόνα 41: *Τελικός έλεγχος Κοχλιών του μοντέλου ανάλυσης.*

Στα νέα διαγράμματα η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι 69.1 MPa όπως φαίνεται και στην εικόνα 38, η οποία και πάλι δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή. Αυτή τη φορά όμως οριακή τιμή κρίνεται ότι έχει η μετατόπιση που φτάνει τη μέγιστη τιμή 2.64 mm (εικόνα 39). Αντίστοιχα η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης είναι 0.00079, ενώ οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν κρίνονται επαρκείς.

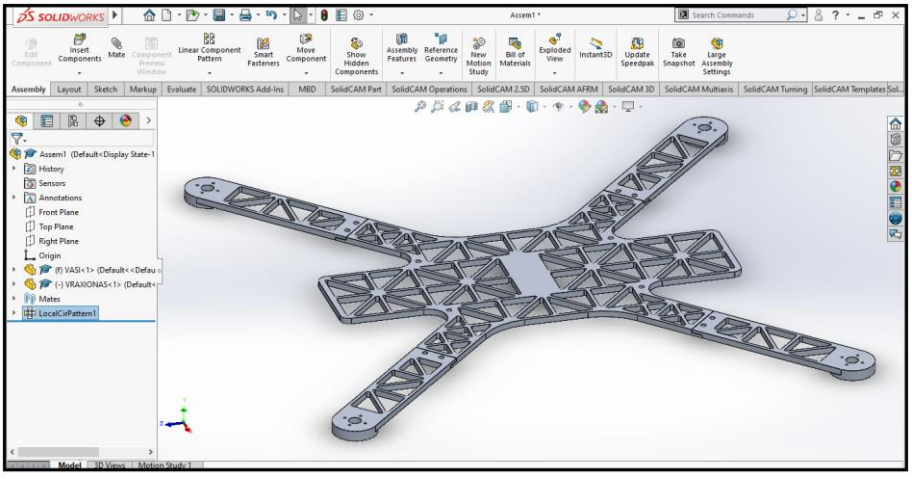
Συμπερασματικά, κρίθηκε σκόπιμο να μην αφαιρεθεί και άλλο υλικό καθώς οι μετατοπίσεις θα αυξάνονταν ακόμα περισσότερο σε μη επιθυμητό βαθμό. Επίσης στο σημείο της ένωσης της βάσης με τους βραχίονες, το πάχος είναι 3.5mm σε κάθε ένα από τα δύο εξαρτήματα, συνεπώς αν αφαιρέσουμε και άλλο υλικό, πιθανόν να υπάρχει κίνδυνος αστοχίας κατά την σύσφιξη των κοχλιών.

3.7 Ανάλυση Συναρμογής Σκάφους

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε η ανάλυση της κατασκευής δίνοντας έμφαση στην δυσμενέστερη περίπτωση σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Για να έχουμε μία συνολική εικόνα της κατασκευής και το πως ασκούνται τα φορτία σε αυτήν καθώς και για την πληρότητα της εργασίας, θα γίνει ακόμα μία ανάλυση που θα αφορά ολόκληρη την κατασκευή αυτή τη φορά. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του τρίτου κεφαλαίου ο όγκος των δεδομένων που θα έχει να επεξεργαστεί ο υπολογιστής επιλύοντας ολόκληρη την κατασκευή θα είναι εκθετικά μεγαλύτερος. Συνεπώς εφόσον η ανάλυση που έγινε με την δυσμενέστερη περίπτωση κρίθηκε επαρκής από πλευράς αντοχής, δίνεται η δυνατότητα να γίνει μία πιο χονδροειδής προσέγγιση σε αυτήν την ανάλυση.

Στις παρακάτω παραγράφους θα παρουσιαστεί η ανάλυση και τα αποτελέσματα της κατασκευής με πιο συνοπτικές πληροφορίες καθώς αυτές παρουσιάστηκαν λεπτομερώς κατά την διαδικασία εκτέλεσης της πρώτης ανάλυσης.

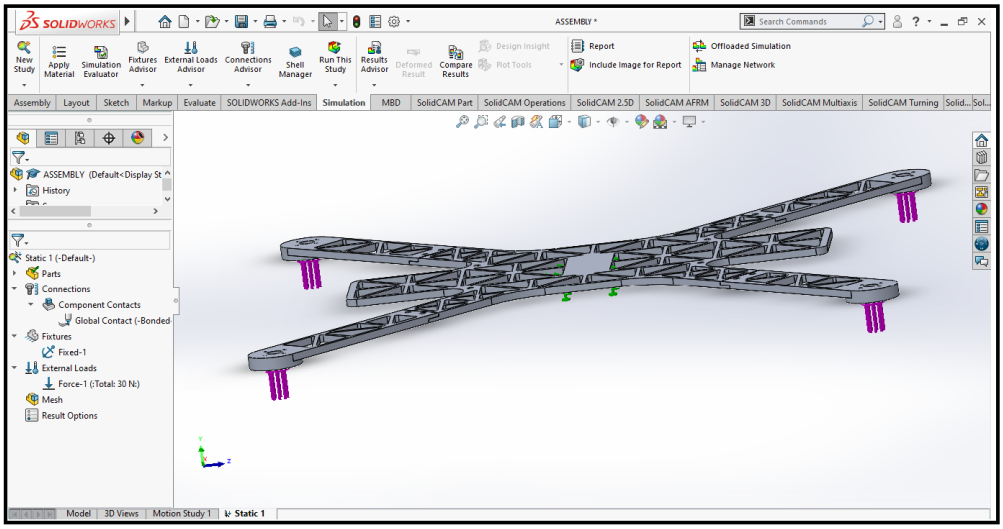
Αρχικά παρουσιάζεται η γεωμετρία στην οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Αποτελείται από την βάση του σκάφους και τους τέσσερεις βραχίονες. Η ανάλυση θα είναι γραμμική και η κατασκευή θα θεωρηθεί σαν ένα ενιαίο σώμα χωρίς να ληφθούν υπόψη οι όποιες επαφές μεταξύ των εξαρτημάτων.



Εικόνα 42: *Γεωμετρία ανάλυσης συναρμογής.*

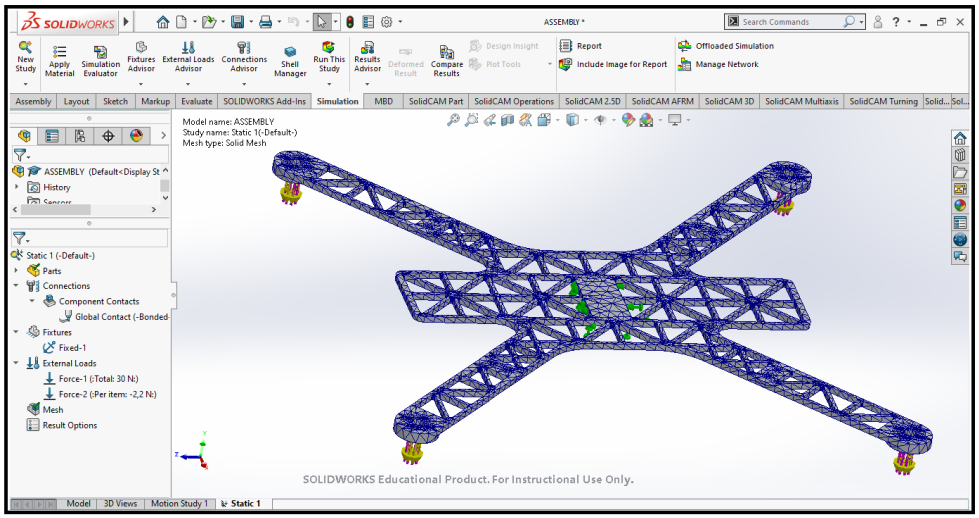
Επόμενο βήμα είναι να τοποθετηθούν οι στηρίξεις και τα φορτία στην γεωμετρία. Όσον αφορά την στήριξη της γεωμετρίας θα έχουμε πάκτωση η οποία θα τοποθετηθεί στο κέντρο της κάτω πλευράς της βάσης. Σαν φορτία έχουμε την ώση που παράγεται από τους τέσσερεις κινητήρες και όπως αναφέρθηκε στην πρώτη ανάλυση είναι 30N

με φορά προς τα πάνω. Αντίστοιχα έχουμε και το βάρος των τεσσάρων κινητήρων το οποίο είναι 2.2N για τον καθένα και εφαρμόζεται με αντίστροφη φορά από αυτήν της ώσης. Τα δύο αυτά είδη φορτίων θα τοποθετηθούν ανά ζεύγη σε κάθε βραχίονα αντίστοιχα. Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο της ανάλυσης με τοποθετημένα τις στηρίξεις και τα φορτία σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε αυτήν την παράγραφο.



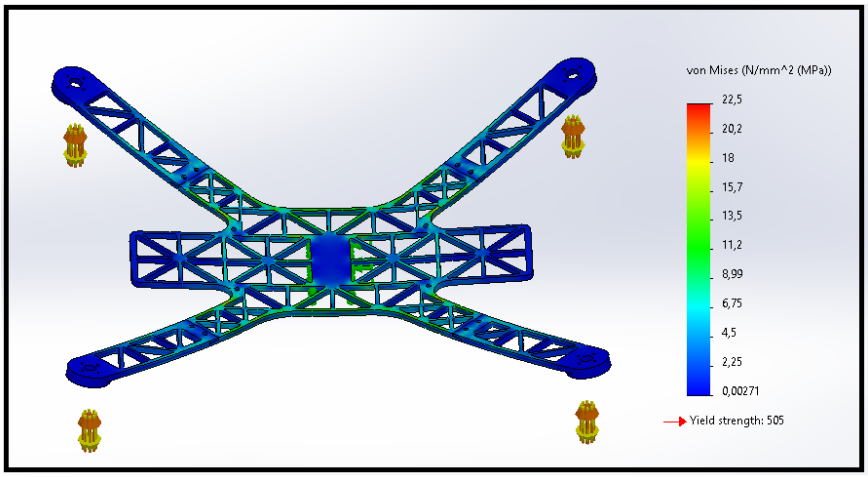
Εικόνα 43: *Στήριξη και φόρτιση ανάλυσης συναρμογής.*

Επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιηθεί ο καθορισμός του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων από το οποίο θα αποτελείται η κατασκευή. Η πυκνότητα του πλέγματος επιλέχθηκε να είναι αραιή σύμφωνα με αυτά που προαναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο της ανάλυσης με την προσθήκη του πλέγματος.

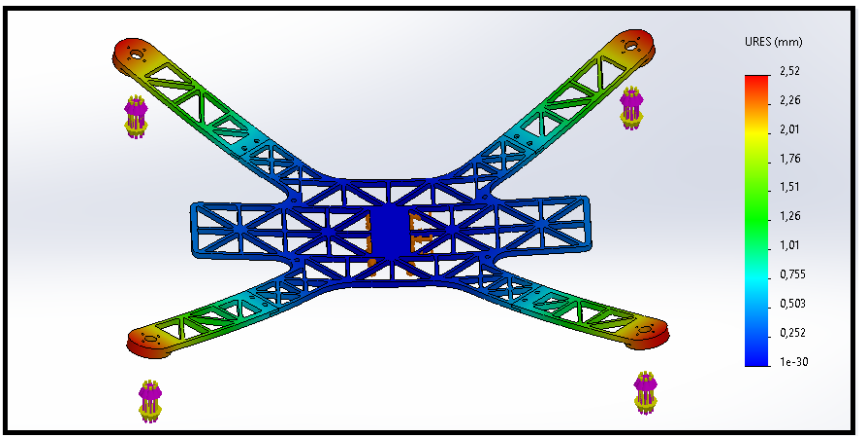


Εικόνα 44: *Πλεγματοποίηση ανάλυσης συναρμογής.*

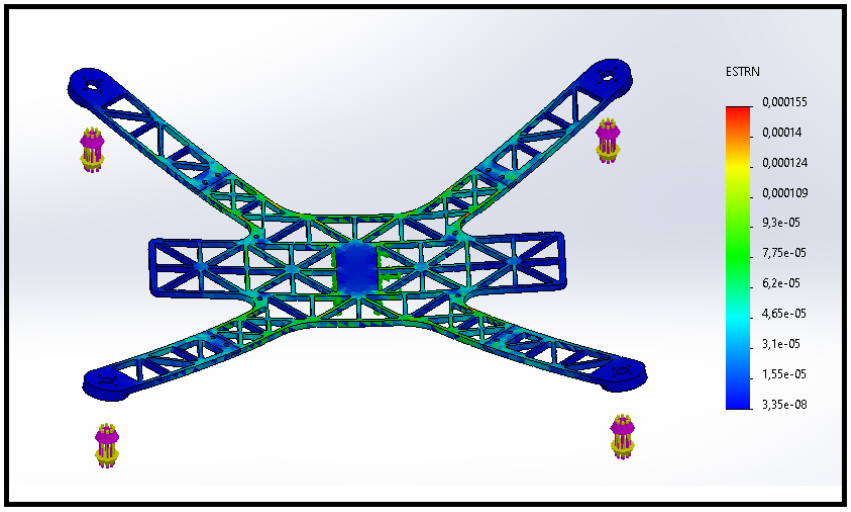
Επόμενο και τελευταίο βήμα είναι να πάρουμε τα αποτελέσματα από τον solver του SolidWorks. Στις επόμενες εικόνες θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Εικόνα 45: *Τάση σε σχέση με το όριο διαρροής ανάλυσης συναρμογής.*



Εικόνα 46: *Μετατόπιση ανάλυσης συναρμογής.*



Εικόνα 47: *Παραμόρφωση ανάλυσης συναρμογής.*

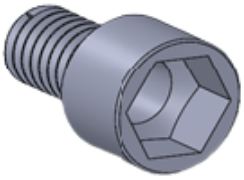
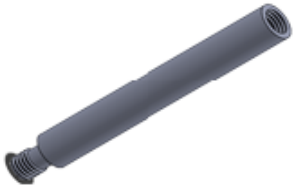
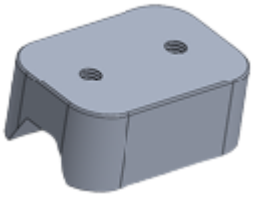
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της εικόνας 45 βλέπουμε ότι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο είναι 22.5 Mpa το οποίο είναι κατά πολύ μικρότερο σε σχέση με το όριο διαρροής του υλικού που επιλέχθηκε, του οποίου είναι 505 Mpa. Στην εικόνα 46 έχουμε την μέγιστη μετατόπιση του μοντέλου η οποία φτάνει τα 2,52 mm ενώ τέλος στην εικόνα 47 έχουμε την μέγιστη παραμόρφωση του μοντέλου που είναι 0,00015. Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα σύμφωνα με την πρώτη ανάλυση της δυσμενέστερης περίπτωσης και είναι προφανές ότι η κατασκευή είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια από πλευράς αντοχής. Επίσης συγκεντρωτικά, από τη σύγκριση του γραμμικού και του μη γραμμικού μοντέλου προκύπτει ότι και τα δύο είναι ενδεικτικά της απόδοσης της κατασκευής.

Εφόσον ολοκληρώθηκε η ανάλυση της κατασκευής και ορίστηκαν οι τελικές γεωμετρίες τις οποίες θα διαθέτει το σκάφος κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία συνολική αναφορά των εξαρτημάτων καθώς και οι μάζες αυτών. Στον πίνακα 6 παρουσιάζεται το βάρος κάθε εξαρτήματος ξεχωριστά αλλά και το συνολικό βάρος της κατασκευής συγκεντρωτικά. Αντίστοιχα στον πίνακα 7 παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα επιμέρους εξαρτήματα από τα οποία θα αποτελείται συνολικά η κατασκευή. Παρατηρώντας τον πίνακα 6 βλέπουμε ότι το συνολικό βάρος της κατασκευής προκύπτει 4586 gr. Σύμφωνα με τους αρχικούς υπολογισμούς του πακέτου eCalc η συνολική μάζα του σκάφους για τους συγκεκριμένους κινητήρες ήταν 5800 gr. Συνεπώς, με τη μείωση της μάζας του πλαισίου επιτεύχθηκε επιπλέον δυνατότητα μεταφοράς εξωτερικού φορτίου 1214 gr.

Πίνακας 6: *Βάρος εξαρτημάτων κατασκευής.*

Εξάρτημα	**Βάρος (gr)**	**Τεμάχια**	**Συνολικό Βάρος (gr)**
Κινητήρας	216	4	864
Έλικα	32	4	128
Μπαταρία	1217	1	1217
ESC	63	4	252
Ελεγκτής	90	1	90
Σκάφος	2035	1	2035
ΣΥΝΟΛΟ			**4586**

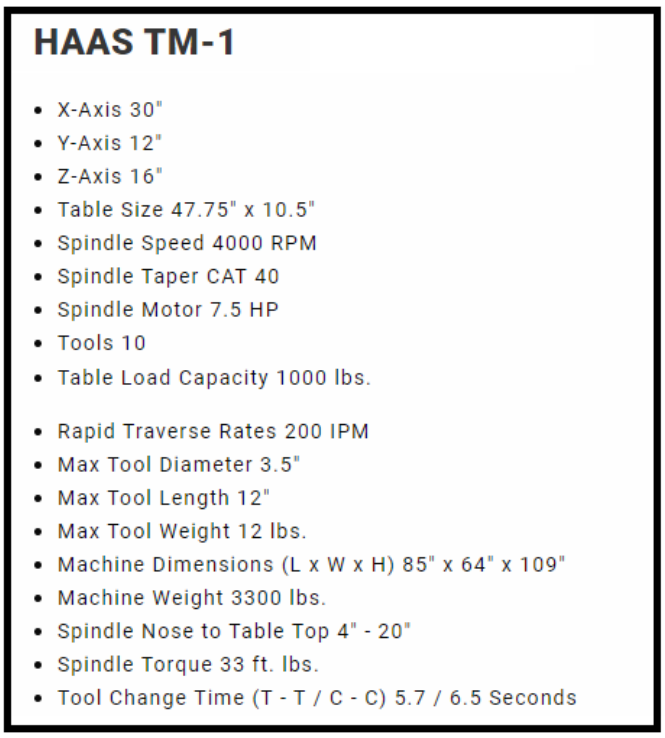
Πίνακας 7: *Εξαρτήματα κατασκευής.*

Εξάρτημα	Τεμάχια	Εξάρτημα	Τεμάχια
ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	4	**ΚΟΧΛΙΑΣ M6X1** 	12
ΕΛΙΚΑ	4	**ΚΟΧΛΙΑΣ M3X0.5**	16
ΜΠΑΤΑΡΙΑ	1	**ΚΟΧΛΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ** 	12
ESC	4	**ΟΡΟΦΗ**	1
ΕΛΕΓΚΤΗΣ	1	**ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ**	4
ΒΑΣΗ	1	**ΠΟΔΙ** 	4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κατασκευή πλαισίου

Η κατασκευή των εξαρτημάτων του σκάφους θα ολοκληρωθεί σε φρέζα CNC τριών αξόνων HAAS TM-1 η οποία βρίσκεται στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στην εικόνα 49.

Εικόνα 48: *Μηχανή κατεργασίας HAAS TM-1.*



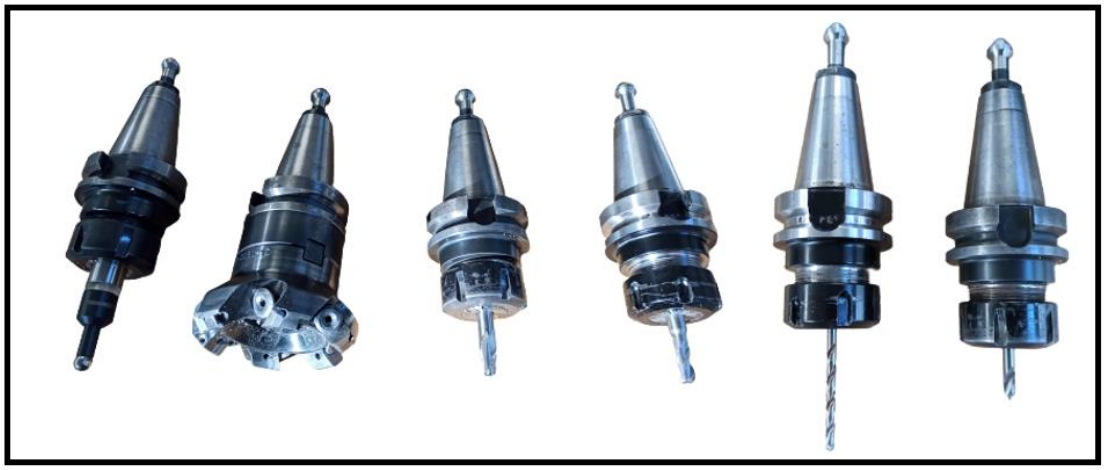
Εικόνα 49: *Χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής HAAS TM-1*

4.1 Επιλογή κοπτικών εργαλείων

Για την κατεργασία κραμάτων αλουμινίου χρησιμοποιούνται μη επικαλυμμένα σκληρομέταλλα και διαμάντι. Τα σκληρομέταλλα χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατεργασίες διαμόρφωσης και υποευτηκτοειδών κραμάτων αλουμινίου λόγω της αντίστασης τους σε φθορά και σκληρότητα. Όσο αναφορά τα υπερευτηκτοειδή κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται διαμάντια σε μονοκρυσταλλική και πολυκρυσταλλική μορφή [26].

