ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837

ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΕΥΡΙΠΟΥ – ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων

Master of Science in Design and Manufacturing of Sports Vehicle Systems

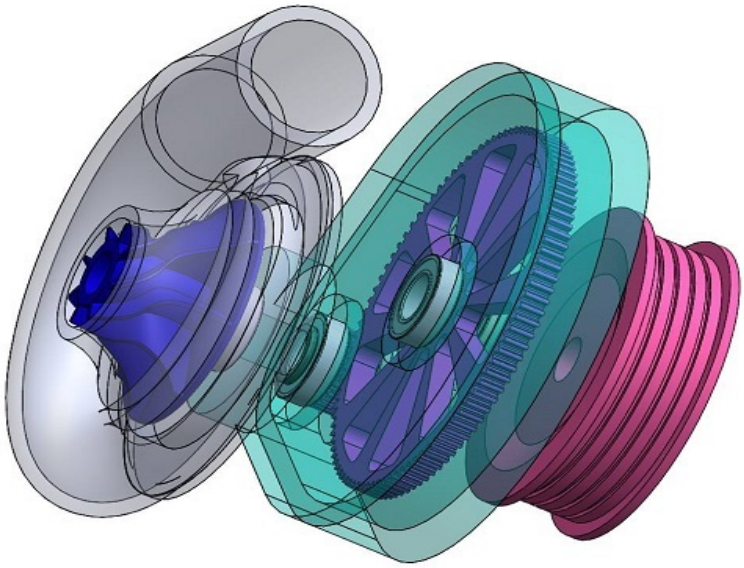
Διπλωματική Εργασία

«Μελέτη μηχανικών αντοχών 3Δ τεμαχίων σε στρέψη και κατασκευή πρωτότυπου πολλαπλασιαστή στροφών από εκτυπώσιμα υλικά»

Διονύσιος Μπομπούλας

Α.Μ.: 516006

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Μηχ. Α. Κριμπένης, Επίκουρος Καθηγητής



Ψαχνά, Ιούνιος 2020

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ »

Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα αντιγραφής και χρήσης

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μπομπούλα Διονυσίου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οποιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/ δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

(Υπογραφή)
……..

Ψαχνά, Ιούνιος 2020

Διπλωματική Εργασία

του

Μπομπούλα Διονυσίου

«Μελέτη μηχανικών αντοχών 3Δ τεμαχίων σε στρέψη και κατασκευή πρωτότυπου πολλαπλασιαστή στροφών από εκτυπώσιμα υλικά»

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Γενική Συνέλευση του Γενικού Τμήματος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σύμφωνα με το νόμο και τον εγκεκριμένο οδηγό σπουδών του ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων. Τα μέλη της Επιτροπής ήταν ο κ. Αγαθοκλής Κριμπένης, ο κ. Στυλιανός Μαρκολέφας και ο κ. Στυλιανός Γεωργαντζίνος.

Εξεταστική Επιτροπή Διπλωματικής Εργασίας

(Υπογραφή)	*(Υπογραφή)*	*(Υπογραφή)*
.....	.....	.....
Αγαθοκλής Κριμπένης	Στυλιανός Μαρκολέφας	Στυλιανός Γεωργαντζίνος
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.	Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.	Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

Ψαχνά, Ιούνιος 2020

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές όπου βοήθησαν στην πνευματική και ηθική μου ανάπτυξη. Που αφιέρωσαν χρόνο, κόπο και γνώσεις για να είμαι πλέον σε θέση να παρουσιάσω και εγώ με τη σειρά μου, το έργο μου στην ανθρωπότητα.

Επίσης θα ήθελα να δώσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου σε συγκεκριμένους ανθρώπους, οι οποίοι με βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Πιο συγκεκριμένα:

- Δρ. Μηχ. Α. Κριμπένης, Επίκουρος Καθηγητής, Επιβλέπων καθηγητής της μελέτης αυτής. Εμπνευστής και μέντοράς μου.
- Δρ. Κωνσταντίνος Ι. Γιαννακόπουλος, Για την παραχώρηση των εργαστηριακών υποδομών του ΠΑΔΑ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ως προς την τέλεση των πειραμάτων και ευγενική συνεργασία ως προς την διεξαγωγή αποτελεσμάτων.
- Την εταιρία τρισδιάστατων εκτυπώσεων Solid 3D, που μας εκτύπωσε τα δοκίμια, τα μέρη του μηχανισμού και μοιράστηκε μαζί μας τα μυστικά του επαγγέλματός της.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανακάλυψη νέων μονοπατιών γνώσης και ορθής χρήσης της νέας κατασκευαστικής τεχνολογίας που ορίζεται ως 3Δ εκτύπωση. Η μέθοδος αυτή είναι μέθοδος πρόσθεσης υλικού σε αντίθεση με την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία αφαίρεσης υλικού όπως για παράδειγμα με χρήση φρέζας ή τόρνου. Οι άνθρωποι που τόλμησαν είναι αυτοί που ανέβασαν το βιοτικό επίπεδο της ανθρωπότητας ένα σκαλοπάτι πιο πάνω. Έτσι λοιπόν έγινε μια πρώτη επαφή με αυτή τη νέα τεχνολογία των τρισδιάστατων εκτυπώσεων (3Δ εκτύπωση), ώστε να γνωρίσει ο αναγνώστης τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Να γίνει πόλος έλξης και έμπνευσης κάθε νέος τρόπος χρήσης αυτής και να δοθεί ευκαιρία για περαιτέρω εξέλιξη. Μέσα από την ανάλυσή της να γίνουν οι άνθρωποι πιο παραγωγικοί και να χρησιμοποιούν υλικά και διαδικασίες παραγωγής αντικειμένων, λιγότερο ρυπογόνες ως προς το περιβάλλον.

Η εργασία χωρίζεται σε τρία κύρια τμήματα μέσα από τα οποία πραγματοποιήθηκε και παρουσιάζεται. Είναι μια προσπάθεια κατανόησης και ορθής αξιοποίησης της νέας τεχνολογίας 3Δ εκτύπωση που δημιουργήθηκε και ακόμα εξελίσσεται. Μέσα από αυτή την εργασία–μελέτη παρουσιάζονται ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα πάνω στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

Το πρώτο μέρος της μελέτης είναι καθαρά πειραματικό και δίνει λαβές για περαιτέρω έρευνα. Αφού έγινε ο σχεδιασμός και η εκτύπωση των δοκιμίων προς μελέτη, τα πειράματα έλαβαν χώρα στο εργαστηριακό περιβάλλον Αντοχής Υλικών στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (ΠΑΔΑ), Τμήμα Μηχανικών Αντοχών. Από αυτά εξήχθηκαν ενδεικτικές μετρήσεις, οι οποίες βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς των εκτυπώσιμων υλικών σε καταπόνηση στρέψης. Τέλος, καθότι επιλέχτηκαν διάφορα υλικά και συγκεκριμένα πέντε στον αριθμό, μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.

Το δεύτερο μέρος αφορά στο σχεδιασμό ενός μηχανισμού με διάφορα εξαρτήματα. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστή με τη βοήθεια του προγράμματος ‘Solidworks’. Ο μηχανισμός αυτός είναι ένας μηχανικός αεροσυμπιεστής. Αυτός ο αεροσυμπιεστής παίρνει κίνηση από μια εξωτερική τροχαλία που πολλαπλασιάζεται μέσω δυο οδοντωτών γραναζιών και στη συνέχεια η κίνηση μεταφέρεται σε μια πτερωτή, που αναρροφά ατμοσφαιρικό αέρα και τον συμπιέζει. Στην ουσία είναι μια μίξη μηχανικού συμπιεστή και συμπιεστή καυσαερίων. Ο άμεσος στόχος της κατασκευής δεν είναι να τοποθετηθεί αυτούσια σε κινητήρα εσωτερικής καύσης, αλλά να μπορεί να δώσει πειραματικά αποτελέσματα σε περιβάλλον εργαστηρίου.

Το τρίτο μέρος είναι πρακτικό και αφορά στην εκτύπωση του μηχανισμού. Θεωρητικά μπορεί να ειπωθεί ότι αν συνδεθεί ένας υπολογιστής με ένα τρισδιάστατο εκτυπωτή και εισαχθούν

τα δεδομένα, μπορεί να γίνει η εκτύπωση ενός μοντέλου. Στην πράξη όμως, η τοποθέτηση του τεμαχίου στην τράπεζα του τρισδιάστατου εκτυπωτή, ο προσανατολισμός του τεμαχίου και κάποιες άλλες παράμετροι μπορούν να αλλάξουν τα αποτελέσματα της εκτύπωσης. Συνεπώς, πρέπει να γίνει πρόβλεψη πιθανών αστοχιών, για να υπάρξει βέλτιστο αποτέλεσμα. Οι εκτυπώσεις έλαβαν χώρα στο εξειδικευμένο κατάστημα τρισδιάστατων εκτυπώσεων Solid 3D, όπου και δόθηκαν λύσεις για πιθανά προβλήματα που μπορεί να προέκυπταν στην πορεία, όπως ο προσανατολισμός των προς εκτύπωση τεμαχίων, η παροχή υλικού, το ποσοστό γεμίσματος (infill) κ.ά..

Τα υλικά αυτά που μελετήθηκαν είναι τα ακόλουθα: ABS, PETG, ASA, CARBON FIBER και PLA.

Μέσα από αυτή τη διαδικασία, συμπεραίνεται ότι ο αναγνώστης μπορεί να έχει μια γενική εικόνα στο θέμα και να ενημερωθεί κατάλληλα για τη χρήση τέτοιων υλικών, καθώς και για την εξέταση της συμπεριφοράς τους μέσω αυτής της νέας τεχνολογίας, ώστε να δοθεί ευκαιρία για περαιτέρω έρευνα.

Λέξεις – Κλειδιά

Μηχανικός αεροσυμπιεστής, Καταπόνηση στρέψης, 3Δ εκτύπωση, ABS, ASA, PETG, CARBON FIBER, Vero Clear, PolyJet, FDM.

Abstract

The purpose of this paper is to discover new knowledge paths and the proper use of new construction technologies defined as 3D Printing. This method is a procedure of adding material in contrary to the already existing one that subtracts material, for instance through the use of a milling machine or a lathe. People who take risks are the ones who raise the standard of living. So, during this thesis a first approach of the technology of 3D Printing was undertaken, so that the reader can be informed of its advantages and disadvantages. New ways of using 3D Printing will become a pole of attraction and inspiration and will provide a chance for further development. Through this analysis, people will become more productive and will take advantage of materials and procedures more environmental friendly in the production processes.

The present dissertation is divided into three main sections, which indicate the stages it was carried out and presented. It is an attempt to understand and use the new technologies that are emerging and are still evolving. Thus, this study offers opportunities for further research on the field 3D printing.

The first section of the study is definitely experimental and motivates the audience to further research. After the design and the printing of the samples, the experiments took place in the laboratory environment of Strength of Materials at the University of West Attica. Indicative measurements were obtained, so as to understand the behavior of print materials in torsion stress. Finally, the fact that several materials have been experimentally investigated, and more specifically five in number, the opportunity for comparing them and examining their further behavior arose.

The second section refers to the design of a mechanism that consists of various components. Design was performed on a computer using 'Solidworks' CAD software. This mechanism is a mechanical air compressor. This air compressor takes motion from an outer pulley that is multiplied through two toothed gears and then motion is transferred to an impeller that compresses atmospheric air. Therefore, it is a combination of mechanical compressor and exhaust compressor. The main aim of the construction is not to be placed as it is to an internal combustion engine but to be able to give experimental results in a laboratory environment.

The third section is a practical one and refers to the actual 3DPrinting of the mechanism. In theory, it can be said that if anybody connects a computer to a 3D printer and inserts the proper data, a 3D model can be 3D printed. In practice, however, if placing the piece in the 3D printer table, the orientation of the piece and other parameters may change the printing outcome. Therefore, some possible failures must be taken into consideration to achieve an optimal result. The printing took place at the specialized 3D printing store, called Solid 3D, where solutions were

given to possible problems before they could arise, such as part orientation, the material supply, the infill rate etc.

The materials which were studied are the following: ABS, PETG, ASA, CARBON FIBER and PLA.

Through this procedure, we can infer that the audience can have an overview on this topic and be informed about the use of such materials accordingly, as well as the examination of their behavior through this new technology so as to give the opportunity for further research.

Key words

Mechanical air compressor, Torsion Stress, 3D Printing, ABS, ASA, PETG, CARBON FIBER, Vero Clear, PolyJet, FDM.

Περιεχόμενα

Περίληψη v
Περιεχόμενα ix
Κατάλογος Εικόνων x
Κατάλογος Πινάκων xi
Κατάλογος Γραφημάτων xii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 1
Εισαγωγή 1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 3
Υλικά που χρησιμοποιούνται στην 3Δ εκτύπωση 3
2.1 Υλικά και Ιδιότητές τους 3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 11
3Δ Εκτύπωση με εξώθηση νήματος (FDM) & με πολλαπλή εκτόξευση υλικού (PolyJet) 11
3.1 Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης 11
3.2 Τεχνολογία εκτύπωσης με νήμα (FDM) 12
3.3 Εκτόξευση υλικού (Material Jetting) 15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 21
Αντοχή 3Δ εκτυπωμένων δοκιμίων σε στρέψη 21
4.1 Παρουσίαση μηχανικών καταπονήσεων 21
4.2. Περιβάλλον εκτύπωσης τεχνολογίας εξώθησης νήματος & πολλαπλής εκτόξευσης υλικού 23
4.2.1. Επιλογή τεχνολογίας και υλικού για τρισδιάστατη εκτύπωση του μηχανισμού 23
4.2.2. Περιβάλλον εκτύπωσης 24
4.2.3. Η τεχνολογία πολλαπλής εκτόξευσης υλικού ως δεύτερη επιλογή 26
4.2.4. Περιβάλλον εκτύπωσης 28
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραμάτων 29
4.3.1 Πείραμα 1ο 33
4.3.2 Πείραμα 2ο 40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 48
Σχεδίαση Γραναζωτού Μηχανισμού πολλαπλασιασμού στροφών 48
5.1 Μελέτη Σχεδίασης του μηχανισμού 48
5.2 Προβολή σχεδίου επιμέρους τεμαχίων 49
5.3 Ψηφιακή Συναρμολόγηση του μηχανισμού 60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 65
Κατασκευή και συναρμολόγηση του μηχανισμού 65
6.1 Περιβάλλον εκτύπωσης 65
6.1.1 Περιβάλλον εκτύπωσης εξώθησης νήματος 65
6.1.2 Περιβάλλον εκτύπωσης πολλαπλής εξώθησης υλικού 75
6.2 Οικονομοτεχνική μελέτη κατασκευής του μηχανισμού με 3Δ εκτύπωση 81
6.3 Κατασκευή και συναρμολόγηση 86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 89
Συμπεράσματα – Μελλοντική Σημασία 89
7.1 Συμπεράσματα 89
7.1.1 Ο σχεδιασμός 89
7.1.2 Το πείραμα 91
7.1.3 Η εκτύπωση 91

7.2 Μελλοντική σημασία 93
Βιβλιογραφία.....94

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Εξώθηση Υλικού (Πηγή: [B2]) 12
Εικόνα 2: Ιδιότητες υλικών που εκτυπώθηκαν (Πηγή: [B1]) 13
Εικόνα 3: Ιδιότητες υλικών που εκτυπώθηκαν (Πηγή: [B1]) 14
Εικόνα 4: 3Δ εκτυπωτής Stratasys Eden 260V (Πηγή: [B3]) 16
Εικόνα 5: Εκτύπωση πολλαπλής εκτόξευσης υλικού (Πηγή: [B3]) 17
Εικόνα 6: Πολύπλοκη εκτύπωση (Πηγή: [B3]) 18
Εικόνα 7: Ανθεκτική εκτύπωση (Πηγή: [B16]) 18
Εικόνα 8: 3Δ πολύχρωμη, ενιαία εκτύπωση PolyJet (Πηγή: [B2]) 20
Εικόνα 9: Μηχανικές καταπονήσεις (Πηγή: [B2]) 22
Εικόνα 17: Χρωματική επεξήγηση Βημάτων κατά την Εκτύπωση 25
Εικόνα 18: Vero Clear data sheet.....28
Εικόνα 10: Τρισδιάστατη απεικόνιση δοκιμίου που συνεργάζεται με τη μηχανή μελέτης στρέψης 30
Εικόνα 11: 0 μοίρες γωνία εκτύπωσης.....30
Εικόνα 12: 15 μοίρες γωνία εκτύπωσης με φορά προς τα δεξιά.....31
Εικόνα 13: 15 μοίρες γωνία εκτύπωσης με φορά προς τα αριστερά 31
Εικόνα 14: 45 μοίρες γωνία εκτύπωσης με φορά προς τα δεξιά.....32
Εικόνα 15: 45 μοίρες γωνία εκτύπωσης με φορά προς τα αριστερά.....32
Εικόνα 16: Μηχανή στρέψης SM 21 Advanced Torsion.....33
Εικόνα 19: Πινιόν-Πρωτεύων Γρανάζι κίνησης τροχαλίας, 100 δόντια (Power gear (1st)) 50
Εικόνα 20: Συνεργαζόμενο- Δευτερεύον γρανάζι κίνησης, 20 δόντια (Idle gear (2nd)).....51
Εικόνα 21: Κέλυφος γραναζιών (Compressor house) -Εξωτερική όψη 51
Εικόνα 22: Κέλυφος γραναζιών (Compressor house) -Εσωτερική όψη 52
Εικόνα 23: Καπάκι κελύφους γραναζιών (Case Cover)- Εσωτερική όψη.....53
Εικόνα 24: Καπάκι κελύφους γραναζιών (Case Cover)- Εξωτερική όψη 53
Εικόνα 25: Άξονας μετάδοσης κίνησης (Axle).....54
Εικόνα 26: Τροχαλία (Pulley).....54
Εικόνα 27: Κέλυφος πτερωτής (Turbo)- Μπροστινή όψη 55
Εικόνα 28: Κέλυφος πτερωτής (Turbo)- Πίσω όψη 56
Εικόνα 29: Πτερωτή(Compressor Impeller)-Κάτοψη.....57
Εικόνα 30: Πτερωτή (Compressor Impeller)-Ισομετρική όψη 57
Εικόνα 31: Σύνδεσμος κελύφους και συμπιεστή αέρα (Washer Front).....58
Εικόνα 32: Σύνδεσμος κελύφους και συμπιεστή με φωλιά για ρουλεμάν (Washer back) .59
Εικόνα 33: Πρόσοψη.....60
Εικόνα 34: Πίσω Όψη 61
Εικόνα 35: Πλάγια Όψη 61
Εικόνα 36: Τρισδιάστατη ισομετρική απεικόνιση 62
Εικόνα 37: Τρισδιάστατη διάφανη πάνω όψη συνεργαζόμενων εξαρτημάτων.....62
Εικόνα 38: Τρισδιάστατη διάφανη κάτω όψη συνεργαζόμενων εξαρτημάτων.....63
Εικόνα 39: Τρισδιάστατη διάφανη πρόσοψη συνεργαζόμενων εξαρτημάτων 63

Εικόνα 40: Τρισδιάστατη διάφανη πίσω όψη συνεργαζόμενων εξαρτημάτων 64
Εικόνα 41: Κέλυφος πτερωτής (Compressor House) 66
Εικόνα 42: Άξονες κίνησης (2xAxle) 67
Εικόνα 43: Καπάκι κελύφους γραναζιών (Case Cover) 68
Εικόνα 44: Θήκη γραναζιών (Case).....69
Εικόνα 45: Σύνδεσμος κελύφους και συμπιεστή αέρα (Compressor Base) 70
Εικόνα 46: Πτερωτή (Compressor Impeller) 71
Εικόνα 47: Γρανάζι κίνησης πτερωτής(δευτερεύον-συνεργαζόμενο) (Idle Gear (2nd)).....72
Εικόνα 48: Γρανάζι κίνησης τροχαλίας(πρωτεύον-πινιόν) (Power Gear (1st)).....73
Εικόνα 49: Τροχαλία (Pulley).....74
Εικόνα 50: Κέλυφος Πτερωτής.....75
Εικόνα 51: Άξονες 76
Εικόνα 52: Καπάκι Κελύφους.....76
Εικόνα 53: Θήκη 77
Εικόνα 54: Βάση Κελύφους.....77
Εικόνα 55: Πτερωτή.....78
Εικόνα 56: Δευτερεύον Γρανάζι (Συνεργαζόμενο).....78
Εικόνα 57: Πρωτεύον Γρανάζι (Πινιόν) 79
Εικόνα 58: Τροχαλία.....79
Εικόνα 59: Όλα τα εξαρτήματα σε μια εκτύπωση 80
Εικόνα 60: Η θήκη και το πρωτεύον γρανάζι σε δεύτερη εκτύπωση 80
Εικόνα 61: Υλικά που διατίθενται στο εμπόριο για εκτύπωση με νήμα (Πηγή: [B1]).....81
Εικόνα 62: Ιδιότητες Υλικών που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση (Πηγή: [B1]) 84
Εικόνα 63: Ιδιότητες Υλικών που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση (συνέχεια) (Πηγή: [B1]).....85
Εικόνα 64: Εσωτερική όψη του μηχανισμού (κέλυφος).....86
Εικόνα 65: Εσωτερική όψη του μηχανισμού (καπάκι κελύφους).....87
Εικόνα 66: Εξωτερική όψη του μηχανισμού 88
Εικόνα 67: Μηχανισμός εταιρείας ROTREX (Πηγή: [B25]) 90
Εικόνα 68: Μηχανισμός εταιρείας ROTREX (Πηγή: [B25]) 90

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Μετάφραση Υπαρχουσών Μηχανικών Καταπονήσεων 21
Πίνακας 4: Επεξήγηση Παραμέτρων τρισδιάστατης εκτύπωσης 26
Πίνακας 2: PLA.....40
Πίνακας 3: ASA, CARBON FIBER, PETG, ABS 47
Πίνακας 5: Γεωμετρικά και λειτουργικά στοιχεία των γραναζιών του μηχανισμού 49
Πίνακας 6: Μετάφραση Ορολογίας σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών για τρισδιάστατη εκτύπωση 82

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1: Δοκίμιο PLA - 1ο δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 10332 στροφές 34
Γράφημα 2: Δοκίμιο PLA - 2ο δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9645 στροφές 34
Γράφημα 3: Δοκίμιο PLA - 3ο δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9610 στροφές 35
Γράφημα 4: Δοκίμιο PLA - 1ο δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 12190 στροφές ...36
Γράφημα 5: Δοκίμιο PLA - 2ο δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9430 στροφές 36
Γράφημα 6: Δοκίμιο PLA - 3ο δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 10524 στροφές ..37
Γράφημα 7: Δοκίμιο PLA - 1ο δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9740 στροφές ..37
Γράφημα 8: Δοκίμιο PLA - 2ο δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9967 στροφές 38
Γράφημα 9: Δοκίμιο PLA - 3ο δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9622 στροφές 38
Γράφημα 10: Σύγκριση πειραμάτων PLA 1ο45^{o} – PLA 3ο15^{o} – PLA 2ο0^{o} 39
Γράφημα 11: Υλικό ASA – 15° γωνίας εκτύπωσης – 2651 στροφές 40
Γράφημα 12: Υλικό ASA – 15° γωνίας εκτύπωσης – 2345 στροφές 41
Γράφημα 13: Υλικό CARBON FIBER – 15° γωνίας εκτύπωσης – 10436 στροφές 41
Γράφημα 14: Υλικό CARBON FIBER – 15° γωνίας εκτύπωσης – 6537 στροφές 42
Γράφημα 15: Υλικό PETG – 15° γωνίας εκτύπωσης – 1842 στροφές.....42
Γράφημα 16: Υλικό PETG – 15° γωνίας εκτύπωσης – 2714 στροφές 43
Γράφημα 17: Υλικό PETG – 15° γωνίας εκτύπωσης – 2813 στροφές 43
Γράφημα 18: Υλικό ABS – 15° γωνίας εκτύπωσης – 1840 στροφές.....44
Γράφημα 19: Υλικό ABS – 15° γωνίας εκτύπωσης – 1657 στροφές.....45
Γράφημα 20: Υλικό ABS – 15° γωνίας εκτύπωσης – 4884 στροφές.....45
Γράφημα 21: Συγκριτικό αποτελεσμάτων ASA – CARBON FIBER – PETG – ABS 46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιαστούν οι δυνατότητες της νέας κατασκευαστικής τεχνολογίας που ορίζεται ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3Δ εκτύπωση ή 3D Printing) που είναι η μέθοδος Πρόσθεσης Υλικού ή Προσθετικής Κατασκευής σε αντίθεση με τις υπάρχουσες ευρέως χρησιμοποιούμενες Κατεργασίες Αφαίρεσης Υλικού, όπως για παράδειγμα με χρήση φρέζας, τόρνου ή άλλων εργαλειομηχανών κοπής. Οι άνθρωποι μέσα από συνεχή παρατήρηση, έρευνα και πειραματισμό κατάφεραν να εξελίξουν τεχνολογίες που βελτιώνουν το βιοτικό τους επίπεδο. Έτσι λοιπόν έγινε μια πρώτη επαφή με αυτή τη νέα τεχνολογία, ώστε να αναδειχθούν τα θετικά και τις ατέλειές της, όχι μόνο σαν διαδικασία αλλά και στα τελικά προϊόντα. Εφαρμόζοντας σωστά την τεχνολογία αυτή της τρισδιάστατης εκτύπωσης, δίνεται η δυνατότητα στην βιομηχανία να γίνει παραγωγικότερη με λιγότερο κόστος και μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Υπάρχουν υλικά που ανακυκλώνονται, υλικά που είναι βιοδιασπώμενα, υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μηχανολογικές κατασκευές ή σε άλλες επιστήμες, όπως στην περίπτωση της ιατρικής όπου τα υλικά πρέπει να είναι βίο-συμβατά. Μέσα από την παρούσα εργασία λοιπόν μπορεί ένας ερευνητής να γνωρίσει τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και μελετήθηκαν και να προχωρήσει σε μετέπειτα μελέτη όχι μόνο σε αυτά, αλλά και σε άλλα που μπορεί να θεωρεί πιο κατάλληλα για τη χρήση που τα προορίζει. Επίσης, με την κατασκευή του συγκεκριμένου προτεινόμενου μηχανισμού, ως μελέτη εφαρμογής ενός λειτουργικού συναρμολογήματος, μπορούν να μελετηθούν τριβές μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών, να μελετηθεί η ροή των αερίων με τη συγκεκριμένη πτερωτή ή, αν αλλάξει ο τύπος της πτερωτής, μπορούν να μελετηθούν οι νέες ροές αερίων που θα προκύψουν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τύποι νήματος για 3Δ εκτύπωση όπου διατίθενται στο εμπόριο. Ακολουθεί σύντομη επεξήγηση του κάθε υλικού και οι ιδιότητες τους. Τα υλικά που παρουσιάζονται είναι τα ABS, PLA, ASA, CARBON FIBER, PETG, HIPS, PVA, NYLON, νήμα με πρόσμιξη ξύλου (Wood PLA) και νήμα με πρόσμιξη μετάλλων. ο λόγος που επιλέχθηκαν αυτά είναι για να γίνει γνωστό στον αναγνώστη ότι αυτά θεωρούνται τα συνήθη για 3Δ εκτύπωση.