Για τις ανάγκες της εφαρμογής επιλέχθηκαν τα παρακάτω εργαλεία για τα οποία γίνεται αναφορά στο παράρτημα Α:

- Φρεζοκεφαλή Φ80
- Κονδύλι Φ10
- Κονδύλι Φ4
- Τρυπάνι Φ6
- Τρυπάνι Φ5
- Τρυπάνι Φ3
- Κεντροτρύπανο chamfer



***Εικόνα 50**: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατεργασία.*

4.2 Συνθήκες κοπής

Στην βιβλιογραφία βρέθηκαν αρκετές μελέτες στις οποίες υπολογίζονται οι βέλτιστες συνθήκες κοπής ανάλογα την κατεργασία, για κράμα αλουμινίου 7075. Οι Surasit Rawangwong et al. [27] εξέτασαν την επιφανειακή τραχύτητα κατεργασμένων τεμαχίων 7075 συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου, της πρόωσης και του βάθους κοπής το όποιο δεν ξεπερνούσε το 1mm, σε κατεργασία προσώπου. Το κοπτικό εργαλείο είχε 63mm διάμετρο και τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η πρόωση και η ταχύτητα περιστροφής επηρέασαν άμεσα την τελική επιφάνεια του τεμαχίου ενώ το βάθος κοπής δεν είχε μεγάλη επίδραση. Η καλύτερη επιφάνεια προέκυψε όταν η ταχύτητα περιστροφής ήταν 3800 RPM και η πρόωση ήταν 1000 mm/min.

Σε μια άλλη μελέτη οι T. P. Mahesh και R. Rajesh [28] προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν τις συνθήκες κοπής σε κράμα αλουμινίου Al 7075-T6 σε κατεργασία προφίλ με τη μέθοδο Taguchi. Οι παράμετροι κοπής που λήφθηκαν υπόψη ήταν η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου, η πρόωση και το βάθος κοπής. Η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου ήταν 16mm και δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές στις παραμέτρους ώστε να ελαχιστοποιήσουν την τραχύτητα επιφανείας του κατεργασμένου τεμαχίου. Η βέλτιστη επιφάνεια αποκτήθηκε εφαρμόζοντας ταχύτητα περιστροφής ατράκτου 4000 RPM, πρόωση 0.04 mm/tooth και βάθος κοπής 0.4 mm.

Στην μελέτη που διεξήχθησαν οι E. Bahçe και B. Özdemir [29], εξέτασαν την τραχύτητα της επιφάνειας που αφήνει το τρυπάνι μετά την κατεργασία του σε κράμα

αλουμινίου 7075. Οι παράμετροι που εξέτασαν ήταν η γωνία εξόδου του εργαλείου, η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου και η πρόωση. Τα πειράματα έγιναν χωρίς να χρησιμοποιηθεί υγρό κοπής με διάμετρο εργαλείου 7.5mm και υλικό HSS. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν αξιολογήθηκαν με την μέθοδο Taguchi, ANOVA και NLR. Η βέλτιστη επιφάνεια προέκυψε όταν η γωνία εξόδου του εργαλείου ήταν 15°, η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ήταν 2300 RPM και η πρόωση ήταν 0.1 mm/rev.

Οι συνθήκες κοπής για το εκάστοτε εργαλείο δίνονται από τον κατασκευαστή ανάλογα με το υλικό το οποίο θέλουμε να κατεργαστούμε. Τα μεγέθη τα οποία θα μας απασχολήσουν είναι τα παρακάτω:

- Ταχύτητα κοπής
- Ταχύτητα πρόωσης
- Βάθος κοπής
- Πλάτος κοπής

Στην παρούσα διπλωματική τα μεγέθη αυτά θα υπολογιστούν με τυπολόγιο και θα γίνει σύγκρισή τους με τις τιμές των κατασκευαστών.

Η ταχύτητα κοπής είναι η περιφερειακή ταχύτητα του κοπτικού εργαλείου εφόσον η κατεργασία γίνεται σε φρέζα. Μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση [30]:

$$V_C = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \ m/min$$

όπου

V_C : Η περιφερειακή ταχύτητα σε m/min

D: Η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου σε mm

n: Η ταχύτητα περιστροφής της κύριας ατράκτου σε RPM

Η πρόωση είναι η σχετική μετατόπιση του εργαλείου στη μονάδα του χρόνου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο είτε προς μία διεύθυνση (X,Y,Z), είτε προς δύο διευθύνσεις είτε και ως προς τις τρεις. Η ταχύτητα πρόωσης είναι η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου ως προς κάποια διεύθυνση στην μονάδα του χρόνου. Μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω σχέση [30]:

$$F = z \cdot f \cdot n$$

όπου

F: Η πρόωση σε mm/min

z: Ο αριθμός των κοπτικών ακμών

f: Η πρόωση σε mm/tooth

n: Η ταχύτητα περιστροφής σε RPM

Το βάθος κοπής είναι η διαφορά σε mm μεταξύ της κατεργασμένης και της μη κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου κατά την διάρκεια ενός πάσου και αφορά μία από τις τρεις κύριες διευθύνσεις (X,Y, Z).

Το πλάτος κοπής (engagement) είναι το ποσοστό της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου που εκτελεί το τρέχον πάσο και εκφράζεται σε mm [30].

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, γίνεται ο υπολογισμός των συνθηκών κοπής για τα εξαρτήματα και παρουσιάζεται στην παρακάτω παράγραφο.

4.3 Φασεολόγιο κοπής εξαρτημάτων

Με βάση την προηγούμενη παράγραφο, παρουσιάζονται σε πίνακες οι φάσεις κατεργασίας για τα τέσσερα εξαρτήματα.

Πίνακας 8: Φασεολόγιο κοπής Οροφής.

Εργαλείο	**Υλικό**	**n (rpm)**	**F (mm/min)**	**α (mm)**	**Παρατηρήσεις**
1η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Φρεζοκεφαλή Φ80	Καρβίδιο	1500	450	1	Εκχόνδριση Προσώπου
		2000	360	0,2	Φινίρισμα Προσώπου
Κονδύλι Φ4	Καρβίδιο	3500	126	1	Εκχόνδριση Δικτυώματος
		3500	140	0,2	Φινίρισμα Δικτυώματος
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Περιφερειακή Εκχόνδριση
		3000	366	0,2	Περιφερειακό Φινίρισμα
Τρυπάνι Φ6	HSS	2500	90	3	Διάνοιξη 4 οπών

Κεντροτρύπανο Chamfer	Καρβίδιο	2500	50	0,2	Chamfer τεμαχίου
2η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Φρεζοκεφαλή Φ80	Καρβίδιο	1500	450	1	Εκχόνδριση Προσώπου
		2000	360	0,2	Φινίρισμα Προσώπου
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Περιφερειακή Εκχόνδριση
		3000	366	0,2	Περιφερειακό Φινίρισμα
Κεντροτρύπανο Chamfer	Καρβίδιο	2500	50	0,2	Chamfer τεμαχίου

Πίνακας 9: *Φασεολόγιο κοπής Βραχίονα.*

Εργαλείο	**Υλικό**	**n (rpm)**	**F (mm/min)**	**α (mm)**	**Παρατηρήσεις**
1η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Φρεζοκεφαλή Φ80	Καρβίδιο	1500	450	1	Εκχόνδριση Προσώπου
		2000	360	0,2	Φινίρισμα Προσώπου
Κονδύλι Φ4	Καρβίδιο	3500	126	1	Εκχόνδριση Δικτυώματος
		3500	140	0,2	Φινίρισμα Δικτυώματος
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Περιφερειακή Εκχόνδριση
		3000	366	0,2	Περιφερειακό Φινίρισμα
Τρυπάνι Φ6	HSS	2500	90	3	Διάνοιξη 2 οπών
Τρυπάνι Φ3	HSS	3000	60	3	Διάνοιξη 4 οπών
Κεντροτρύπανο Chamfer	Καρβίδιο	2500	50	0,2	Chamfer τεμαχίου
2η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Φρεζοκεφαλή Φ80	Καρβίδιο	1500	450	1	Εκχόνδριση Προσώπου
		2000	360	0,2	Φινίρισμα Προσώπου

Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Περιφερειακή Εκχόνδριση
		3000	366	0,2	Περιφερειακό Φινίρισμα
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Εκχόνδριση Προφίλ
		3000	366	0,2	Φινίρισμα Προφίλ
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Εκχόνδριση Ποκέτας
		3000	366	0,2	Φινίρισμα Ποκέτας

Πίνακας 10: *Φασεολόγιο κοπής Ποδιού στήριξης.*

Εργαλείο	**Υλικό**	**n (rpm)**	**F (mm/min)**	**α (mm)**	**Παρατηρήσεις**
1η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Φρεζοκεφαλή Φ80	Καρβίδιο	1500	450	1	Εκχόνδριση Προσώπου
		2000	360	0,2	Φινίρισμα Προσώπου
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Περιφερειακή Εκχόνδριση
		3000	366	0,2	Περιφερειακό Φινίρισμα
Τρυπάνι Φ5	HSS	2500	75	3	Διάνοιξη 2 οπών
Κεντροτρύπανο Chamfer	Καρβίδιο	2500	50	0,2	Chamfer τεμαχίου
2η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Φρεζοκεφαλή Φ80	Καρβίδιο	1500	450	1	Εκχόνδριση Προσώπου
		2000	360	0,2	Φινίρισμα Προσώπου
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Περιφερειακή Εκχόνδριση
		3000	366	0,2	Περιφερειακό Φινίρισμα
3η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Εκχόνδριση Κωνικού Προφίλ
		3000	366	0,2	Φινίρισμα Κωνικού Προφίλ

4η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Εκχόνδριση Κωνικού Προφίλ
		3000	366	0,2	Φινίρισμα Κωνικού Προφίλ

Πίνακας 11*: Φασεολόγιο κοπής της Βάσης.*

Εργαλείο	**Υλικό**	**n (rpm)**	**F (mm/min)**	**α (mm)**	**Παρατηρήσεις**
1η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Φρεζοκεφαλή Φ80	Καρβίδιο	1500	450	1	Εκχόνδριση Προσώπου
		2000	360	0,2	Φινίρισμα Προσώπου
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Περιφερειακή Εκχόνδριση
		3000	366	0,2	Περιφερειακό Φινίρισμα
Κονδύλι Φ4	Καρβίδιο	3500	126	1	Εκχόνδριση Δικτυώματος
		3500	140	0,2	Φινίρισμα Δικτυώματος
Τρυπάνι Φ6	HSS	2500	90	3	Διάνοιξη 8 οπών
Τρυπάνι Φ5	HSS	2500	75	3	Διάνοιξη 4 οπών
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Εκχόνδριση Ποκέτας
		3000	366	0,2	Φινίρισμα Ποκέτας
Κεντροτρύπανο Chamfer	Καρβίδιο	2500	50	0,2	Chamfer τεμαχίου
2η ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					
Φρεζοκεφαλή Φ80	Καρβίδιο	1500	450	1	Εκχόνδριση Προσώπου
		2000	360	0,2	Φινίρισμα Προσώπου
Κονδύλι Φ10	Καρβίδιο	3000	330	1	Περιφερειακή Εκχόνδριση
		3000	366	0,2	Περιφερειακό Φινίρισμα
Κεντροτρύπανο Chamfer	Καρβίδιο	2500	50	0,2	Chamfer τεμαχίου

4.4 Προγραμματισμός τεμαχίων προς κατεργασία με CAM

Εφόσον ορίστηκαν οι φάσεις και οι συνθήκες κατεργασίες των τεμαχίων, σειρά είχε να φορτωθούν τα σχέδια των εξαρτημάτων στο λογισμικό SolidCam 2017 και από εκεί να παραχθεί ο G_Code για να εκτελέσει η μηχανή κατεργασίας την κοπή τους. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστεί ολόκληρη η διαδικασία μέσα από το περιβάλλον του SolidCam για ένα από τα τέσσερα εξαρτήματα. Το εξάρτημα που επιλέχθηκε ως τυπικό είναι ο βραχίονας του σκάφους και κατά παρόμοιο τρόπο έγινε αντίστοιχη διαδικασία και στα υπόλοιπα εξαρτήματα.

Η διαδικασία ξεκινά φορτώνοντας αρχικά το σχέδιο στο περιβάλλον του SolidWorks και επιλέγοντας στην καρτέλα SolidCAM part, new – milling. Από εκεί το SolidCam μας ζητάει να ορίσουμε την μηχανή κατεργασίας η οποία στην δική μας περίπτωση είναι η gMilling_Haas_3x. Στην συνέχεια θα πρέπει να ορίσουμε τρεις παραμέτρους οι οποίες είναι:

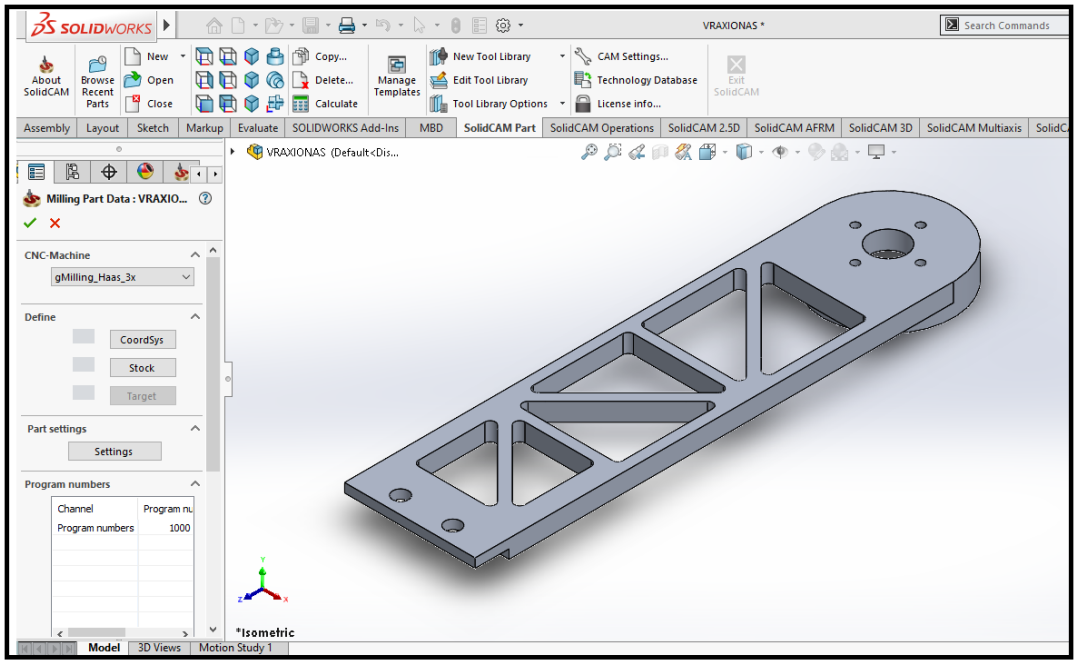
- Σύστημα Συντεταγμένων
- Block
- Τελική Γεωμετρία

Το σύστημα συντεταγμένων αφορά το σημείο αναφοράς κατά το οποίο μπορεί να γνωρίζει η μηχανή ως σταθερό σημείο κατά την διάρκεια μιας κατεργασίας. Το σύστημα συντεταγμένων μπορεί να είναι παραπάνω από ένα, ανάλογα τις εκάστοτε ανάγκες κατεργασίας του κάθε εξαρτήματος. Η γενική οδηγία είναι ότι προσπαθούμε να καταλήξουμε στην τελική γεωμετρία την οποία θέλουμε να έχουμε, με τα λιγότερα δυνατά συστήματα συντεταγμένων. Κάθε διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων συνεπάγεται λύσιμο – δέσιμο του κομματιού σε διαφορετική θέση στην μέγγενη της μηχανής το οποίο οδηγεί σε αυξημένο χρόνο κατεργασίας και ενδεχομένως στην μείωση της διαστασιακής ακρίβειας.

Το Block ή Stock, αφορά τις διαστάσεις που θα έχει το τεμάχιο πριν από την διαδικασία της κατεργασίας. Το φρεζάρισμα αποτελεί κατεργασία αφαίρεσης υλικού, συνεπώς θα πρέπει οι αρχικές διαστάσεις του block να είναι μεγαλύτερες από αυτές της τελικής γεωμετρίας. Στην πράξη όμως θα πρέπει οι διαστάσεις του αρχικού υλικού που θα προμηθευτούμε να είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές που χρειαζόμαστε για το block. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι για να ξεκινήσουμε την

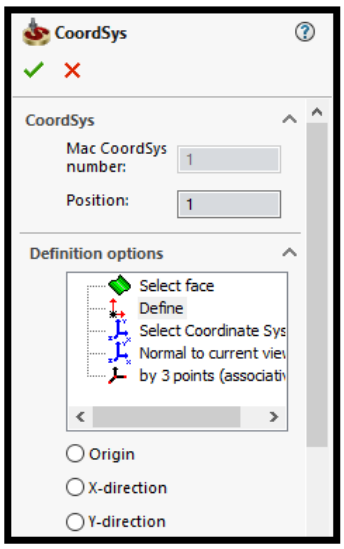
κατεργασία θα πρέπει όλες οι πλευρές του block να είναι παράλληλες κάτι το οποίο δεν συμβαίνει κατά την προμήθεια. Συνεπώς πριν κατεργαστούμε το τεμάχιό μας με κάποιο CAM πρόγραμμα, θα πρέπει να φρεζάρουμε όλες τις επιφάνειες του αρχικού υλικού που θα παραλάβουμε και να προσεγγίσουμε τις τιμές του block με τις οποίες έχουμε φτιάξει το CAM πρόγραμμα κοπής για το εκάστοτε εξάρτημα.

Η τελική γεωμετρία αφορά το τρισδιάστατο αντικείμενο το οποίο θέλουμε να έχει το αρχικό μας block μετά το πέρας την κατεργασίας.



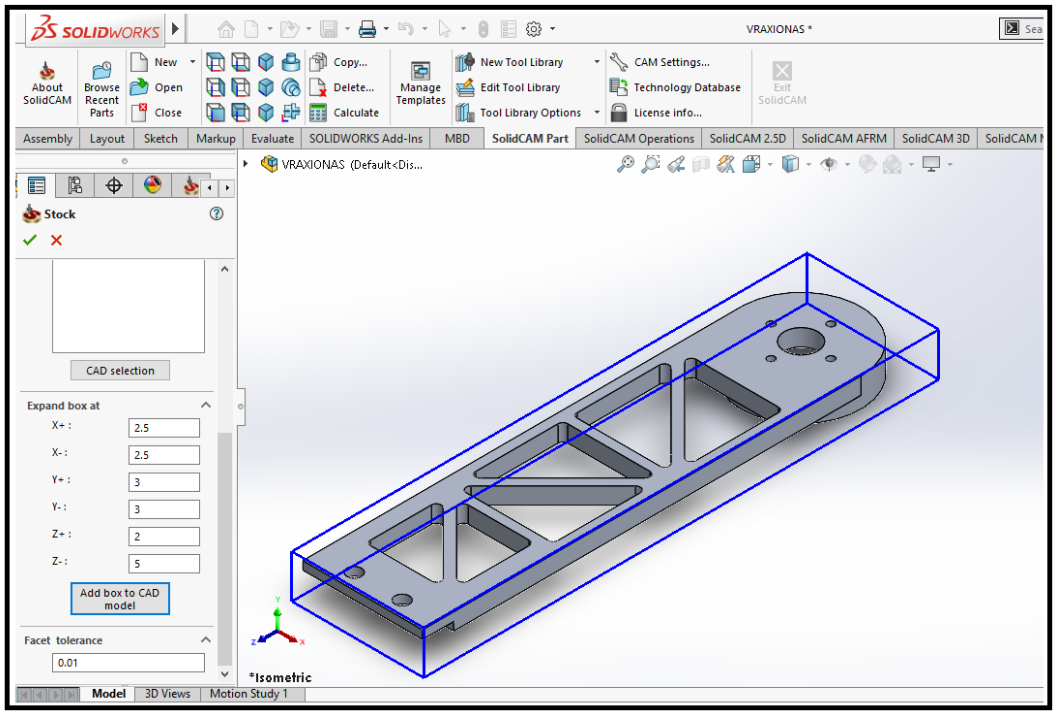
Εικόνα 51: *Ορισμός συστήματος συντεταγμένων, stock και τελικής γεωμετρίας.*

Ο προσδιορισμός συστήματος συντεταγμένων γίνεται επιλέγοντας το CoordSys όπου εμφανίζεται το παράθυρο το όποιο φαίνεται στην εικόνα 52. Το SolidCam μας δίνει την δυνατότητα να προσδιορίσουμε το σύστημα συντεταγμένων με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες μας και τον τρόπο με τον οποίο μας εξυπηρετεί να εργαστούμε. Στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η επιλογή define όπου και θα πρέπει να ορίσουμε τρεις παραμέτρους για να προσδιοριστεί το σύστημα συντεταγμένων. Αρχικά στο origin επιλέγεται το σημείο τομής των τριών αξόνων, στην συνέχεια επιλέγουμε μία γραμμή η οποία αποτελεί την κατά x διεύθυνση και τέλος άλλη μία γραμμή η οποία αφορά την κατά y διεύθυνση. Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου εξαρτήματος χρειάστηκε να οριστούν δύο συστήματα συντεταγμένων.



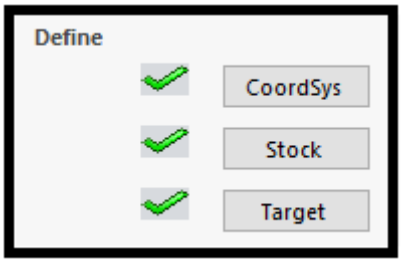
Εικόνα 52: *Σύστημα Συντεταγμένων.*

Οι διαστάσεις του block μπορούν να προσδιοριστούν επιλέγοντας το παράθυρο stock. Το SolidCam μας ζητάει να του ορίσουμε τις διαστάσεις που θα έχει το block στις τρεις διευθύνσεις και στα θετικά του άξονα άλλα και στα αρνητικά. Ως διαστάσεις αναφοράς καθορίζονται εξ ορισμού οι διαστάσεις της τελικής γεωμετρίας του εξαρτήματος και σε αυτές προστίθενται τα επιπλέον mm που θα έχει το block σε κάθε άξονα (X-Y-Z). Το πρόγραμμα μας δίνει επίσης την δυνατότητα δούμε την προεπισκόπηση του block κλικάροντας την επιλογή add box to CAD model.



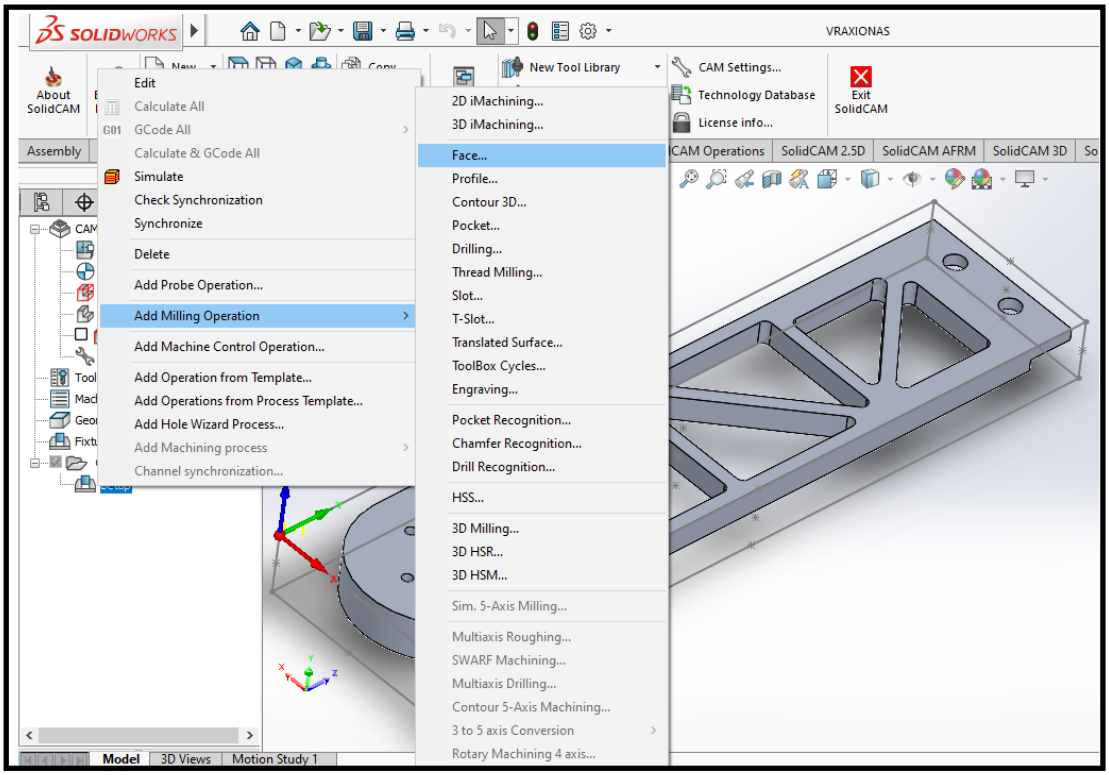
Εικόνα 53: *Ορισμός διαστάσεων block.*

Η τελική γεωμετρία καθορίζεται πολύ εύκολα πατώντας την επιλογή target και επιλέγοντας κάποιο σημείο πάνω στο σχέδιο. Όταν καθοριστούν και οι τρεις παράμετροι, το SolidCam μας εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο για να μας δηλώσει ότι ο καθορισμός έχει γίνει με επιτυχία.



Εικόνα 54: *Επιτυχής ολοκλήρωση καθορισμού αρχικών παραμέτρων.*

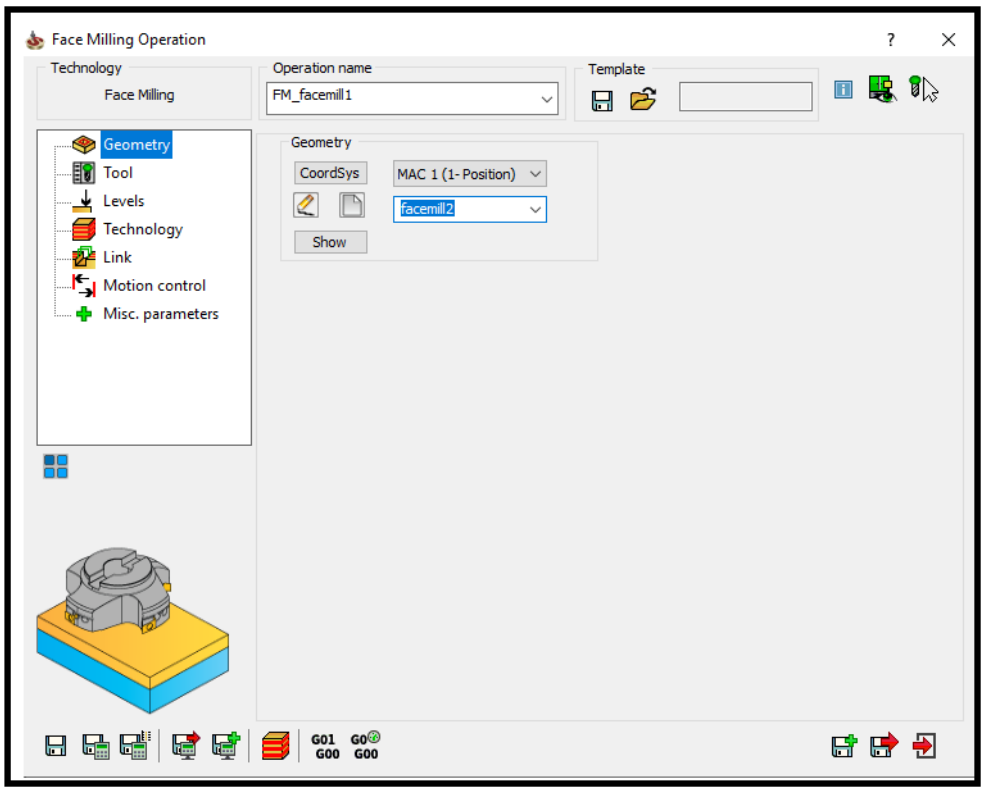
Στην συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία κοπής του εξαρτήματος με την εκτέλεση φασεολογίου. Πρώτη φάση κατεργασίας είναι η εκχόνδριση και το φινίρισμα του προσώπου κατά την διάσταση z στην μία πλευρά του τεμαχίου. Πατώντας δεξί κλικ στο setup και στην συνέχεια add Milling Operation, επιλέγεται το εικονίδιο face.



Εικόνα 55: *Διαδικασία εκχόνδρισης και φινιρίσματος προσώπου.*

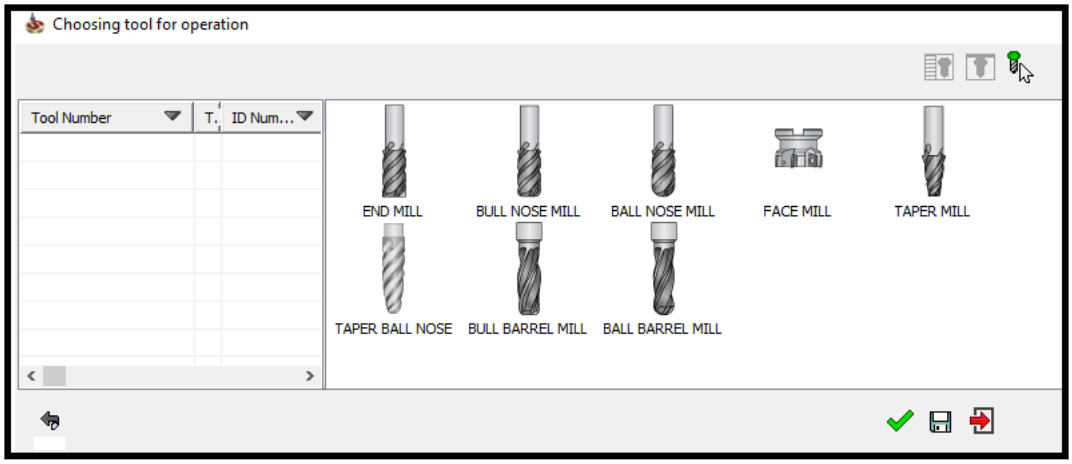
Στην συνέχεια εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο κατά το οποίο ακολουθείται μία διαδικασία βήμα – βήμα μέχρι το πέρας της κατεργασίας όπως φαίνεται και στην

εικόνα 56. Αρχικά στην καρτέλα Geometry επιλέγεται η επιφάνεια στην οποία θέλουμε να πραγματοποιηθεί η κατεργασία.

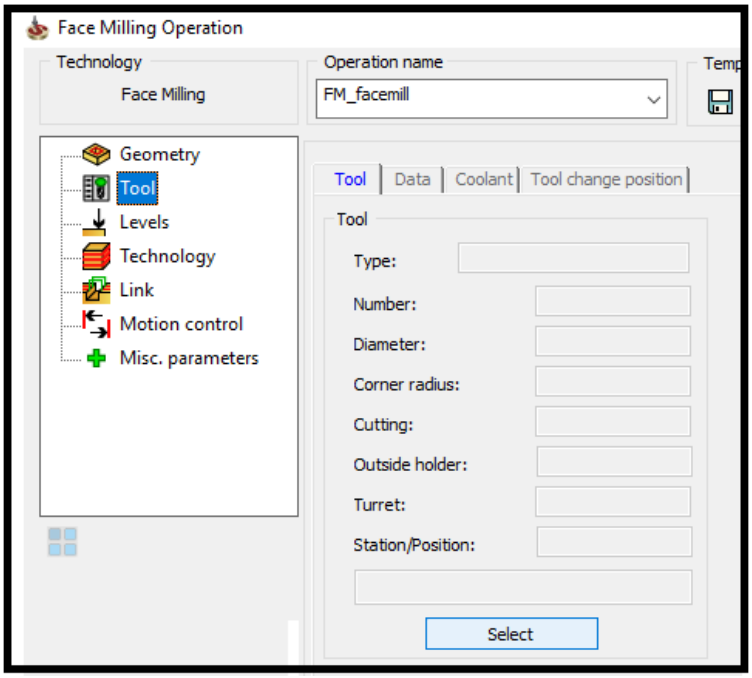


Εικόνα 56: *Παραμετροποίηση κατεργασίας προσώπου.*

Αφού ορίσουμε την επιφάνεια, επιλέγουμε την καρτέλα Tool που αφορά το εργαλείο με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η κατεργασία. Επιλέγοντας select και στην συνέχεια add milling tool εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο μας δίνεται μια γκάμα μορφής κοπτικών εργαλείων τα οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε.

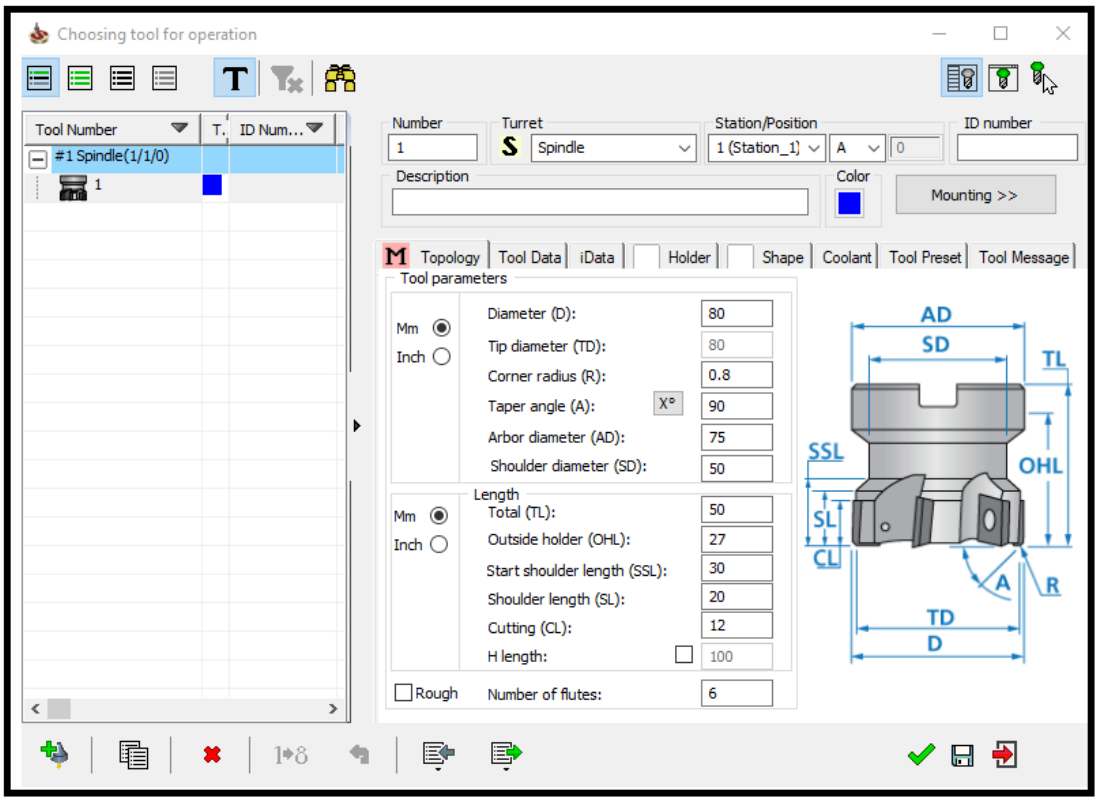


Εικόνα 57: *Διαθέσιμα κοπτικά εργαλεία του SolidCam για φρεζάρισμα.*



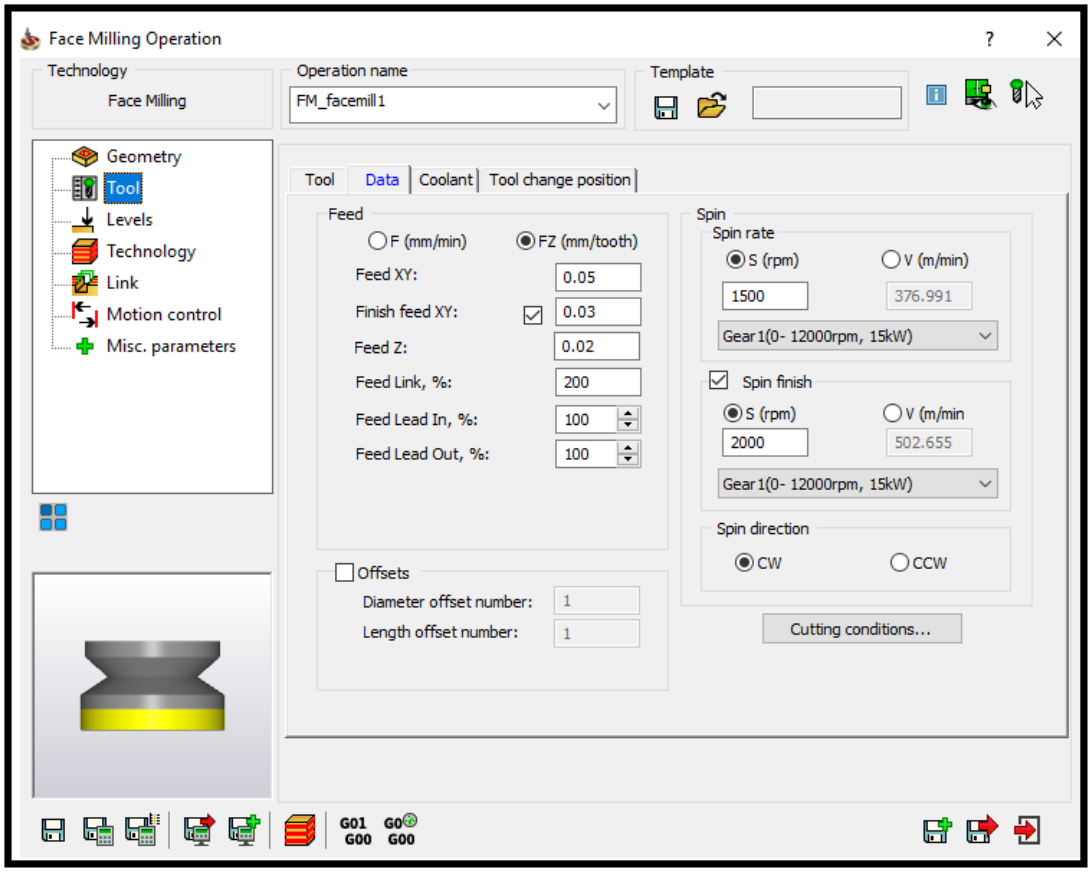
Εικόνα 58: *Η καρτέλα Tool του SolidCam.*

Επιλέγουμε το εργαλείο Face Mill για το οποίο θα πρέπει να δηλώσουμε τις διαστάσεις του εργαλείου που θα χρησιμοποιήσουμε. Οι διαστάσεις αυτές καθορίστηκαν σύμφωνα με τον κατασκευαστή και φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



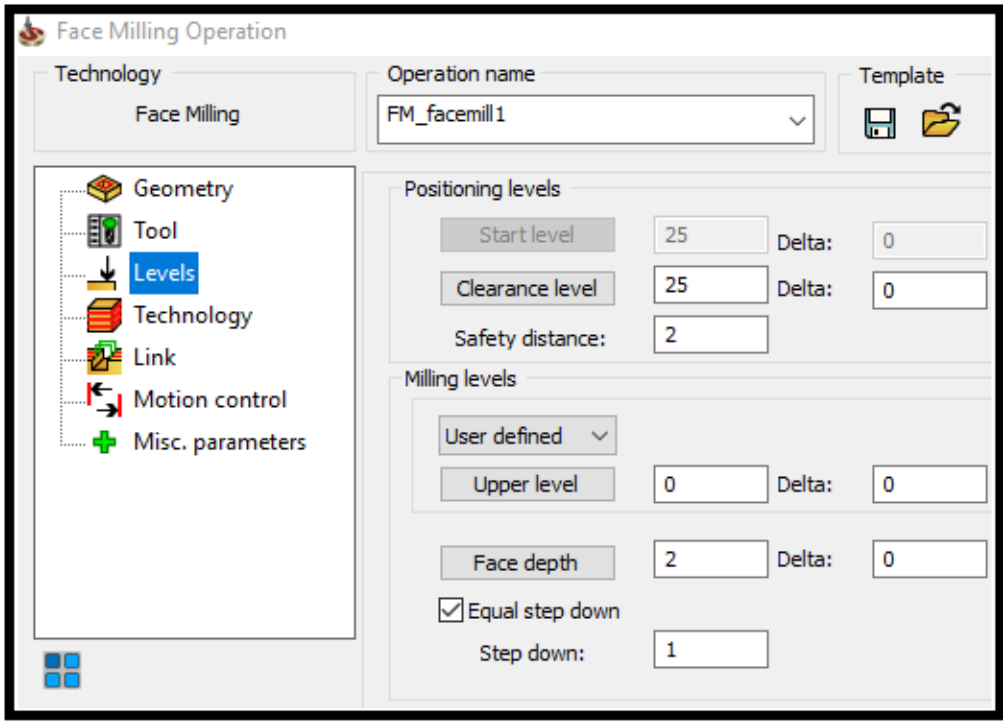
Εικόνα 59: *Διαστασιολόγηση φρεζοκεφαλής στο SolidCam.*

Στην συνέχεια στην ίδια καρτέλα μετακινούμαστε δεξιά στην καρτέλα data. Σε αυτό το σημείο ζητείται να καθοριστούν οι στροφές της ατράκτου κατά το εκχόνδρισμα και το φινίρισμα καθώς και οι τιμές των προώσεων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα ωρολογιακής ή ανθωρολογιακής περιστροφής ατράκτου. Οι τιμές που εκχωρήθηκαν φαίνονται στην εικόνα 60 και επιλέχθηκαν σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έχουν γίνει στην παράγραφο 4.