Επίσης αναλύονται οι υπάρχουσες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης όπως η Εξώθηση Υλικού, ο Πολυμερισμός σε δεξαμενή, η Σύντηξη σε τράπεζα σκόνης, η Εκτόξευση υλικού, η Εκτόξευση συνδετικού υλικού, η Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια και η

Στρωμάτωση φύλλων, για να διασαφηνιστούν έτσι ώστε μετέπειτα να επιλεγούν τα πιο κατάλληλα για την πραγματοποίηση της παρούσας έρευνας μέσω του πειράματος.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μηχανικές καταπονήσεις που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα τεμάχιο, και αναλύονται εκτενέστερα η μέθοδος εκτύπωσης εξώθησης νήματος και με εκτόξευση υλικού. [A6,A7,A8,A9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Υλικά που χρησιμοποιούνται στην 3Δ εκτύπωση

2.1 Υλικά και Ιδιότητές τους

Με τόσα πολλά και διαφορετικά είδη αναλωσίμων που κυκλοφορούν στην αγορά, είναι εύλογη η απορία ως προς το ποιοι είναι οι καλύτεροι τύποι νήματος για 3Δ εκτύπωση. Η απάντηση δεν είναι ξεκάθαρη, καθώς η επιλογή αναλωσίμου εξαρτάται από το τι πρόκειται να εκτυπωθεί και ποια θα είναι η χρήση του τρισδιάστατα εκτυπωμένου αντικειμένου, καθώς οι διαφορετικές χημικές συστάσεις οδηγούν και σε διαφορετικές φυσικές, μηχανικές, θερμικές και άλλες ιδιότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει το τέλειο υλικό, αλλά απλά το κατάλληλο ή μια ομάδα από κατάλληλα για κάθε χρήση.

Συχνά παρουσιάζονται καινούριοι τύποι νημάτων από νέα υλικά ή και με υβριδική σύσταση και παρακάτω παρατίθενται μερικές κατηγορίες από τα πιο κοινά και διαδεδομένα πλαστικά νήματα που χρησιμοποιούνται. [A1,B5]

- Το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) είναι παράγωγο πετρελαίου και αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά 3Δ εκτύπωση μαζί με το PLA. Σε σύγκριση με το PLA, το ABS είναι πιο εύκαμπτο και ανθεκτικό σε κρούση, καθώς επίσης διαθέτει ψηλότερο σημείο τήξης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η υφή του είναι πιο ματ και μπορεί να υποστεί επεξεργασία, τρίψιμο και βάψιμο. Επιπροσθέτως, είναι διαλυτό σε ακετόνη, κάτι που βοηθάει στη συγκόλληση εκτυπώσεων μεταξύ τους ή για την εξομάλυνσή τους. Το ABS χρησιμοποιείται σε πολλά προϊόντα που εμφανίζονται στην καθημερινότητά μας, όπως ανταλλακτικά αυτοκινήτων, σκεύη ή ακόμα και παιχνίδια όπως π.χ. τα Legos. Στην τρισδιάστατη (3Δ) εκτύπωση, το νήμα ABS απαιτεί θερμαινόμενη πλατφόρμα για την καλύτερη πρόσφυση των μοντέλων αλλά και για την ελαχιστοποίηση της στρέβλωσης τους, καθώς το ABS έχει την ιδιότητα να συρρικνώνεται όταν κρυώσει. Κατά την εκτύπωση, αφήνει μια μυρωδιά πλαστικού, από ενοχλητική στα κακής ποιότητας αναλώσιμα έως και σχεδόν ανεπαίσθητη στα καλύτερης ποιότητας (όπως το Z-ABS). [B22]

  Πλεονεκτήματα

  - Χαμηλό κόστος
  - Αντοχή σε θερμοκρασίες
  - Αντοχή σε κρούση και σε τριβή
  - Εύκολη κατεργασία του αντικειμένου μετά από την εκτύπωση

Μειονεκτήματα

- Παράγει έντονη οσμή όταν θερμαίνεται
- Παρουσιάζονται στρεβλώσεις κατά την εκτύπωση
- Χρειάζεται θερμαινόμενη τράπεζα ή και θερμαινόμενο θάλαμο κατά την εκτύπωση
- Τα εκτυπωμένα τεμάχια τείνουν να συρρικνώνονται αλλάζοντας τις τελικές διαστάσεις [B1]

- Το PLA (Polylactic Acid) είναι ακόμη ένα δημοφιλές υλικό 3Δ εκτύπωσης και είναι πολύ διαδεδομένο λόγω της ευκολίας στη χρήση του. Παράγεται από βιοδιασπώμενα υλικά, όπως ζαχαρότευτλα, καλαμπόκι και σόγια και είναι βιοδιασπώμενο και οικολογικό. Η θερμοκρασία εξώθησης που απαιτείται για την εκτύπωση είναι χαμηλότερη από αυτήν του ABS και έχει μικρό συντελεστή συρρίκνωσης και δεν πάσχει από στρέβλωση όσο άλλα αναλώσιμα. Το PLA έχει πολύ καλή πρόσφυση σε κρύα πλατφόρμα και συνήθως αρκεί η κάλυψή της με μπλε ταινία. Λόγω της μικρότερης θερμοκρασίας εκτύπωσης και της πιο εύκολης ψύξης του, διατηρεί πλεονέκτημα σε μοντέλα με μικρολεπτομέρειες και αιχμηρές άκρες. Η επιφάνεια του είναι σχετικά γυαλιστερή και μπορεί να δεχτεί κανονικά εξωτερική επεξεργασία. Είναι πιο σκληρό από το ABS αλλά και πιο εύθραυστο. [B23]

Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό κόστος
- Αντοχή σε φορτία
- Καλή ακρίβεια διαστάσεων
- Αντοχή στο χρόνο- (φαινόμενο γήρανσης)

Μειονεκτήματα

- Χαμηλή αντοχή σε θερμοκρασίες
- Δεν παρουσιάζει αντοχή σε uv ακτινοβολία
- Η χορδή εκτύπωσης του νήματος κόβεται εύκολα
- Μπορεί να καταρρεύσει κατά την εκτύπωση οπότε ίσως χρειαστεί ψύξη [B1]

- Το PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified) είναι μία αναβαθμισμένη έκδοση του δημοφιλούς νήματος PET. Η διαφορά μεταξύ PET και PETG είναι η προσθήκη γλυκόλης η οποία εμποδίζει την κρυστάλλωση και κάνει το νήμα λιγότερο εύθραυστο. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτού του υλικού στην αγορά όπως το PETE και το PETT. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του PETG είναι η αντοχή του στην κρούση. Επίσης, έχει πολύ μεγάλη οπτική καθαρότητα και σε σύγκριση με τα Acetal και Nylon, έχει καλύτερη αντοχή

σε όξινες συνθήκες, στην φθορά και την τριβή. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων του, το PETG έχει πολλές χρήσεις και εφαρμογές σε προϊόντα που κυμαίνονται από ιατρικό εξοπλισμό, συσκευασία τροφίμων, σήμανση και πολλά άλλα. [B13]

Πλεονεκτήματα

- Άοσμο κατά την εκτύπωση
- Αμελητέα φαινόμενα στρέβλωσης
- Γυαλιστερό και λείο φινίρισμα επιφανείας
- Καλή εφαρμογή με την τράπεζα εκτύπωσης

Μειονεκτήματα

- Αδυναμία γεφύρωσης
- Παρουσία λεπτών ινών στην επιφάνεια [B1]

- ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile)Το ακρυλικό ακρυλονιτρίλιο ακρυλικό , το οποίο ονομάζεται επίσης ακρυλικό ακρυλονιτρίλιο στυρολίου. Ανήκει στα θερμοπλαστικά και αναπτύχθηκε ως εναλλακτική λύση στο (ABS), αλλά με βελτιωμένη αντοχή στις καιρικές συνθήκες και χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Πρόκειται για ένα ακρυλικό συμπολυμερές στυρενίου ακρυλονιτριλίου τροποποιημένο με καουτσούκ. Χρησιμοποιείται για γενικά πρωτότυπα σε 3Δ εκτύπωση όπου η αντοχή του στην υπεριώδη ακτινοβολία και οι μηχανικές του ιδιότητες, το καθιστούν ένα εξαιρετικό υλικό για χρήση σε εκτυπωτές. Το ASA είναι ελαφρώς υγροσκοπικό σαν υλικό. Τέλος είναι υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο σε άλλα πολυμερή. [B8,B17,B18]

Πλεονεκτήματα

- Ισχυρή ακαμψία
- Υψηλή σκληρότητα
- Θερμική σταθερότητα
- Αντοχή στις καιρικές συνθήκες
- Αντίσταση στην ακτινοβολία UV
- Χημική αντίσταση σε διαβρωτικά
- Αντίσταση χρώματος / γήρανσης / κιτρινίσματος

Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος
- Απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες εξώθησης- εκτύπωσης
- Παράγει επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία αναθυμιάσεις κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης [B1]

- Carbon Fiber Οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται κυρίως για την ενίσχυση των συνθετικών υλικών. Δεν είναι ένα μόνο καθαρό υλικό. Δηλαδή, είναι πολυμερή με πρώτη ύλη το PLA ή το ABS ενισχυμένα-εμπλουτισμένα με ίνες άνθρακα ή γραφίτη. Οι ίνες άνθρακα είναι πρόσμιξη σε αναλογία διαφορετική από την κάθε εταιρία που το παράγει και αυτή είναι από 5% έως 20% ενώ το υπόλοιπο υλικό που χρησιμοποιείται έχει το ρόλο του συγκολλητικού υλικού των ινών. Η πρόσθεσή τους γίνεται σε μορφή πούδρας διαστάσεων από 150μm έως100μm και αυξάνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των τελικών τεμαχίων.

  Οι ρυθμίσεις εκτύπωσης, όπως η θερμοκρασία εκτύπωσης, η ταχύτητα, η πρόσφυση στο κρεβάτι και οι ρυθμοί εξώθησης θα είναι παρόμοιες με τις κανονικές ρυθμίσεις που χρησιμοποιούνται για το βασικό υλικό στο οποίο προστέθηκαν οι ίνες (για παράδειγμα, οι ρυθμίσεις PLA αποθεμάτων θα ήταν ένα καλό σημείο εκκίνησης για Νήμα από ανθρακονήματα με βάση PLA). Ωστόσο, λόγω των πρόσθετων ινών, αυτά τα ειδικά υλικά είναι πιο πιθανό να φθείρουν το ακροφύσιο του εκτυπωτή. Απαιτείται καλό καθάρισμα του ακροφυσίου με το πέρας κάθε εκτύπωσης πριν στερεοποιηθεί το υλικό πάλι μέσα του. [B19]

  Πλεονεκτήματα
  - Ελαφρύ υλικό
  - Υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και σχετικά άκαμπτο
  - Δεν μεταβάλλονται οι διαστάσεις κατά την εκτύπωση

  Μειονεκτήματα
  - Υψηλό κόστος
  - Απαιτεί αυξημένη ροή υλικού
  - Υψηλή τάση για φράξιμο και φθορά του ακροφυσίου
  - Υψηλός κίνδυνος να κοπεί το νήμα κατά την εκτύπωση
  - Απαιτεί ακροφύσιο από σκληρό υλικό (ανοξείδωτο και όχι ορειχάλκινο) [B1]

- Metal 3D Filament Επιπρόσθετα υπάρχουν και υλικά που περιέχουν μεταλλικές προσμίξεις. Η πρώτη ύλη παραμένει το PLA ή το ABS πάλι με ρόλο συγκολλητικού υλικού όπως και στο Carbon Fiber. Μπορεί να προστεθεί πούδρα από ανοξείδωτο ατσάλι, χρωμονικέλιο χαλκό ή και αλουμίνιο. Το τελικό αποτέλεσμα έχει την όψη και την υφή του μετάλλου που έχει επιλεχτεί όχι όμως και το βάρος του αφού δεν είναι συμπαγές μέταλλο. Αυτό επίσης σημαίνει ότι τα τεμάχια που εκτυπώνονται με μεταλλικό γεμισμένο PLA θα ζυγίζουν σημαντικά περισσότερο από αυτά του τυπικού PLA, παρά το ότι χρησιμοποιούν τις ίδιες ρυθμίσεις και καταναλώνουν την ίδια ποσότητα υλικού. Τα παραγόμενα τεμάχια έχουν βελτιωμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες έναντι της πρώτης ύλης PLA ή και ABS.

  Μειονέκτημα της πρόσμιξης με μεταλλικές πούδρες είναι η γρήγορη φθορά του

ακροφυσίου της μηχανής εκτύπωσης. Ένα τυπικό ακροφύσιο ορείχαλκου θα είναι πολύ μαλακό και θα φθαρεί γρήγορα, Για αυτό το λόγο αντικαθίστανται με άλλο από ανοξείδωτο ατσάλι που είναι σημαντικά ανθεκτικότερο αλλά με το ανάλογο κόστος.. Αν δεν γίνει γρήγορα αντιληπτή η φθορά και να πραγματοποιηθεί αντικατάσταση, τότε η εκτύπωση θα παρουσιάσει διαστασιολογικές και εμφανισιακές ατέλειες. Μέρος της εξέλιξης της τεχνολογίας εκτύπωσης με νήματα εμπλουτισμένα με μεταλλικά στοιχεία είναι μέσω ειδικής θερμικής κατεργασίας να απομακρυνθεί το συνθετικό συνδετικό υλικό και να παραμείνει μόνο το επιλεγμένο μέταλλο στις αρχικές διαστάσεις και με αυξημένες μηχανολογικές ιδιότητες. [B11,B20]

Πλεονεκτήματα

- Στιβαρές κατασκευές
- Μεταλλική όψη και υφή
- Δεν χρειάζεται υψηλές θερμοκρασίες για την εκτύπωση

Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος
- Βαριές κατασκευές
- Τα τυπωμένα μέρη είναι εύθραυστα
- Αλλοιώνει τα ορειχάλκινα ακροφύσια
- Απαιτεί ακροφύσιο ανθεκτικό στη φθορά
- Κάνει κακές γέφυρες λόγο του βάρους του
- Το νήμα μπορεί να κοπεί κατά την εκτύπωση
- Απαιτεί καθαρισμό του ακροφυσίου με το πέρας κάθε εκτύπωσης [B1]

- Wood PLA. Φυσικά από τα εκτυπώσιμα υλικά δε θα μπορούσε να λείπει το ξύλο που είναι το πρώτο υλικό που κατεργάστηκε ο άνθρωπος και έφτιαξε τα πρώτα του εργαλεία. Υλικό σε αφθονία στη φύση. Εύκολο στην κατεργασία του, καλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες με χαμηλό κόστος. Τα νήματα που παράγονται έχουν σαν πρώτη ύλη το PLA σε ρόλο συνδετικού υλικού με πούδρα κυρίως από πεύκο ή φελλό σε αναλογία 70% και 30% αντίστοιχα. Φυσικά η αναλογία αυτή μπορεί να διαφέρει από εταιρία σε εταιρία που το παράγει. Το αποτέλεσμα είναι ένα τραχύ καφέ ματ φινίρισμα με πραγματική ξύλινη αίσθηση. Διατίθενται διάφορες αποχρώσεις, κυρίως του καφέ ανάλογα την αίσθηση του ξύλου που θέλει να δώσει κάποιος. Πχ καρυδιά, κερασιά, πεύκο. Λόγω της πορώδους φύσης της κυτταρίνης (ξύλο) το τελικό αποτέλεσμα έχει υγροσκοπικές τάσεις. Τα εκτυπωμένα τεμάχια συνήθως έχουν διακοσμητικό ρόλο και δεν δίνεται βάση στις μηχανικές ιδιότητες. [B15]

Πλεονεκτήματα

- Όψη και υφή ξύλου
- Χρωματίζεται εύκολα
- Καλαίσθητες κατασκευές
- Δεν αλλοιώνει τα ορειχάλκινα ακροφύσια
- Δεν χρειάζεται υψηλές θερμοκρασίες για την εκτύπωση

Μειονεκτήματα

- Αφήνει χορδές
- Είναι υγροσκοπικό
- Μπορεί να φράξει το ακροφύσιο
- Τα τυπωμένα μέρη είναι εύθραυστα
- Το νήμα μπορεί να κοπεί κατά την εκτύπωση
- Απαιτεί καθαρισμό του ακροφυσίου με το πέρας κάθε εκτύπωσης
- Με χρήση ακροφυσίου μεγαλύτερης διατομής αλλάζει η ποιότητα επιφανείας [B1]

- Το HIPS (High Impact Polystyrene) είναι ένα διαλυτό νήμα που χρησιμοποιείται συχνά ως υλικό στήριξης. Λειτουργεί εξαιρετικά ως υλικό υποστήριξης με το ABS και δεν αλλοιώνει την επιφάνεια που εφάπτεται. Δεν συγκολλείται μόνιμα με το κύριο υλικό του εκτυπωμένου τεμαχίου με αποτέλεσμα να μην απαιτεί ξύσιμο, κοπή ή οποιαδήποτε άλλη μέθοδο αφαίρεσης που μπορεί να προκαλέσει ζημιά στις επιφάνειες των τεμαχίων που εκτυπώθηκαν.

Το HIPS είναι τόσο εύκολο στην εκτύπωση όσο το ABS, αλλά είναι πολύ λιγότερο πιθανό να παραμορφωθεί. Είναι ιδανικό υλικό για εκτύπωση σε συνδυασμό με το ABS λόγω της παρόμοιας συμπεριφοράς τους. Βοηθά επίσης ότι το HIPS και το ABS πρέπει να εκτυπωθούν στην ίδια θερμοκρασία εξώθησης περίπου 230 ° C.

Προτεινόμενες ρυθμίσεις εκτύπωσης

Θερμοκρασία εξώθησης: 220-240 ° C

Θερμοκρασία τράπεζας: 90-110 ° C

Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό κόστος
- Αντοχή σε κρούση
- Ανθεκτικό στο νερό
- Διαλυτό από την ουσία di-Limonene (διαλύτης για την αφαίρεση του από το εκτυπωμένο τεμάχιο)

Μειονεκτήματα

- Απαιτεί θερμαινόμενο κρεβάτι

- Απαιτεί θερμαινόμενο θάλαμο
- Υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης
- Ελευθερώνει δυσάρεστες οσμές [B1]

▪ Το PVA (Polyvinyl alcohol) είναι συνήθως γνωστό για την ικανότητά του να διαλύεται σε νερό και χρησιμοποιείται συχνά ως υλικό στήριξης για πολύπλοκες εκτυπώσεις.

Το PVA, ή πολυβινυλική αλκοόλη, είναι ένα μαλακό και βιοδιαλυτό πολυμερές που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην υγρασία και λειτουργεί κυρίως ως υποστηρικτικό υλικό όταν γίνεται εκτύπωση με PLA. Όταν εκτίθεται σε νερό, το PVA διασπάται, γεγονός που το καθιστά ένα πολύ χρήσιμο δομικό υλικό στήριξης για εκτύπωση 3Δ. Όταν εκτυπώνονται εξαιρετικά περίπλοκα σχήματα ή σχήματα με μερικώς κλειστές κοιλότητες, τα στηρίγματα PVA μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αφαιρεθούν εύκολα με χρήση ζεστού νερού. Οι τυπικές υποστηρίξεις μπορεί να ήταν δύσκολο να εκτυπωθούν ή να αφαιρεθούν σε αυτές τις περιπτώσεις. Το PVA μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο υλικό, εάν υπάρχει ανάγκη δημιουργίας γρήγορων πρωτοτύπων.

Πλεονεκτήματα

- Γρήγορες εκτυπώσεις
- Βιοδιασπώμενο υλικό
- Δεν απαιτούνται ειδικοί διαλύτες
- Υδατοδιαλυτό (ως υποστηρικτικό υλικό)

Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος
- Αντοχή σε θερμοκρασίες
- Υδατοδιαλυτό (ως κύριο υλικό)
- Απαιτούνται αεροστεγή δοχεία αποθήκευσης
- Φράζει το ακροφύσιο εάν είναι ζεστό αλλά δεν εξωθείται υλικό [B1,B24]

▪ Το Nylon (νάιλον) είναι ένα σκληρό και ημι-εύκαμπτο υλικό που προσφέρει υψηλή αντοχή σε κρούση και τριβή. Είναι μια ιδανική επιλογή για εκτύπωση ανθεκτικών ανταλλακτικών. Το νάιλον (γνωστό και ως πολυαμίδιο) είναι ένα δημοφιλές υλικό στη βιομηχανία πλαστικών, γνωστό για τη σκληρότητα και την ευελιξία του. Τα νάιλον νήματα συνήθως απαιτούν θερμοκρασίες εξώθησης κοντά στους 250 ºC, ωστόσο, ορισμένες μάρκες επιτρέπουν την εκτύπωση σε θερμοκρασίες τόσο χαμηλές όσο 220 ºC λόγω της χημικής τους σύνθεσης. Πολλοί εκτυπωτές δεν περιλαμβάνουν μια επένδυση που μπορεί να φτάσει με ασφάλεια στους 250 ºC, επομένως αυτές οι εκδόσεις χαμηλότερης θερμοκρασίας μπορεί να

είναι χρήσιμες και ενδεχομένως να σας εξοικονομήσουν από την ανάγκη αναβάθμισης της επείγουσας υποστήριξης. Μια μεγάλη πρόκληση με τα νάιλον νήματα είναι ότι είναι υγροσκοπικά, πράγμα που σημαίνει ότι απορροφούν εύκολα την υγρασία από το περιβάλλον τους. Η εκτύπωση νάιλον αφού απορροφήσει την υγρασία θα οδηγήσει σε πολλά προβλήματα ποιότητας εκτύπωσης, επομένως η αποθήκευση νήματος καθίσταται πολύ σημαντική και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

<u>Πλεονεκτήματα</u>

- Αντοχή σε τριβή
- Αντοχή σε κρούση
- Εύκολη εκτύπωση
- Σκληρό αλλά και ελαστικό

<u>Μειονεκτήματα</u>

- Υγροσκοπικό
- Επιρρεπές σε στρέβλωση
- Αεροστεγής αποθήκευση μόνο
- Εκτύπωση σε ξηρό περιβάλλον
- Νήμα με υγρασία ή εκτύπωση σε περιβάλλον με υψηλή υγρασία δημιουργεί προβλήματα στην εκτύπωση [B1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3Δ Εκτύπωση με εξώθηση νήματος (FDM) & με πολλαπλή εκτόξευση υλικού (PolyJet)

3.1 Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια μέθοδος Προσθετικής Κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Στην τρισδιάστατη εκτύπωση εξώθησης νήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού κυρίως κεραμικά και πολυμερή. Σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες και εξοπλισμό προσθετικής κατασκευής, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές εξώθησης νήματος είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. [B25]

Στην μέχρι τώρα ιστορία της κατασκευής εξαρτημάτων, χρησιμοποιούνται οι Κατεργασίες Αφαίρεσης Υλικού, όπως το φρεζάρισμα, η τόρνευση κτλ. Πλέον δίνεται η δυνατότητα να δημιουργηθεί από την αρχή στις διαστάσεις που απαιτείται, εξοικονομώντας υλικό, χρόνο και ενέργεια.

Οι κατηγορίες των Κατεργασιών Πρόσθεσης Υλικού είναι οι κάτωθι: [A4]:

I. Εξώθηση Υλικού (Material extrusion) (fused deposition modeling- FDM)
II. Πολυμερισμός σε δεξαμενή (Vat photo-polymerization) [A3]
III. Σύντηξη σε τράπεζα σκόνης (Powder bed fusion)
IV. Εκτόξευση υλικού (Material jetting)- (PolyJet)
V. Εκτόξευση συνδετικού υλικού (Binder jetting)
VI. Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια (Directed energy deposition)[A5]
VII. Στρωμάτωση φύλλων (Sheet lamination)

Η παρούσα εργασία αφορά τις ακόλουθες δύο κατηγορίες Κατεργασιών Πρόσθεσης Υλικού:

I. Εξώθηση Υλικού (Material extrusion)

Υλικά Εκτύπωσης: ASA – CARBON FIBER – PETG – ABS- PLA

II. Εκτόξευση υλικού (Material jetting)- (PolyJet)

Υλικό Εκτύπωσης: Ρητίνη Vero Clear

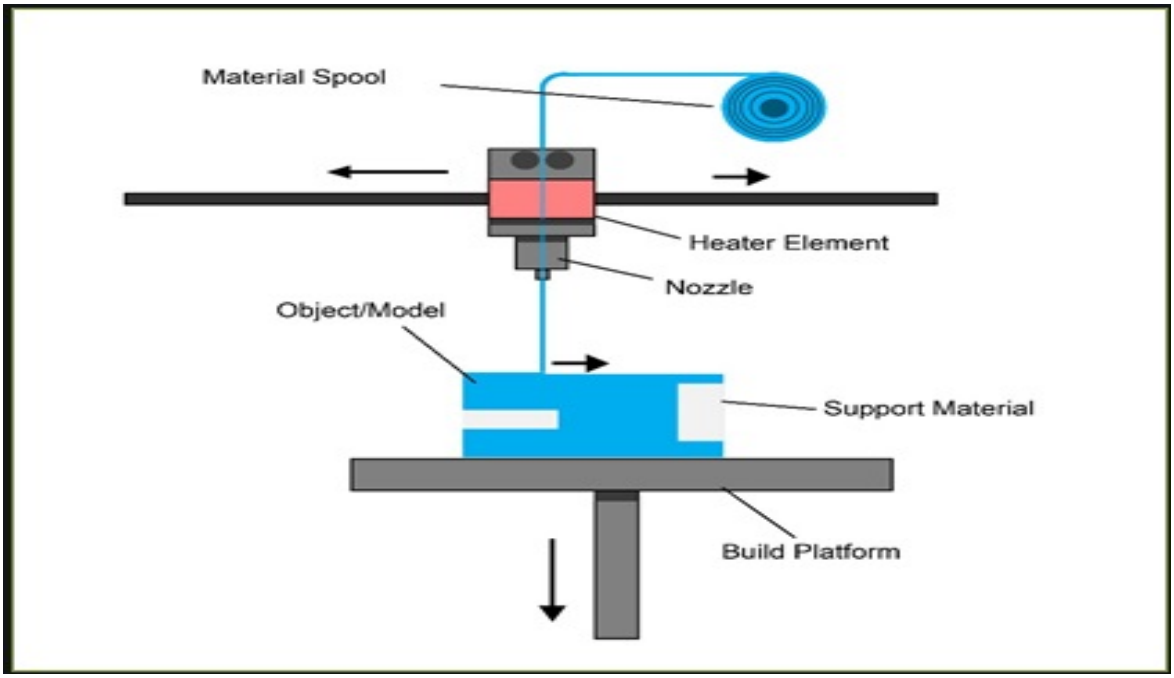
3.2 Τεχνολογία εκτύπωσης με νήμα (FDM)

Η τεχνολογία εξώθησης νήματος χρησιμοποιεί θερμοπλαστικά νήματα τα οποία προωθούνται από έναν εξωθητήρα και διοχετεύονται μέσω ενός ζεσταμένου ακροφυσίου εξώθησης πάνω στην τράπεζα εκτύπωσης.. Κατά την έξοδο από την κεφαλή του εκτυπωτή, το υλικό εξωθείται σε μεγάλες θερμοκρασίες (190-300 βαθμούς Κελσίου συνήθως, ανάλογα με το υλικό). Η ενέργεια αυτή επαναλαμβάνεται ως γραμμή-γραμμή στους άξονες X και Y, όπως και σε κάθε στρώση στον άξονα Z, μέχρι το μοντέλο να αποκτήσει την τελική του μορφή. Η ανάλυση της κάθε στρώσης (πάχος στρώσης) στον άξονα Z είναι της τάξης 0,100-0,300 χιλιοστά συνήθως.
Η επιφάνεια (τράπεζα) πάνω στην οποία χτίζεται το τεμάχιο συχνά είναι ζεσταμένη, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή πρόσφυση του τεμαχίου στην επιφάνεια εκτύπωσης.

Επίσης η εκτύπωση μπορεί να λαμβάνει χώρα σε θάλαμο για να υπάρχει ομοιόμορφη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, αλλά και για να μην δημιουργηθούν ανεπιθύμητες επικαθήσεις από μικροσωματίδια που βρίσκονται στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Μέρος του εκτυπωμένου νήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποστηρικτικό υλικό στο τεμάχιο που εκτυπώνεται, ώστε να μην αλλοιωθεί η γεωμετρία του. Με το πέρας της διαδικασίας τα μέρη που δεν αποτελούν τμήμα του τελικού τεμαχίου αφαιρούνται.

Από τον τρόπο που θα οριστεί η εκτύπωση του τεμαχίου πάνω στην τράπεζα της μηχανής εξαρτάται και η αναγκαιότητα της ποσότητας του υποστηρικτικού υλικού που θα χρειαστεί, ο χρόνος εκτύπωσης και η συνολική ανάγκη σε ποσότητα νήματος. [B12]



Εικόνα 1: Εξώθηση Υλικού (Πηγή: [B2])

	ABS	PLA	PETG	Carbon Fiber Filled	ASA
	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More
Compare Selected / Show All					
Ultimate Strength	40 MPa	65 MPa	53 MPa	45 - 48 MPa	55 MPa
Stiffness	5 / 10	7.5 / 10	5 / 10	10 / 10	5 / 10
Durability	8 / 10	4 / 10	8 / 10	3 / 10	10 / 10
Maximum Service Temperature	98 °C	52 °C	73 °C	52 °C	95 °C
Coefficient of Thermal Expansion	90 µm/m-°C	68 µm/m-°C	60 µm/m-°C	57.5 µm/m-°C	98 µm/m-°C
Density	1.04 g/cm³	1.24 g/cm³	1.23 g/cm³	1.3 g/cm³	1.07 g/cm³
Price (per kg)	$10 - $40	$10 - $40	$20 - $60	$30 - $80	$38 - $40
Printability	8 / 10	9 / 10	9 / 10	8 / 10	7 / 10
Extruder Temperature	220 - 250 °C	190 - 220 °C	230 - 250 °C	200 - 230 °C	235 - 255 °C
Bed temperature	95 - 110 °C	45 - 60 °C	75 - 90 °C	45 - 60 °C	90 - 110 °C
Heated Bed	Required	Optional	Required	Optional	Required
Recommended Build Surfaces	Kapton Tape, ABS Slurry	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glue Stick, Painter's Tape	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glue Stick, PEI
Other Hardware Requirements	Heated Bed, Enclosure Recommended	Part Cooling Fan	Heated Bed, Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed

Εικόνα 2: Ιδιότητες υλικών που εκτυπώθηκαν (Πηγή: [B1])

	ABS	PLA	PETG	Carbon Fiber Filled	ASA
Flexible	–	–	–	–	–
Elastic	–	–	–	–	–
Impact Resistant	✔	–	–	–	✔
Soft	–	–	–	–	–
Composite	–	–	–	✔	–
UV Resistant	–	–	–	–	✔
Water Resistant	–	–	✔	–	–
Dissolvable	–	–	–	–	–
Heat Resistant	✔	–	–	–	✔
Chemically Resistant	–	–	✔	–	–
Fatigue Resistant	–	–	✔	–	–
Heated Bed Not Required	–	✔	–	✔	–

Εικόνα 3: Ιδιότητες υλικών που εκτυπώθηκαν (Πηγή: [B1])

Στις παραπάνω εικόνες 2 και 3 παρουσιάζονται τα υλικά που κατασκευάστηκαν τα δοκίμια προς μελέτη. Οι εικόνες αυτές είναι πίνακες με χρήσιμες συγκριτικές πληροφορίες για τα υλικά. Ανάλογα τις ανάγκες της έκαστης κατασκευής, οι πληροφορίες αυτές μπορούν να βοηθήσουν στην επιλογή του ορθότερου υλικού.

Αν οι ανάγκες είναι πχ αντοχή σε θερμοκρασία, τότε το Carbon Fiber δεν είναι καλή επιλογή. Αν όμως απαιτείται ακαμψία τότε είναι το ιδανικότερο από τις άλλες επιλογές μας.

Στην περίπτωση που ένα αντικείμενο πρέπει να είναι ανθεκτικό στον ήλιο, τότε η χρήση υλικού ASA είναι μονόδρομος.

Μειονέκτημα των περισσότερων εκτυπώσιμων υλικών είναι ότι είναι υδρόφιλα. Αυτό στην πράξη μεταφράζεται ως εξής. Οι πόροι του υλικού γεμίζουν με υγρασία ή πχ λιπαντικό, αλλά μεταβάλουν και τις τελικές διαστάσεις του τεμαχίου που κατασκευάστηκε. Έτσι ανάλογα τη

χρήση ίσως πρέπει να δοθούν άλλες ανοχές μεταξύ συνεργαζόμενων τεμαχίων κατά το σχεδιασμό τους.

Γενικά όλες οι πληροφορίες που παρουσιάζονται βοηθούν στην καλύτερη επιλογή του υλικού ανά περίπτωση, αλλά και για τον καλύτερο δυνατό τρόπο εκτύπωσης του, όπως η θερμοκρασία τραπεζιού.

Οι κατασκευαστές των υλικών δεν δίνουν πληροφορίες για αντοχή σε στρέψη για κανένα από τα υλικά τρισδιάστατων εκτυπώσεων που παρέχονται στο εμπόριο.

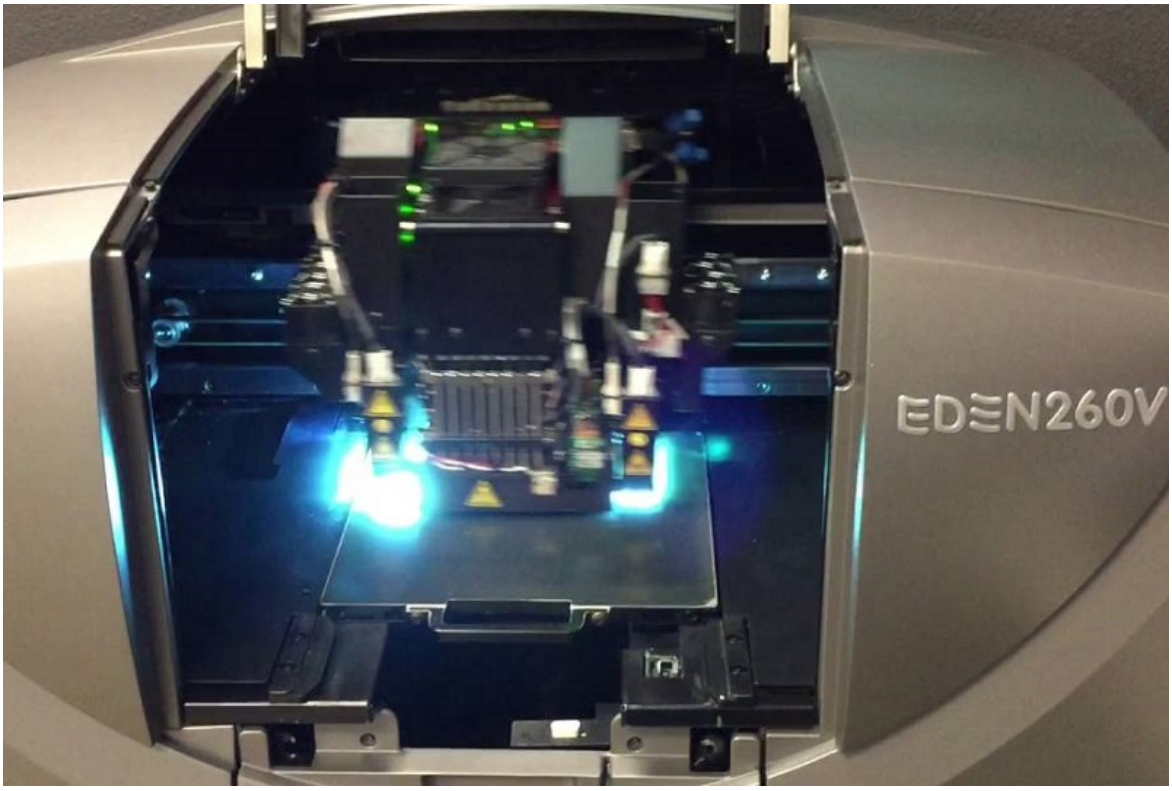
Ο όρος Εκτυπωσιμότητα (Prinatability) θα μπορούσε να ερμηνευτεί στην πράξη ως ποσοστό επιτυχίας της εκτύπωσης που φέρει το κάθε υλικό. Αν μεταβληθούν κάποιες σταθερές όπως η θερμοκρασία τραπεζιού, κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, τότε μπορεί να υπάρξει κατασκευαστική αστοχία. Μπορεί δηλαδή το εκτυπώσιμο τεμάχιο να στρεβλώσει ή να μην υπάρξει ένωση μεταξύ στρώσεων εκτυπώσιμου υλικού και να υπάρξει αποκόλληση.

Στην περίπτωση που η εκτύπωση διακοπεί χωρίς να ολοκληρωθεί, για κάποιο λόγο και η συνέχεια της εκτύπωσης δεν υποστηρίζεται από τον εκτυπωτή τότε το εκτυπώσιμο τεμάχιο είναι άχρηστο και η διαδικασία πρέπει να γίνει από την αρχή. (πχ: διακοπή ηλεκτροδότησης)

Οι τιμές που αναγράφονται είναι ενδεικτικές σαν αγορά νήματος προς εκτύπωση και όχι αγοράς εκτυπώμενου τεμαχίου.

3.3 Εκτόξευση υλικού (Material Jetting)

Η εκτόξευση υλικού (Material jetting)-(PolyJet) είναι μια Κατεργασία Πρόσθεσης Υλικού, κατά την οποία ένα φωτο-ευαίσθητο πολυμερές (ρητίνη) στερεοποιείται επιλεκτικά μέσω πολυμερισμού που ενεργοποιείται με υπεριώδες φως. Δηλαδή είναι μια μέθοδος εκτύπωσης με στερεοποίηση ρητίνης *(PolyJet*) και ένα μοντέλο εκτυπωτή που χρησιμοποιεί αυτά την τεχνολογία είναι ο Stratasys Eden 260V. Λόγο των πολλαπλών οπών που φέρουν οι κεφαλές η τεχνολογία αυτή συναντάται και ως πολλαπλή εκτόξευση υλικού.



Εικόνα 4: 3Δ εκτυπωτής Stratasys Eden 260V (Πηγή: [B3])

Η πολλαπλής εκτόξευσης υλικού 3Δ εκτύπωση είναι από τις πλέον ισχυρές τεχνολογίες 3Δ εκτύπωσης που παράγει υψηλής ποιότητας, με μεγάλη ακρίβεια και πολύ καλές επιφάνειες, πρωτότυπα και εργαλεία. Με τη χρήση μιας πολλαπλής εκτόξευσης υλικού 3Δ εκτυπωτή επιτυγχάνονται λεία και λεπτομερή πρωτότυπα που μεταφέρουν την αισθητική του τελικού προϊόντος.

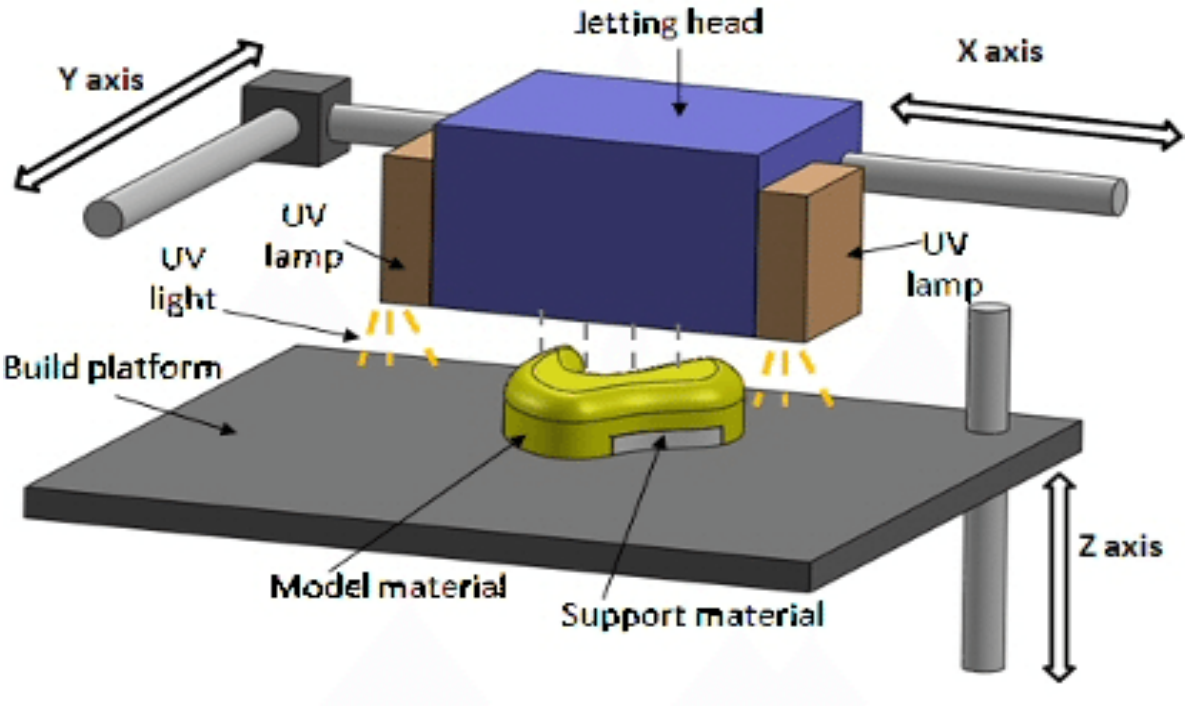
Ένας 3Δ εκτυπωτής πολλαπλής εκτόξευσης υλικού λειτουργεί σαν εκτυπωτής inkjet. Αντί να ρίχνει σταγόνες μελάνης, οι εκτοξευτήρες εκτοξεύουν φωτοπολυμερή ρητίνη η οποία στερεοποιείται όταν εκτίθεται σε υπεριώδες φως (UV). Κάθε στρώση από φωτοπολυμερή ρητίνη επικάθεται στην επιφάνεια του τραπεζιού του 3Δ εκτυπωτή μέχρι το τελικό χτίσιμο του μοντέλου.

Η μέθοδος εκτύπωσης με στερεοποίηση ρητίνης (πολλαπλή εκτόξευση υλικού) είναι μια μέθοδος με την οποία επιτυγχάνονται καλύτερες κατασκευαστικές ακρίβειες σε σύγκριση με την τεχνολογία εκτύπωσης με νήμα. Έτσι δε χρειάζεται να αλλάξουν οι διαστάσεις σε μία κατασκευή στη διάρκεια του σχεδιασμού της για να ληφθούν υπόψη διαστασιολογικές ατέλειες. Οι τελικές διαστάσεις του προϊόντος είναι οι επιθυμητές. Επίσης δεν χρειάζεται περαιτέρω κατεργασία το εκτυπωμένο τεμάχιο, όπως λείανση. Το βασικό υλικό είναι μία ρητίνη σε υγρή μορφή και αφού οι κεφαλές την αφήσουν στο επιθυμητό σημείο, τότε με κατευθυνόμενη υπεριώδη ακτινοβολία τη στερεοποιούν. Για υποστηρικτικό υλικό χρησιμοποιείται πάλι ρητίνη σε υγρή μορφή, η οποία

στερεοποιείται με τον ίδιο τρόπο, αλλά στην υφή και συμπεριφορά είναι σαν ζελέ. Αυτό βοηθά στην εύκολη διαχώριση από το τελικό τεμάχιο χωρίς να αφήσει στίγμα πάνω του. Αυτές οι ρητίνες είναι συνήθως από αλκοολούχες ενώσεις και η αφαίρεση γίνεται εύκολα με υδροβολή. Σαν κόστος υλικού είναι αισθητά ακριβότερο από τα υλικά που αναφέρθηκαν νωρίτερα στην τεχνολογία εξώθησης υλικού.

Ένα παράδειγμα είναι το βιο-συμβατό φωτοπολυμερές PolyJet (MED610), όπου είναι ένα άκαμπτο ιατρικό πρωτότυπο υλικό. Διαθέτει υψηλή σταθερότητα διαστάσεων και άχρωμη διαφάνεια.

Η τεχνολογία πολλαπλής εκτόξευσης υλικού χρησιμοποιεί ένα φορείο με κεφαλές που ψεκάζουν φωτοπολυμερή ρητίνη στο θάλαμο, η οποία πολυμερίζεται με τη χρήση υπεριώδους φωτός με τη χρήση UV λαμπών. Κάθε μια στρώση (επιφάνεια X,Y) ορίζεται ως οριζόντια τομή του μοντέλου. Μετά από κάθε στρώση, επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι το μοντέλο να αποκτήσει την τελική μορφή του. Η ανάλυση της κάθε στρώσης είναι της τάξης 0,016-0,030 χιλιοστά.

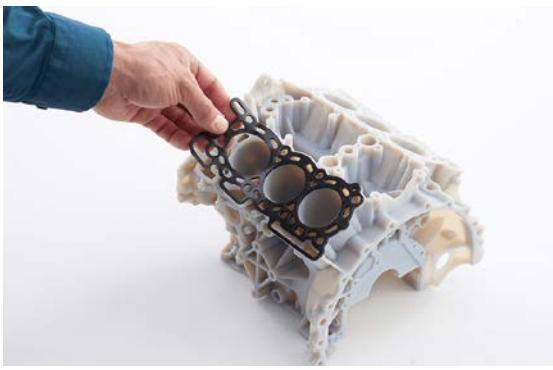


Εικόνα 5: Εκτύπωση πολλαπλής εκτόξευσης υλικού (Πηγή: [B3])

Σύμφωνα με τις διαφορές στη διαδικασία και στα υλικά, κάθε τεχνολογία έχει και διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η επιλογή λοιπόν της τεχνολογίας ποικίλει ανάλογα με τις εφαρμογές που θα έχει το μοντέλο.

Εφαρμογές

Με τη χρήση της τεχνολογίας πολλαπλής εκτόξευσης υλικού δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων αντικειμένων με μεγάλη ακρίβεια, ειδικά στο χτίσιμο πρωτότυπων μοντέλων.



Εικόνα 6: Πολύπλοκη εκτύπωση (Πηγή: [B3])

Ενώ με την τεχνολογία πολλαπλής εκτόξευσης υλικού δίνεται έμφαση με λεπτομέρεια στο τελικό αποτέλεσμα, η χρήση των μηχανημάτων εξώθησης νήματος δίνει την δυνατότητα κατασκευής ανθεκτικών μοντέλων που είναι έτοιμα για τελική χρήση.

Εικόνα 7: Ανθεκτική εκτύπωση (Πηγή: [B16])

Υλικά

Είναι σημαντικό, ανάλογα με την χρήση του μοντέλου να γίνει η σωστή επιλογή του υλικού που θα ικανοποιήσει τις ανάγκες για το τελικό προϊόν.

Για έμφαση στη λεπτομέρεια, οι ρητίνες που χρησιμοποιεί η τεχνολογία πολλαπλής εκτόξευσης υλικού είναι ιδανική. Μικρά χαρακτηριστικά, λεπτές ή και πολύπλοκες επιφάνειες μπορούν εύκολα να χτιστούν με τη χρήση της τεχνολογίας αυτής. Με υλικά που ποικίλουν, από εύκαμπτα έως πιο άκαμπτα ή ακόμα και βιοσυμβατά, χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως στην οδοντιατρική, κατασκευή εξαρτημάτων, πρωτοτύπων κ.α..

Η τεχνολογία FDM χρησιμοποιεί διάφορα θερμοπλαστικά που βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς ανάλογα με τις ανάγκες. Κάποιες κατηγορίες ενδεικτικά είναι σε θερμοπλαστικά που έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασίες, σε διάφορα χημικά κ.α.

Επιφάνεια

Η επιφάνεια του τελικού προϊόντος εξαρτάται από την εφαρμογή του. Για πρωτότυπα αντικείμενα, οι επιφάνειες και η αισθητική παίζουν καθοριστικό ρόλο. Σε αυτή την περίπτωση η τεχνολογία πολλαπλής εκτόξευσης υλικού, με την χρήση διαφόρων υλικών ανάλογα την εφαρμογή, είναι μια πολύ καλή επιλογή.

Η τεχνολογία εξώθησης νήματος δεν μπορεί να προσφέρει την λεπτομέρεια που παρέχει η πολλαπλή εκτόξευση υλικού μπορεί όμως να παράγει αντικείμενα με σχετικά περίπλοκη γεωμετρία. Τα αντικείμενα που παράγονται από τη διαδικασία εξώθησης νήματος, παρουσιάζουν γραμμές στο τελικό προϊόν, τόσο στους άξονες X-Y, όσο και στον Z. Αυτές οι γραμμές ενδέχεται σε ορισμένες περιπτώσεις να επηρεάσουν το τελικό προϊόν όταν αυτό υποστεί μηχανικές δοκιμές. Από αισθητικής πλευράς με χρήση γυαλόχαρτου ενδέχεται να επιτευχθεί αρκετά καλό επιφανειακό φινίρισμα.

Μέγεθος Αντικειμένου

Το συνολικό μέγεθος του μοντέλου που πρόκειται να εκτυπωθεί, δημιουργεί ένα ζήτημα. Συνήθως οι εκτυπωτές πολλαπλής εκτόξευσης υλικού βγαίνουν σε διαστάσεις όχι μεγαλύτερες από 20x20x20 εκατοστών. Στην τεχνολογία εξώθησης νήματος, μπορεί κανείς να βρει αρκετά μεγαλύτερους. Και στις 2 μεθόδους υπάρχει δυνατότητα εκτύπωσης μεγάλων αντικειμένων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Η πιο συνηθισμένη είναι ο διαχωρισμός ενός μεγάλου κομματιού σε ορισμένα μικρότερα ώστε να χωράνε στον θάλαμο εκτύπωσης του εκάστοτε εκτυπωτή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει στη φάση του σχεδιασμού του κομματιού. Τα κομμάτια που εκτυπώνονται μπορούν να κολληθούν μεταξύ τους και το αποτέλεσμα να μοιάζει σαν το προϊόν να είναι αποτέλεσμα μιας και μόνο εκτύπωσης.

Κόστος

Ένα μεγάλο ζήτημα που προκύπτει κοιτάζοντας την κάθε τεχνολογία, είναι το κόστος του εκτυπωτή ή και της ίδιας της εκτύπωσης. Η πολλαπλής εκτόξευσης υλικού τεχνολογία αποτελείται από ακριβά μέρη που στελεχώνουν τον 3Δ εκτυπωτή ώστε να παρέχεται στον χρήστη η λεπτομέρεια του τελικού προϊόντος. Επίσης τα αναλώσιμα του εκτυπωτή όπως είναι τα ανταλλακτικά και οι ρητίνες για το μοντέλο και το υποστηρικτικό υλικό είναι κι αυτά πολύ ακριβά.

Στην τεχνολογία εξώθησης νήματος, το κόστος τόσο του εκτυπωτή όσο και των πρώτων υλών είναι αρκετά πιο χαμηλό, τόσο σε ερασιτεχνικούς 3Δ εκτυπωτές όσο και σε επαγγελματικούς, κάτι που τους κάνει πλέον προσιτούς και σε ιδιώτες.

Η επιλογή της τεχνολογίας έχει να κάνει με τη χρήση και την εφαρμογή του τελικού παραγόμενου προϊόντος. Κάθε μια έχει τα όρια της, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της.

Εικόνα 8: 3Δ πολύχρωμη, ενιαία εκτύπωση PolyJet (Πηγή: [B2])

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αντοχή 3Δ εκτυπωμένων δοκιμίων σε στρέψη

4.1 Παρουσίαση μηχανικών καταπονήσεων

Οι σπουδαιότερες καταπονήσεις στη μηχανική των υλικών είναι οι ακόλουθες:

Εφελκυσμός και θλίψη: Οι καταπονήσεις αυτές, για να εκδηλωθούν σε ένα σώμα, θα πρέπει να ενεργούν στα άκρα του φορτίου αντίθετα, των οποίων η συνισταμένη συμπίπτει με το γεωμετρικό άξονα του σώματος. Ανάλογα αν το σώμα επιμηκυνθεί ή επιβραχυνθεί, καταπονείται αντίστοιχα σε εφελκυσμό και θλίψη.

Διάτμηση: Εμφανίζεται σε ένα σώμα, όταν ενεργούν σε αυτό δύο φορτία κάθετα στον άξονά του και οι διευθύνσεις τους βρίσκονται πάλι πλησίον η μία στην άλλη.