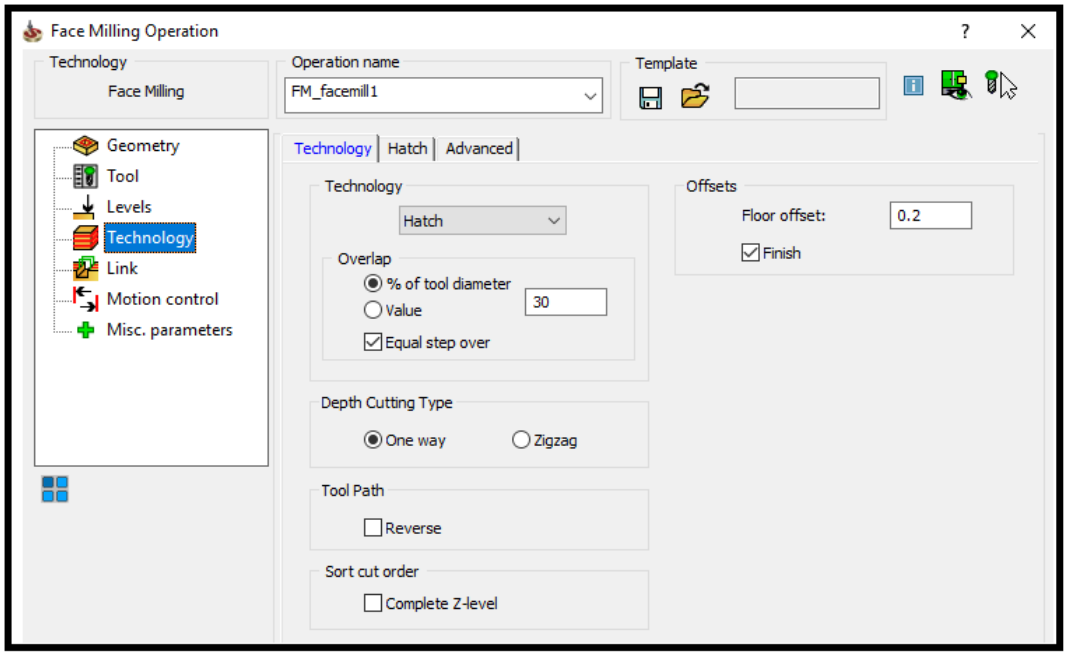
Εικόνα 60: *Δήλωση ταχύτητας περιστροφής ατράκτου και πρόωσης.*

Στην συνέχεια προχωράμε στην καρτέλα Levels όπου επιλέγουμε το ύψος στο οποίο θα ξεκινήσει και θα τελειώσει η κατεργασία. Με το upper level ορίζουμε το υψηλότερο σημείο ενώ με το face depth ορίζουμε το χαμηλότερο. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα μέσω του delta να προσθέσουμε σε αυτά τα όρια κάποια επιπλέον mm ανάλογα τις επιθυμητές ανάγκες. Ακόμα μπορούμε να ορίσουμε το σημείο στο οποίο θα επιστρέψει το κοπτικό εργαλείο μετά την κατεργασία με την επιλογή clearance level ενώ με το safety distance ορίζουμε την απόκλιση από την υψηλότερη τιμή ύψους όπου το εργαλείο θα κινείται με κοπτική κίνηση. Οι τιμές που επιλέχθηκαν σε αυτήν την καρτέλα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

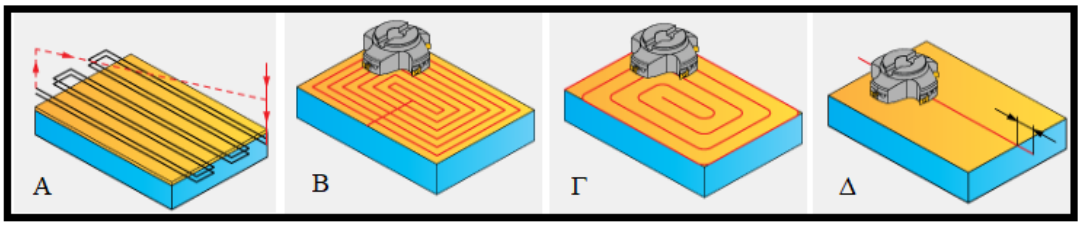


Εικόνα 61: *Η καρτέλα Levels του SolidCam.*

Στην καρτέλα Technology επιλέγουμε τον τρόπο με τον οποίο θα εκτελεί την κατεργασία το κοπτικό εργαλείο. Υπάρχουν τέσσερεις διαφορετικοί τρόποι επιλογής οι οποίοι είναι hatch, contour, one pass και spiral. Επίσης δίνεται η δυνατότητα να οριστεί το βάθος κοπής του φινιρίσματος. Οι τιμές που επιλέχθηκαν φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

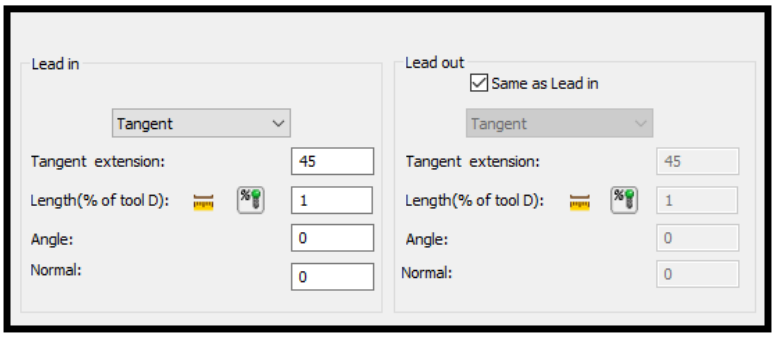


Εικόνα 62*: Η καρτέλα Technology του SolidCam.*



Εικόνα 63: *Κίνηση του κοπτικού εργαλείου πάνω στο τεμάχιο: Α) hatch, Β) contour, Γ) spiral, Δ) one pass.*

Με την βοήθεια της καρτέλας Link μπορούμε να ορίσουμε την τροχιά που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο κατά την είσοδο και έξοδο του στο κομμάτι. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής tangent ή arc τόσο για την είσοδο όσο και για την έξοδο. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι επιλογές που έγιναν για την συγκεκριμένη κατεργασία.



Εικόνα 64: *Η καρτέλα Link του SolidCam.*

Οι επόμενες δύο καρτέλες Motion control και Misc. parameters θα παραμείνουν ως έχει.

Αφού ολοκληρώθηκε ο καθορισμός της κατεργασίας, με το εικονίδιο γίνεται υπολογισμός και αποθήκευση της διαδικασίας, ενώ με το εικονίδιο μπορούμε να δούμε την προσομοίωση της κατεργασίας. Τέλος με το εικονίδιο επιστρέφουμε στο αρχικό μενού.

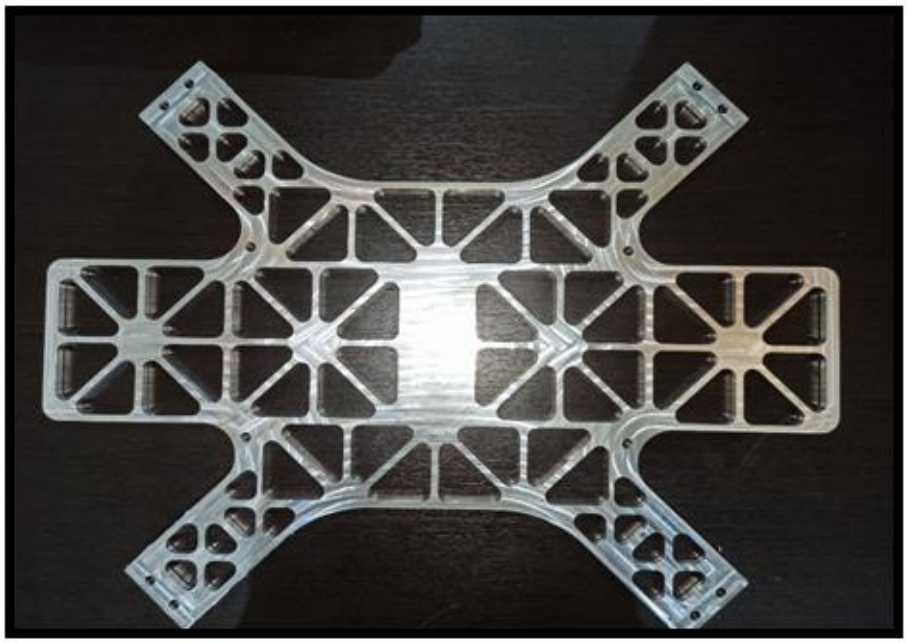
Στην συνέχεια με παρόμοιο τρόπο πραγματοποιήθηκε και το υπόλοιπο φασεολόγιο για την κατεργασία του βραχίονα με την σειρά και τις συνθήκες κοπής που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2. Μετά το πέρας του φασεολογίου επιλέγουμε από το δέντρο εργασιών του κομματιού με δεξί κλικ το operation, GCode all και τέλος generate και εμφανίζεται ο τελικός κώδικας ο οποίος παρουσιάζεται στο παράρτημα Β και είναι αυτός που μπορεί να διαβάσει η μηχανή. Το αρχείο αυτό αποθηκεύεται σε ένα usb και στην συνέχεια φορτώνεται στην μηχανή.

4.5 Παρουσίαση κατασκευασμένων εξαρτημάτων

Η κοπή αρχικά πραγματοποιήθηκε σε τεμάχια από φελιζόλ με σκοπό την πρόληψη από ενδεχόμενα σφάλματα που μπορεί να παρουσιάζονταν. Το συγκεκριμένο βήμα δεν ήταν απαραίτητο παρόλα αυτά αν και θυσιάστηκε επιπλέον χρόνος, εκ του αποτελέσματος κρίθηκε απαραίτητο βήμα καθώς προβλέφθηκαν αστοχίες που οφείλονταν τόσο στον προγραμματισμό του κάθε εξαρτήματος όσο και από τον λανθασμένο μηδενισμό των τεμαχίων και εργαλείων. Συνεπώς ο επιπλέον χρόνος που ξοδεύτηκε, εξοικονομήθηκε σε υλικό καθώς δεν δημιουργήθηκαν scrap τεμάχια αλουμινίου. Στις επόμενες παραγράφους, θα παρουσιαστούν τα τελικά τεμάχια σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

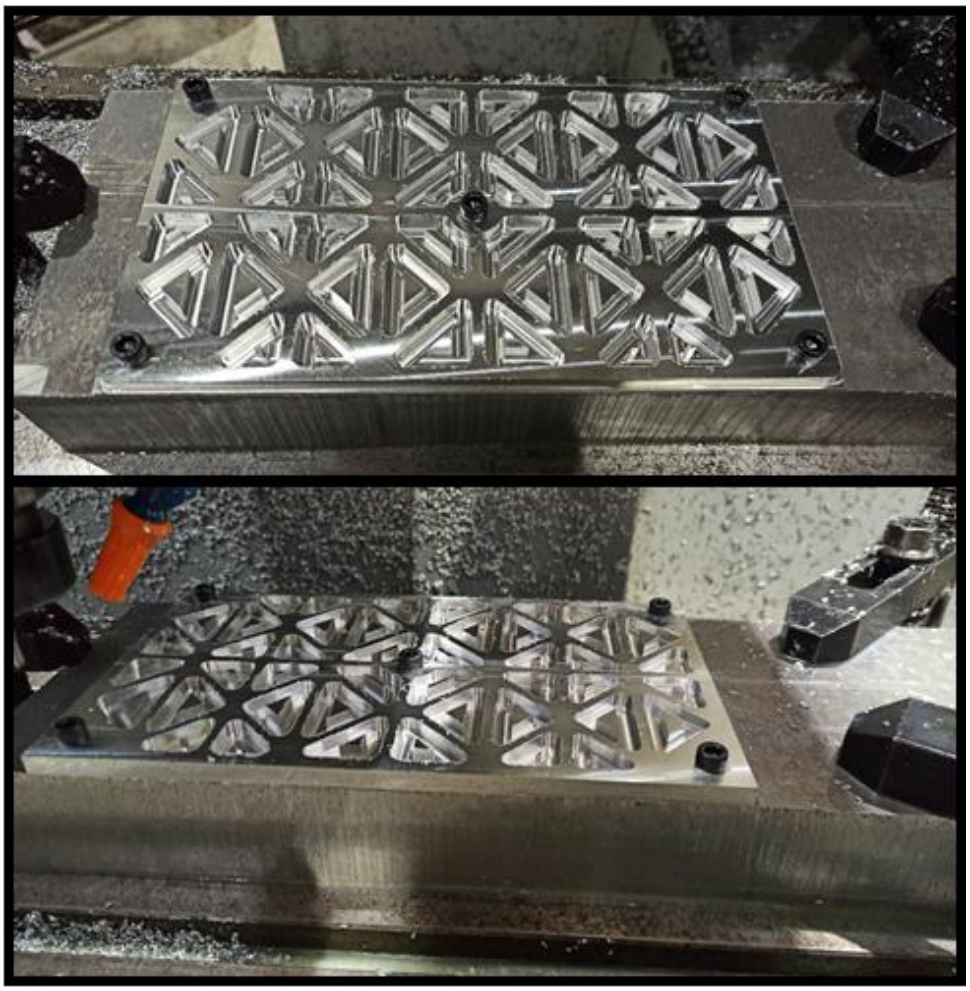
Βάση σκάφους

Εικόνα 65: *Διαδικασία κοπής βάσης σκάφους.*

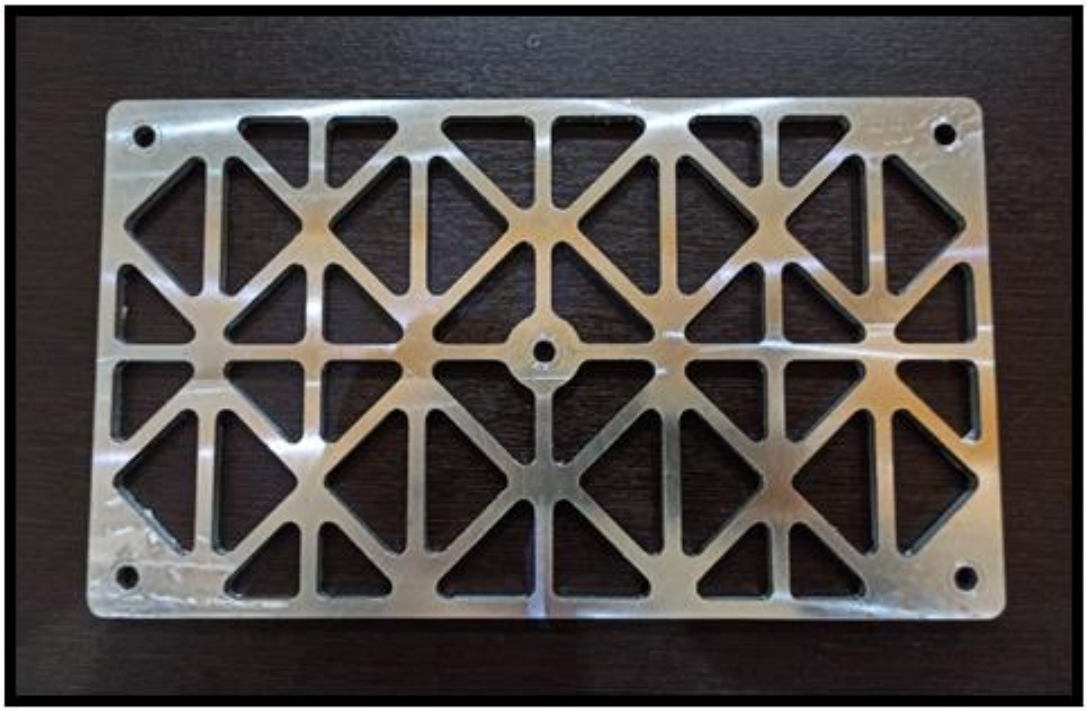


Εικόνα 66: *Τελικό τεμάχιο βάσης σκάφους.*

Οροφή σκάφους

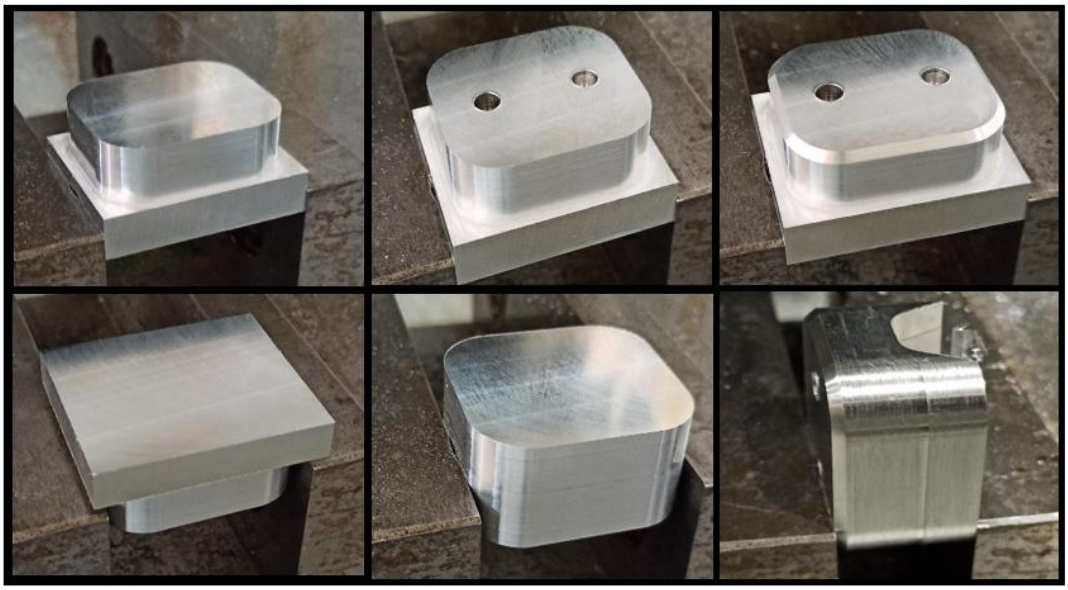


Εικόνα 67: *Διαδικασία κοπής οροφής σκάφους.*



Εικόνα 68: *Τελικό τεμάχιο οροφής σκάφους.*

Πέλμα σκάφους

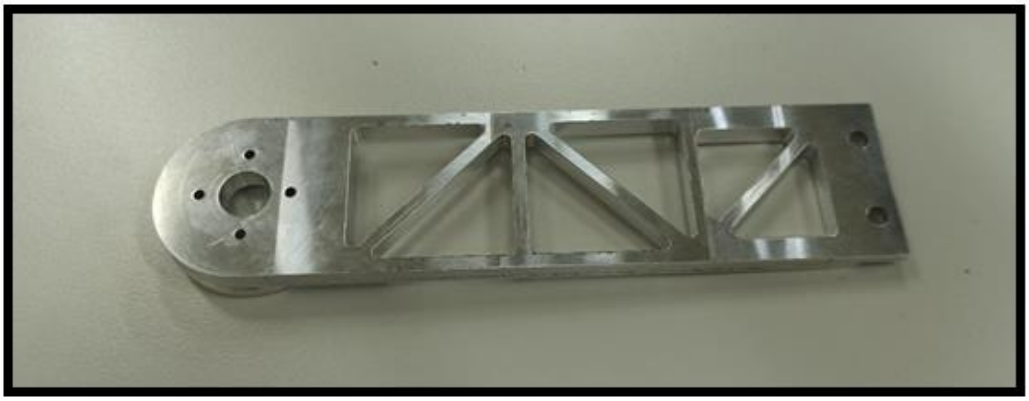


Εικόνα 69: *Διαδικασία κοπής πέλματος σκάφους.*

Εικόνα 70: *Τελικό τεμάχιο πέλματος σκάφους.*

Βραχίονας σκάφους

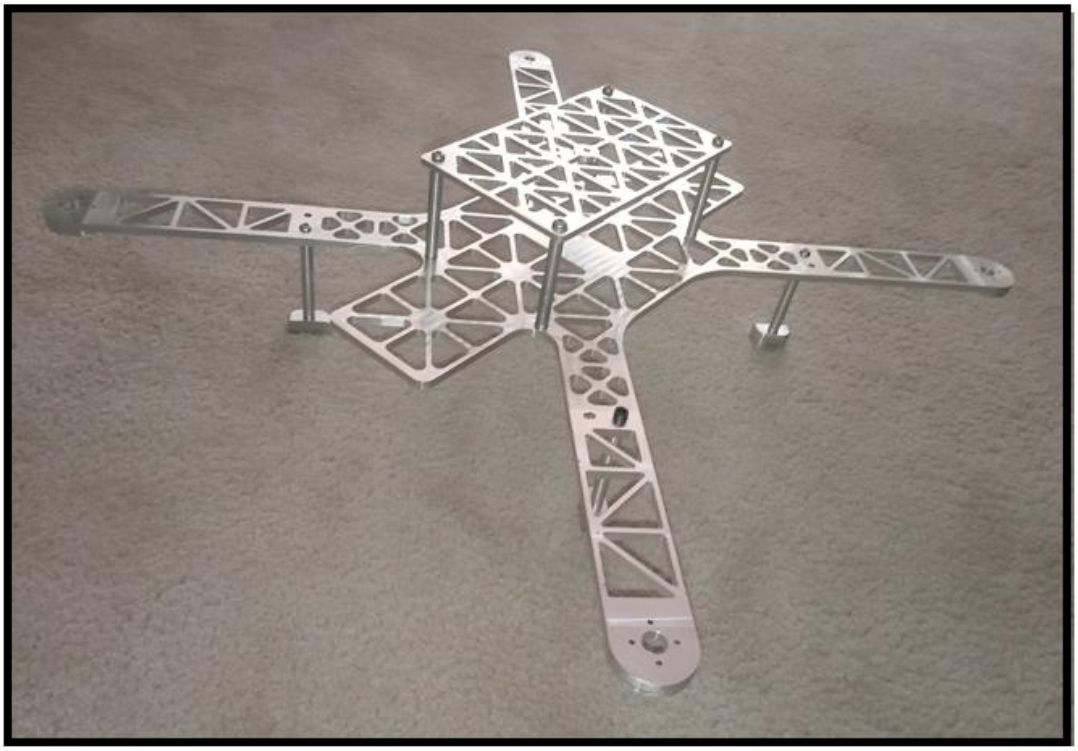
Εικόνα 71: *Διαδικασία κοπής βραχίονα σκάφους.*

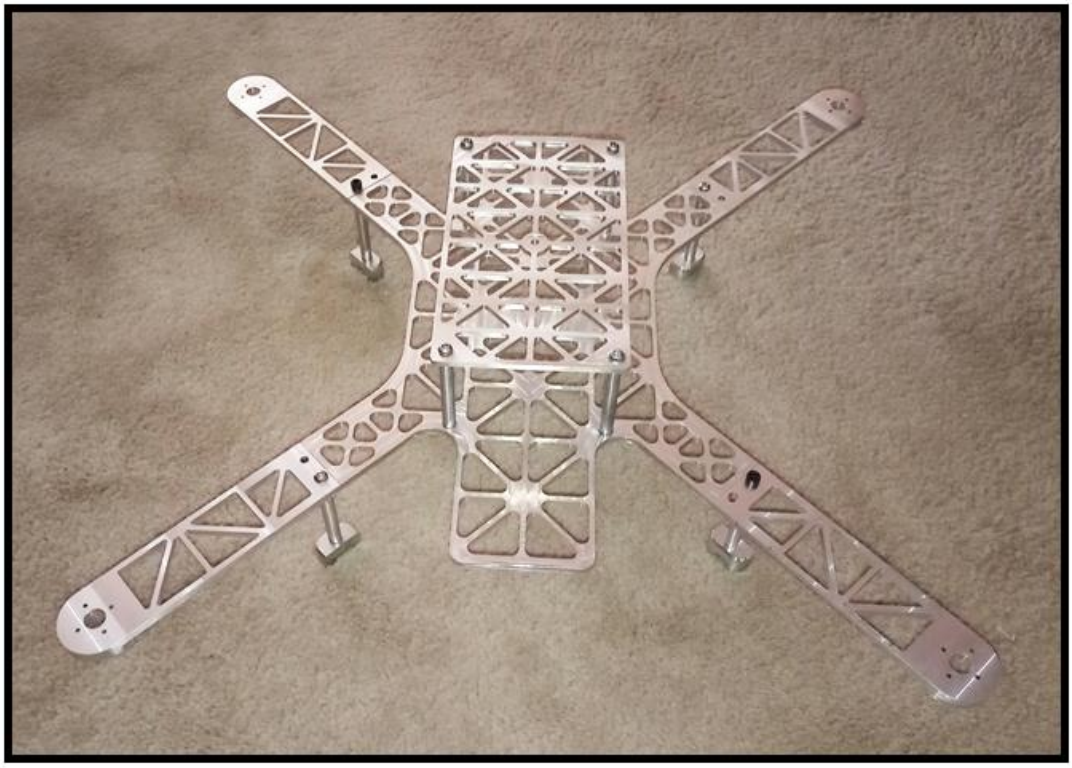


Εικόνα 72: *Τελικό τεμάχιο βραχίονα σκάφους.*

4.6 Συναρμολογημένο πλαίσιο drone

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται το συναρμολογημένο με κοχλίες πλαίσιο.