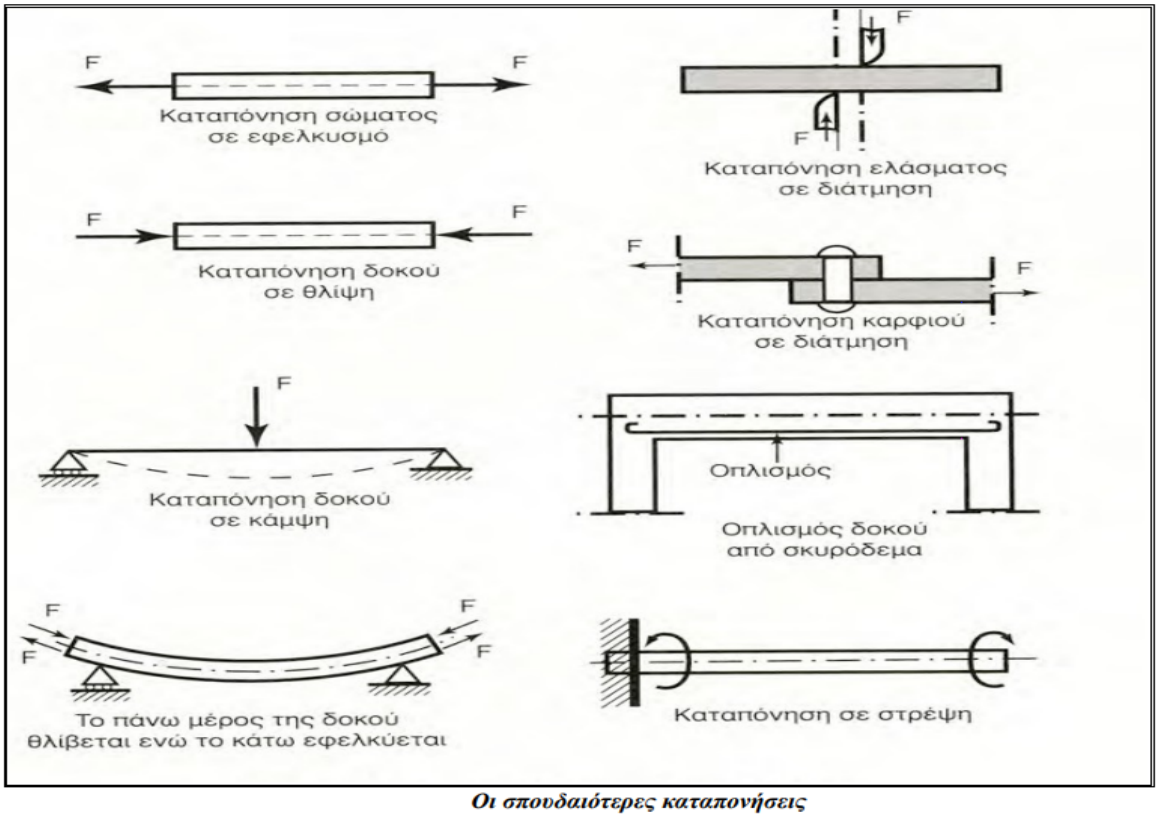
Κάμψη: Εμφανίζεται σε ένα σώμα, όταν ενεργούν σε αυτό φορτία κάθετα στον άξονά του, που έχουν ως συνέπεια τη δημιουργία ροπών, που βρίσκονται σε επίπεδο κάθετο στη διατομή του και που διέρχεται από το γεωμετρικό άξονα του σώματος.

Στρέψη: Εμφανίζεται σε ένα σώμα, όταν ενεργούν σε αυτό φορτία τα οποία αποτελούν ζεύγος δυνάμεων τα οποία βρίσκονται κάθετα στη διατομή στον άξονα του σώματος.

Λυγισμός: Είναι η ταυτόσημη καταπόνηση με τη θλίψη, με τη διαφορά ότι το μήκος του σώματος είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις του.

δύναμη	strength, force
εφελκυσμός	tensile
θλίψη	compression
τμήση	split
διάτμηση	shearing
στρέψη	tortion
λυγισμός	buckling

Πίνακας 1: Μετάφραση Υπαρχουσών Μηχανικών Καταπονήσεων



Οι σπουδαιότερες καταπονήσεις

Εικόνα 9: Μηχανικές καταπονήσεις (Πηγή: [B2])

Ο μηχανισμός που σχεδιάστηκε φέρει δυο σε αριθμό άξονες όπου συνεργάζονται μέσο γραναζιών. Τα γρανάζια παρουσιάζουν δυνάμεις τριβής και οι άξονες υφίστανται στρεπτική καταπόνηση.

Ο κύριος σκοπός της δοκιμής της στρέψης είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά των δοκιμίων που υποβάλλονται σε στρεπτική καταπόνηση και να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της δοκιμής. Επίσης, ο υπολογισμός των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, δηλαδή των τάσεων διαρροής και θραύσης, καθώς και η κατασκευή του διαγράμματος στρέψης (ροπές στρέψης – γωνίες στροφής) , όπως και ο υπολογισμός του μέτρου διάτμησης G του υλικού αλλά και η πορεία της συμπεριφοράς του. Η καταπόνηση σε στρέψη είναι ένα από τα είδη των απλών καταπονήσεων στην οποία καταπονούνται συνήθως οι ράβδοι, αλλά και οι δοκοί. Μια ράβδος καταπονείται σε στρέψη όταν επάνω σε αυτή επενεργούν ζεύγη ίσων και αντιθέτων δυνάμεων που τα επίπεδα τους είναι κάθετα στον κεντροβαρικό άξονα της.

Τα ζεύγη των δυνάμεων αυτών προκαλούν σε κάθε διατομή της ράβδου ροπή, ονομάζονται ροπή στρέψης. Σε περίπτωση που τα ζεύγη αυτά είναι περισσότερα από ένα, η ροπή στρέψης ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών όλων των ζευγών που είναι αριστερά ή δεξιά της διατομής. Το διάνυσμα Mt της ροπής στρέψης είναι παράλληλο με τον άξονα της ράβδου και συμβολίζεται με Mx , διότι συμπίπτει με τον άξονα x της ράβδου και η ράβδος

περιστρέφεται περί τον άξονα της. Η ύπαρξη της ροπής στρέψης Mt (Mx) δημιουργεί στο υλικό της ελαστικής ράβδου εσωτερικές διατμητικές τάσεις, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια στροφή των διατομών μεταξύ τους που ονομάζεται γωνία στροφής .

Στρέψη παρουσιάζεται σε πολλές εφαρμογές και η πιο κοινή εφαρμογή είναι σε ατράκτους ή άξονες μετάδοσης της κίνησης που χρησιμοποιούνται για να μεταδίδουν ισχύ από ένα σημείο σε άλλο. Οι άξονες μπορεί να είναι συμπαγείς ή κοίλοι.

Παραδοχές

Οι παραδοχές που πρέπει να λάβουμε υπόψη κατά τη δοκιμασία της στρέψης είναι :

i. Οι διατομές της ράβδου παραμένουν επίπεδες και μετά την παραμόρφωση και διατηρούν το σχήμα, το μέγεθος και την μεταξύ τους απόσταση.
ii. Κάθε διατομή περιστρέφεται σαν στερεός δίσκος, με αποτέλεσμα η διατομή να περιστρέφεται σαν σύνολο (οι ακτίνες παραμένουν ευθείες).
iii. Το υλικό της ράβδου είναι ομογενές και ισότροπο, ώστε οι ιδιότητες να είναι ομοιόμορφες σε κάθε σημείο και διεύθυνση.

Η τελευταία παραδοχή δεν ισχύει επακριβώς στα εκτυπώσιμα υλικά και μελετάται κατά περίπτωση. Δεδομένου ότι ορίζεται φορά εκτύπωσης οι ιδιότητες τους δεν είναι ομοιόμορφες προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτό είναι ένα σημαντικό μέρος της μελέτης που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία μέσο των πειραμάτων που τελέστηκαν αρχικά με υλικό PLA [A11,A12].

4.2. Περιβάλλον εκτύπωσης τεχνολογίας εξώθησης νήματος & πολλαπλής εκτόξευσης υλικού

4.2.1. Επιλογή τεχνολογίας και υλικού για τρισδιάστατη εκτύπωση του μηχανισμού

Η πρώτη επιλογή για τρισδιάστατη εκτύπωση είναι με εκτύπωση εξώθησης νήματος με τον εκτυπωτή ‘Modix Big 60’.

Κύρια χαρακτηριστικά εκτυπωτή:

- Πλαίσιο Αλουμινίου
- Σύστημα εξώθησης με 3Δ κεφαλή υψηλής ροής hotend & Titan
- Σύστημα στιβαρής κίνησης - Hiwin ράγες κίνησης και ιμάντες Gates
- Αυτόματη ρύθμιση ευθυγράμμισης επιφανείας εκτύπωσης (Auto bed lebeling)
- Μονή ή διπλή κεφαλή εκτύπωσης
- Κλειστό περίβλημα (Plexiglass)

Τα υλικά αυτά που εκτυπώθηκαν τα δοκίμια είναι τα ακόλουθα:

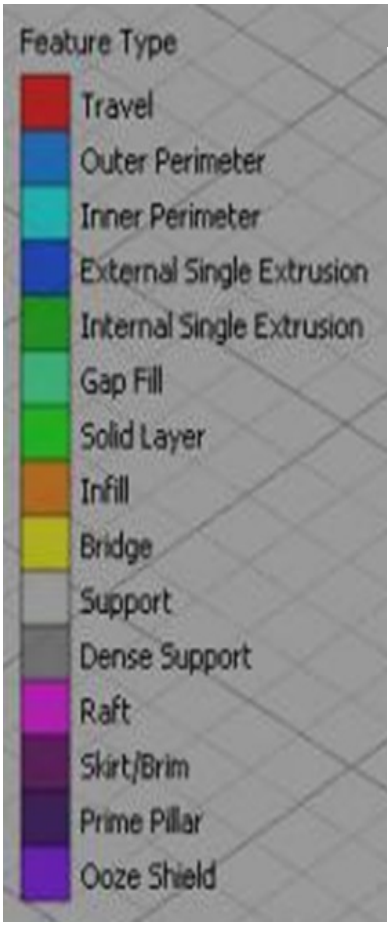
- ABS
- PETG
- ASA
- CARBON FIBER
- PLA

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μια συγκεκριμένη χημική σύσταση ανάλογα με το υλικό και τη χρήση του. Η χημική σύσταση η οποία δομεί το κάθε υλικό δεν αποκαλύπτεται από την κατασκευάστρια εταιρία του. Τέλος υπάρχει ένα ποσοστό κοντά στο 1% όπου είναι οι χρωστικές ουσίες που αναμειγνύονται και δίνουν τις επιθυμητές αποχρώσεις.

4.2.2. Περιβάλλον εκτύπωσης

Στις ακόλουθες εικόνες και πίνακες εμφανίζονται χρήσιμες πληροφορίες για τα αντικείμενα που πρόκειται να εκτυπωθούν. Ανάλογα με το σχήμα του τεμαχίου προς εκτύπωση και τον τρόπο που προσανατολίζεται πάνω στο θερμαινόμενο τραπέζι μπορούν να αλλάξουν πολλά σε μια εκτύπωση, όπως η ελάττωση του υποστηρικτικού υλικού ή η αποφυγή αστοχιών. Πιθανές αστοχίες ως προς το τελικό αποτέλεσμα υφίστανται ως προς τα εξής: χαμηλή ποιότητα επιφανείας, αποκόλληση εκτυπώσιμων φύλλων, χρήση υπερβολικού υποστηρικτικού υλικού που στο τέλος πάει για ανακύκλωση καθώς και η θερμοκρασία και η ταχύτητα εκτύπωσης. Σημαντική λεπτομέρεια είναι ότι το υποστηρικτικό υλικό είναι το ίδιο που χρησιμοποιείται για το τεμάχιο. Με το πέρας της διαδικασίας εκτύπωσης πρέπει να αφαιρεθεί. Η αφαίρεση αυτή γίνεται με χρήση μυτοτσίμπιδου ή λεπίδας που το κόβει και με υαλόπανο τρίβεται η επιφάνεια για να φύγουν οι ατέλειες. Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνεται εύκολα το υποστηρικτικό υλικό, το τεμάχιο, οι καμπύλες και οι επίπεδες επιφάνειες. Στα αριστερά της κάθε εικόνας αναγράφεται ο χρόνος εκτύπωσης, το πάχος της εκτύπωσης και το τελικό βάρος του τεμαχίου. Κάθε λογισμικό που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό και την εξαγωγή g-code διαθέτει βάση αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται από το εκάστοτε λογισμικό πρόγραμμα με δυνατότητα εκτίμησης των παραπάνω με μεγαλύτερη ή μικρότερη ακρίβεια.

Ο **Modix Big 60** που χρησιμοποιήθηκε δίνει τη δυνατότητα για εκτύπωση 0,1mm πάχους ανά επίπεδο εκτύπωσης. Επίσης δίνεται η δυνατότητα και για άλλες ταχύτερες σε χρόνο εκτύπωσης, αλλά λόγω του παχύτερου στρώματος εκτύπωσης αλλάζει η ποιότητα επιφανείας εμφανίζοντας μικρά σκαλοπάτια. Έτσι το τελικό αποτέλεσμα κρίνεται από την τελική ποιότητα επιφανείας που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το πάχος της στρώσης νήματος που θα επιλεχθεί για να πραγματοποιηθεί η εκτύπωση.



Travel	Διαδρομή κεφαλής χωρίς να εκτυπώνει
Outer Perimeter	Εξωτερική στρώση υλικού
Inner Perimeter	Εσωτερική στρώση υλικού
External Single Extrusion	Τελική εξωτερική στρώση υλικού
Internal Single Extrusion	Στρώση υλικού μεταξύ γεμίσματος και τελικής
Gap Fill	Κενό
Solid Layer	Τελική πάνω στρώση υλικού
Infill	Εσωτερικό γέμισμα
Bridge	Στρώση υλικού χωρίς να έχει κάτι από κάτω του
Support	Υποστηρικτικό υλικό
Dense Support	Πυκνό υποστηρικτικό υλικό
Raft	Κατασκευή πάτου στήριξης
Skirt/Brim	Τύπωση υλικού εξωτερικά από τις αρχικές διαστάσεις
Ooze Shield	Κινήσεις διορθωτικές από σημείο σε σημείο

Εικόνα 10: Χρωματική επεξήγηση Βημάτων κατά την Εκτύπωση

Αναλυτικότερα:

Travel	Διαδρομή κεφαλής όταν δεν εκτυπώνει (για να πάει από το ένα σημείο στο επόμενο που θα χρειαστεί συνεχίσει την εκτύπωση). δε φαίνεται στις φωτογραφίες γιατί δεν έχει ενεργοποιηθεί η επιλογή να φαίνονται οι γραμμές
Outer Perimeter	Εξωτερική στρώση υλικού (περίμετρος)
Inner Perimeter	Εσωτερική στρώση υλικού αμέσως πριν την εξωτερική περίμετρο
External Single Extrusion	Τελική εξωτερική στρώση υλικού
Internal Single Extrusion	Στρώση υλικού μεταξύ γεμίσματος και τελικής
Gap Fill	Γέμισμα Κενού
Solid Layer	Τελική στρώση υλικού
Infill	Εσωτερικό γέμισμα
Bridge	Στρώση υλικού όταν μεταξύ των σημείων που στρώνει δεν υπάρχει υλικό και στην ουσία τυπώνει στον αέρα. Αυτό συμβαίνει και όταν από κάτω δε βρίσκεται υποστηρικτικό υλικό και το οποίο δεν αναγνωρίζεται σαν στερεό υλικό του μοντέλου που εκτυπώνεται.

Support	Υποστηρικτικό υλικό.
Dense Support	Πυκνό υποστηρικτικό υλικό πριν από τη στρώση υλικού για το χτίσιμο του μοντέλου. Χρησιμοποιείται για καλύτερη επιφάνεια στο χτίσιμο του μοντέλου και ευκολότερη απομάκρυνσης της υποστήριξης στο τέλος της εκτύπωσης.
Raft	Υλικό που στρώνεται πριν τη πρώτη στρώση με μέγεθος όσο είναι το εμβαδό του μοντέλου και σε μεγαλύτερη κλίμακα ώστε να κολλήσει καλύτερα το μοντέλο. Χρησιμοποιείται σε μικρά αντικείμενα που η επιφάνεια τους δεν είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μη ξεκολλήσουν από το τραπέζι καθώς εκτυπώνονται. Η επιλογή δεν είναι ενεργοποιημένη.
Skirt/Brim	Μια γραμμή πριν ξεκινήσει να χτίζεται το κομμάτι και σε offset 3 χιλιοστά από το κομμάτι. Χρησιμοποιείται πειραματικά ώστε να γίνουν κατάλληλες μικρορυθμίσεις εν ώρα εκτύπωσης πριν χτιστεί το κυρίως μοντέλο (π.χ. Levelingτραπεζιού, ταχύτητα κλπ).
Ooze Shield	Κινήσεις του extruder για να αποφευχθεί η δημιουργία φουσκαλών στο μοντέλο κατά την εκτύπωση οι οποίες θα χαλάσουν την επιφάνεια.

Πίνακας 2: Επεξήγηση Παραμέτρων τρισδιάστατης εκτύπωσης

4.2.3. Η τεχνολογία πολλαπλής εκτόξευσης υλικού ως δεύτερη επιλογή

Σαν δεύτερη επιλογή όπου αυξάνεται πολύ το κόστος αλλά και η ποιότητα της κατασκευής λόγω χρήσης ειδικών ρητινών (*Vero Clear*), είναι η χρήση φωτοπολυμερούς εκτυπωτή (*PolyJet*). Στη συγκεκριμένη τεχνολογία, το εκτυπώσιμο υλικό και το υποστηρικτικό υλικό είναι διαφορετικά. Η ρητίνη είναι σε υγρή μορφή, ενώ το υποστηρικτικό υλικό είναι άλλη ρητίνη υδατοδιαλυτή, ώστε να μην επηρεάζει την επιφάνεια του τελικού αποτελέσματος κυρίως κατά την αφαίρεσή της. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υποστηρικτική ρητίνη ορίζεται σαν βιομηχανικό απόβλητο και περισυλλέγεται από ειδικούς φορείς που τα διαχειρίζονται. Ο εκτυπωτής αυτός έχει τη δυνατότητα να κάνει ακόμα πιο λεπτά στρώματα υλικού(*0.016mm*) με αποτέλεσμα καλύτερη και ποιοτικότερη επιφάνεια στο τελικό αποτέλεσμα. Φυσικά έτσι αυξάνεται ακόμα περισσότερο ο χρόνος εκτύπωσης. Μπορεί όμως να επιλεγεί και μικρότερη ανάλυση και έτσι να μειωθεί ο χρόνος εκτύπωσης (*0.030mm*). Είναι σε δοχείο το υλικό που βγαίνει από κεφαλές, οι οποίες έχουν από δέκα πολύ μικρές οπές <100μm. Για το Vero Clear υπάρχουν τέσσερις κεφαλές με εκατό οπές η κάθε μία και για το υποστηρικτικό υλικό (support) άλλες τέσσερις κεφαλές με εκατό οπές η κάθε μια. Ο φορέας που κινούνται οι κεφαλές κινείται μόνο σε οριζόντια διεύθυνση και αφήνει το υλικό από την κεφαλή που χρειάζεται (κύριο ή υποστηρικτικό. Το μοντέλο που είναι διαθέσιμο στη εταιρία είναι το *Stratasys Eden 260V*. [B3,A3]

Όγκος κατασκευής 255 x 252 x 200 mm (10,0 x 9,9 x 7,9 in.)

Χαμηλή ανάλυση επιπέδου 32 micron (0,001 in.)

Ανάλυση επιπέδου 16 micron (0,0006 in.)

Η Objet Eden260V προσφέρει πρωτοφανή απόδοση της επένδυσης για ένα ευρύ φάσμα επαγγελματικών εφαρμογών ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων. Μπορούν να επιλεχτούν 18 διαφορετικά υλικά για να επιτευχθεί η εκτύπωση. Εκτυπώνει εξαιρετικά επίπεδα 32 μικρομέτρων με εξαιρετικές λεπτομέρειες, σύνθετες γεωμετρίες και λεπτές εφαρμογές.

Η Objet Eden260V χρησιμοποιεί δοκιμασμένη τεχνολογία PolyJet. Η 3Δ εκτύπωση PolyJet είναι παρόμοια με την εκτύπωση εγγράφων inkjet. Όμως, αντί το χαρτί να ψεκάζεται με σταγόνες μελανιού, εκτοξεύονται στρώματα υγρού φωτοπολυμερούς πάνω σε ένα δίσκο κατασκευής και επεξεργάζονται πλήρως με υπεριώδες φως. Τα επίπεδα αξιοποιούνται ένα κάθε φορά για τη δημιουργία ενός μοντέλου ή ενός πρωτοτύπου 3Δ. Ο χειρισμός και η χρήση πλήρως επεξεργασμένων μοντέλων μπορούν να γίνουν άμεσα χωρίς μετέπειτα επεξεργασία. Μαζί με το επιλεγμένο υλικό μοντέλου, ο 3Δ εκτυπωτής διαθέτει επίσης υλικό υποστήριξης τύπου ‘gel’, ειδικά σχεδιασμένο να υποστηρίζει τις υπερπηδήσεις και τις περίπλοκες γεωμετρίες. Αφαιρείται εύκολα χρησιμοποιώντας νερό υπό πίεση. Η τεχνολογία 3Δ εκτύπωσης PolyJet έχει πολλά πλεονεκτήματα για γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων, όπως επαγγελματική ποιότητα και ταχύτητα, υψηλή ακρίβεια και μεγάλη ποικιλία υλικών. Η τεχνολογία PolyJet είναι μια τέλεια λύση για τις ανάγκες δημιουργίας πρωτοτύπων ακριβείας και θέτει τα πρότυπα για ρεαλιστικά τελικά προϊόντα. [B4,A10]

Polyjet (Photopolymer resins)

Printer:Stratasys Eden 260V

Material for Stratasys Eden 260V specs

Material: Vero clear

Infill: 100%

Layer Height: 0.030mm

	ASTM	METRIC	ENGLISH
Tensile Strength	D-638-03	50-65 MPa	7,250-9,450 psi
Elongation at Break	D-638-05	10-25%	10-25%
Modulus of Elasticity	D-638-04	2,000-3,000 MPa	290,000-435,000 psi
Flexural Strength	D-790-03	75-110 MPa	11,000-16,000 psi
Flexural Modulus	D-790-04	2,200-3,200 MPa	320,000-465,000 psi
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	45-50 °C	113-122 °F
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	45-50 °C	113-122 °F
Izod Notched Impact	D-256-06	20-30 J/m	0.375-0.562 ft-lb/inch
Water Absorption	D-570-98 24hr	1.1-1.5%	1.1-1.5%
Tg	DMA, E»	52-54 °C	126-129 °F
Shore Hardness (D)	Scale D	83-86	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	73-76	73-76
Polymerized Density	ASTM D792	1.18-1.19 g/cm³	
Ash Content	USP281	0.02-0.06%	0.02-0.06%

Εικόνα 11: Vero Clear data sheet

4.2.4. Περιβάλλον εκτύπωσης

Στο συγκεκριμένο περιβάλλον εκτύπωσης υπάρχουν οι ακόλουθες πληροφορίες:

Vero Clear: υλικό εκτύπωσης σε γραμμάρια.

Support: υποστηρικτικό υλικό που απαιτείται σε γραμμάρια (είναι διαφορετικό υλικό από το εκτυπώσιμο).

Building time: χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εκτύπωσης.

Αν λοιπόν τα τεμάχια είχαν εκτυπωθεί με αυτή την τεχνολογία θα υπήρχαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για εκτύπωση με πάχος στρώματος 0,003mm. Στις πρώτες εικόνες παρουσιάζονται τεμάχια μόνα τους, ενώ στην πορεία παρουσιάζονται όλα μαζί πάνω στο τραπέζι σε δυο παρτίδες όπου μπορούν να εκτυπωθούν. Τα βασικά δεδομένα είναι το βάρος του υλικού (ρητίνη Vero Clear), το βάρος του υποστηρικτικού υλικού (άλλη ρητίνη) και ο χρόνος που θα είναι έτοιμα τα τεμάχια προς εκτύπωση.

<u>Παράδειγμα:</u>

Έστω ότι ζητείται προς εκτύπωση τεμάχιο Χ και μας δίνονται οι παρακάτω πληροφορίες:

Vero Clear: 120gr
Support: 30gr
Building time: 1:45 hours

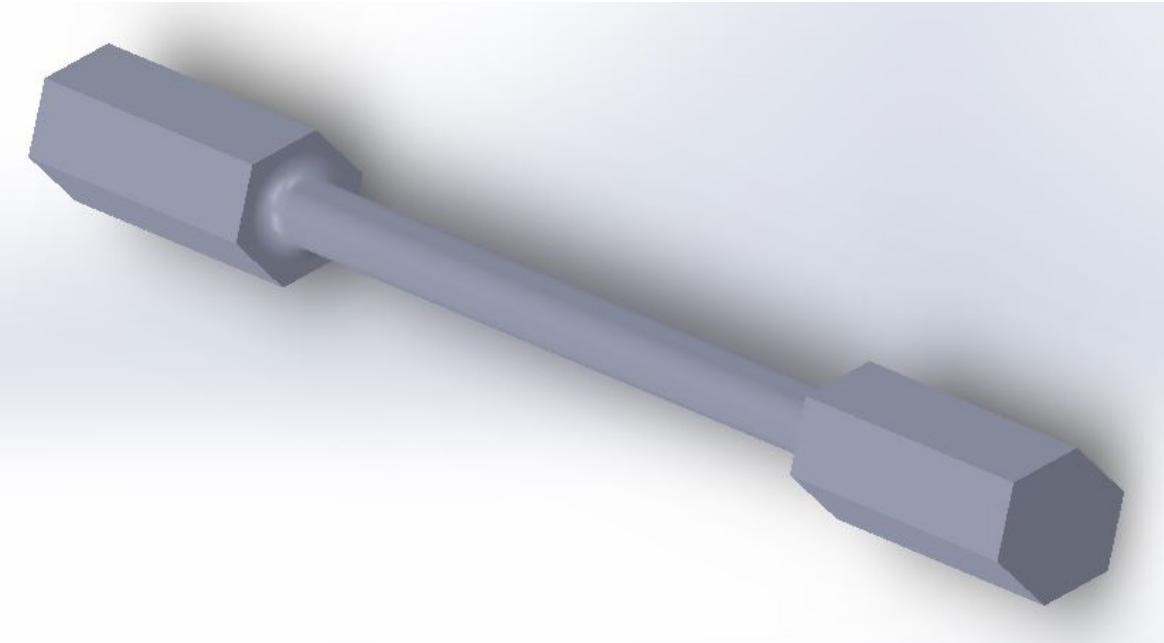
Οι πληροφορίες από το παραπάνω παράδειγμα είναι ότι το τεμάχιο Χ απαιτεί σαν πρώτη ύλη 120gr υλικού (ρητίνη Vero Clear) και αυτό θα είναι το τελικό του βάρος. Όμως απαιτούνται για την εκτύπωση 30gr υποστηρικτικού υλικού (άλλη ρητίνη) όπου με το πέρας της εκτύπωσης είναι προς ανακύκλωση και η διαδικασία της εκτύπωσης από το λογισμικό του εκτυπωτή θα έχει ολοκληρωθεί σε μία ώρα και σαράντα πέντε λεπτά της ώρας (εκτιμώμενος χρόνος).

4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραμάτων

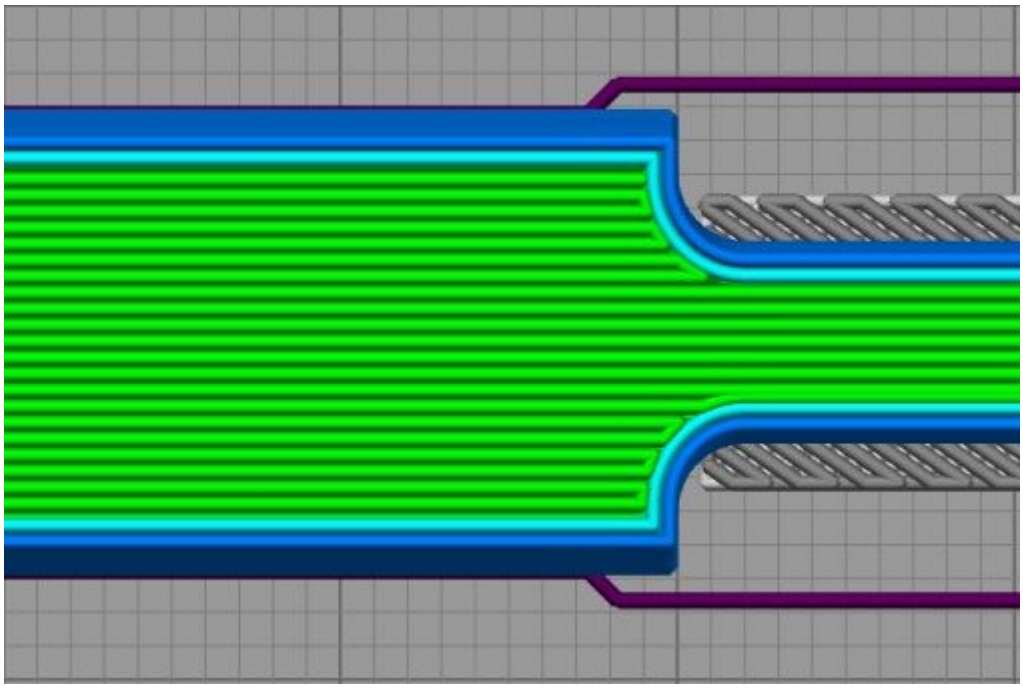
Αφού επιλέχτηκαν τα υλικά προς μελέτη, σχεδιάστηκε το δοκίμιο που δέχεται η στρεπτική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε SM 21 Advanced Torsion. Με το πέρας του σχεδιασμού του δοκιμίου, έλαβε χώρα η εκτύπωση των δοκιμίων. Όλα τα δοκίμια εκτυπώθηκαν στον ίδιο εκτυπωτή Modix Big 60. Αυτό έγινε με στόχο να είναι λιγότεροι οι διαφορετικοί εξωγενείς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της εκτύπωσης. Μελετήθηκαν υλικά και όχι οι δυνατότητες διαφορετικών εκτυπωτών (μάρκες και μοντέλα).

Το πρώτο μέρος του πειράματος είναι η εκτύπωση των δοκιμίων υπό γωνία. Έτσι επιλέχτηκε ένα υλικό, PLA στην προκείμενη περίπτωση, και έγιναν οι εκτυπώσεις των δοκιμίων υπό τρεις διαφορετικές γωνίες.

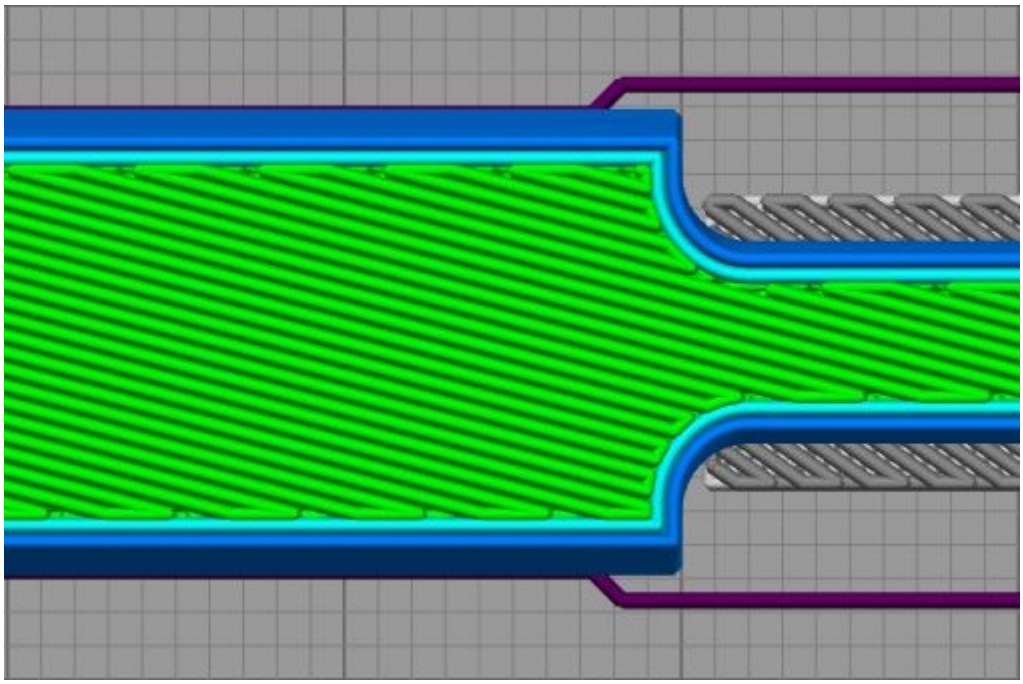
Μηδέν μοίρες γωνία εκτύπωσης, δεκαπέντε μοίρες γωνία εκτύπωσης και σαράντα πέντε μοίρες γωνία εκτύπωσης (0°,15°,45°). Η επιλογή των γωνιών έγινε με γνώμονα το μήκος της ίνας του εκτυπώσιμου υλικού ανά επίπεδο στρώματος, ώστε να μην είναι μικρό. Δηλαδή στις μηδέν μοίρες υπάρχει η μέγιστη ίνα σε μήκος. Από τις σαράντα πέντε μοίρες γωνίας εκτύπωσης και πάνω η ίνα μικραίνει πολύ σε μήκος και η εκτύπωση γίνεται σχεδόν κάθετη. [A10]



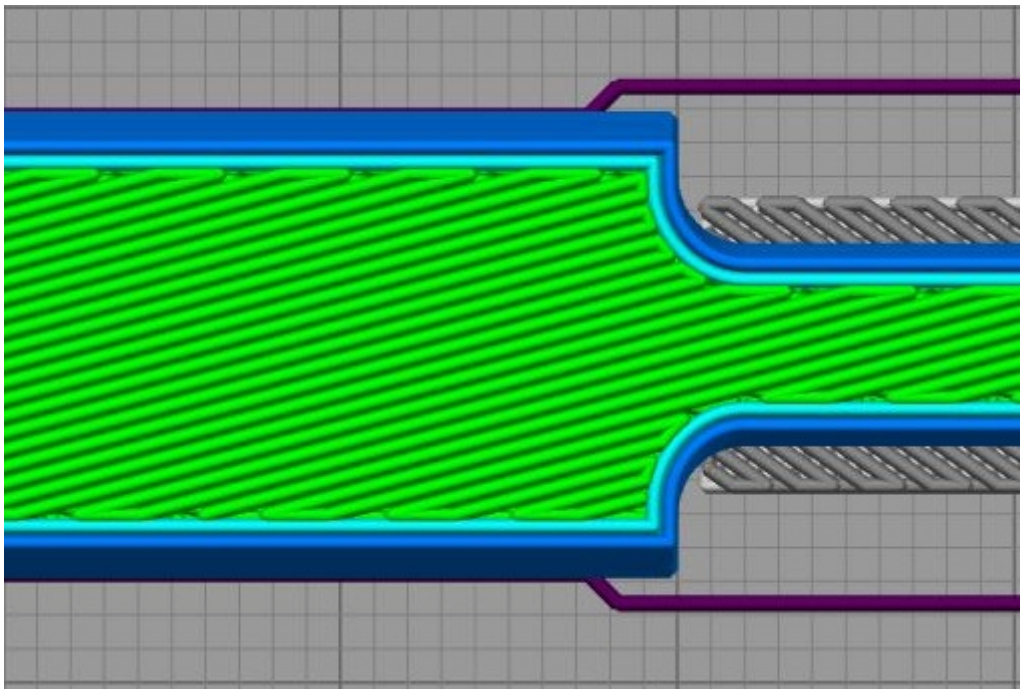
Εικόνα 12: Τρισδιάστατη απεικόνιση δοκιμίου που συνεργάζεται με τη μηχανή μελέτης στρέψης



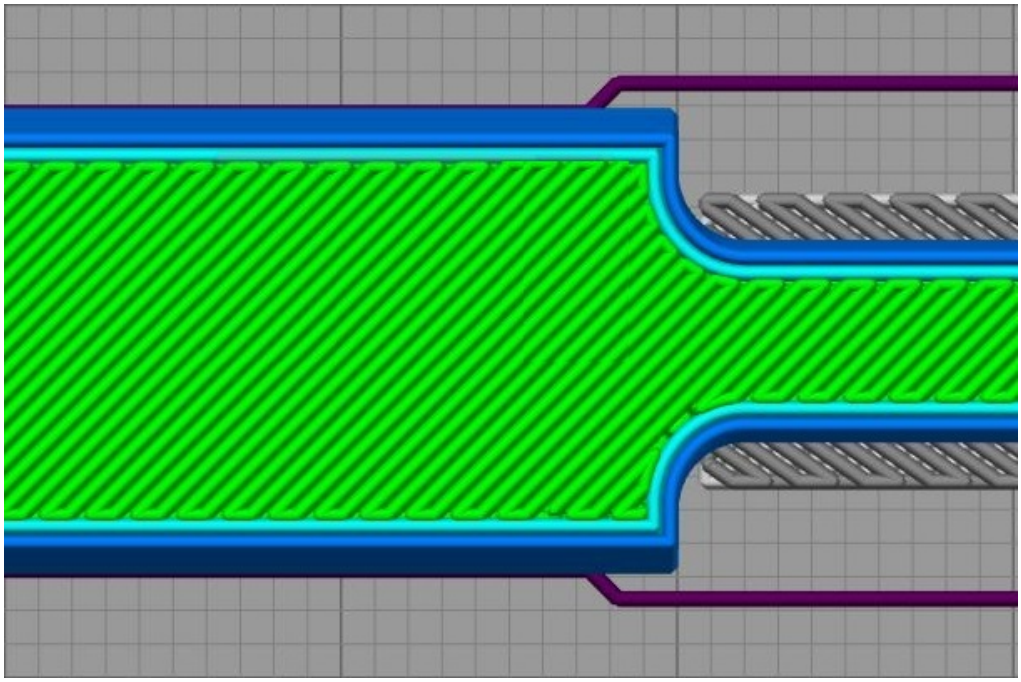
Εικόνα 13: 0 μοίρες γωνία εκτύπωσης



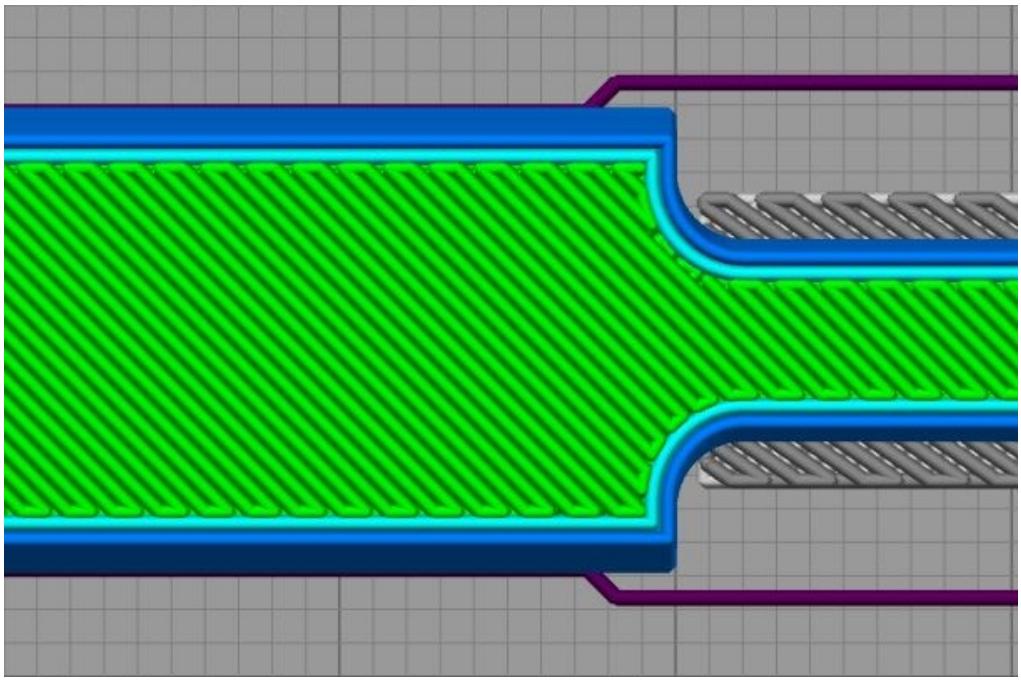
Εικόνα 14: 15 μοίρες γωνία εκτύπωσης με φορά προς τα δεξιά



Εικόνα 15: 15 μοίρες γωνία εκτύπωσης με φορά προς τα αριστερά



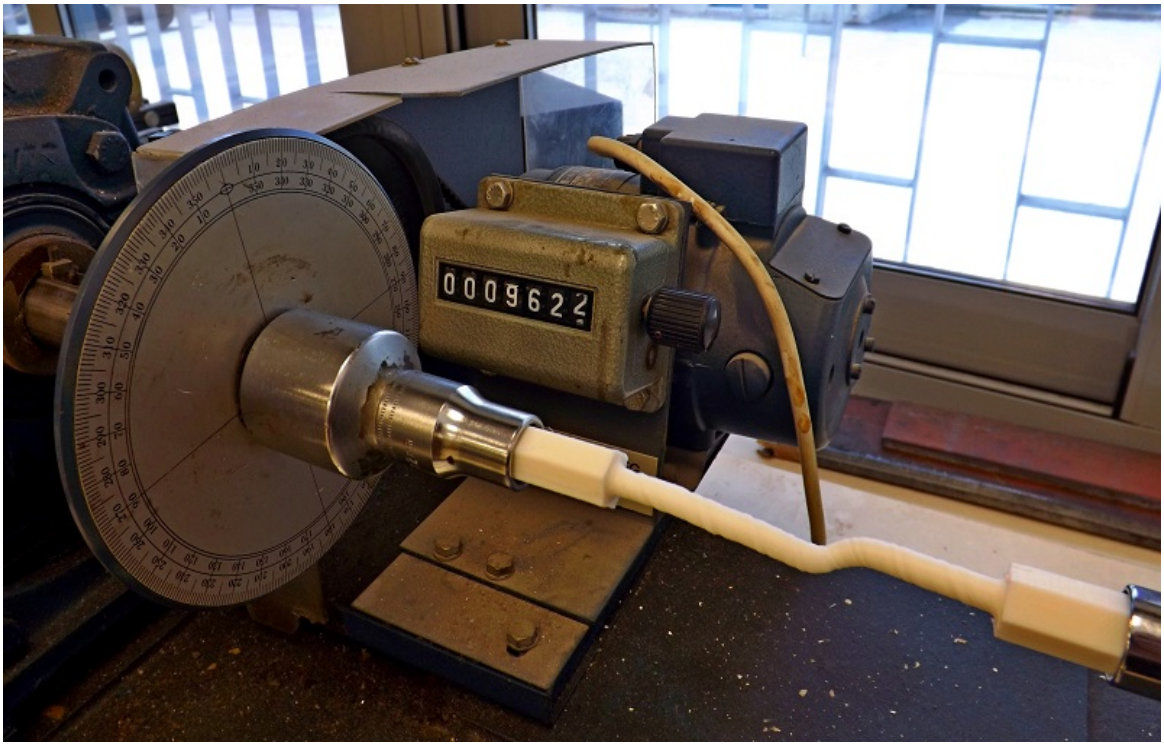
Εικόνα 16: 45 μοίρες γωνία εκτύπωσης με φορά προς τα δεξιά



Εικόνα 17: 45 μοίρες γωνία εκτύπωσης με φορά προς τα αριστερά

Στις παραπάνω εικόνες, και πιο συγκεκριμένα εικόνα 11 έως 15, φαίνονται οι γωνίες που έγιναν οι εκτυπώσεις των δοκιμίων. Γίνεται ορατό ότι ανά επίπεδο εκτύπωσης αλλάζει η φορά. Δηλαδή η μία στρώση έχει τη φορά που φαίνεται στην εικόνα 12 και η επόμενη στρώση πραγματοποιείται στις ίδιες μοίρες αλλά με ανάποδη φορά όπως στην εικόνα 13. Στις εικόνες 12 και 13 είναι το ίδιο δοκίμιο με διαφορά ένα επίπεδο εκτύπωσης.

Το ίδιο ισχύει και για τις εικόνες 14 και 15 όπου το δοκίμιο εκτυπώθηκε στις 45°.



Εικόνα 18: Μηχανή στρέψης SM 21 Advanced Torsion

4.3.1 Πείραμα 1ο

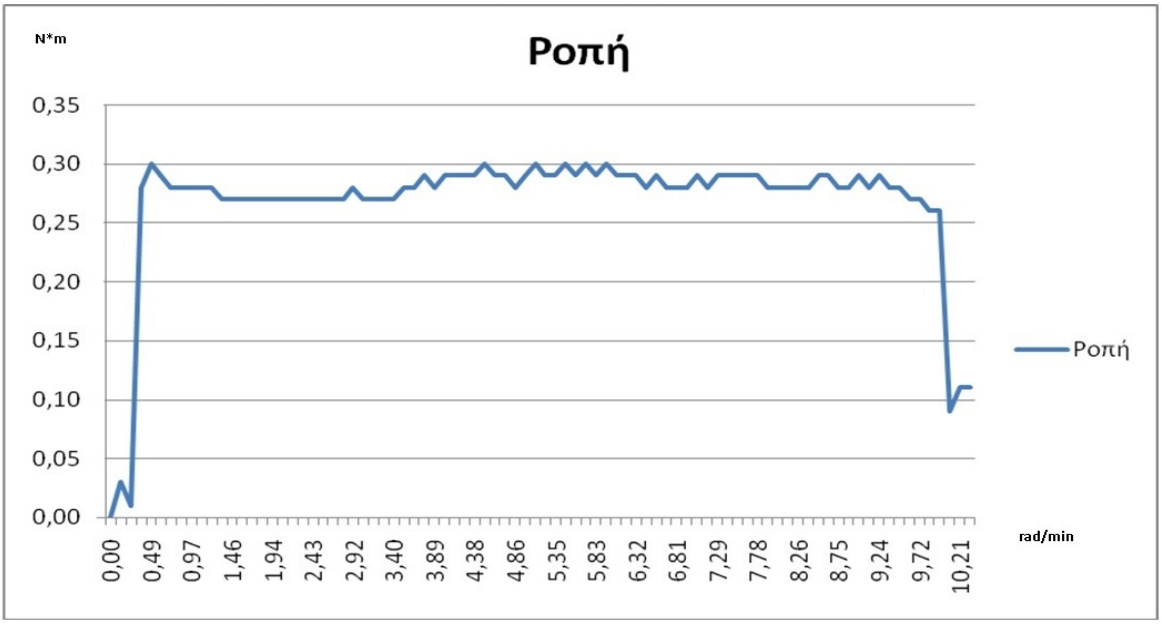
Στο ακόλουθο πείραμα, όπως προαναφέρθηκε, το υλικό κατασκευής των δοκιμίων είναι ίδιο (PLA). Αλλάζει μόνο η γωνία εκτύπωσης. Ελήφθησαν μετρήσεις από τρία δοκίμια ανά διαφορετική γωνία εκτύπωσης και παρουσιάζονται ακολούθως. Οι τιμές των στροφών που παρουσιάζονται, είναι στροφές μηχανής και όχι στροφές του δοκιμίου γύρο από τον άξονα του. Τα νούμερα αυτά είναι τα τελικά όταν θεωρήθηκε ότι το πείραμα έληξε.

Δεν υπήρξε πάντα θραύση του δοκιμίου.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν ο άξονας Ψ είναι ο άξονας της Ροπής σε N*m ενώ ο άξονας των X είναι ακτίνια/minute.

Δοκίμιο PLA

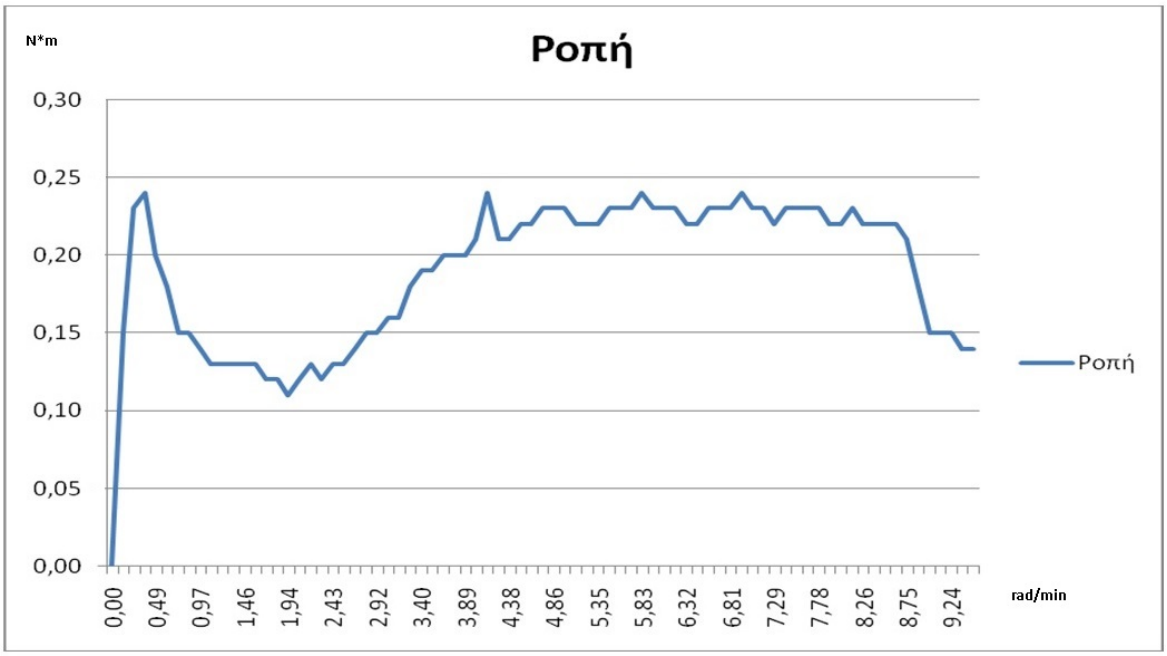
1$_o$ δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 10332 στροφές



Γράφημα 1: Δοκίμιο PLA - 1ο δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 10332 στροφές

Στο πείραμα PLA 1ο, 0° το δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 10332 κύκλους μηχανής. Στο παραπάνω διάγραμμα είναι ορατή η αστοχία όταν η τιμή της ροπής ελαττώνεται απότομα. Το δοκίμιο αυτό, παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή ροπής και το καλύτερο διάγραμμα σε σύγκριση με τα άλλα δυο που εκτυπώθηκαν στις ίδιες μοίρες. Το πείραμα τερματίστηκε με την ολική θραύση του δοκιμίου.

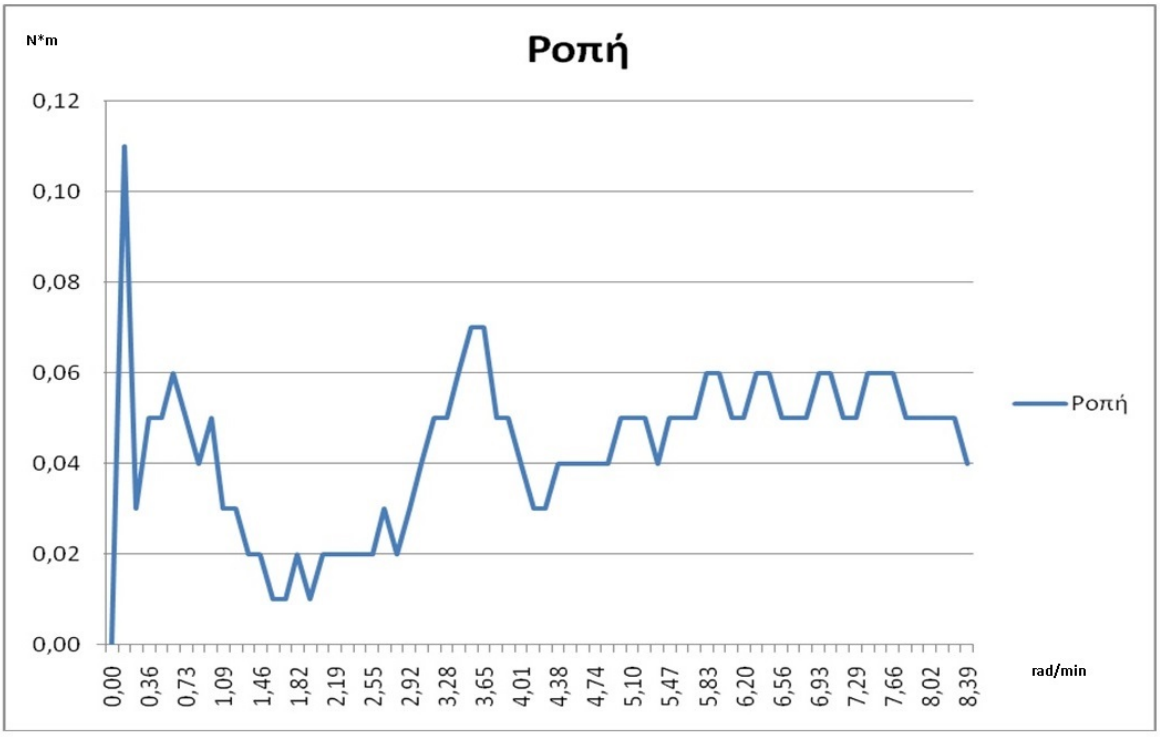
2$_o$ δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9645 στροφές



Γράφημα 2: Δοκίμιο PLA - 2ο δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9645 στροφές

Στο πείραμα PLA 2ο, 0° το δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 9645 κύκλους μηχανής. Στο παραπάνω διάγραμμα είναι ορατή η αστοχία όταν η τιμή της ροπής ελαττώνεται απότομα στα δεξιά του διαγράμματος. Στο πρώτο μισό του διαγράμματος φανερώνεται η ελαστική παραμόρφωση του υλικού. Από τη μέση όμως και προς τα δεξιά έχουν αρχίσει οι πλαστικές παραμορφώσεις μέχρι την διακοπή του πειράματος, δεδομένου ότι το δοκίμιο είχε ξεκινήσει να παρουσιάζει σημάδια αστοχίας στην εξωτερική του επιφάνεια.