Εικόνα 73: *Συναρμολογημένο πλαίσιο.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να πραγματοποιηθεί σχεδιασμός και κατασκευή ενός τετρακόπτερου drone με σκοπό την χρήση του για μεταφορά υλικών και εξαρτημάτων σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών. Η προσέγγιση του σχεδιασμού έγινε με βάση τα δεδομένα που εξήχθησαν από την διπλωματική του Γ. Μαλτέζου μέσα από το περιβάλλον του eCalc.

5.1 Συμπεράσματα

Σαν μοναδικό δεδομένο από πλευράς σχεδιασμού τις εξωτερικές διαστάσεις και το βάρος που θα έπρεπε να είχε το drone, η αρχική προσέγγιση έγινε σχεδόν αυθαίρετα. Σημαντικά μεγέθη τα οποία βοήθησαν επίσης στον σχεδιασμό του, ήταν οι διαστάσεις των επιμέρους εξαρτημάτων (κινητήρες, μπαταρία κλπ) καθώς αυτά είχαν ήδη προεπιλεγεί. Η πρώτη δυσκολία που εμφανίστηκε ήταν στην διαμόρφωση γεωμετρίας και πάχους της κατασκευής η οποία θα έπρεπε να καλύπτει τις μηχανικές ανάγκες της εφαρμογής. Έτσι θα έπρεπε να βρεθεί βέλτιστη λύση από πλευράς κατασκευής ούτως ώστε να εξυπηρετείται κατά το μέγιστο βαθμό η χρήση για την οποία προορίζονταν το drone, δηλαδή μέγιστη δυνατή μεταφορά ωφέλιμου φορτίου.

Καθώς η χρήση των drone για την μεταφορά φορτίων είναι ακόμα περιορισμένη, η σχετική βιβλιογραφία που βρέθηκε ήταν αρκετά φτωχή και με ελλιπή δεδομένα. Συνεπώς θα έπρεπε να γίνουν αρκετές σχεδιαστικές προσεγγίσεις ούτως ώστε να καταλήξουμε στην τελική γεωμετρία που θα είχε το σκάφος. Επίσης το κριτήριο επιλογής γεωμετρίας μέχρι αυτό το βήμα ήταν μόνο η μη υπέρβαση του ορίου του βάρους του drone. Κάτι τέτοιο φυσικά δεν αποτελούσε ικανό κριτήριο ούτως ώστε να προχωρήσουμε στην κατασκευή καθώς δεν γνωρίζαμε εκ των προτέρων εάν πληρούσε ή όχι τα κριτήρια μηχανική αντοχής.

Επιπρόσθετα θα έπρεπε να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε να μπορεί η κατασκευή να πραγματοποιηθεί από πλευράς διαστάσεων στην διαθέσιμη τριαξονική φρέζα CNC στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Συνεπώς θα έπρεπε εκ των προτέρων να αποφασιστεί η διαίρεση της κατασκευής σε επιμέρους εξαρτήματα. Κάτι τέτοιο θεωρήθηκε πλεονέκτημα καθώς προέκυψε η δυνατότητα αντικατάστασης μελλοντικού ελαττωματικού εξαρτήματος έναντι αντικατάστασης ολόκληρης της

κατασκευής. Από την άλλη όμως θα έπρεπε να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις τοποθεσίες όπου θα προέκυπτε η διαίρεση των εξαρτημάτων καθώς αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μειωμένη αντοχή. Αυτό το σημείο ήταν κομβικό για την περάτωση της εργασίας και πολυπαραμετρικό. Σημαντικά εργαλεία κρίθηκαν η εξοικείωση με τον 3d σχεδιασμό, το θεωρητικό υπόβαθρο στην αντοχή των υλικών καθώς και η όποια εμπειρία σε παρόμοιες κατασκευές.

Εφόσον έγινε η πρώτη ικανοποιητική προσέγγιση της γεωμετρίας θα έπρεπε να γίνει μελέτη αντοχής. Το επόμενο πρόβλημα που δημιουργήθηκε ήταν η σωστή μοντελοποίηση της κατασκευής. Καθώς το drone αποτελείται από πληθώρα εξαρτημάτων δε θα μπορούσαμε να το προσεγγίσουμε σαν ένα γραμμικό μοντέλο. Από την άλλη η μη γραμμικότητα της κατασκευής καθιστούσε δύσκολη την έγκυρη μοντελοποίηση και ως εκ τούτου, την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων. Επίσης ένα εμπόδιο ήταν ο μεγάλος χρόνος περάτωσης που χρειάζονταν ο υπολογιστής για να μπορέσει να επεξεργαστεί τον τεράστιο όγκο δεδομένων. Με βάση την βιβλιογραφία που αναζητήθηκε για παρόμοιες κατασκευές η λύση που βρέθηκε ήταν η μοντελοποίηση μέρος της κατασκευής και όχι ολόκληρης με βάση το γεγονός ότι η κατασκευή ήταν συμμετρική. Σε αυτό το στάδιο η εξοικείωση με τέτοιου είδους αναλύσεις μπορεί να προσφέρει μειωμένο υπολογιστικό χρόνο ανάλυσης. Επίσης η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός δυνατού σε χαρακτηριστικά υπολογιστή αποτελεί πάντα μία καλή λύση.

Μία ακόμα παράμετρος που ήταν καθοριστική σε αυτό το στάδιο ήταν η ορθή επιλογή κράματος αλουμινίου σύμφωνα με τις ανάγκες της κατασκευής. Σε αυτή την απόφαση εκτός από τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες, κριτήριο επιλογής ήταν και το κόστος απόκτησης του υλικού καθώς αυτό θα καθόριζε ένα μέρος του συνολικού κόστους κατασκευής. Το κόστος της κατασκευής κρίνεται μείζων σημασίας καθώς αποτελεί σημαντικό κριτήριο ώστε να μπορέσει να γίνει ελκυστική η επιλογή του για τις βιομηχανίες. Συνεπώς η κατασκευή προσεγγίστηκε ως επί το πλείστον από την σκοπιά του μηχανικού όμως για να μπορέσει να επιβιώσει στον ανταγωνισμό θα πρέπει να ήταν και οικονομοτεχνική.

Έπειτα εφόσον καθορίστηκαν οι τελικές γεωμετρίες που θα είχαν τα εξαρτήματα που συντελούσαν την κατασκευή, σειρά είχε η επεξεργασία τους με το SolidCam και η εξαγωγή των G_code για την κοπής τους. Ένα πρόβλημα που εντοπίστηκε εκ των

υστέρων ήταν το γεγονός ότι το πάχος των stock τεμαχίων το οποίο επιλέχθηκε αρχικά ήταν οριακό. Το παραπάνω δημιούργησε στην συνέχεια δυσκολίες κατά την κατεργασία των τεμαχίων τόσο στην συγκράτηση αυτών στη μέγγενη, όσο και στην εμφάνιση ταλαντώσεων οι οποίες δημιουργούσαν με την σειρά τους αστοχίες στην διαστασιακή ακρίβεια των τελικών τεμαχίων αλλά και στην επιφάνειά τους. Απόρροια των παραπάνω ήταν η ανάγκη χρήσης μίας αναλώσιμης πλάκας ώστε να βιδωθούν τα τεμάχια με τι οριακές διαστάσεις πάνω σε αυτή και να πραγματοποιηθεί η κατεργασία τους.

5.2 Μελλοντική εργασία

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να παραθέσω ορισμένες συστάσεις για ενδεχόμενες μελλοντικές βελτιώσεις της κατασκευής. Αρχικά όπως αναφέρθηκε σε πολλά σημεία της εργασίας, η ελαχιστοποίηση της μάζας είναι μείζων σημασίας καθώς συνδέεται άμεσα με την ικανότητα μεταφοράς ωφέλιμου φορτίου. Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε με κράμα αλουμινίου 7075 και το συνολικό βάρος του πλαισίου έφτασε περίπου τα 2 kg. Μία εναλλακτική λύση από πλευράς υλικού θα ήταν να κατασκευαστεί από ανθρακόνημα ώστε να έχει χαμηλότερο βάρος. Από την άλλη θα πρέπει να γίνει αντίστοιχη μελέτη στο κόστος αυτού καθώς θα είναι αυξημένο σε σχέση με την λύση που προτάθηκε στην εν λόγω διπλωματική.

Ένα άλλο κομμάτι που θα πρέπει να δοθεί προσοχή είναι ο σχεδιασμός της αρπάγης. Καταρχάς θα πρέπει να μην τραυματίζει τα αντικείμενα κατά την πρόσδεση και μεταφορά τους και να τα συγκρατεί με επάρκεια αποφεύγοντας την αποκόλλησή τους η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει τόσο σε καταστροφή τους όσο και σε ύπαρξη τραυματισμού με κάποιον άνθρωπο. Επίσης θα πρέπει να έχει όσο το δυνατότερο μικρότερη μάζα έτσι ώστε να μην αυξηθεί κατά πολύ το συνολικό βάρος της κατασκευής.

Τέλος από πλευράς κατασκευής η κοπή των εξαρτημάτων τα οποία έχουν την μορφή πλακών δηλαδή η οροφή και η βάση του σκάφους, θα ήταν συμφέροντες από άποψη κόστους και χρόνου να πραγματοποιούνταν με λέιζερ.

Βιβλιογραφία

[1] M. Deja, S. Mieczysław, Siemiątkowski, G.-C. Vosniakos and g. Maltezos, "Opportunities and challenges for exploiting drones in agile manufacturing systems," *Procedia Manufacturing,* vol. 51, pp. 527-534, 2020.

[2] Γ.Μαλτέζος, «Μεταφορά υλικών σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών με drone: μελέτη καταλληλότητας πρωτοτύπου,» *Διπλωματική εργασία,* 2020.

[3] A. Martinetti, M. Margaryan and L. van Dong, "Simulating mechanical stress on a micro Unmanned Aerial Vehicle (UAV) body frame for selecting maintenance actions,," *Procedia Manufacturing,* vol. 16, pp. 61-66, 2018.

[4] P. Sharma and A. Selvakumar, "Conceptual Design and Non-Linear Analysis of Triphibian Drone," *Procedia Computer Science,* vol. 133, pp. 448-455, 2018.

[5] E. Kuantama, D. Craciun and R. Tarca, "Quadcopter Body Frame Model and Analysis, Annals of The University of Oradea," *Fascicle of Management and Technological Engineering,* vol. 25, no. 1, pp. 71-74, 2016.

[6] M. Anudeep, G. Diwakar and R. Katukam, "Design of A Quad Copter and Fabrication," *International Journal of Innovations in Engineering and,* vol. 4, pp. 59-65, 2014.

[7] P. Wei, Z. Jian Yang and Q. Wang, "The Design of Quadcopter Frame Based on Finite Element Analysis, 3rd International Conference on Mechatronics," *Robotics and Automation,* pp. 1353-1356, 2015.

[8] A. Balachandran, D. Karelia and J. Challa, "Material selection for Unmanned Aerial Vehicle," *International journal of Mechanical Engineering and Technology,* vol. 5, pp. 34-40, 2014.

[9] A. V. Javir, P. Ketan, D. Santosh and P. Nitin, "Design, Analysis and Fabrication of QuadCopter for Emergency Medical Services using GPS," *Journal of The International Association of Advanced Technology and Science,* vol. 16, pp. 65-68, 2015.

[10] K. N. Shah, B. J. Dutt and H. Modh, "Quadrotor – An Unmanned Aerial Vehicle," *IJEDR,* vol. 2, no. 1, pp. 1299-1303, 2014.

[11] R. Nallappan, C. H. Maxim and P. B. Kumar, "Design and Analysis of Quadcopter," *ICSSCCET,* vol. 2, pp. 248-252, 2016.

[12] S. K. Phang, K. Li, K. H. Yu , B. M. Chen and T. H. Lee, "Systematic Design and Implementation of a Micro Unmanned Quad rotor System," *World Scientific Publishing Company,* vol. 2, no. 2, pp. 121-141, 2014.

[13] R. F. Alphonso, A. P. Irawan and F. J. Daywin, "Design and Development of Quadcopter Prototype," *2nd International Conference on Engineering of Tarumanagara,* pp. ME-18/1-18/7, 2015.

[14] S. Kumar and R. K. Sankaralingam, "Design and control implementation of Quadcopter," *International Journal of Mechanical and Production Engineering,* vol. 4, pp. 69-72, 2016.

[15] Γ. Παπαδόπουλος, «Μηχανική των θραύσεων,» Κλειδάριθμος, 2015, pp. 15-31.

[16] W. D. Callister, Materials Science and Engineering, An introduction, USA: John Wiley & Sons, 1999, pp. 151-183.

[17] S. Rajasekaran, N. Udayashankar and J. Nayak, "T4 and T6 Treatment of 6061 Al-15 Vol.% SiCp Composite," *ISRN Materials Science,* 2018.

[18] K. E. Öksüz, H. Bağirov, M. Şimşir, C. Karpuzoğlu, A. Özbölük, Y. Z. Demirhan and H. U. Bilgin, "Investigation of mechanical properties and microstructure of AA2024 and AA7075," *Appl. Mech. Mater.,* vol. 390, pp. 547-551, 2013.

[19] W. Safeen, S. Hussain, A. Wasim, M. Jahanzaib, H. Aziz and H. Abdalla, "Predicting the tensile strength, impact toughness and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.,* vol. 87, pp. 1765-1781, 2016.

[20] G. M. Reddy, P. Mastanaiah, C. S. Murthy, M. Thondapi and N. Viswanathan, "Microstructure, residual stress distribution and mechanical properties of friction-stir AA 6061 aluminium alloy weldments," *Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation,* 2006.

[21] MIL-HDBK-60, «Threaded Fasteners - Tightening to Proper Tension,» 1990, pp. 4-12.

[22] G. Owens and B. Cheal, "Structural steelwork connections," Butterworths, 1989, pp. 27-41.

[23] R. Budynas and J. Nisbett, Shigley's mechanical engineering design., McGraw Hill ed., 2014, pp. 410-451.

[24] S. Yıldırım, N. Çabuk and V. Bakırcıog, "Design and Trajectory Control of Universal Drone System," *Measurement,* vol. 147, 2019.

[25] He Zhu, Hong Nie, Limao Zhang, Xiaohui Wei and Ming Zhang, "Design and assessment of octocopter drones with improved aerodynamic efficiency and performance," *Aerospace Science and Technology,* vol. 106, 2020.

[26] Α. Θ. Αντωνιάδης, Μηχανουργική Τεχνολογία, 3 επιμ., Τζιόλα, 2018.

[27] S. Rawangwong, J. Chatthong, W. Boonchouytan and R. Burapa, "Influence of Cutting Parameters in Face Milling Semi-solid AA 7075 Using Carbide Tool Affected the Surface Roughness and Tool Wear," *Energy Procedia,* vol. 56, pp. 448-457, 2014.

[28] T. Mahesh and R. Rajesh, "Optimal Selection of Process Parameters in CNC End Milling of Al 7075-T6 Aluminium Alloy Using a Taguchi-fuzzy Approach," *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 2493-2502, 2014.

[29] E. Bahçe and B. Özdemir, "Investigation of the burr formation during the drilling of free-form surfaces in al 7075 alloy," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4198-4208, 2019.

[30] Α. Κριμπένης, Σημειώσεις εργαστηριακού μαθήματος Εργαλειομηχανές CNC, 2018.

[31] «https://www.yg1.kr».

[32] "https://www.secotools.com".

Παράρτημα

Α. Προδιαγραφές εργαλείων

YG HSS END MILLS

E2570 SERIES FLAT SHANK SEITLICHE MITNAHMEFLÄCHEN

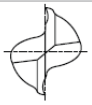
EQ570 SERIES FLAT SHANK SEITLICHE MITNAHMEFLÄCHEN

HSSCo8, 2 FLUTE SHORT LENGTH

HSSCo8, 2 SCHNEIDEN KURZ

Fraise HSSCo8, 2 dents, courte

2 TAGLIENTI, SERIE CORTA - HSSCo8

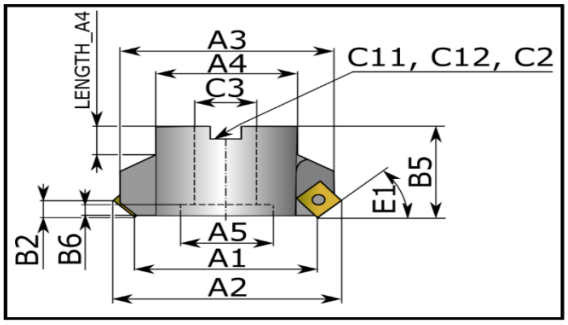


HSS Co8 | DIN 327 | N | 2 | ≈30° | DIN 1835B

P.1447-1448

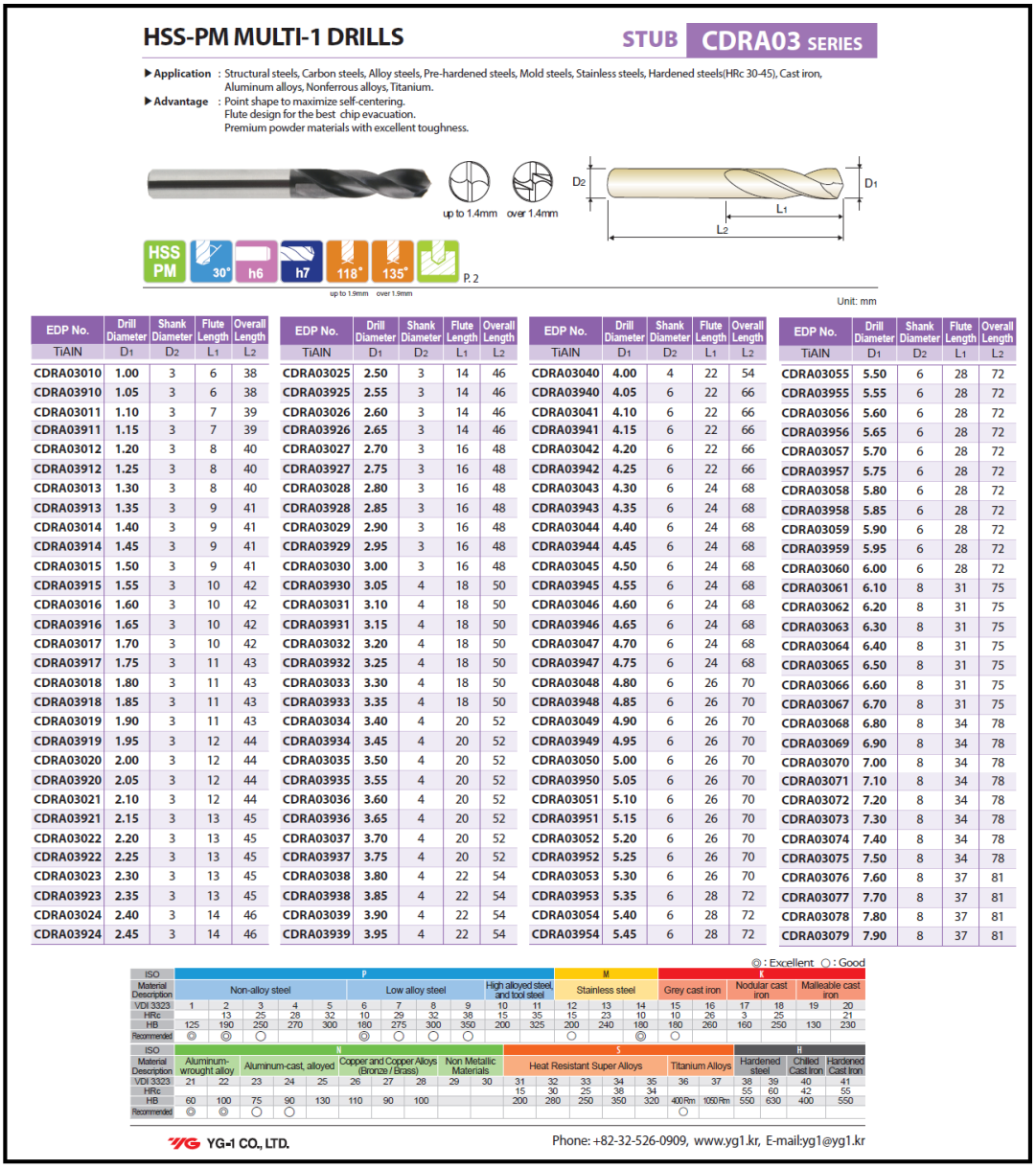
EDP No.		Mill Diameter	Shank Diameter	Length of Cut	Overall Length
UNCOATED	TiAlN	e8	h6		
E2570010	EQ570010	1.0	6	2.5	47
E2570015	EQ570015	1.5	6	3	47
E2570020	EQ570020	2.0	6	4	48
E2570025	EQ570025	2.5	6	5	49
E2570028	EQ570028	2.8	6	5	49
E2570030	EQ570030	3.0	6	5	49
E2570035	EQ570035	3.5	6	6	50
E2570038	EQ570038	3.8	6	7	51
E2570040	EQ570040	4.0	6	7	51
E2570045	EQ570045	4.5	6	7	51
E2570048	EQ570048	4.8	6	8	52
E2570050	EQ570050	5.0	6	8	52
E2570055	EQ570055	5.5	6	8	52
E2570957	EQ570957	5.75	6	8	52
E2570060	EQ570060	6.0	6	8	52
E2570065	EQ570065	6.5	10	10	60
E2570967	EQ570967	6.75	10	10	60
E2570070	EQ570070	7.0	10	10	60
E2570075	EQ570075	7.5	10	10	60
E2570977	EQ570977	7.75	10	11	61
E2570080	EQ570080	8.0	10	11	61
E2570085	EQ570085	8.5	10	11	61
E2570087	EQ570087	8.7	10	11	61
E2570090	EQ570090	9.0	10	11	61
E2570095	EQ570095	9.5	10	11	61
E2570097	EQ570097	9.7	10	13	63
E2570100	EQ570100	10.0	10	13	63

Εικόνα 74: Χαρακτηριστικά για τα κονδύλια YG, Φ4 και Φ10 αντίστοιχα [31].