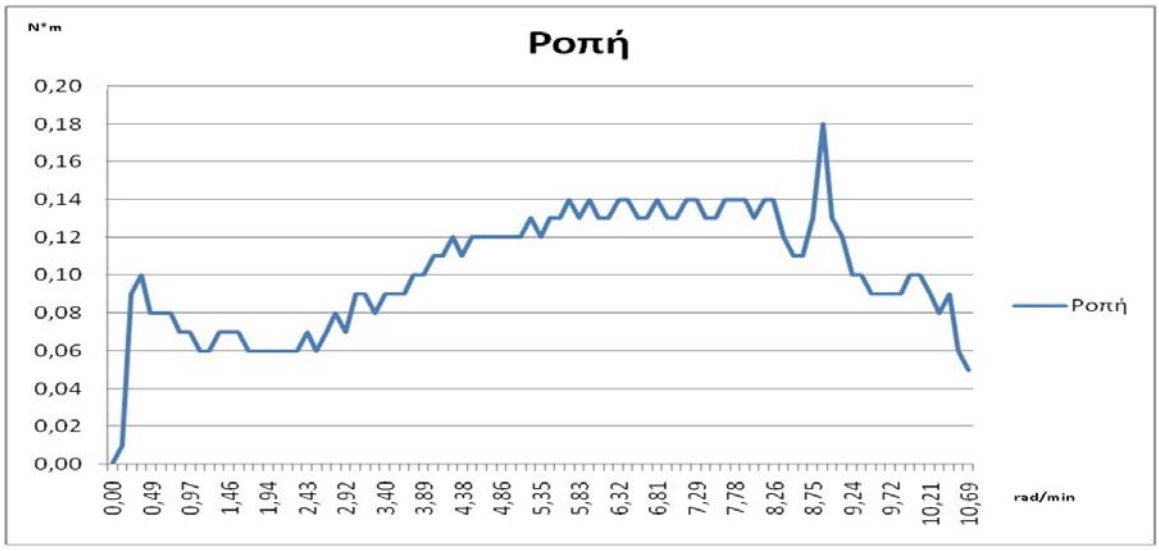
3_o δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9610 στροφές



Γράφημα 3: Δοκίμιο PLA - 3ο δοκίμιο 0 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9610 στροφές

Στο πείραμα PLA3ο, 0^oτο δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 9610 κύκλους μηχανής. Στο παραπάνω διάγραμμα το πρώτο μισό του διαγράμματος φανερώνεται η ελαστική παραμόρφωση του υλικού. Στη μέση όμως παρουσιάζεται στιγμιαία η μέγιστη τιμή ροπής και προς τα δεξιά έχουν αρχίσει οι πλαστικές παραμορφώσεις μέχρι την διακοπή του πειράματος. Το δοκίμιο αυτό παρουσίασε τη μικρότερη τιμή ροπής.

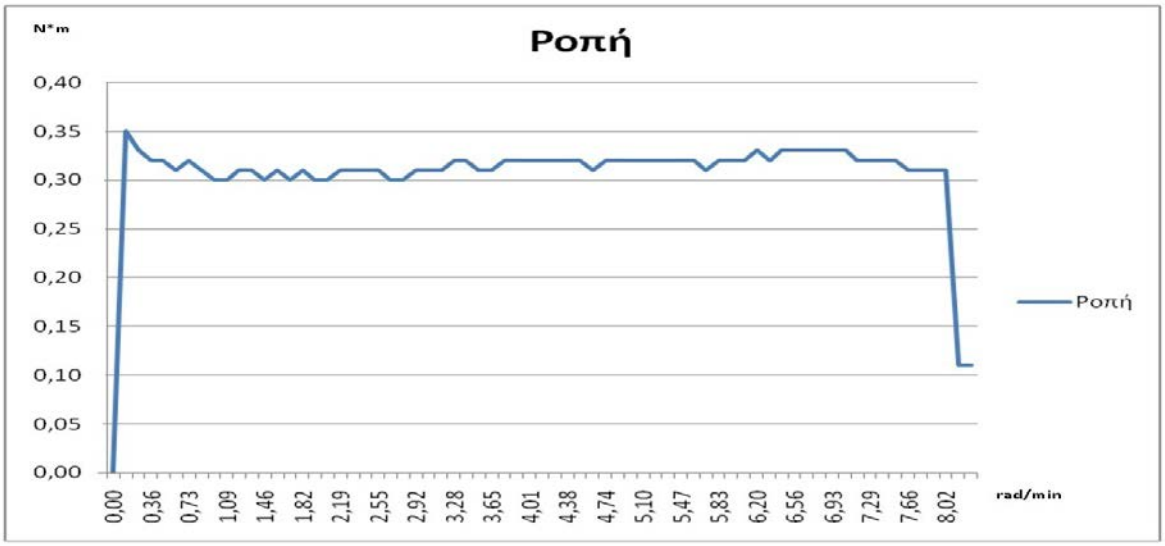
1$_o$ δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 1290 στροφές



Γράφημα 4: Δοκίμιο PLA - 1ο δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 12190 στροφές

Στο πείραμα PLA 1ο, 15°το δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 12190 κύκλους μηχανής. Στο παραπάνω διάγραμμα είναι ορατή η αστοχία όταν η τιμή της ροπής φτάνει τη μέγιστη τιμή της και μετά ελαττώνεται απότομα. Το δοκίμιο αυτό, παρουσίασε τη μικρότερη τιμή ροπής σε σύγκριση με τα άλλα δυο που εκτυπώθηκαν στις ίδιες μοίρες. Το πείραμα τερματίστηκε πριν την ολική θραύση του δοκιμίου.

2$_o$ δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9430 στροφές

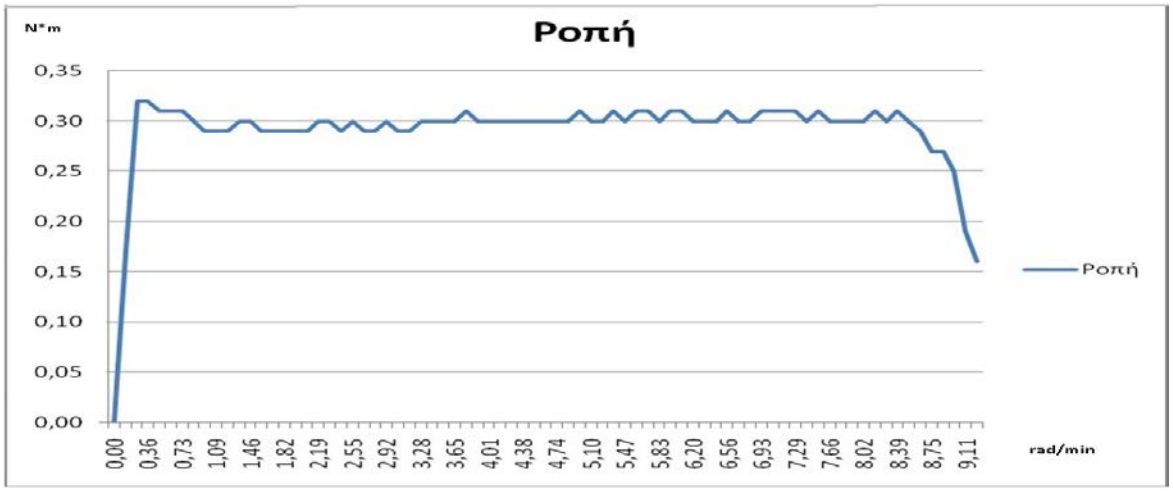


Γράφημα 5: Δοκίμιο PLA - 2ο δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9430 στροφές

Στο πείραμα PLA 2ο, 15° το δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 9430 κύκλους μηχανής. Στο παραπάνω διάγραμμα είναι ορατή η αστοχία όταν η τιμή της ροπής ελαττώνεται απότομα. Το δοκίμιο αυτό, παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή ροπής σε σύγκριση με τα άλλα δυο που

εκτυπώθηκαν στις ίδιες μοίρες, αλλά είχε τη μικρότερη τιμή σε κύκλους μηχανής . Το πείραμα τερματίστηκε με την ολική θραύση του δοκιμίου.

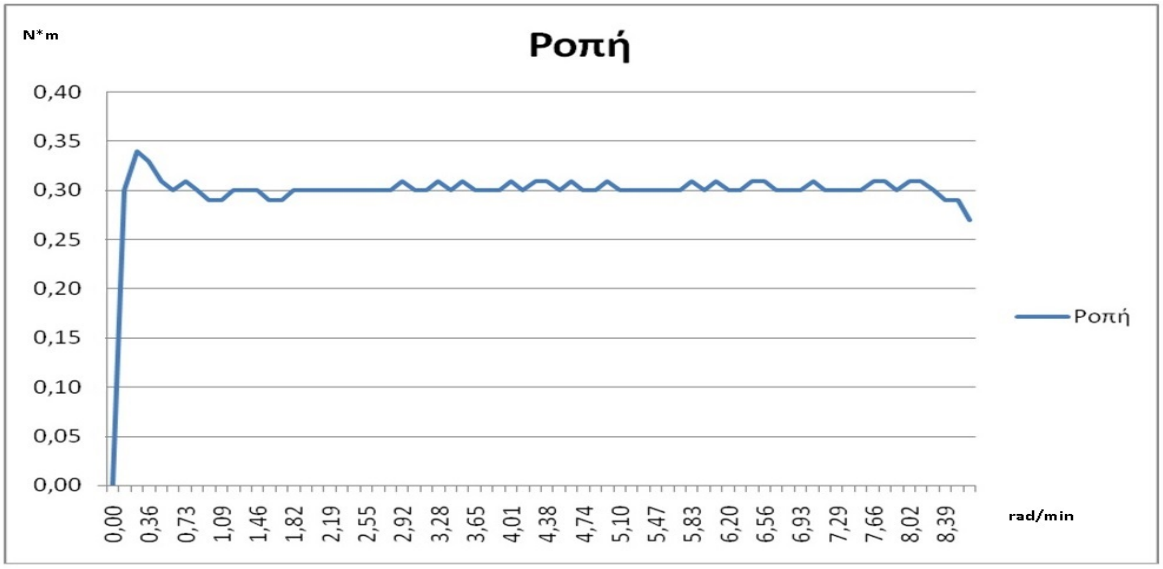
3_o δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 10524 στροφές



Γράφημα 6: Δοκίμιο PLA - 3ο δοκίμιο 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 10524 στροφές

Στο πείραμα PLA 3ο, 15° το δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 10524 κύκλους μηχανής. Στο παραπάνω διάγραμμα είναι ορατή η αστοχία όταν η τιμή της ροπής ελαττώνεται απότομα. Το δοκίμιο αυτό, παρουσίασε τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή ροπής σε σύγκριση με τα άλλα δυο που εκτυπώθηκαν στις ίδιες μοίρες. Το πείραμα τερματίστηκε πριν να προκύψει θραύση του δοκιμίου γιατί αυτό ξεκίνησε να συστρέφεται γύρω από τον άξονά του και να μειώνει το μήκος του. Έτσι δεν υπήρξε καταστροφή του αλλά παραμόρφωση του.

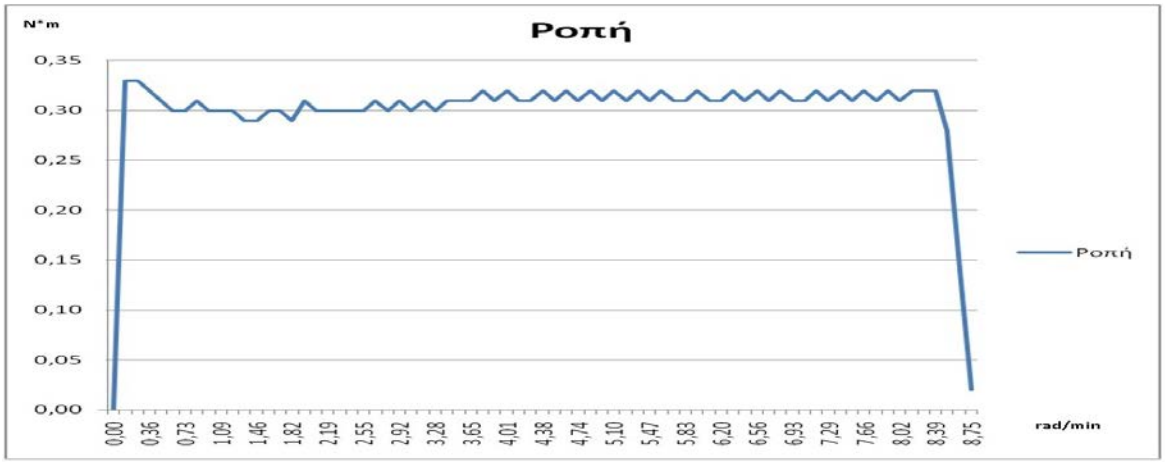
1_o δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9740 στροφές



Γράφημα 7: Δοκίμιο PLA - 1ο δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9740 στροφές

Στο πείραμα PLA 1ο, 45° το δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 9740 κύκλους μηχανής. Το δοκίμιο αυτό, παρουσίασε περίπου την ίδια τιμή ροπής σε σύγκριση με τα άλλα δυο που εκτυπώθηκαν στις ίδιες μοίρες. Το πείραμα τερματίστηκε πριν να προκύψει θραύση του δοκιμίου γιατί αυτό ξεκίνησε να συστρέφεται γύρω από τον άξονά του και να μειώνει το μήκος του. Έτσι δεν υπήρξε καταστροφή του αλλά παραμόρφωση του.

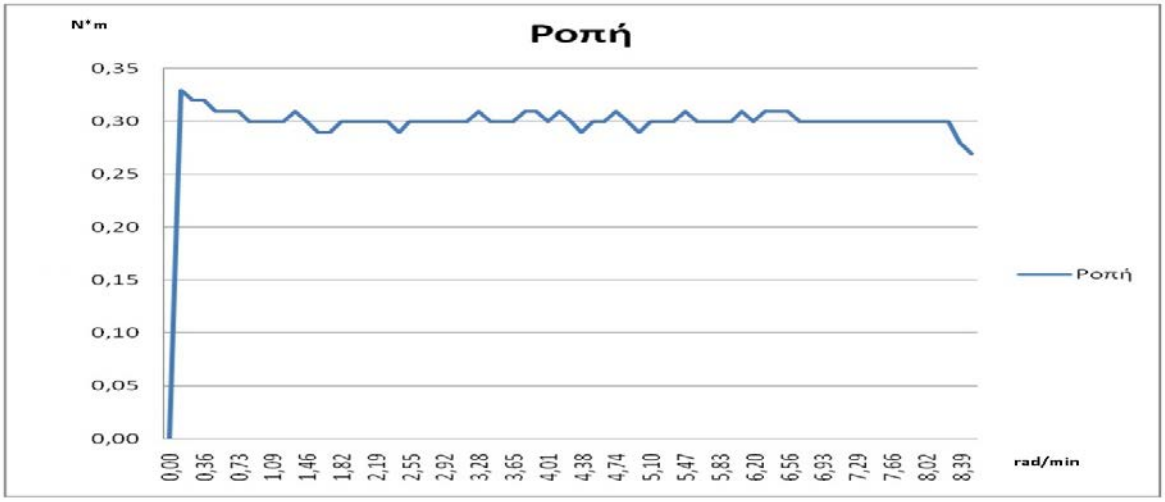
2$_{ο}$ δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9967 στροφές



Γράφημα 8: Δοκίμιο PLA - 2ο δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9967 στροφές

Στο πείραμα PLA 2ο, 45° το δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 9967 κύκλους μηχανής. Στο παραπάνω διάγραμμα είναι ορατή η αστοχία όταν η τιμή της ροπής ελαττώνεται απότομα. Το δοκίμιο αυτό, παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή ροπής και το καλύτερο διάγραμμα σε σύγκριση με τα άλλα δυο που εκτυπώθηκαν στις ίδιες μοίρες. Το πείραμα τερματίστηκε με την ολική θραύση του δοκιμίου.

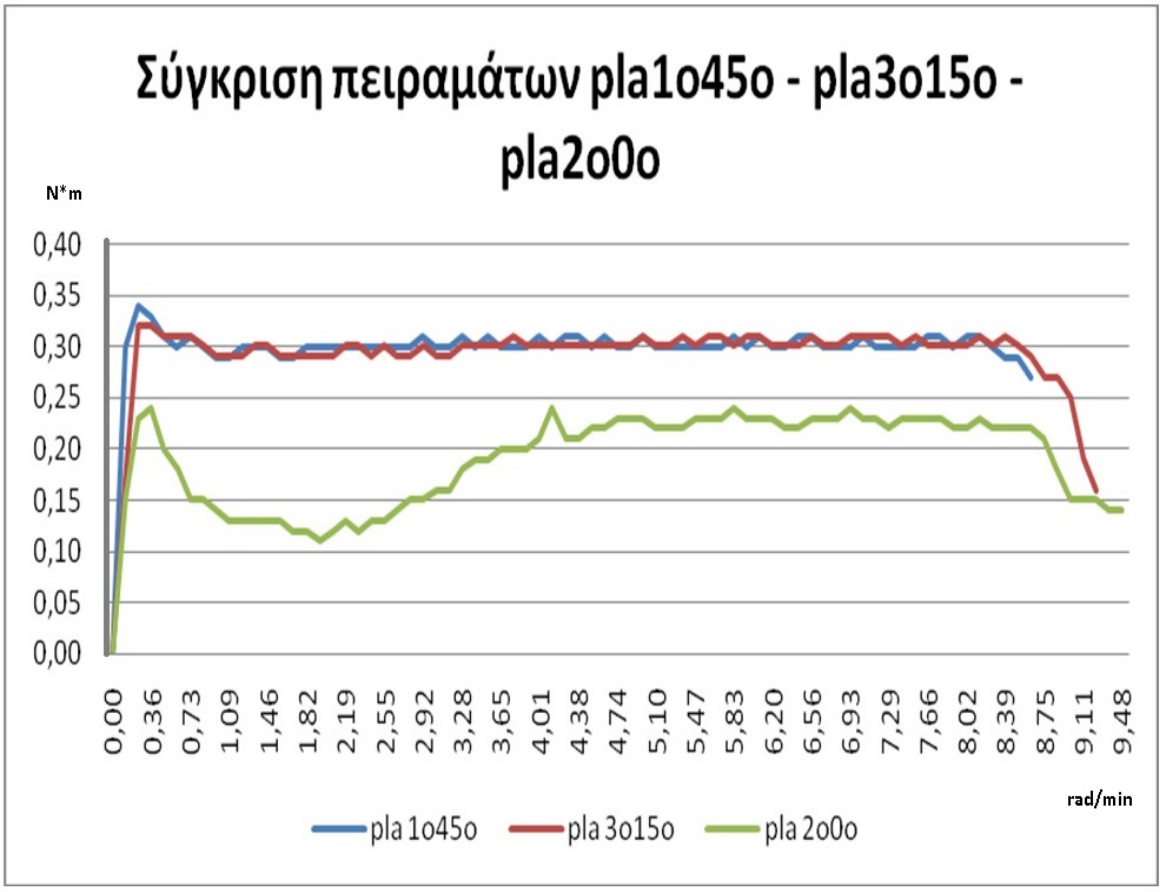
3$_{ο}$ δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9622 στροφές



Γράφημα 9: Δοκίμιο PLA - 3ο δοκίμιο 45 μοίρες γωνίας εκτύπωσης, 9622 στροφές

Στο πείραμα PLA3o, 45°το δοκίμιο έφτασε σε αστοχία στους 9622 κύκλους μηχανής. Στο παραπάνω διάγραμμα είναι ορατή η αστοχία όταν η τιμή της ροπής ελαττώνεται απότομα στα δεξιά του διαγράμματος. Το πείραμα διεκόπη όταν το δοκίμιο είχε ξεκινήσει να παρουσιάζει σημάδια αστοχίας στην εξωτερική του επιφάνεια.

Σύγκριση PLA



Γράφημα 10: Σύγκριση πειραμάτων PLA 1o45^{o} – PLA 3o15^{o} – PLA 2o0^{o}

Στο παραπάνω διάγραμμα διακρίνονται τρια από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν νωρίτερα σε ένα. Γίνεται ορατό ότι τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν υπο γωνία και όχι σε ευθία, παρουσίασαν τις μέγιστες τιμές ροπής. Αυτός είναι ο λόγος που τα πειράματα που ακολουθούν έγιναν από δοκίμια που εκτυπώθηκαν σε γωνία 15°.

Εδώ διακρίνεται ένα δοκίμιο από υλικό PLA όπου έχει φέρει 9622 κύκλους μηχανής και δεν έχει κοπεί αλλά έχει τσακίσει. Το συγκεκριμένο δοκίμιο έχει περιστραφεί γύρω από τον άξονα του περίπου οχτώ φορές χωρίς να παρουσιαστούν δείγματα κομμένων ινών αλλά έχει υποστεί παραμόρφωση μειώνοντας το μήκος του.

Με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων από την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε επιλέχθηκε το δεύτερο μέρος του πειράματος να γίνει σε δεκαπέντε μοίρες γωνίας εκτύπωσης. Έτσι τα υλικά πλέων είναι διαφορετικά και είναι τα ακόλουθα:

- ABS
- PETG
- ASA
- CARBON FIBER

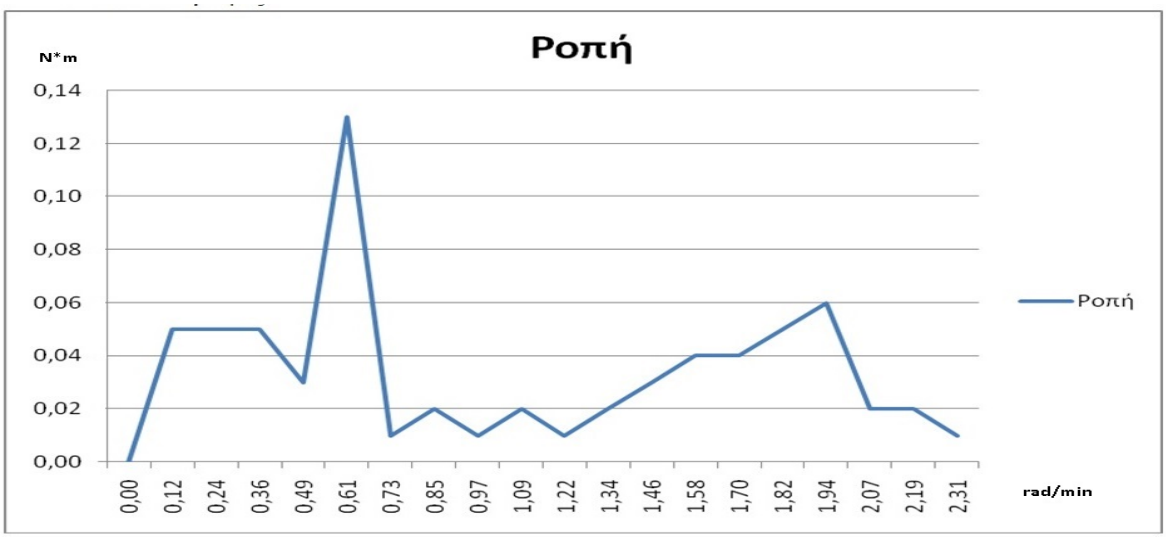
ΥΛΙΚΟ PLA/ ΔΟΚΙΜΙΟ	ΓΩΝΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ
1_o	0°	10332
2_o	0°	9645
3_o	0°	9610
1_o	15°	12190
2_o	15°	9430
3_o	15°	10524
1_o	45°	9740
2_o	45°	9967
3_o	45°	9622

Πίνακας 3: PLA

4.3.2 Πείραμα 2ο

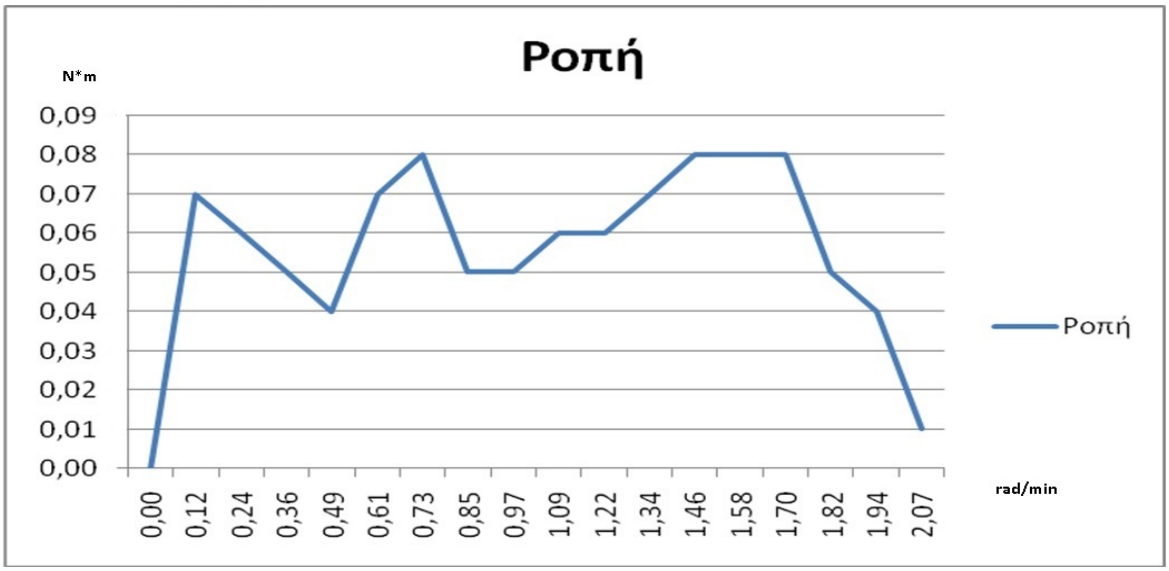
Υλικό ASA/ 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης

1 2651 στροφές



Γράφημα 11: Υλικό ASA – 15° γωνίας εκτύπωσης – 2651 στροφές

2 2345 στροφές

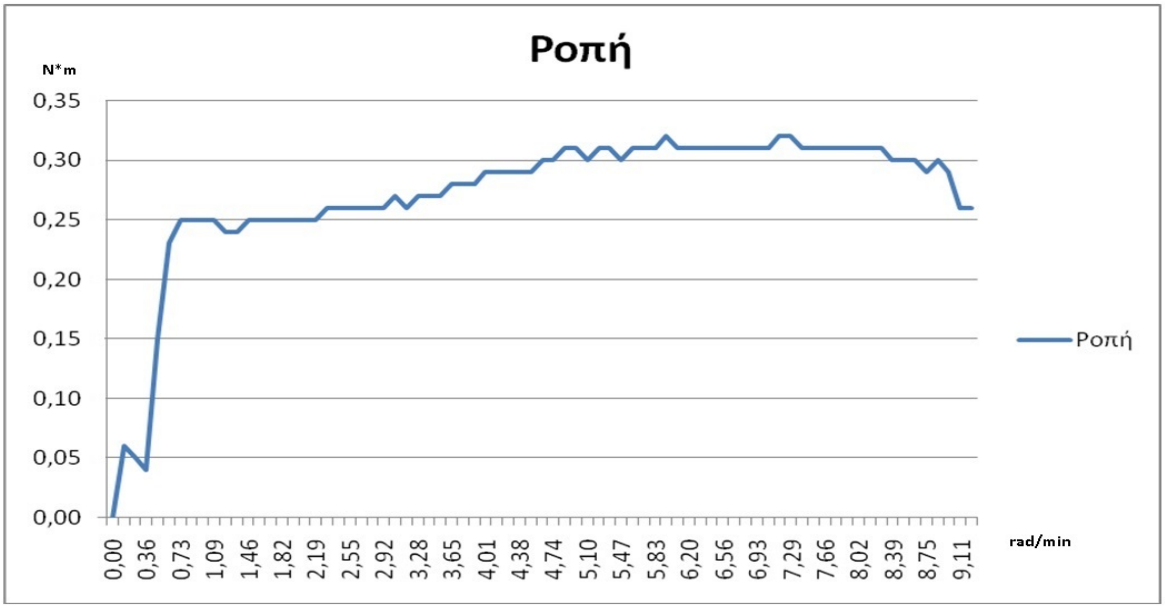


Γράφημα 12: Υλικό ASA – 15° γωνίας εκτύπωσης – 2345 στροφές

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν από υλικό ASA και εκτυπώθηκαν σε 15° γωνία παρουσίασαν πολύ μικρή αντοχή στη στρέψη, με μικρές τιμές ροπής και αμέσως ξεκίνησε η αστοχία τους. Εκτός από την θραύση των ινών που ξεκίνησε από έξω προς τα μέσα παρουσιάστηκε και το φαινόμενο της αποκόλλησης στρωμάτων. Έτσι δεν υπήρξε πλήρης καταστροφή των δοκιμίων. Οι χαμηλές τιμές που ελήφθησαν ήταν αντιπροσωπευτικές για να απορριφθεί το υλικό για την κατασκευή μας.

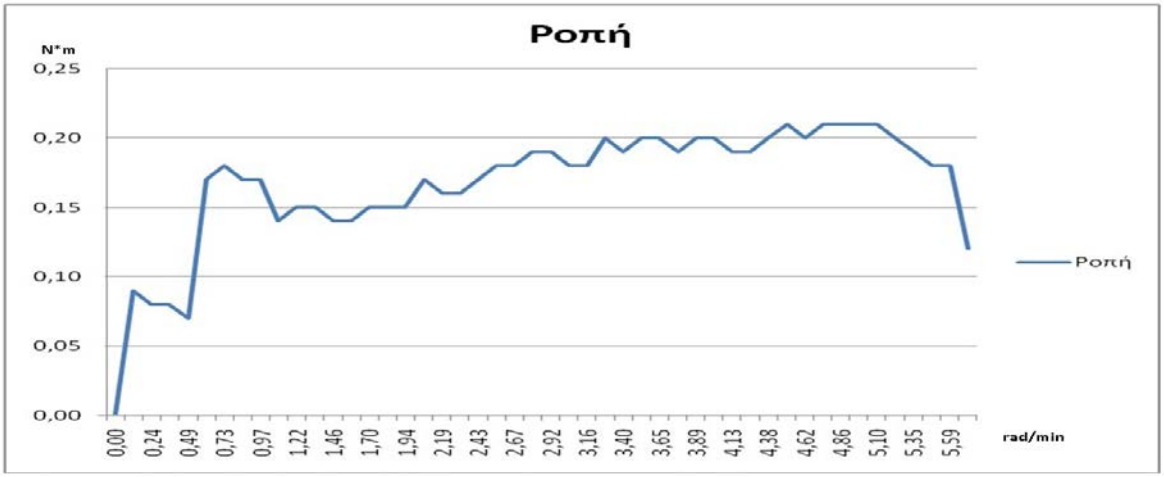
Υλικό CARBON FIBER/15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης

1 10436 στροφές



Γράφημα 13: Υλικό CARBON FIBER – 15° γωνίας εκτύπωσης – 10436 στροφές

2 6537στροφές (υπήρξε αποκοπή στρώματος)



Γράφημα 14: Υλικό CARBON FIBER – 15° γωνίας εκτύπωσης – 6537 στροφές

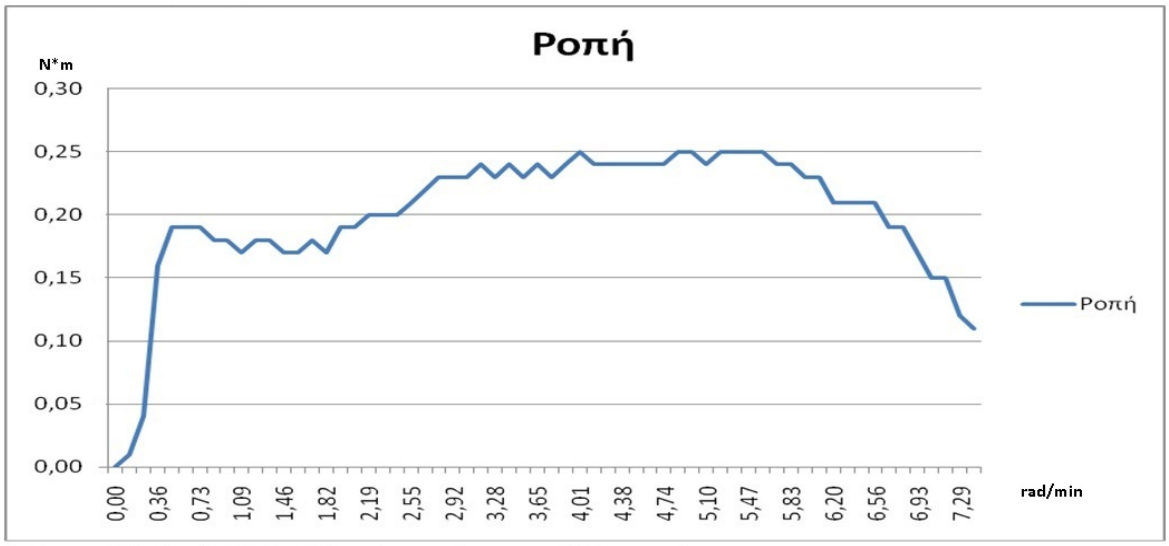
Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν από υλικό Carbon Fiber και εκτυπώθηκαν σε 15° γωνία παρουσίασαν τα ακόλουθα.

Το μεν πρώτο δοκίμιο είχε μια άριστη συμπεριφορά ως προς την αντοχή του σε καταπόνηση ροπής στρέψης παρουσιάζοντας υψηλό αριθμό κύκλων μηχανής και ροπής. Δεν υπήρξε θραύση του δοκιμίου, αλλά το πείραμα τερματίστηκε όταν η τιμή της ροπής στρέψης άρχισε να φθίνει και το δοκίμια άρχισε να παραμορφώνεται παρουσιάζοντας συστροφή ως προς τον άξονά του.

Το δε δεύτερο παρουσίασε από νωρίς αποκόλληση στρώματος οπότε δεν κατάφερε να δώσει υψηλές τιμές και το πείραμα τερματίστηκε σχεδόν στο μισό χρόνο από το πρώτο.

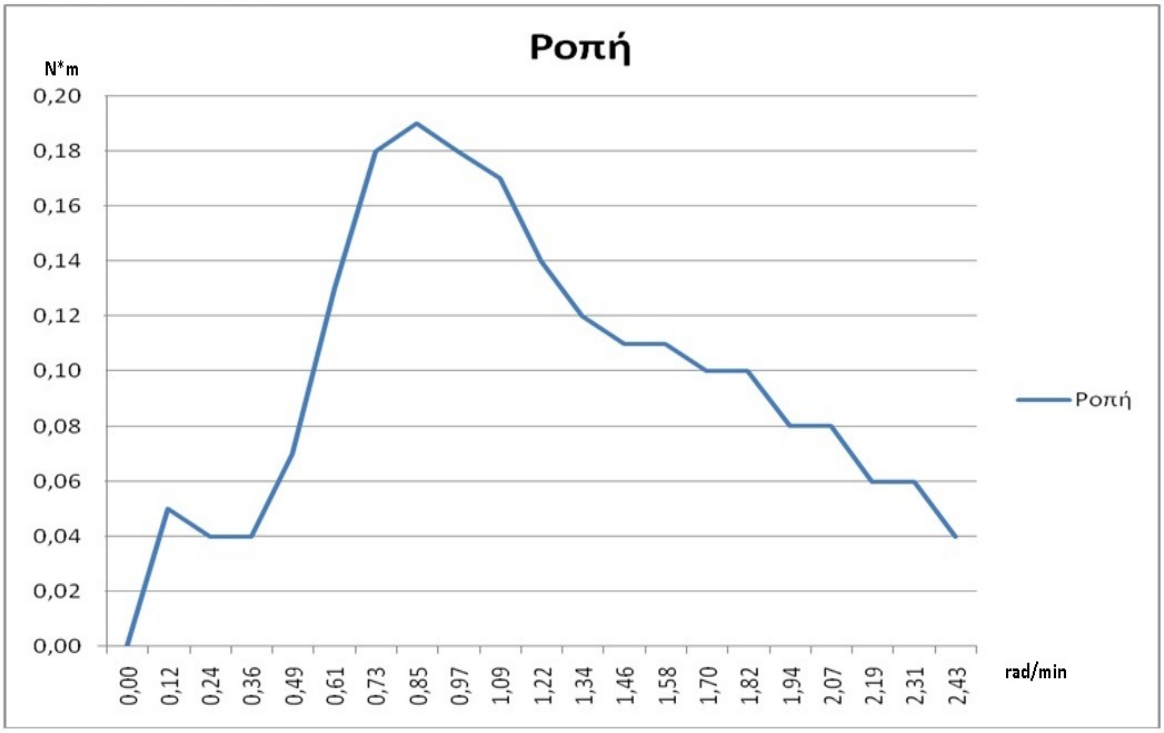
Υλικό PETG / 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης

1 1842 στροφές



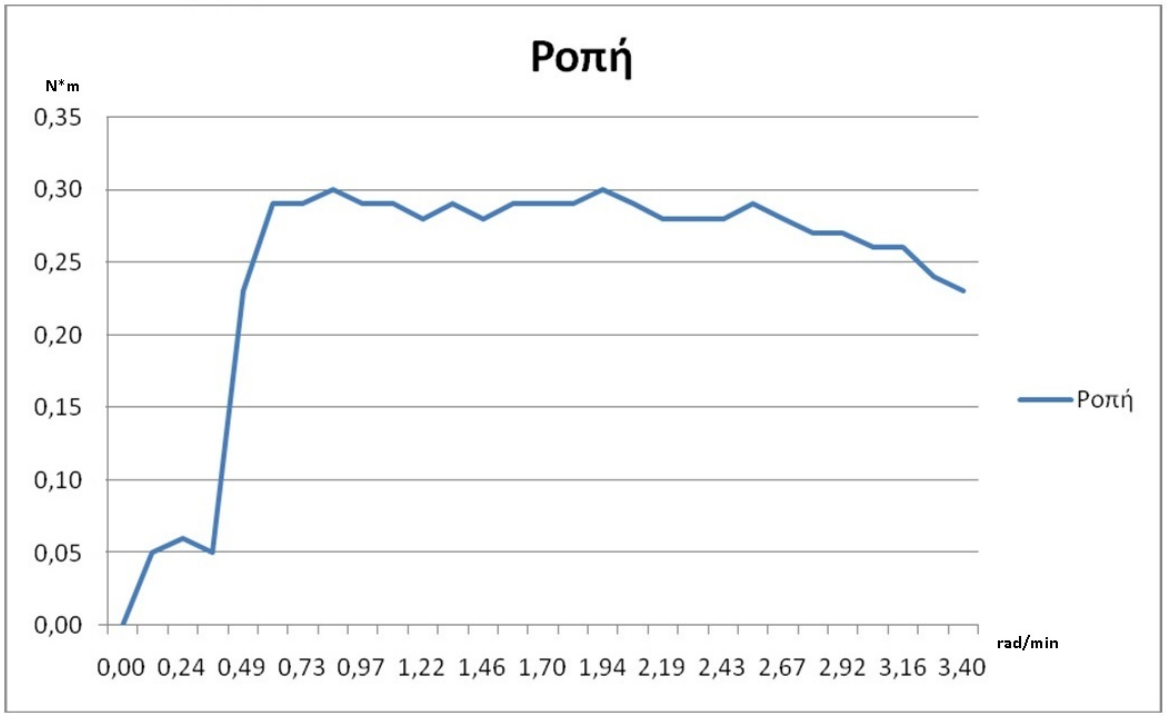
Γράφημα 15: Υλικό PETG – 15° γωνίας εκτύπωσης – 1842 στροφές

2 2714 στροφές



Γράφημα 16: Υλικό PETG – 15° γωνίας εκτύπωσης – 2714 στροφές

3 3813 στροφές



Γράφημα 17: Υλικό PETG – 15° γωνίας εκτύπωσης – 2813 στροφές

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν από υλικό PETG και εκτυπώθηκαν σε 15° γωνία παρουσίασαν τα ακόλουθα:

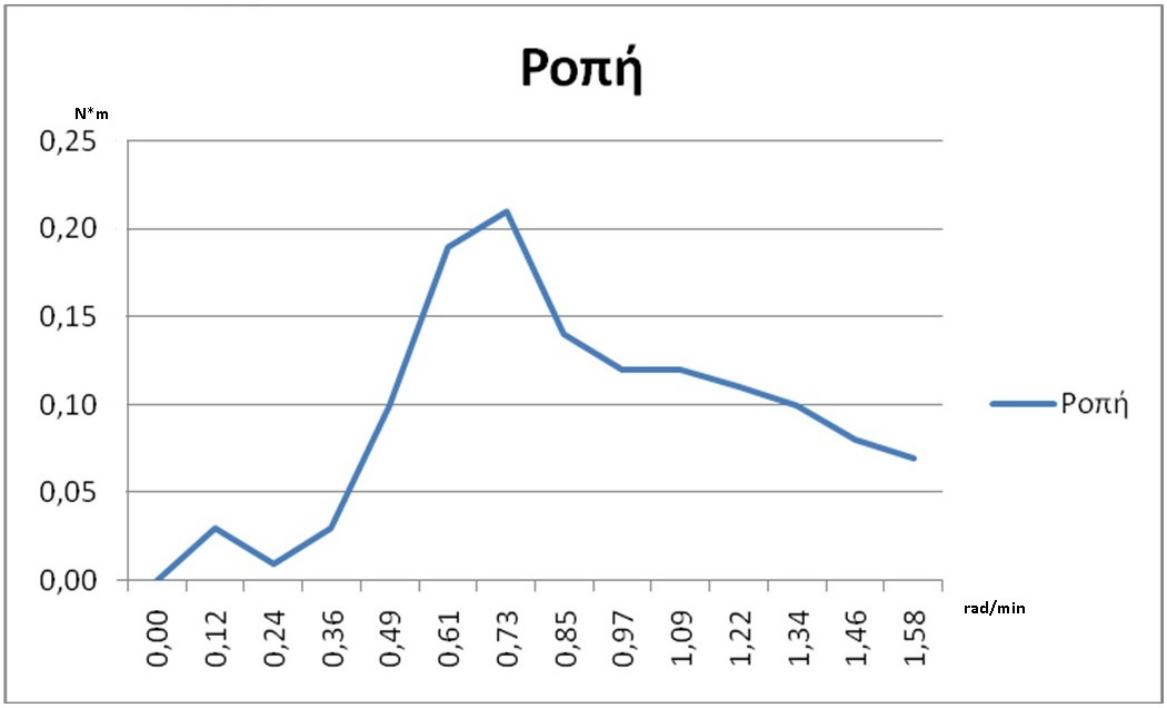
Το πρώτο δοκίμιο είχε το μικρότερο αριθμό κύκλων μηχανής και στο διάγραμμα του φαίνεται η ελαστική περιοχή του υλικού στα αριστερά, ενώ με την κορύφωση της ροπής στρέψης έχει περάσει στο φάσμα των πλαστικών παραμορφώσεων.

Το δεύτερο δοκίμιο παρουσίασε αποκόλληση στρώματος με αποτέλεσμα το διάγραμμα ροπής στρέψης που βλέπουμε παραπάνω. Το πείραμα διακόπηκε πριν την πλήρη αστοχία του υλικού γιατί δε θα έδινε αντιπροσωπευτικές τιμές.

Το τρίτο πείραμα είναι το πιο αντιπροσωπευτικό του υλικού αυτού, αφού δεν παρουσίασε το δοκίμιο καμία ατέλεια κατά τη διάρκεια του πειράματος.. Έδωσε τις μέγιστες τιμές ροπής στρέψης και κύκλων μηχανής. Στο διάγραμμα του είναι εμφανής η περιοχή της ελαστικής παραμόρφωσης στα αριστερά, ενώ στα δεξιά διακρίνεται μια σταδιακή πτώση της τιμής ροπής στρέψης γιατί έχει αρχίσει να αστοχεί το δοκίμιο από τις έξω στρώσεις προς τις μέσα.

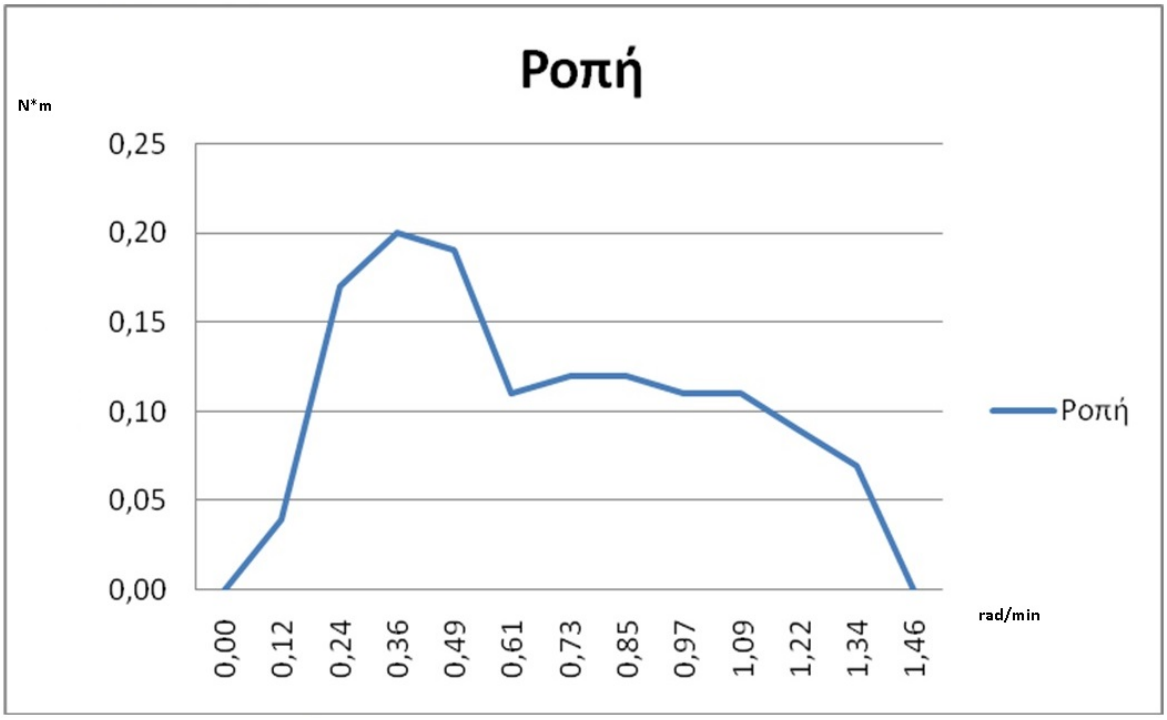
Υλικό ABS / 15 μοίρες γωνίας εκτύπωσης

1 1840 στροφές



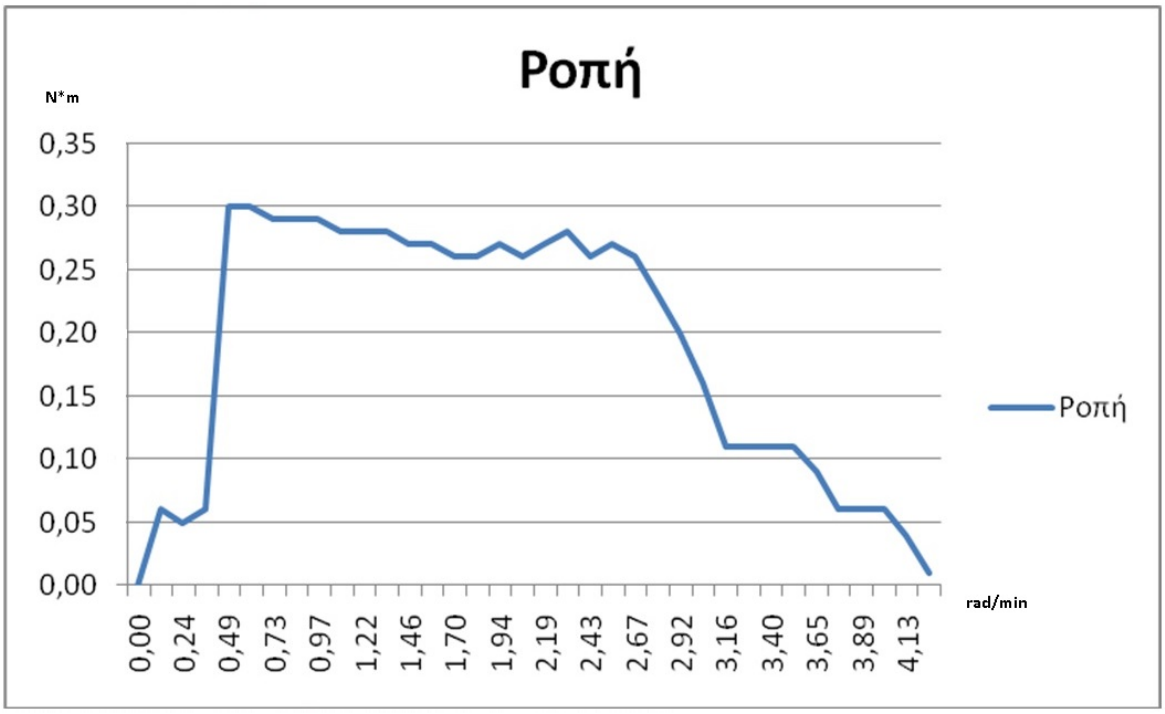
Γράφημα 18: Υλικό ABS – 15° γωνίας εκτύπωσης – 1840 στροφές

2 1657 στροφές



Γράφημα 19: Υλικό ABS – 15° γωνίας εκτύπωσης – 1657 στροφές

3 4884 στροφές



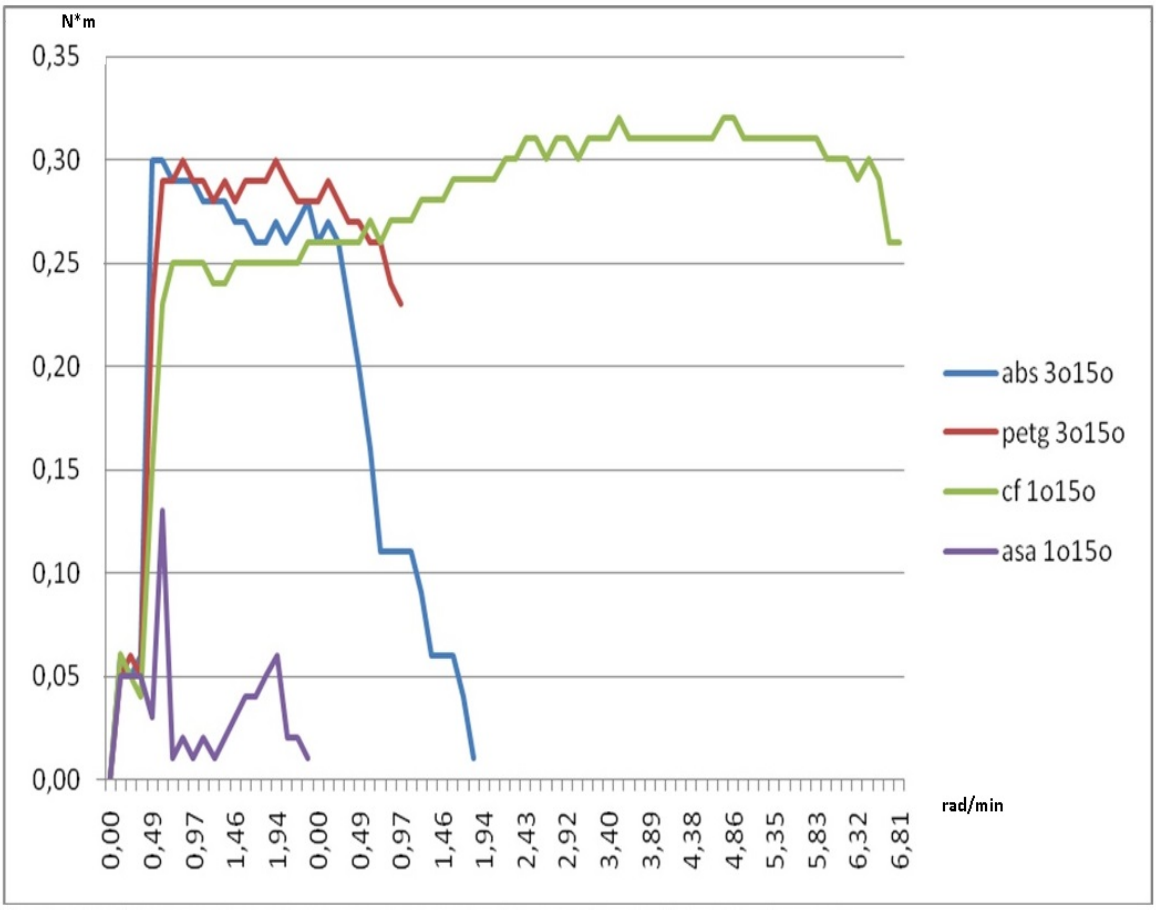
Γράφημα 20: Υλικό ABS – 15° γωνίας εκτύπωσης – 4884 στροφές

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν από υλικό ABS και εκτυπώθηκαν σε 15° γωνία παρουσίασαν τα ακόλουθα:

Το πρώτο και το δεύτερο δοκίμιο παρουσίασαν αποκόλληση στρωμάτων. Έτσι δόθηκαν χαμηλές τιμές και σε ροπή στρέψης και σε κύκλους μηχανής. Αυτό είναι ορατό στα παραπάνω διαγράμματα όπου μετά την μέγιστη τιμή ροπής στρέψης, αρχίζει μια φθίνουσα πορεία τιμών.