Geometric data		
	Description	**Value**
J20	Order ID 2	75011301
J21	Article number	R220.13-0080-12
J3	Company code	SO - SECO Tools
NSM	Standard number of properties layout	DIN4000-88
BLD	Tool style code	1
A1	Cutting diameter	80 mm
A1A	Cutting edge angle major, Pos. A	90 Degree
A2	Cutting diameter maximum	94 mm
A2A	Clearance angle major, Pos. A	20 Degree
B1A	Cutting edge length, Pos. A	12.7 mm
B2	Cutting depth maximum	6 mm
B3A	Inscribed circle diameter, Pos. A	12.7 mm
BLDA	Tool style code Position A	2
C11	Connection code type machine side	FDA
C12	Connection code form at machine side	22
C14	Connection code unit base machine side	0 - Metric
C1A	Insert thickness, Pos. A	3.175 mm
C2	Connection size code machine side	0270
C3	Connection diameter machine side	27 mm
D1A	Corner radius, Pos. A	0.8 mm
D6	Rotational speed maximum	7600 1/min
D7	Weight of item	1.042 kg
E1	Tool cutting edge angle	45 Degree
E2	Rake angle radial	20 Degree
E3	Rake angle axial	-3 Degree
F1	Cutting direction	R - Right
F21	Peripheral effective cutting edge count	6
F22	Face effective cutting edge count	6
G13	Face mounted insert count	6
G4A	Insert width pos. A	3.175

Εικόνα 75: *Χαρακτηριστικά φρεζοκεφαλής SECO 80mm [32].*



HSS-PM MULTI-1 DRILLS

STUB CDRA03 SERIES

▶ **Application** : Structural steels, Carbon steels, Alloy steels, Pre-hardened steels, Mold steels, Stainless steels, Hardened steels(HRc 30-45), Cast iron, Aluminum alloys, Nonferrous alloys, Titanium.

▶ **Advantage** : Point shape to maximize self-centering.
Flute design for the best chip evacuation.
Premium powder materials with excellent toughness.

up to 1.4mm over 1.4mm

D2 D1 L1 L2

HSS PM | 30° | h6 | h7 | 118° | 135° | P. 2

up to 1.9mm over 1.9mm

Unit: mm

EDP No.	Drill Diameter	Shank Diameter	Flute Length	Overall Length
TiAlN	D1	D2	L1	L2
CDRA03010	1.00	3	6	38
CDRA03910	1.05	3	6	38
CDRA03011	1.10	3	7	39
CDRA03911	1.15	3	7	39
CDRA03012	1.20	3	8	40
CDRA03912	1.25	3	8	40
CDRA03013	1.30	3	8	40
CDRA03913	1.35	3	9	41
CDRA03014	1.40	3	9	41
CDRA03914	1.45	3	9	41
CDRA03015	1.50	3	9	41
CDRA03915	1.55	3	10	42
CDRA03016	1.60	3	10	42
CDRA03916	1.65	3	10	42
CDRA03017	1.70	3	10	42
CDRA03917	1.75	3	11	43
CDRA03018	1.80	3	11	43
CDRA03918	1.85	3	11	43
CDRA03019	1.90	3	11	43
CDRA03919	1.95	3	12	44
CDRA03020	2.00	3	12	44
CDRA03920	2.05	3	12	44
CDRA03021	2.10	3	12	44
CDRA03921	2.15	3	13	45
CDRA03022	2.20	3	13	45
CDRA03922	2.25	3	13	45
CDRA03023	2.30	3	13	45
CDRA03923	2.35	3	13	45
CDRA03024	2.40	3	14	46
CDRA03924	2.45	3	14	46
CDRA03025	2.50	3	14	46
CDRA03925	2.55	3	14	46
CDRA03026	2.60	3	14	46
CDRA03926	2.65	3	14	46
CDRA03027	2.70	3	16	48
CDRA03927	2.75	3	16	48
CDRA03028	2.80	3	16	48
CDRA03928	2.85	3	16	48
CDRA03029	2.90	3	16	48
CDRA03929	2.95	3	16	48
CDRA03030	3.00	3	16	48
CDRA03930	3.05	4	18	50
CDRA03031	3.10	4	18	50
CDRA03931	3.15	4	18	50
CDRA03032	3.20	4	18	50
CDRA03932	3.25	4	18	50
CDRA03033	3.30	4	18	50
CDRA03933	3.35	4	18	50
CDRA03034	3.40	4	20	52
CDRA03934	3.45	4	20	52
CDRA03035	3.50	4	20	52
CDRA03935	3.55	4	20	52
CDRA03036	3.60	4	20	52
CDRA03936	3.65	4	20	52
CDRA03037	3.70	4	20	52
CDRA03937	3.75	4	20	52
CDRA03038	3.80	4	22	54
CDRA03938	3.85	4	22	54
CDRA03039	3.90	4	22	54
CDRA03939	3.95	4	22	54
CDRA03040	4.00	4	22	54
CDRA03940	4.05	6	22	66
CDRA03041	4.10	6	22	66
CDRA03941	4.15	6	22	66
CDRA03042	4.20	6	22	66
CDRA03942	4.25	6	22	66
CDRA03043	4.30	6	24	68
CDRA03943	4.35	6	24	68
CDRA03044	4.40	6	24	68
CDRA03944	4.45	6	24	68
CDRA03045	4.50	6	24	68
CDRA03945	4.55	6	24	68
CDRA03046	4.60	6	24	68
CDRA03946	4.65	6	24	68
CDRA03047	4.70	6	24	68
CDRA03947	4.75	6	24	68
CDRA03048	4.80	6	26	70
CDRA03948	4.85	6	26	70
CDRA03049	4.90	6	26	70
CDRA03949	4.95	6	26	70
CDRA03050	5.00	6	26	70
CDRA03950	5.05	6	26	70
CDRA03051	5.10	6	26	70
CDRA03951	5.15	6	26	70
CDRA03052	5.20	6	26	70
CDRA03952	5.25	6	26	70
CDRA03053	5.30	6	26	70
CDRA03953	5.35	6	28	72
CDRA03054	5.40	6	28	72
CDRA03954	5.45	6	28	72
CDRA03055	5.50	6	28	72
CDRA03955	5.55	6	28	72
CDRA03056	5.60	6	28	72
CDRA03956	5.65	6	28	72
CDRA03057	5.70	6	28	72
CDRA03957	5.75	6	28	72
CDRA03058	5.80	6	28	72
CDRA03958	5.85	6	28	72
CDRA03059	5.90	6	28	72
CDRA03959	5.95	6	28	72
CDRA03060	6.00	6	28	72
CDRA03061	6.10	8	31	75
CDRA03062	6.20	8	31	75
CDRA03063	6.30	8	31	75
CDRA03064	6.40	8	31	75
CDRA03065	6.50	8	31	75
CDRA03066	6.60	8	31	75
CDRA03067	6.70	8	31	75
CDRA03068	6.80	8	34	78
CDRA03069	6.90	8	34	78
CDRA03070	7.00	8	34	78
CDRA03071	7.10	8	34	78
CDRA03072	7.20	8	34	78
CDRA03073	7.30	8	34	78
CDRA03074	7.40	8	34	78
CDRA03075	7.50	8	34	78
CDRA03076	7.60	8	37	81
CDRA03077	7.70	8	37	81
CDRA03078	7.80	8	37	81
CDRA03079	7.90	8	37	81

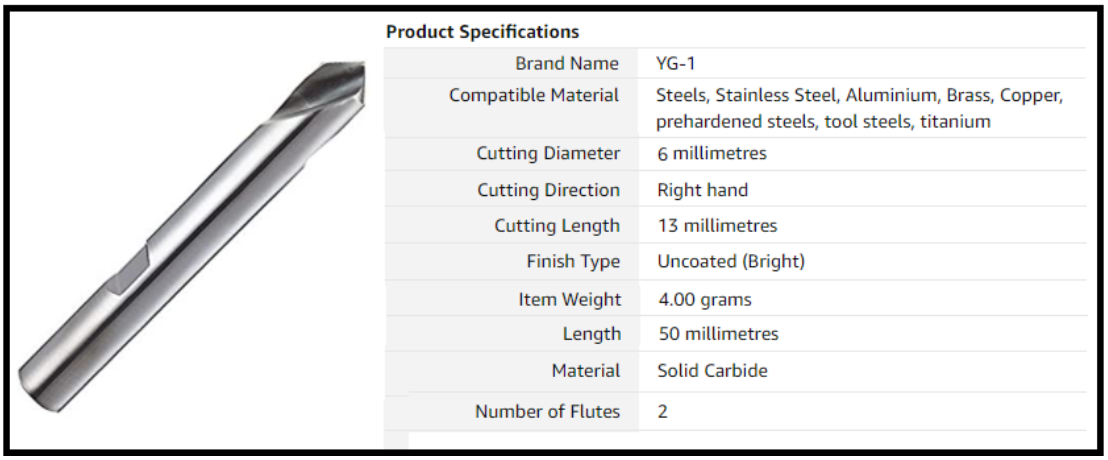
◎ : Excellent ○ : Good

ISO	P													M		K				
Material Description	Non-alloy steel					Low alloy steel				High alloyed steel, and tool steel		Stainless steel			Grey cast iron		Nodular cast iron		Malleable cast iron	
VDI 3323	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
HRc		13	25	28	32	10	29	32	38	15	35	15	23	10	10	26	3	25		21
HB	125	190	250	270	300	180	275	300	350	200	325	200	240	160	180	260	160	250	130	230
Recommended	◎	◎	○			◎	○	○	○			○		◎	○					

ISO	N										S							H		
Material Description	Aluminum-wrought alloy		Aluminum-cast, alloyed			Copper and Copper Alloys (Bronze / Brass)			Non Metallic Materials		Heat Resistant Super Alloys					Titanium Alloys		Hardened steel	Chilled Cast Iron	Hardened Cast Iron
VDI 3323	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
HRc											15	30	25	38	34			55	60	42	55
HB	60	100	75	90	130	110	90	100			200	280	250	350	320	400 Rm	1050 Rm	550	630	400	550
Recommended	◎	◎	○	○												○					

YG-1 CO., LTD. Phone: +82-32-526-0909, www.yg1.kr, E-mail:yg1@yg1.kr

Εικόνα 76: *Χαρακτηριστικά τρυπανιών YG, 3, 5 και 6mm.*



Product Specifications

Brand Name	YG-1
Compatible Material	Steels, Stainless Steel, Aluminium, Brass, Copper, prehardened steels, tool steels, titanium
Cutting Diameter	6 millimetres
Cutting Direction	Right hand
Cutting Length	13 millimetres
Finish Type	Uncoated (Bright)
Item Weight	4.00 grams
Length	50 millimetres
Material	Solid Carbide
Number of Flutes	2

Εικόνα 77*: Κεντροτρύπανο chamfer.*

B. G_Code βραχίονα σκάφους

```
%
O1000 (VRAXIONAS2)
N100 (COMPENSATION-WEAR)
N102 (REV-0.70)
N104 (FEB-14-2022-7:58:28PM)
N106 (TOOL 4 - TRYPANI D6)
N108 (TOOL 6 - TRYPANI D3)
N110 (TOOL 1 - FREZOKEFALI)
N112 (TOOL 2 - KONDYLI D4)
N114 (TOOL 3 - KONDLI D10)
N1 G90 G17 G40 G80 G00
N116 M06 T4 ()
N118 T6
N120 (D-drill)
N122 G00 G54 G90 X18. Y204. S2500
M03
N124 G43 H4 Z118.
N126 Z23.
N128 G98 G83 X18. Y204. Z-8.803
R2. Q2. F90.
N130 X38.
N132 G80
N134 M05
N136 M01
N2 G90 G17 G40 G80 G00
N138 M06 T6 ()
N140 T1
N142 (D-drill1)
N144 G00 G54 G90 X15.5 Y27.5
S3000 M03
N146 G43 H6 Z118.
N148 Z23.
N150 G98 G83 X15.5 Y27.5 Z-10.901
R2. Q2. F60.
N152 X28. Y15.
N154 X40.5 Y27.5
N156 X28. Y40.
N158 G80
N160 M05
N162 M01
N3 G90 G17 G40 G80 G00
N164 M06 T1 ()
N166 T2
N168 (FM-facemill1)
N170 G00 G54 G90 X-65. Y194.4
S1500 M03
N172 G43 H1 Z118.
N174 Z23.
N176 Z2.
N178 G01 Z-0.9 F270.
N180 X104. F450.
N182 Y135.8 F900.
N184 X-48. F450.
N186 Y77.2 F900.
N188 X104. F450.
N190 Y18.6 F900.
N192 X-65. F450.
N194 G00 Z23.
N196 Y194.4
N198 Z1.1
N200 G01 Z-1.8 F270.
N202 X104. F450.
N204 Y135.8 F900.
N206 X-48. F450.
N208 Y77.2 F900.
N210 X104. F450.
N212 Y18.6 F900.
N214 X-65. F450.
N216 S2000
N218 G00 Z23.
N220 Y194.4
N222 Z0.2
N224 G01 Z-2. F270.
N226 X104. F360.
N228 Y135.8 F720.
N230 X-48. F360.
N232 Y77.2 F720.
N234 X104. F360.
N236 Y18.6 F720.
N238 X-65. F360.
N240 G00 Z23.
N242 M05
N244 M01
N4 G90 G17 G40 G80 G00
N246 M06 T2 ()
N248 T3
N250 (F-contour1)
N252 G00 G54 G90 X42.856 Y58.125
S3000 M03
N254 G43 H2 Z118.
N256 Z23.
N258 Z0.
N260 G01 Z-2.971 F180.
N262 G41 D2 X42.856 Y58.125 F126.
N264 X9.196 Y91.786
N266 Y58.125
N268 X42.856
N270 G40 Y58.126
N272 G00 Z23.
N274 X42.856 Y58.125
N276 Z-0.971
N278 G01 Z-3.943 F180.
N280 G41 D2 X42.856 Y58.125 F126.
N282 X9.196 Y91.786
N284 Y58.125
N286 X42.856
N288 G40 Y58.126
N290 G00 Z23.
N292 X42.856 Y58.125
N294 Z-1.943
N296 G01 Z-4.914 F180.
N298 G41 D2 X42.856 Y58.125 F126.
N300 X9.196 Y91.786
N302 Y58.125
N304 X42.856
N306 G40 Y58.126
N308 G00 Z23.
N310 X42.856 Y58.125
N312 Z-2.914
N314 G01 Z-5.886 F180.
N316 G41 D2 X42.856 Y58.125 F126.
N318 X9.196 Y91.786
N320 Y58.125
N322 X42.856
N324 G40 Y58.126
N326 G00 Z23.
N328 X42.856 Y58.125
N330 Z-3.886
N332 G01 Z-6.857 F180.
N334 G41 D2 X42.856 Y58.125 F126.
N336 X9.196 Y91.786
N338 Y58.125
N340 X42.856
N342 G40 Y58.126
N344 G00 Z23.
N346 X42.856 Y58.125
N348 Z-4.857
N350 G01 Z-7.829 F180.
N352 G41 D2 X42.856 Y58.125 F126.
N354 X9.196 Y91.786
N356 Y58.125
N358 X42.856
N360 G40 Y58.126
N362 G00 Z23.
N364 X42.856 Y58.125
N366 Z-5.829
N368 G01 Z-8.8 F180.
N370 G41 D2 X42.856 Y58.125 F126.
N372 X9.196 Y91.786
N374 Y58.125
N376 X42.856
N378 G40 Y58.126
N380 G00 Z23.
N382 X43.321 Y57.942
N384 Z0.
N386 G01 Z-9. F180.
N388 G41 D2 X43.322 Y57.943 F140.
N390 X8.996 Y92.269
N392 Y57.925
N394 X43.339
N396 X36.958 Y64.306
N398 G03 X36.11 Y64.306 I-0.424 J-
0.424
N400 G01 G40 X36.534 Y63.882
N402 G00 Z23.
N404 X46.795 Y66.065
N406 Z0.
N408 G01 Z-2.971 F180.
N410 G41 D2 X46.796 F126.
N412 Y99.725
N414 X13.136
N416 X46.796 Y66.065
N418 G40 X46.797 Y66.066
N420 G00 Z23.
N422 X46.795 Y66.065
N424 Z-0.971
N426 G01 Z-3.943 F180.
N428 G41 D2 X46.796 F126.
N430 Y99.725
N432 X13.136
N434 X46.796 Y66.065
N436 G40 X46.797 Y66.066
N438 G00 Z23.
N440 X46.795 Y66.065
N442 Z-1.943
N444 G01 Z-4.914 F180.
N446 G41 D2 X46.796 F126.
N448 Y99.725
N450 X13.136
N452 X46.796 Y66.065
N454 G40 X46.797 Y66.066
N456 G00 Z23.
N458 X46.795 Y66.065
N460 Z-2.914
N462 G01 Z-5.886 F180.
N464 G41 D2 X46.796 F126.
N466 Y99.725
N468 X13.136
N470 X46.796 Y66.065
N472 G40 X46.797 Y66.066
N474 G00 Z23.
N476 X46.795 Y66.065
N478 Z-3.886
N480 G01 Z-6.857 F180.
N482 G41 D2 X46.796 F126.
N484 Y99.725
N486 X13.136
N488 X46.796 Y66.065
N490 G40 X46.797 Y66.066
N492 G00 Z23.
N494 X46.795 Y66.065
N496 Z-4.857
N498 G01 Z-7.829 F180.
N500 G41 D2 X46.796 F126.
N502 Y99.725
N504 X13.136
N506 X46.796 Y66.065
N508 G40 X46.797 Y66.066
N510 G00 Z23.
N512 X46.795 Y66.065
N514 Z-5.829
N516 G01 Z-8.8 F180.
N518 G41 D2 X46.796 F126.
N520 Y99.725
N522 X13.136
N524 X46.796 Y66.065
N526 G40 X46.797 Y66.066
N528 G00 Z23.
N530 X46.995 Y65.606
N532 Z0.
N534 G01 Z-9. F180.
N536 G41 D2 X46.996 F140.
N538 Y99.925
N540 X12.653
N542 X46.996 Y65.582
N544 Y74.606
N546 G03 X46.396 Y75.206 I-0.6 J0.
N548 G01 G40 Y74.606
N550 G00 Z23.
N552 X46.795 Y108.125
N554 Z0.
N556 G01 Z-2.971 F180.
N558 G41 D2 X46.796 F126.
N560 Y141.786
N562 X13.136 Y108.125
N564 X46.796
N566 G40 Y108.126
N568 G00 Z23.
N570 X46.795 Y108.125
N572 Z-0.971
N574 G01 Z-3.943 F180.
N576 G41 D2 X46.796 F126.
N578 Y141.786
N580 X13.136 Y108.125
N582 X46.796
N584 G40 Y108.126
N586 G00 Z23.
N588 X46.795 Y108.125
N590 Z-1.943
N592 G01 Z-4.914 F180.
N594 G41 D2 X46.796 F126.
N596 Y141.786
N598 X13.136 Y108.125
N600 X46.796
N602 G40 Y108.126
N604 G00 Z23.
N606 X46.795 Y108.125
N608 Z-2.914
N610 G01 Z-5.886 F180.
N612 G41 D2 X46.796 F126.
N614 Y141.786
N616 X13.136 Y108.125
N618 X46.796
N620 G40 Y108.126
N622 G00 Z23.
N624 X46.795 Y108.125
N626 Z-3.886
N628 G01 Z-6.857 F180.
N630 G41 D2 X46.796 F126.
N632 Y141.786
N634 X13.136 Y108.125
N636 X46.796
N638 G40 Y108.126
N640 G00 Z23.
N642 X46.795 Y108.125
N644 Z-4.857
N646 G01 Z-7.829 F180.
N648 G41 D2 X46.796 F126.
N650 Y141.786
N652 X13.136 Y108.125
N654 X46.796
N656 G40 Y108.126
N658 G00 Z23.
N660 X46.795 Y108.125
N662 Z-5.829
N664 G01 Z-8.8 F180.
N666 G41 D2 X46.796 F126.
N668 Y141.786
N670 X13.136 Y108.125
N672 X46.796
N674 G40 Y108.126
N676 G00 Z23.
N678 X46.995 Y107.935
N680 Z0.
N682 G01 Z-9. F180.
N684 G41 D2 X46.996 F140.
N686 Y142.268
N688 X12.653 Y107.925
N690 X46.996
N692 Y116.935
N694 G03 X46.396 Y117.535 I-0.6 J0.
N696 G01 G40 Y116.935
N698 G00 Z23.
N700 X42.856 Y149.724
N702 Z0.
N704 G01 Z-2.971 F180.
N706 G41 D2 Y149.725 F126.
N708 X9.196
N710 Y116.065
N712 X42.856 Y149.725
N714 G40 X42.856 Y149.726
N716 G00 Z23.
N718 X42.856 Y149.724
N720 Z-0.971
N722 G01 Z-3.943 F180.
N724 G41 D2 Y149.725 F126.
N726 X9.196
N728 Y116.065
N730 X42.856 Y149.725
N732 G40 X42.856 Y149.726
N734 G00 Z23.
N736 X42.856 Y149.724
N738 Z-1.943
N740 G01 Z-4.914 F180.
N742 G41 D2 Y149.725 F126.
N744 X9.196
N746 Y116.065
N748 X42.856 Y149.725
N750 G40 X42.856 Y149.726
N752 G00 Z23.
N754 X42.856 Y149.724
N756 Z-2.914
N758 G01 Z-5.886 F180.
N760 G41 D2 Y149.725 F126.
N762 X9.196
N764 Y116.065
N766 X42.856 Y149.725
N768 G40 X42.856 Y149.726
N770 G00 Z23.
N772 X42.856 Y149.724
N774 Z-3.886
N776 G01 Z-6.857 F180.
N778 G41 D2 Y149.725 F126.
N780 X9.196
N782 Y116.065
N784 X42.856 Y149.725
```

```
N786 G40 X42.856 Y149.726
N788 G00 Z23.
N790 X42.856 Y149.724
N792 Z-4.857
N794 G01 Z-7.829 F180.
N796 G41 D2 Y149.725 F126.
N798 X9.196
N800 Y116.065
N802 X42.856 Y149.725
N804 G40 X42.856 Y149.726
N806 G00 Z23.
N808 X42.856 Y149.724
N810 Z-5.829
N812 G01 Z-8.8 F180.
N814 G41 D2 Y149.725 F126.
N816 X9.196
N818 Y116.065
N820 X42.856 Y149.725
N822 G40 X42.856 Y149.726
N824 G00 Z23.
N826 X43.315 Y149.924
N828 Z0.
N830 G01 Z-9. F180.
N832 G41 D2 Y149.925 F140.
N834 X8.996
N836 Y115.582
N838 X43.339 Y149.925
N840 X34.315
N842 G03 X33.715 Y149.325 I0. J-0.6
N844 G01 G40 X34.315
N846 G00 Z23.
N848 X13.313 Y158.126
N850 Z0.
N852 G01 Z-2.971 F180.
N854 G41 D2 Y158.125 F126.
N856 X38.028
N858 X13.313 Y182.84
N860 Y158.125
N862 G40 X13.314
N864 G00 Z23.
N866 X13.313 Y158.126
N868 Z-0.971
N870 G01 Z-3.943 F180.
N872 G41 D2 Y158.125 F126.
N874 X38.028
N876 X13.313 Y182.84
N878 Y158.125
N880 G40 X13.314
N882 G00 Z23.
N884 X13.313 Y158.126
N886 Z-1.943
N888 G01 Z-4.914 F180.
N890 G41 D2 Y158.125 F126.
N892 X38.028
N894 X13.313 Y182.84
N896 Y158.125
N898 G40 X13.314
N900 G00 Z23.
N902 X13.313 Y158.126
N904 Z-2.914
N906 G01 Z-5.886 F180.
N908 G41 D2 Y158.125 F126.
N910 X38.028
N912 X13.313 Y182.84
N914 Y158.125
N916 G40 X13.314
N918 G00 Z23.
N920 X13.313 Y158.126
N922 Z-3.886
N924 G01 Z-6.857 F180.
N926 G41 D2 Y158.125 F126.
N928 X38.028
N930 X13.313 Y182.84
N932 Y158.125
N934 G40 X13.314
N936 G00 Z23.
N938 X13.313 Y158.126
N940 Z-4.857
N942 G01 Z-7.829 F180.
N944 G41 D2 Y158.125 F126.
N946 X38.028
N948 X13.313 Y182.84
N950 Y158.125
N952 G40 X13.314
N954 G00 Z23.
N956 X13.313 Y158.126
N958 Z-5.829
N960 G01 Z-8.8 F180.
N962 G41 D2 Y158.125 F126.
N964 X38.028
N966 X13.313 Y182.84
N968 Y158.125
N970 G40 X13.314
N972 G00 Z23.
N974 X13.123 Y157.926
N976 Z0.
N978 G01 Z-9. F180.
N980 G41 D2 Y157.925 F140.
N982 X38.511
N984 X13.113 Y183.323
N986 Y157.925
N988 X22.123
N990 G03 X22.723 Y158.525 I0. J0.6
N992 G01 G40 X22.123
N994 G00 Z23.
N996 X43.967 Y164.065
N998 Z0.
N1000 G01 Z-2.971 F180.
N1002 G41 D2 X43.968 F126.
N1004 Y188.78
N1006 X19.253
N1008 X43.968 Y164.065
N1010 G40 X43.968 Y164.066
N1012 G00 Z23.
N1014 X43.967 Y164.065
N1016 Z-0.971
N1018 G01 Z-3.943 F180.
N1020 G41 D2 X43.968 F126.
N1022 Y188.78
N1024 X19.253
N1026 X43.968 Y164.065
N1028 G40 X43.968 Y164.066
N1030 G00 Z23.
N1032 X43.967 Y164.065
N1034 Z-1.943
N1036 G01 Z-4.914 F180.
N1038 G41 D2 X43.968 F126.
N1040 Y188.78
N1042 X19.253
N1044 X43.968 Y164.065
N1046 G40 X43.968 Y164.066
N1048 G00 Z23.
N1050 X43.967 Y164.065
N1052 Z-2.914
N1054 G01 Z-5.886 F180.
N1056 G41 D2 X43.968 F126.
N1058 Y188.78
N1060 X19.253
N1062 X43.968 Y164.065
N1064 G40 X43.968 Y164.066
N1066 G00 Z23.
N1068 X43.967 Y164.065
N1070 Z-3.886
N1072 G01 Z-6.857 F180.
N1074 G41 D2 X43.968 F126.
N1076 Y188.78
N1078 X19.253
N1080 X43.968 Y164.065
N1082 G40 X43.968 Y164.066
N1084 G00 Z23.
N1086 X43.967 Y164.065
N1088 Z-4.857
N1090 G01 Z-7.829 F180.
N1092 G41 D2 X43.968 F126.
N1094 Y188.78
N1096 X19.253
N1098 X43.968 Y164.065
N1100 G40 X43.968 Y164.066
N1102 G00 Z23.
N1104 X43.967 Y164.065
N1106 Z-5.829
N1108 G01 Z-8.8 F180.
N1110 G41 D2 X43.968 F126.
N1112 Y188.78
N1114 X19.253
N1116 X43.968 Y164.065
N1118 G40 X43.968 Y164.066
N1120 G00 Z23.
N1122 X44.167 Y163.606
N1124 Z0.
N1126 G01 Z-9. F180.
N1128 G41 D2 X44.168 F140.
N1130 Y188.98
N1132 X18.77
N1134 X44.168 Y163.582
N1136 Y172.606
N1138 G03 X43.568 Y173.206 I-0.6
J0.
N1140 G01 G40 Y172.606
N1142 G00 Z23.
N1144 X28. Y32.299
N1146 Z0.
N1148 G01 Z-2.971 F180.
N1150 G41 D2 Y32.3 F126.
N1152 G03 X28. Y32.3 I0. J-4.8
N1154 G01 G40 Y32.299
N1156 Z-3.943 F180.
N1158 G41 D2 Y32.3 F126.
N1160 G03 X28. Y32.3 I0. J-4.8
N1162 G01 G40 Y32.299
N1164 Z-4.914 F180.
N1166 G41 D2 Y32.3 F126.
N1168 G03 X28. Y32.3 I0. J-4.8
N1170 G01 G40 Y32.299
N1172 Z-5.886 F180.
N1174 G41 D2 Y32.3 F126.
N1176 G03 X28. Y32.3 I0. J-4.8
N1178 G01 G40 Y32.299
N1180 Z-6.857 F180.
N1182 G41 D2 Y32.3 F126.
N1184 G03 X28. Y32.3 I0. J-4.8
N1186 G01 G40 Y32.299
N1188 Z-7.829 F180.
N1190 G41 D2 Y32.3 F126.
N1192 G03 X28. Y32.3 I0. J-4.8
N1194 G01 G40 Y32.299
N1196 Z-8.8 F180.
N1198 G41 D2 Y32.3 F126.
N1200 G03 X28. Y32.3 I0. J-4.8
N1202 G01 G40 Y32.299
N1204 G00 Z23.
N1206 Y32.499
N1208 Z0.
N1210 G01 Z-9. F180.
N1212 G41 D2 Y32.5 F140.
N1214 G03 X28. Y32.5 I0. J-5.
N1216 G01 G40 Y32.499
N1218 G00 Z23.
N1220 M05
N1222 M01

N5 G90 G17 G40 G80 G00
N1224 M06 T3 ()
N1226 T1
N1228 (F-contour2)
N1230 G00 G54 G90 X-3.2 Y18.5
S3000 M03
N1232 G43 H3 Z118.
N1234 Z23.
N1236 Z0.
N1238 G01 Z-2.983 F270.
N1240 G41 D3 Y17.5 F330.
N1242 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1244 G01 Y210.7
N1246 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1248 G01 X53.2
N1250 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1252 G01 Y27.5
N1254 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1256 G01 Y36.5
N1258 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1260 G01 G40 Y36.5
N1262 G00 Z23.
N1264 Y18.5
N1266 Z-0.983
N1268 G01 Z-3.967 F270.
N1270 G41 D3 Y17.5 F330.
N1272 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1274 G01 Y210.7
N1276 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1278 G01 X53.2
N1280 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1282 G01 Y27.5
N1284 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1286 G01 Y36.5
N1288 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1290 G01 G40 Y36.5
N1292 G00 Z23.
N1294 Y18.5
N1296 Z-1.967
N1298 G01 Z-4.95 F270.
N1300 G41 D3 Y17.5 F330.
N1302 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1304 G01 Y210.7
N1306 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1308 G01 X53.2
N1310 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1312 G01 Y27.5
N1314 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1316 G01 Y36.5
N1318 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1320 G01 G40 Y36.5
N1322 G00 Z23.
N1324 Y18.5
N1326 Z-2.95
N1328 G01 Z-5.933 F270.
N1330 G41 D3 Y17.5 F330.
N1332 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1334 G01 Y210.7
N1336 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1338 G01 X53.2
N1340 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1342 G01 Y27.5
N1344 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1346 G01 Y36.5
N1348 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1350 G01 G40 Y36.5
N1352 G00 Z23.
N1354 Y18.5
N1356 Z-3.933
N1358 G01 Z-6.917 F270.
N1360 G41 D3 Y17.5 F330.
N1362 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1364 G01 Y210.7
N1366 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1368 G01 X53.2
N1370 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1372 G01 Y27.5
N1374 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1376 G01 Y36.5
N1378 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1380 G01 G40 Y36.5
N1382 G00 Z23.
N1384 Y18.5
N1386 Z-4.917
N1388 G01 Z-7.9 F270.
N1390 G41 D3 Y17.5 F330.
N1392 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1394 G01 Y210.7
N1396 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1398 G01 X53.2
N1400 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1402 G01 Y27.5
N1404 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1406 G01 Y36.5
N1408 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1410 G01 G40 Y36.5
N1412 G00 Z23.
N1414 Y18.5
N1416 Z-5.9
N1418 G01 Z-8.883 F270.
N1420 G41 D3 Y17.5 F330.
N1422 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1424 G01 Y210.7
N1426 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1428 G01 X53.2
N1430 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1432 G01 Y27.5
N1434 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1436 G01 Y36.5
N1438 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1440 G01 G40 Y36.5
N1442 G00 Z23.
N1444 Y18.5
N1446 Z-6.883
N1448 G01 Z-9.867 F270.
N1450 G41 D3 Y17.5 F330.
N1452 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1454 G01 Y210.7
N1456 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1458 G01 X53.2
N1460 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1462 G01 Y27.5
N1464 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1466 G01 Y36.5
N1468 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1470 G01 G40 Y36.5
N1472 G00 Z23.
N1474 Y18.5
N1476 Z-7.867
N1478 G01 Z-10.85 F270.
N1480 G41 D3 Y17.5 F330.
N1482 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1484 G01 Y210.7
N1486 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1488 G01 X53.2
```

N1490 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1492 G01 Y27.5
N1494 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1496 G01 Y36.5
N1498 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1500 G01 G40 Y36.5
N1502 G00 Z23.
N1504 Y18.5
N1506 Z-8.85
N1508 G01 Z-11.833 F270.
N1510 G41 D3 Y17.5 F330.
N1512 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1514 G01 Y210.7
N1516 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1518 G01 X53.2
N1520 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1522 G01 Y27.5
N1524 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1526 G01 Y36.5
N1528 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1530 G01 G40 Y36.5
N1532 G00 Z23.
N1534 Y18.5
N1536 Z-9.833
N1538 G01 Z-12.817 F270.
N1540 G41 D3 Y17.5 F330.
N1542 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1544 G01 Y210.7
N1546 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1548 G01 X53.2
N1550 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1552 G01 Y27.5
N1554 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1556 G01 Y36.5
N1558 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1560 G01 G40 Y36.5
N1562 G00 Z23.
N1564 Y18.5
N1566 Z-10.817
N1568 G01 Z-13.8 F270.
N1570 G41 D3 Y17.5 F330.
N1572 G03 X-2.2 Y18.5 I0. J1.
N1574 G01 Y210.7
N1576 G02 X2.8 Y215.7 I5. J-0.
N1578 G01 X53.2
N1580 G02 X58.2 Y210.7 I0. J-5.
N1582 G01 Y27.5
N1584 G02 X-2.2 Y27.5 I-30.2 J0.
N1586 G01 Y36.5
N1588 G03 X-3.2 Y37.5 I-1. J0.
N1590 G01 G40 Y36.5
N1592 G00 Z23.
N1594 Y18.5
N1596 Z0.
N1598 G01 Z-14. F270.
N1600 G41 D3 Y17.3 F366.
N1602 G03 X-2. Y18.5 I0. J1.2
N1604 G01 Y215.5
N1606 X58.
N1608 Y27.5
N1610 G02 X-2. Y27.5 I-30. J0.
N1612 G01 Y36.5
N1614 G03 X-3.2 Y37.7 I-1.2 J0.
N1616 G01 G40 Y36.5
N1618 G00 Z23.
N1620 M05
N1622 M01
N6 G90 G17 G40 G80 G00
N1624 M06 T1 ()
N1626 T3
N1628 (FM-facemill2)
N1630 G00 G54 G90 X-65. Y194.4 S1500 M03
N1632 G43 H1 Z118.
N1634 Z23.
N1636 Z2.
N1638 G01 Z-0.96 F270.
N1640 X104. F450.
N1642 Y135.8 F900.
N1644 X-48. F450.
N1646 Y77.2 F900.
N1648 X104. F450.
N1650 Y18.6 F900.
N1652 X-65. F450.
N1654 G00 Z23.
N1656 Y194.4
N1658 Z1.04
N1660 G01 Z-1.92 F270.
N1662 X104. F450.
N1664 Y135.8 F900.
N1666 X-48. F450.
N1668 Y77.2 F900.
N1670 X104. F450.
N1672 Y18.6 F900.
N1674 X-65. F450.
N1676 G00 Z23.
N1678 Y194.4
N1680 Z0.08
N1682 G01 Z-2.88 F270.
N1684 X104. F450.
N1686 Y135.8 F900.
N1688 X-48. F450.
N1690 Y77.2 F900.
N1692 X104. F450.
N1694 Y18.6 F900.
N1696 X-65. F450.
N1698 G00 Z23.
N1700 Y194.4
N1702 Z-0.88
N1704 G01 Z-3.84 F270.
N1706 X104. F450.
N1708 Y135.8 F900.
N1710 X-48. F450.
N1712 Y77.2 F900.
N1714 X104. F450.
N1716 Y18.6 F900.
N1718 X-65. F450.
N1720 G00 Z23.
N1722 Y194.4
N1724 Z-1.84
N1726 G01 Z-4.8 F270.
N1728 X104. F450.
N1730 Y135.8 F900.
N1732 X-48. F450.
N1734 Y77.2 F900.
N1736 X104. F450.
N1738 Y18.6 F900.
N1740 X-65. F450.
N1744 G00 Z23.
N1746 Y194.4
N1748 Z-2.8
N1750 G01 Z-5. F270.
N1752 X104. F360.
N1754 Y135.8 F720.
N1756 X-48. F360.
N1758 Y77.2 F720.
N1760 X104. F360.
N1762 Y18.6 F720.
N1764 X-65. F360.
N1766 G00 Z23.
N1768 M05
N1770 M01

N7 G90 G17 G40 G80 G00
N1772 M06 T3 ()
N1774 (F-contour4)
N1776 G00 G54 G90 X19. Y-3.7 S3000 M03
N1778 G43 H3 Z118.
N1780 Z23.
N1782 Z-3.
N1784 G01 Z-5.96 F270.
N1786 G42 D3 X18. F330.
N1788 G02 X19. Y-2.7 I1. J0.
N1790 G01 X28.
N1792 G03 X28. Y-2.7 I0. J30.2
N1794 G01 X37.
N1796 G02 X38. Y-3.7 I0. J-1.
N1798 G01 G40 X37.
N1800 G00 Z23.
N1802 X19.
N1804 Z-3.96
N1806 G01 Z-6.92 F270.
N1808 G42 D3 X18. F330.
N1810 G02 X19. Y-2.7 I1. J0.
N1812 G01 X28.
N1814 G03 X28. Y-2.7 I0. J30.2
N1816 G01 X37.
N1818 G02 X38. Y-3.7 I0. J-1.
N1820 G01 G40 X37.
N1822 G00 Z23.
N1824 X19.
N1826 Z-4.92
N1828 G01 Z-7.88 F270.
N1830 G42 D3 X18. F330.
N1832 G02 X19. Y-2.7 I1. J0.
N1834 G01 X28.
N1834 G01 X28.
N1836 G03 X28. Y-2.7 I0. J30.2
N1838 G01 X37.
N1840 G02 X38. Y-3.7 I0. J-1.
N1842 G01 G40 X37.
N1844 G00 Z23.
N1846 X19.
N1848 Z-5.88
N1850 G01 Z-8.84 F270.
N1852 G42 D3 X18. F330.
N1854 G02 X19. Y-2.7 I1. J0.
N1856 G01 X28.
N1858 G03 X28. Y-2.7 I0. J30.2
N1860 G01 X37.
N1862 G02 X38. Y-3.7 I0. J-1.
N1864 G01 G40 X37.
N1866 G00 Z23.
N1868 X19.
N1870 Z-6.84
N1872 G01 Z-9.8 F270.
N1874 G42 D3 X18. F330.
N1876 G02 X19. Y-2.7 I1. J0.
N1878 G01 X28.
N1880 G03 X28. Y-2.7 I0. J30.2
N1882 G01 X37.
N1884 G02 X38. Y-3.7 I0. J-1.
N1886 G01 G40 X37.
N1888 G00 Z23.
N1890 X19.
N1892 Z-3.
N1894 G01 Z-10. F270.
N1896 G42 D3 X17.8 F366.
N1898 G02 X19. Y-2.5 I1.2 J0.
N1900 G01 X28.
N1902 G03 X28. Y-2.5 I0. J30.
N1904 G01 X37.
N1906 G02 X38.2 Y-3.7 I0. J-1.2
N1908 G01 G40 X37.
N1910 G00 Z23.
N1912 (P-contour5)
N1916 Z23.
N1918 Z-3.
N1920 G01 Z-5.96 F270.
N1922 G03 X36.8 Y27.5 I0. J8.8 F330.
N1924 G01 X31.8
N1926 G03 X31.8 Y27.5 I-3.8 J0.
N1928 G01 X36.8
N1930 G03 X28. Y18.7 I-8.8 J0.
N1932 G01 Y9.7
N1934 G03 X28. Y9.7 I0. J17.8
N1936 G01 Y9.5
N1938 G03 X28. Y9.5 I0. J18. F366.
N1940 G00 Z23.
N1942 Y18.7
N1944 Z-3.96
N1946 G01 Z-6.92 F270.
N1948 G03 X36.8 Y27.5 I0. J8.8 F330.
N1950 G01 X31.8
N1952 G03 X31.8 Y27.5 I-3.8 J0.
N1954 G01 X36.8
N1956 G03 X28. Y18.7 I-8.8 J0.
N1958 G01 Y9.7
N1960 G03 X28. Y9.7 I0. J17.8
N1962 G01 Y9.5
N1964 G03 X28. Y9.5 I0. J18. F366.
N1966 G00 Z23.
N1968 Y18.7
N1970 Z-4.92
N1972 G01 Z-7.88 F270.
N1974 G03 X36.8 Y27.5 I0. J8.8 F330.
N1976 G01 X31.8
N1978 G03 X31.8 Y27.5 I-3.8 J0.
N1980 G01 X36.8
N1982 G03 X28. Y18.7 I-8.8 J0.
N1984 G01 Y9.7
N1986 G03 X28. Y9.7 I0. J17.8
N1988 G01 Y9.5
N1990 G03 X28. Y9.5 I0. J18. F366.
N1992 G00 Z23.
N1994 Y18.7
N1996 Z-5.88
N1998 G01 Z-8.84 F270.
N2000 G03 X36.8 Y27.5 I0. J8.8 F330.
N2002 G01 X31.8
N2004 G03 X31.8 Y27.5 I-3.8 J0.
N2006 G01 X36.8
N2008 G03 X28. Y18.7 I-8.8 J0.
N2010 G01 Y9.7
N2012 G03 X28. Y9.7 I0. J17.8
N2012 G03 X28. Y9.7 I0. J17.8
N2014 G01 Y9.5
N2016 G03 X28. Y9.5 I0. J18. F366.
N2018 G00 Z23.
N2020 Y18.7
N2022 Z-6.84
N2024 G01 Z-9.8 F270.
N2026 G03 X36.8 Y27.5 I0. J8.8 F330.
N2028 G01 X31.8
N2030 G03 X31.8 Y27.5 I-3.8 J0.
N2032 G01 X36.8
N2034 G03 X28. Y18.7 I-8.8 J0.
N2036 G01 Y9.7
N2038 G03 X28. Y9.7 I0. J17.8
N2040 G01 Y9.5
N2042 G03 X28. Y9.5 I0. J18. F366.
N2044 G00 Z23.
N2046 Y18.7
N2048 Z-7.8
N2050 G01 Z-10. F270.
N2052 G03 X36.8 Y27.5 I0. J8.8 F366.
N2054 G01 X31.8
N2056 G03 X31.8 Y27.5 I-3.8 J0.
N2058 G01 X36.8
N2060 G03 X28. Y18.7 I-8.8 J0.
N2062 G01 Y9.7
N2064 G03 X28. Y9.7 I0. J17.8
N2066 G01 Y9.5
N2068 G03 X28. Y9.5 I0. J18.
N2070 G00 Z23.
N2072 Y185.3
N2074 Z-3.
N2076 G01 Z-5.96 F270.
N2078 X26.2 F330.
N2080 X23.2 Y189.3
N2082 X22.2
N2084 Y188.3
N2086 G02 X23.2 Y189.3 I4. J-3.
N2088 G01 X26.2 Y185.3
N2090 Y75.666
48.166
N2094 G01 Y185.3
N2096 X33.8 Y188.3
N2098 Y189.3
N2100 X32.8
N2102 G02 X33.8 Y188.3 I-3. J-4.
N2104 G01 X29.8 Y185.3
N2106 X28.
N2108 Y194.3
N2110 X17.2
N2112 X14.2 Y198.3
N2114 X13.2
N2116 Y197.3
N2118 G02 X14.2 Y198.3 I4. J-3.
N2120 G01 X17.2 Y194.3
N2122 Y65.183
N2124 G02 X22.856 Y66.361 I10.8 J-37.683
N2126 G01 X22.2 Y71.318
N2128 G02 X23.484 Y71.469 I5.8 J-43.818
N2130 X22.2 Y72.666 I2.716 J4.198
N2132 G01 Y71.318
N2134 X22.856 Y66.361
N2136 G02 X33.144 Y66.361 I5.144 J-38.861
N2138 G01 X33.8 Y71.318
N2140 Y72.666
N2142 G02 X32.516 Y71.469 I-4. J3.
N2144 X33.8 Y71.318 I-4.516 J-43.969
N2146 G01 X33.144 Y66.361
N2148 G02 X38.8 Y65.183 I-5.144 J-38.861
N2150 G01 Y194.3
N2152 X28.
N2154 Y203.3
N2156 X8.2
N2158 Y62.183
N2160 X13.2
N2162 Y59.437
N2164 G02 X15.603 Y60.445 I14.8 J-31.937
N2166 X13.2 Y62.183 I1.597 J4.738
N2168 G01 X8.2
N2170 Y50.304
N2172 G02 X47.8 Y50.304 I19.8 J-22.804
N2174 G01 Y62.183

N2176 X42.8
N2178 G02 X40.397 Y60.445 I-4. J3.
N2180 X42.8 Y59.437 I-12.397 J-32.945
N2182 G01 Y62.183
N2184 X47.8
N2186 Y197.3
N2188 X42.8
N2190 Y198.3
N2192 X41.8
N2194 G02 X42.8 Y197.3 I-3. J-4.
N2196 G01 X47.8
N2198 Y203.3
N2200 X28.
N2202 X8. Y203.5
N2204 Y49.861 F366.
N2206 G02 X48. Y49.861 I20. J-22.361
N2208 G01 Y203.5
N2210 G00 Z23.
N2212 X28. Y185.3
N2214 Z-3.96
N2216 G01 Z-6.92 F270.
N2218 X26.2 F330.
N2220 X23.2 Y189.3
N2222 X22.2
N2224 Y188.3
N2226 G02 X23.2 Y189.3 I4. J-3.
N2228 G01 X26.2 Y185.3
N2230 Y75.666
N2232 G02 X29.8 Y75.666 I1.8 J-48.166
N2234 G01 Y185.3
N2236 X33.8 Y188.3
N2238 Y189.3
N2240 X32.8
N2242 G02 X33.8 Y188.3 I-3. J-4.
N2244 G01 X29.8 Y185.3
N2246 X28.
N2248 Y194.3
N2250 X17.2
N2252 X14.2 Y198.3
N2254 X13.2
N2256 Y197.3
N2258 G02 X14.2 Y198.3 I4. J-3.
N2260 G01 X17.2 Y194.3
N2262 Y65.183
N2264 G02 X22.856 Y66.361 I10.8 J-37.683
N2266 G01 X22.2 Y71.318
N2268 G02 X23.484 Y71.469 I5.8 J-43.818
N2270 X22.2 Y72.666 I2.716 J4.198
N2272 G01 Y71.318
N2274 X22.856 Y66.361
N2276 G02 X33.144 Y66.361 I5.144 J-38.861
N2278 G01 X33.8 Y71.318
N2280 Y72.666
N2282 G02 X32.516 Y71.469 I-4. J3.
N2284 X33.8 Y71.318 I-4.516 J-43.969
N2286 G01 X33.144 Y66.361
N2288 G02 X38.8 Y65.183 I-5.144 J-38.861
N2290 G01 Y194.3
N2292 X28.
N2294 Y203.3
N2296 X8.2
N2298 Y62.183
N2300 X13.2
N2302 Y59.437
N2304 G02 X15.603 Y60.445 I14.8 J-31.937
N2306 X13.2 Y62.183 I1.597 J4.738
N2308 G01 X8.2
N2310 Y50.304
N2312 G02 X47.8 Y50.304 I19.8 J-22.804
N2314 G01 Y62.183
N2316 X42.8
N2318 G02 X40.397 Y60.445 I-4. J3.
N2320 X42.8 Y59.437 I-12.397 J-32.945
N2322 G01 Y62.183
N2324 X47.8
N2326 Y197.3
N2328 X42.8
N2330 Y198.3
N2332 X41.8
N2334 G02 X42.8 Y197.3 I-3. J-4.
N2336 G01 X47.8
N2338 Y203.3
N2340 X28.
N2342 X8. Y203.5
N2344 Y49.861 F366.
N2346 G02 X48. Y49.861 I20. J-22.361
N2348 G01 Y203.5
N2350 G00 Z23.
N2352 X28. Y185.3
N2354 Z-4.92
N2356 G01 Z-7.88 F270.
N2358 X26.2 F330.
N2360 X23.2 Y189.3
N2362 X22.2
N2364 Y188.3
N2366 G02 X23.2 Y189.3 I4. J-3.
N2368 G01 X26.2 Y185.3
N2370 Y75.666
N2372 G02 X29.8 Y75.666 I1.8 J-48.166
N2374 G01 Y185.3
N2376 X33.8 Y188.3
N2378 Y189.3
N2380 X32.8
N2382 G02 X33.8 Y188.3 I-3. J-4.
N2384 G01 X29.8 Y185.3
N2386 X28.
N2388 Y194.3
N2390 X17.2
N2392 X14.2 Y198.3
N2394 X13.2
N2396 Y197.3
N2398 G02 X14.2 Y198.3 I4. J-3.
N2400 G01 X17.2 Y194.3
N2402 Y65.183
N2404 G02 X22.856 Y66.361 I10.8 J-37.683
N2406 G01 X22.2 Y71.318
N2408 G02 X23.484 Y71.469 I5.8 J-43.818
N2410 X22.2 Y72.666 I2.716 J4.198
N2412 G01 Y71.318
N2414 X22.856 Y66.361
N2416 G02 X33.144 Y66.361 I5.144 J-38.861
N2418 G01 X33.8 Y71.318
N2420 Y72.666
N2422 G02 X32.516 Y71.469 I-4. J3.
N2424 X33.8 Y71.318 I-4.516 J-43.969
N2426 G01 X33.144 Y66.361
N2428 G02 X38.8 Y65.183 I-5.144 J-38.861
N2430 G01 Y194.3
N2432 X28.
N2434 Y203.3
N2436 X8.2
N2438 Y62.183
N2440 X13.2
N2442 Y59.437
N2444 G02 X15.603 Y60.445 I14.8 J-31.937
N2446 X13.2 Y62.183 I1.597 J4.738
N2448 G01 X8.2
N2450 Y50.304
N2452 G02 X47.8 Y50.304 I19.8 J-22.804
N2454 G01 Y62.183
N2456 X42.8
N2458 G02 X40.397 Y60.445 I-4. J3.
N2460 X42.8 Y59.437 I-12.397 J-32.945
N2462 G01 Y62.183
N2464 X47.8
N2466 Y197.3
N2468 X42.8
N2470 Y198.3
N2472 X41.8
N2474 G02 X42.8 Y197.3 I-3. J-4.
N2476 G01 X47.8
N2478 Y203.3
N2480 X28.
N2482 X8. Y203.5
N2484 Y49.861 F366.
N2486 G02 X48. Y49.861 I20. J-22.361
N2488 G01 Y203.5
N2490 G00 Z23.
N2492 X28. Y185.3
N2494 Z-5.88
N2496 G01 Z-8.84 F270.
N2498 X26.2 F330.
N2500 X23.2 Y189.3
N2502 X22.2
N2504 Y188.3
N2506 G02 X23.2 Y189.3 I4. J-3.
N2508 G01 X26.2 Y185.3
N2510 Y75.666
N2512 G02 X29.8 Y75.666 I1.8 J-48.166
N2514 G01 Y185.3
N2516 X33.8 Y188.3
N2518 Y189.3
N2520 X32.8
N2522 G02 X33.8 Y188.3 I-3. J-4.
N2524 G01 X29.8 Y185.3
N2526 X28.
N2528 Y194.3
N2530 X17.2
N2532 X14.2 Y198.3
N2534 X13.2
N2536 Y197.3
N2538 G02 X14.2 Y198.3 I4. J-3.
N2540 G01 X17.2 Y194.3
N2542 Y65.183
N2544 G02 X22.856 Y66.361 I10.8 J-37.683
N2546 G01 X22.2 Y71.318
N2548 G02 X23.484 Y71.469 I5.8 J-43.818
N2550 X22.2 Y72.666 I2.716 J4.198
N2552 G01 Y71.318
N2554 X22.856 Y66.361
N2556 G02 X33.144 Y66.361 I5.144 J-38.861
N2558 G01 X33.8 Y71.318
N2560 Y72.666
N2562 G02 X32.516 Y71.469 I-4. J3.
N2564 X33.8 Y71.318 I-4.516 J-43.969
N2566 G01 X33.144 Y66.361
N2568 G02 X38.8 Y65.183 I-5.144 J-38.861
N2570 G01 Y194.3
N2572 X28.
N2574 Y203.3
N2576 X8.2
N2578 Y62.183
N2580 X13.2
N2582 Y59.437
N2584 G02 X15.603 Y60.445 I14.8 J-31.937
N2586 X13.2 Y62.183 I1.597 J4.738
N2588 G01 X8.2
N2590 Y50.304
N2592 G02 X47.8 Y50.304 I19.8 J-22.804
N2594 G01 Y62.183
N2596 X42.8
N2598 G02 X40.397 Y60.445 I-4. J3.
N2600 X42.8 Y59.437 I-12.397 J-32.945
N2602 G01 Y62.183
N2604 X47.8
N2606 Y197.3
N2608 X42.8
N2610 Y198.3
N2612 X41.8
N2614 G02 X42.8 Y197.3 I-3. J-4.
N2616 G01 X47.8
N2618 Y203.3
N2620 X28.
N2622 X8. Y203.5
N2624 Y49.861 F366.
N2626 G02 X48. Y49.861 I20. J-22.361
N2628 G01 Y203.5
N2630 G00 Z23.
N2632 X28. Y185.3
N2634 Z-6.84
N2636 G01 Z-9.8 F270.
N2638 X26.2 F330.
N2640 X23.2 Y189.3
N2642 X22.2
N2644 Y188.3
N2646 G02 X23.2 Y189.3 I4. J-3.
N2648 G01 X26.2 Y185.3
N2650 Y75.666
N2652 G02 X29.8 Y75.666 I1.8 J-48.166
N2654 G01 Y185.3
N2656 X33.8 Y188.3
N2658 Y189.3
N2660 X32.8
N2662 G02 X33.8 Y188.3 I-3. J-4.
N2664 G01 X29.8 Y185.3
N2666 X28.
N2668 Y194.3
N2670 X17.2
N2672 X14.2 Y198.3
N2674 X13.2
N2676 Y197.3
N2678 G02 X14.2 Y198.3 I4. J-3.
N2680 G01 X17.2 Y194.3
N2682 Y65.183
N2684 G02 X22.856 Y66.361 I10.8 J-37.683
N2686 G01 X22.2 Y71.318
N2688 G02 X23.484 Y71.469 I5.8 J-43.818
N2690 X22.2 Y72.666 I2.716 J4.198
N2692 G01 Y71.318
N2694 X22.856 Y66.361
N2696 G02 X33.144 Y66.361 I5.144 J-38.861
N2698 G01 X33.8 Y71.318
N2700 Y72.666
N2702 G02 X32.516 Y71.469 I-4. J3.
N2704 X33.8 Y71.318 I-4.516 J-43.969
N2706 G01 X33.144 Y66.361
N2708 G02 X38.8 Y65.183 I-5.144 J-38.861
N2710 G01 Y194.3
N2712 X28.
N2714 Y203.3
N2716 X8.2
N2718 Y62.183
N2720 X13.2
N2722 Y59.437
N2724 G02 X15.603 Y60.445 I14.8 J-31.937
N2726 X13.2 Y62.183 I1.597 J4.738
N2728 G01 X8.2
N2730 Y50.304
N2732 G02 X47.8 Y50.304 I19.8 J-22.804
N2734 G01 Y62.183
N2736 X42.8
N2738 G02 X40.397 Y60.445 I-4. J3.
N2740 X42.8 Y59.437 I-12.397 J-32.945
N2742 G01 Y62.183
N2744 X47.8
N2746 Y197.3
N2748 X42.8
N2750 Y198.3
N2752 X41.8
N2754 G02 X42.8 Y197.3 I-3. J-4.
N2756 G01 X47.8
N2758 Y203.3
N2760 X28.
N2762 X8. Y203.5
N2764 Y49.861 F366.
N2766 G02 X48. Y49.861 I20. J-22.361
N2768 G01 Y203.5
N2770 G00 Z23.
N2772 X28. Y185.3
N2774 Z-7.8
N2776 G01 Z-10. F270.
N2778 X26.2 F366.
N2780 X23.2 Y189.3
N2782 X22.2
N2784 Y188.3
N2786 G02 X23.2 Y189.3 I4. J-3.
N2788 G01 X26.2 Y185.3
N2790 Y75.666
N2792 G02 X29.8 Y75.666 I1.8 J-48.166
N2794 G01 Y185.3
N2796 X33.8 Y188.3
N2798 Y189.3
N2800 X32.8

```
N2802 G02 X33.8 Y188.3 I-3. J-4.
N2804 G01 X29.8 Y185.3
N2806 X28.
N2808 Y194.3
N2810 X17.2
N2812 X14.2 Y198.3
N2814 X13.2
N2816 Y197.3
N2818 G02 X14.2 Y198.3 I4. J-3.
N2820 G01 X17.2 Y194.3
N2822 Y65.183
N2824 G02 X22.856 Y66.361 I10.8 J-37.683
N2826 G01 X22.2 Y71.318
N2828 G02 X23.484 Y71.469 I5.8 J-43.818
N2830 X22.2 Y72.666 I2.716 J4.198
N2832 G01 Y71.318
N2834 X22.856 Y66.361
N2836 G02 X33.144 Y66.361 I5.144 J-38.861
N2838 G01 X33.8 Y71.318
N2840 Y72.666
N2842 G02 X32.516 Y71.469 I-4. J3.
N2844 X33.8 Y71.318 I-4.516 J-43.969
N2846 G01 X33.144 Y66.361
N2848 G02 X38.8 Y65.183 I-5.144 J-38.861
N2850 G01 Y194.3
N2852 X28.
N2854 Y203.3
N2856 X8.2
N2858 Y62.183
N2860 X13.2
N2862 Y59.437
N2864 G02 X15.603 Y60.445 I14.8 J-31.937
N2866 X13.2 Y62.183 I1.597 J4.738
N2868 G01 X8.2
N2870 Y50.304
N2872 G02 X47.8 Y50.304 I19.8 J-22.804
N2874 G01 Y62.183
N2876 X42.8
N2878 G02 X40.397 Y60.445 I-4. J3.
N2880 X42.8 Y59.437 I-12.397 J-32.945
N2882 G01 Y62.183
N2884 X47.8
N2886 Y197.3
N2888 X42.8
N2890 Y198.3
N2892 X41.8
N2894 G02 X42.8 Y197.3 I-3. J-4.
N2896 G01 X47.8
N2898 Y203.3
N2900 X28.
N2902 X8. Y203.5
N2904 Y49.861
N2906 G02 X48. Y49.861 I20. J-22.361
N2908 G01 Y203.5
N2910 G00 Z23.
N2912 (P-contour6)
N2914 X28. Y216.3
N2916 Z23.
N2918 Z-3.
N2920 G01 Z-5.922 F270.
N2922 X3. F330.
N2924 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N2926 G01 Y202.7
N2928 X53.8
N2930 Y210.5
N2932 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N2934 G01 X3.
N2936 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N2938 G01 Y207.7
N2940 X53.8
N2942 Y202.7
N2944 X58.8
N2946 Y210.5
N2948 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N2950 G01 X28.
N2952 X-2.989 Y203.5 F366.
N2954 X-13.
N2956 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N2958 G01 X-3.
N2960 X68.
N2962 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N2964 G01 X68.
N2966 G00 Z23.
N2968 X28. Y216.3
N2970 Z-3.922
N2972 G01 Z-6.844 F270.
N2974 X3. F330.
N2976 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N2978 G01 Y202.7
N2980 X53.8
N2982 Y210.5
N2984 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N2986 G01 X3.
N2988 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N2990 G01 Y207.7
N2992 X53.8
N2994 Y202.7
N2996 X58.8
N2998 Y210.5
N3000 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3002 G01 X28.
N3004 X-2.989 Y203.5 F366.
N3006 X-13.
N3008 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3010 G01 X-3.
N3012 X68.
N3014 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3016 G01 X68.
N3018 G00 Z23.
N3020 X28. Y216.3
N3022 Z-4.844
N3024 G01 Z-7.767 F270.
N3026 X3. F330.
N3028 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N3030 G01 Y202.7
N3032 X53.8
N3034 Y210.5
N3036 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N3038 G01 X3.
N3040 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N3042 G01 Y207.7
N3044 X53.8
N3046 Y202.7
N3048 X58.8
N3050 Y210.5
N3052 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3054 G01 X28.
N3056 X-2.989 Y203.5 F366.
N3058 X-13.
N3060 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3062 G01 X-3.
N3064 X68.
N3066 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3068 G01 X68.
N3070 G00 Z23.
N3072 X28. Y216.3
N3074 Z-5.767
N3076 G01 Z-8.689 F270.
N3078 X3. F330.
N3080 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N3082 G01 Y202.7
N3084 X53.8
N3086 Y210.5
N3088 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N3090 G01 X3.
N3092 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N3094 G01 Y207.7
N3096 X53.8
N3098 Y202.7
N3100 X58.8
N3102 Y210.5
N3104 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3106 G01 X28.
N3108 X-2.989 Y203.5 F366.
N3110 X-13.
N3112 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3114 G01 X-3.
N3116 X68.
N3118 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3120 G01 X68.
N3122 G00 Z23.
N3124 X28. Y216.3
N3126 Z-6.689
N3128 G01 Z-9.611 F270.
N3130 X3. F330.
N3132 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N3134 G01 Y202.7
N3136 X53.8
N3138 Y210.5
N3140 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N3142 G01 X3.
N3144 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N3146 G01 Y207.7
N3148 X53.8
N3150 Y202.7
N3152 X58.8
N3154 Y210.5
N3156 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3158 G01 X28.
N3160 X-2.989 Y203.5 F366.
N3162 X-13.
N3164 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3166 G01 X-3.
N3168 X68.
N3170 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3172 G01 X68.
N3174 G00 Z23.
N3176 X28. Y216.3
N3178 Z-7.611
N3180 G01 Z-10.533 F270.
N3182 X3. F330.
N3184 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N3186 G01 Y202.7
N3188 X53.8
N3190 Y210.5
N3192 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N3194 G01 X3.
N3196 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N3198 G01 Y207.7
N3200 X53.8
N3202 Y202.7
N3204 X58.8
N3206 Y210.5
N3208 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3210 G01 X28.
N3212 X-2.989 Y203.5 F366.
N3214 X-13.
N3216 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3218 G01 X-3.
N3220 X68.
N3222 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3224 G01 X68.
N3226 G00 Z23.
N3228 X28. Y216.3
N3230 Z-8.533
N3232 G01 Z-11.456 F270.
N3234 X3. F330.
N3236 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N3238 G01 Y202.7
N3240 X53.8
N3242 Y210.5
N3244 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N3246 G01 X3.
N3248 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N3250 G01 Y207.7
N3252 X53.8
N3254 Y202.7
N3256 X58.8
N3258 Y210.5
N3260 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3262 G01 X28.
N3264 X-2.989 Y203.5 F366.
N3266 X-13.
N3268 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3270 G01 X-3.
N3272 X68.
N3274 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3276 G01 X68.
N3278 G00 Z23.
N3280 X28. Y216.3
N3282 Z-9.456
N3284 G01 Z-12.378 F270.
N3286 X3. F330.
N3288 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N3290 G01 Y202.7
N3292 X53.8
N3294 Y210.5
N3296 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N3298 G01 X3.
N3300 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N3302 G01 Y207.7
N3304 X53.8
N3306 Y202.7
N3308 X58.8
N3310 Y210.5
N3312 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3314 G01 X28.
N3316 X-2.989 Y203.5 F366.
N3318 X-13.
N3320 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3322 G01 X-3.
N3324 X68.
N3326 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3328 G01 X68.
N3330 G00 Z23.
N3332 X28. Y216.3
N3334 Z-10.378
N3336 G01 Z-13.3 F270.
N3338 X3. F330.
N3340 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N3342 G01 Y202.7
N3344 X53.8
N3346 Y210.5
N3348 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N3350 G01 X3.
N3352 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N3354 G01 Y207.7
N3356 X53.8
N3358 Y202.7
N3360 X58.8
N3362 Y210.5
N3364 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3366 G01 X28.
N3368 X-2.989 Y203.5 F366.
N3370 X-13.
N3372 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3374 G01 X-3.
N3376 X68.
N3378 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3380 G01 X68.
N3382 G00 Z23.
N3384 X28. Y216.3
N3386 Z-11.3
N3388 G01 Z-13.5 F270.
N3390 X3. F366.
N3392 G03 X-2.8 Y210.5 I0. J-5.8
N3394 G01 Y202.7
N3396 X53.8
N3398 Y210.5
N3400 G03 X53. Y211.3 I-0.8 J0.
N3402 G01 X3.
N3404 G03 X2.2 Y210.5 I0. J-0.8
N3406 G01 Y207.7
N3408 X53.8
N3410 Y202.7
N3412 X58.8
N3414 Y210.5
N3416 G03 X53. Y216.3 I-5.8 J0.
N3418 G01 X28.
N3420 X-2.989 Y203.5
N3422 X-13.
N3424 G03 X-12. Y202.5 I1. J0.
N3426 G01 X-3.
N3428 X68.
N3430 G03 X69. Y203.5 I0. J1.
N3432 G01 X68.
N3434 G00 Z23.
N3436 M05
N3438 G00 G28 G91 Z0
N3440 G00 G28 G91 X-15.0 Y0.
N3442 G90
N3444 M06 T4
N3446 M30
%
```