Το τρίτο δοκίμιο δίνει πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από το υλικό αυτό στο παραπάνω διάγραμμα, αφού παρουσίασε τις μέγιστες τιμές και δεν είχε κατασκευαστικές ατέλειες.

Συγκριτικό ASA – CARBON FIBER – PETG – ABS



Γράφημα 21: Συγκριτικό αποτελεσμάτων ASA – CARBON FIBER – PETG – ABS

Από τα τέσσερα αυτά υλικά που τελέστηκαν τα πειράματα μπορούν να εξαχθούν κάποια πρώτα συμπεράσματα όπως ότι το Carbon Fibereίναι το ανθεκτικότερο όλων αυτών αφού παρουσίασε την μεγαλύτερη αντοχή σε ροπή στρέψης και σε μεγαλύτερο φάσμα κύκλων μηχανής. Στην αντίπερα όχθη τοποθετείται το υλικό ASA με τα μικρότερα νούμερα. Σε μια ενδιάμεση φάση παρουσιάζονται τα υλικά PETG καιABS όπου έχουν μικρό αριθμό κύκλων μηχανής αλλά παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής καταπόνησης σε ροπή στρέψης.

ΥΛΙΚΟ	ΓΩΝΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ
ASA 1_o	15°	2651
ASA 2_o	15°	2345
CARBON FIBER 1_o	15°	10436
CARBON FIBER 2_o	15°	6537
PETG 1_o	15°	1842
PETG 2_o	15°	2714
PETG 3_o	15°	3813
ABS 1_o	15°	1840
ABS 2_o	15°	1657
ABS 3_o	15°	4884

Πίνακας 4: ASA, CARBON FIBER, PETG, ABS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχεδίαση Γραναζωτού Μηχανισμού πολλαπλασιασμού στροφών

5.1 Μελέτη Σχεδίασης του μηχανισμού

Η διπλωματική εργασία αφορά τη σχεδίαση και την κατασκευή ενός γραναζωτού μηχανισμού ο οποίος κατασκευάστηκε με συνθετικά υλικά. Στην πορεία παρουσιάζονται τα επιμέρους τεμάχια που τον απαρτίζουν μεμονωμένα καθώς και σχεδιαγράμματα που παρουσιάζουν τον τρόπο συνεργασίας μεταξύ τους. Η εν λόγω κατασκευή είναι ένα πειραματικό μοντέλο το οποίο μπορεί με την κατάλληλη έρευνα να εξελιχθεί περαιτέρω. Η σχεδίαση του μοντέλου βασίστηκε στη συνεργασία των γραναζιών με λόγο μετάδοσης 5:1. Στόχος ήταν η κατασκευή να είναι μικρή σε όγκο και γι' αυτό το λόγο η διαδικασία σχεδιασμού ήταν σε πρώτη φάση να σχεδιαστούν τα γρανάζια και στη συνέχεια το κέλυφος που θα συνεργάζονταν. Το μικρό μέγεθος της κατασκευής βοηθά στην ελαχιστοποίηση της φύρας σε περίπτωση ατελειών κατά την εκτύπωση, δεδομένου ότι είναι ήδη μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία και επιτυγχάνεται η μείωση του κόστους υλικών

Κατά σειρά έγιναν ως εξής:

- Σχεδιασμός των δυο συνεργαζόμενων γραναζιών.
- Τοποθέτηση σε κέλυφος.
- Δημιουργία καπάκι κελύφους.
- Σχεδιασμός αξόνων που δίνουν και παίρνουν κίνηση.
- Σχεδιασμός τροχαλίας για να δέχεται κίνηση ο μηχανισμός από τη μία πλευρά και από την άλλη.
- Σχεδιασμός κελύφους στροβιλοσυμπιεστή.
- Σχεδιασμός πτερωτής του στροβιλοσυμπιεστή

Παράλληλα, με στόχο την ολοκληρωμένη τρισδιάστατη απεικόνιση του μηχανισμού σχεδιάστηκαν οι απαραίτητες τσιμούχες, βίδες, ροδέλες και τα έδρανα κύλισης. Αυτά είναι μεταλλικά και λαστιχένια οπότε δεν παρουσιάζονται παρακάτω, καθώς δεν εκτυπώθηκαν, αλλά αγοράστηκαν από το εμπόριο. Αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας είναι η διατήρηση του κόστους χαμηλά και η εύκολη αντικατάσταση τους όποτε αυτό χρειαστεί, δεδομένου ότι είναι τυποποιημένα στοιχεία μηχανών.

Για το σχεδιασμό των γραναζιών έγινε η ακόλουθη μελέτη:

Σχεδιάστηκε το γρανάζι (πινιόν) με 100 δόντια και το (συνεργαζόμενο)γρανάζι με 20 δόντια ώστε να υπάρξει πολλαπλασιασμός των στροφών με σχέση μετάδοσης 5:1

Το αποτέλεσμα είναι ο μηχανισμός να δέχεται 1000 στροφές το λεπτό και να περιστρέφει τη πτερωτή με 5000 στροφές το λεπτό.

Modul	m	0,8		0,8
βήμα οδόντωσης	t	2,5132741		2,513274
αριθμός δοντιών	z	20		100
Αρχική διάμετρος	d_o	16		80
Πάχος δοντιού	s	1,216		1,216
ύψος δοντιού	h	1,7336		1,7336
ύψος ποδός	h_f	0,9336		0,9336
ύψος κεφαλής	h_k	0,8		0,8
Διάμετρος κεφαλής	d_k	17,6		81,6
Διάμετρος ποδός	d_f	14,133333		78,13333
διάκενο δοντιού	l	1,296		1,296
απόσταση αξόνων	a	48		-
σχέση μετάδοσης	i	0,2	1/5	-
στροφές	n	5000	<-	1000

Πίνακας 5: Γεωμετρικά και λειτουργικά στοιχεία των γραναζιών του μηχανισμού

5.2 Προβολή σχεδίου επιμέρους τεμαχίων

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν φαίνονται τα επιμέρους κομμάτια που σχεδιάστηκαν και αποτελούν τον μηχανισμό. Έχουν διαφορετικά χρώματα για να είναι ευκολότερη η διάκριση μεταξύ τους. Το υλικό όμως που εκτυπώθηκαν είναι ίδιο, το ονομαζόμενο PETG σε λευκή απόχρωση. Μοναδική εξαίρεση η πτερωτή, που εκτυπώθηκε από Carbon Fiber σε μαύρη απόχρωση για να διακρίνονται οι λεπτομέρειές της. Η πτερωτή κατασκευάστηκε από ανθεκτικότερο υλικό λόγω των λεπτών χαρακτηριστικών της (λεπτά πτερύγια).

Εικόνα 19: Πινιόν-Πρωτεύων Γρανάζι κίνησης τροχαλίας, 100 δόντια (Power gear (1st))

Το modul των συνεργαζόμενων γραναζιών επιλέχτηκε να είναι 0,8 και ο λόγος είναι ότι μεγαλύτερο modul αυξάνει το μέγεθος των δοντιών των γραναζιών(κρουστικό φαινόμενο) και το μικρότερο μέγεθος δημιουργεί πρόβλημα στην αντοχή των δοντιών σε κίνηση. Έτσι λοιπόν κρίθηκε ιδανικό για την περίπτωση αυτού του μηχανισμού. Ο σχεδιασμός του πινιόν έγινε με στόχο να χρησιμοποιηθεί το λιγότερο δυνατό υλικό, όχι τόσο για λόγους οικονομίας αλλά για να παρουσιάζει λιγότερες αδρανειακές μάζες. Δηλαδή δεν έγινε γεμάτο (μασίφ) αλλά σχεδιάστηκε το γρανάζι με ακτίνες για να επιτευχθεί η μείωση του βάρους (άρα μείωση αδρανειακού φαινομένου).

Συνεπώς, περιορίστηκε το φαινόμενο της αδράνειας και μπορεί να αυξηθεί ο μέγιστος αριθμός περιστροφής του χωρίς να μειωθεί η αντοχή του στη χρήση.

Για παράδειγμα, το βάρος του συγκεκριμένου γραναζιού στην εκτύπωση βγήκε 19,07gr. Μια πρώτη μαθηματική προσέγγιση είναι η ορμή (O) που ισούται με το βάρος (kg) επί την ταχύτητα (m/s). Στην περίπτωση που η εκτύπωση γινόταν με πλήρη γέμιση του γραναζιού και δε γινόταν με ακτίνες θα ήταν 25gr.

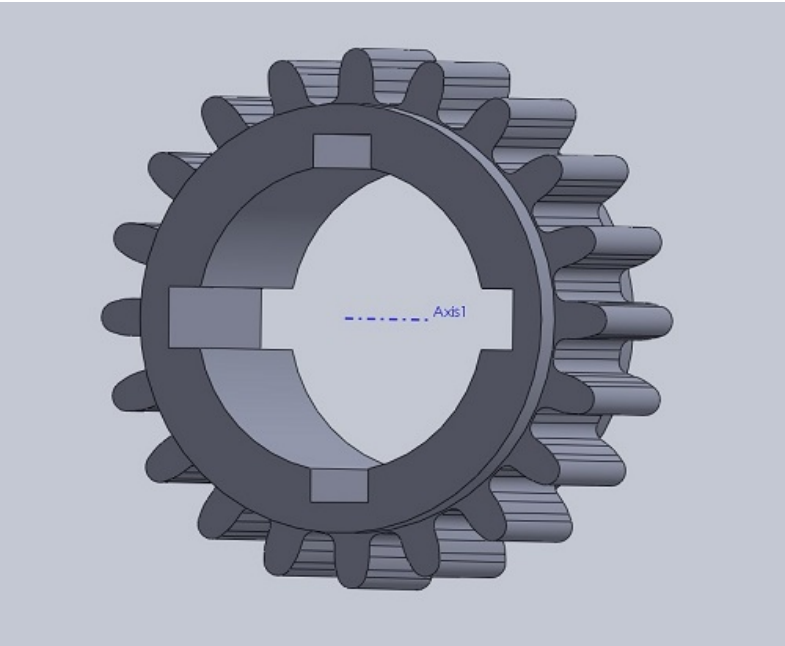
Έστω μια ταχύτητα 100 m/sμε τον ακόλουθο τύπο έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

$$O = B * U$$

O_1 = 0.01907 kg * 100 m/s = 1,907 (kg*m)/s

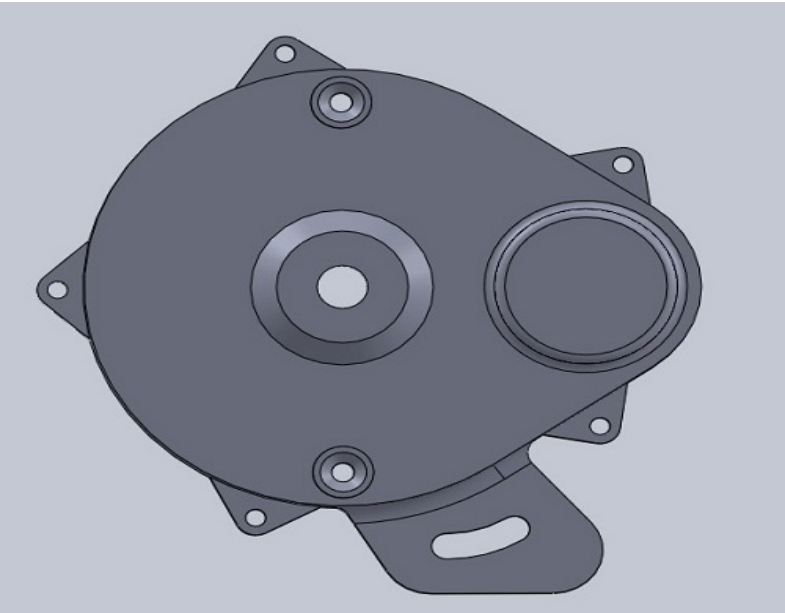
O_2 = 0.025 kg * 100 m/s = 2,5 (kg*m)/s

Με αυτό τον γρήγορο υπολογισμό γίνεται αντιληπτό ότι η μεγάλη αδρανειακή μάζα παρουσιάζει μεγάλη ροπή αδρανείας. Ο μηχανισμός έχει κατασκευαστεί με στόχο να λαμβάνει πέντε χιλιάδες στροφές το λεπτό και να περιστρέφει την πτερωτή εικοσιπέντε χιλιάδες στροφές το λεπτό. Σε αυτά τα νούμερα περιστροφής των κινούμενων μερών του μηχανισμού, είναι σημαντικό το βάρος να παραμείνει χαμηλό. Έτσι ελαχιστοποιείται και η περίπτωση εμφάνισης φαινομένων συντονισμού.



Εικόνα 20: Συνεργαζόμενο- Δευτερεύον γρανάζι κίνησης, 20 δόντια (Idle gear (2nd))

Το modul αυτού του συνεργαζόμενου γραναζιού είναι ίδιο με του πινιόν. Έχει ήδη αναφερθεί ότι ο λόγος είναι 5:1 άρα το συγκεκριμένο γρανάζι έχει 20 δόντια για να επιτευχθεί αυτός ο λόγος, και ως αποτέλεσμα είναι οι μικρές του διαστάσεις. Λόγω της μικρής κατασκευής δεν υπάρχουν περιθώρια για ελαφρύτερη σχεδίαση και εκτύπωση και παράλληλα μειώνεται το κόστος και η ποσότητα του χρησιμοποιούμενου υλικού.



Εικόνα 21: Κέλυφος γραναζιών (Compressor house) -Εξωτερική όψη

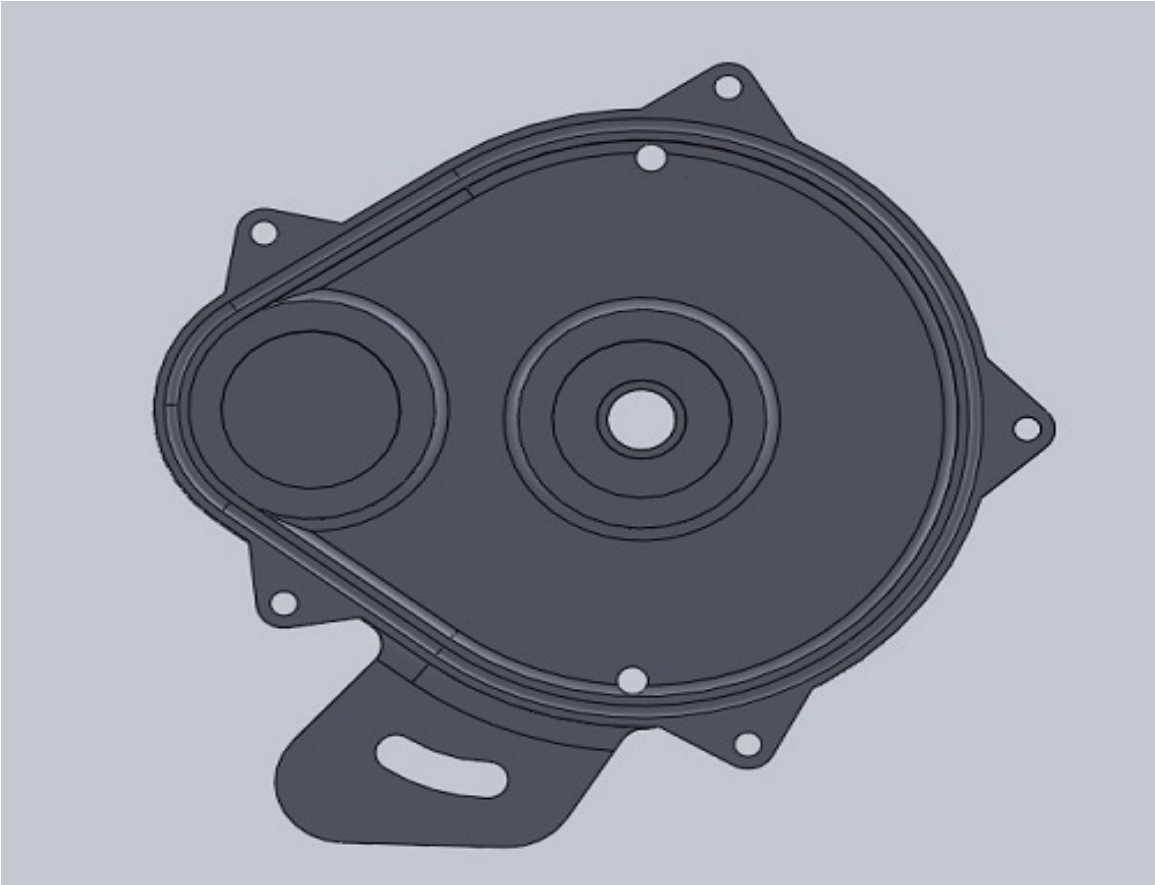
Στην Εικόνα 21 παρουσιάζεται το κεντρικό κομμάτι, πάνω στο οποίο εδράζονται όλα τα συνεργαζόμενα τεμάχια του μηχανισμού.

Διακρίνονται στο κέντρο του μηχανισμού οι δυο φωλιές έδρασης των ρουλμάν, καθώς και η οπή από την οποία περνά ο άξονας που μεταφέρει κίνηση από την τροχαλία στο μεγάλο γρανάζι.

Περιμετρικά παρουσιάζονται τα πέντε σημεία ένωσης με το άλλο μισό του κελύφους .

Στο πάνω και στο κάτω μέρος του κελύφους διακρίνονται δυο οπές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσθήκη λιπαντικού στο εσωτερικό του μηχανισμού σε περίπτωση που παραστεί η ανάγκη.

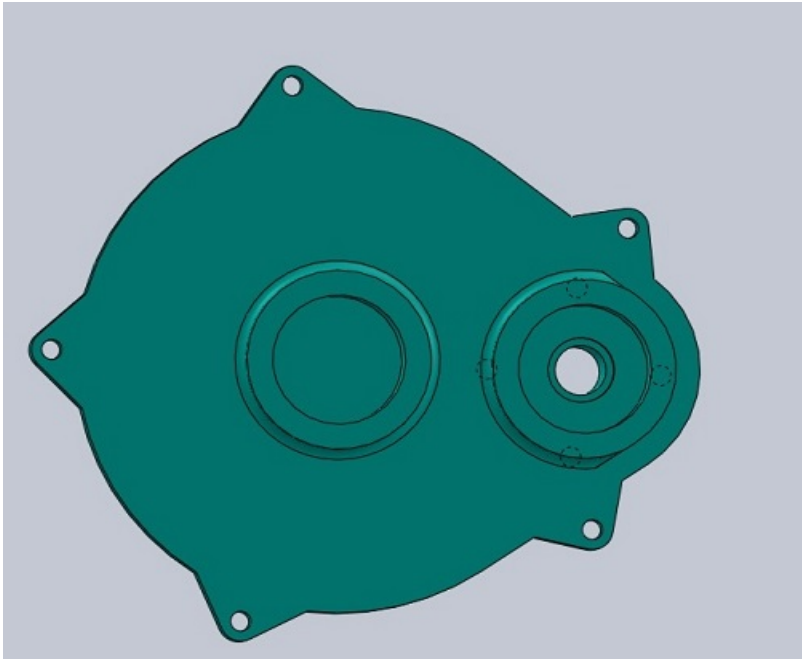
Τέλος, στο κάτω μέρος είναι η βάση στήριξης. Η βάση αυτή κατασκευάστηκε με γνώμονα την εύκολη στήριξη, τη δυνατότητα τοποθέτησης υπό γωνία και την μη αναγκαιότητα χρήσης τανυστήρα.



Εικόνα 22: Κέλυφος γραναζιών (Compressor house) -Εσωτερική όψη

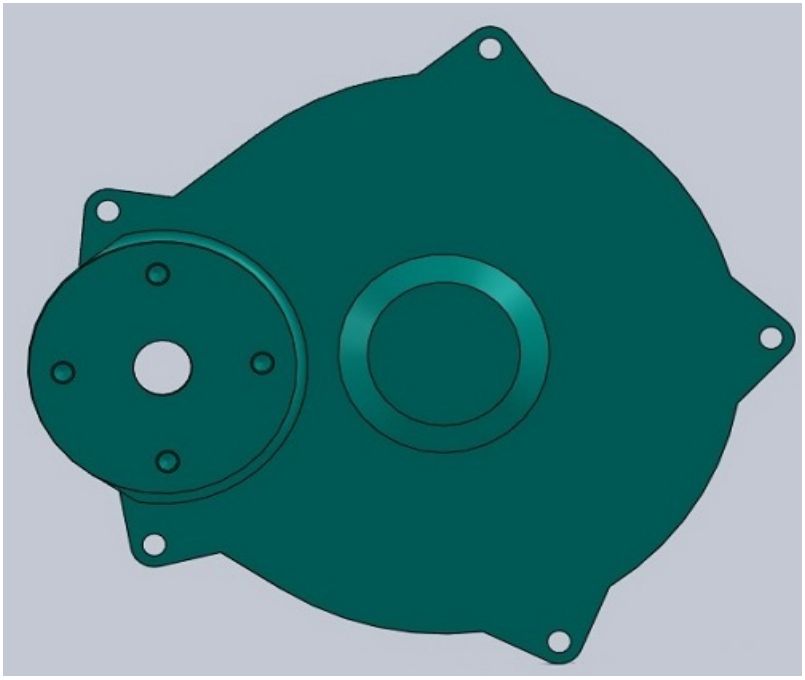
Στην Εικόνα 22 διακρίνονται οι φωλιές έδρασης των δυο ρουλμάν, καθώς και η φωλιά της τσιμούχας στεγανοποίησης (o-ring) στο κέντρο του κελύφους .

Τέλος, περιμετρικά του κελύφους διακρίνεται αυλάκι όπου τοποθετείται συγκολλητικό – στεγανωτικό υλικό (φλατζόκολλα).



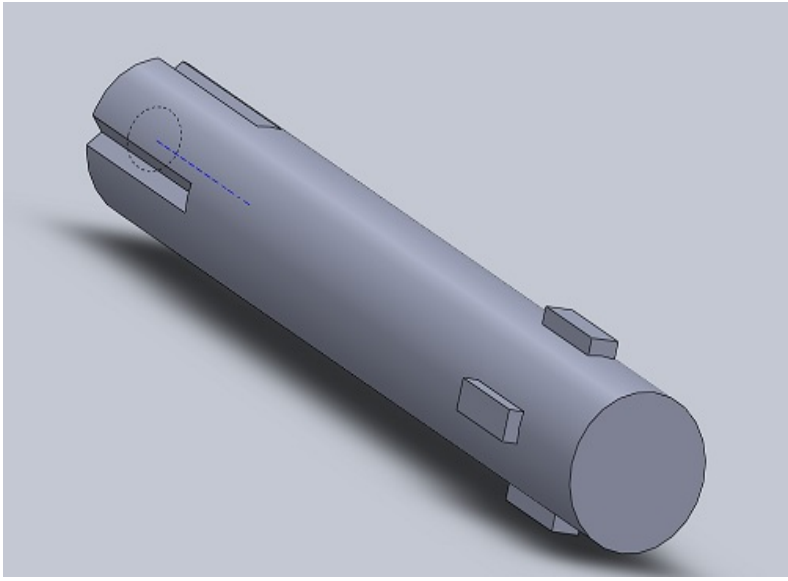
Εικόνα 23: Καπάκι κελύφους γραναζιών (Case Cover)- Εσωτερική όψη

Στην εικόνα 23 διακρίνεται στο κέντρο του μηχανισμού οι δυο φωλιές έδρασης των ρουλεμάν, καθώς και η οπή που περνά ο άξονας που μεταφέρει κίνηση από τα γρανάζια στη πτερωτή. Περιμετρικά φαίνονται τα πέντε σημεία ένωσης με το άλλο μισό του κελύφους. Επίσης είναι η ορατή η φωλιά της τσιμούχας στεγανοποίησης (O-ring) στο κέντρο του κελύφους.



Εικόνα 24: Καπάκι κελύφους γραναζιών (Case Cover)- Εξωτερική όψη

Στα αριστερά της Εικόνας 24 διακρίνονται οι τέσσερις οπές όπου στερεώνεται η βάση της πτερωτής και η οπή για τον άξονα που μεταφέρει την κίνηση στη φτερωτή.

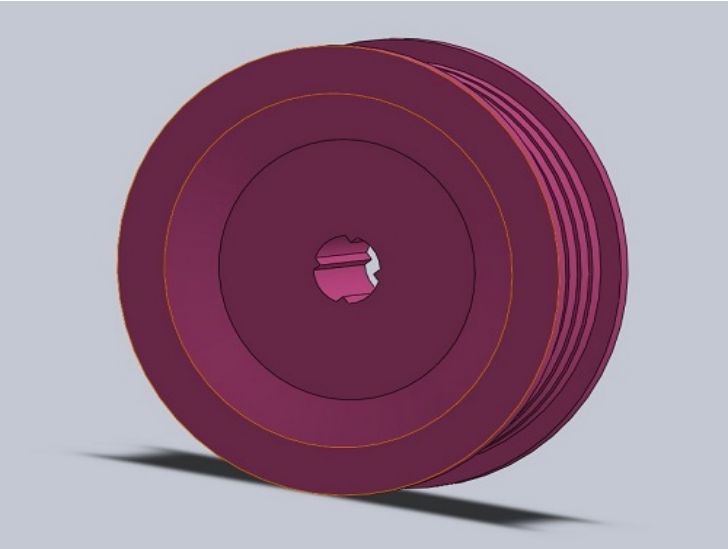


Εικόνα 25: Άξονας μετάδοσης κίνησης (Axle)

Οι άξονες μετάδοσης κίνησης που χρειάζεται για τη λειτουργία του ο μηχανισμός είναι δυο (Εικόνα 25). Το σχέδιο και οι διαστάσεις όμως είναι κοινές. Έτσι αυξάνεται η απλότητα της κατασκευής. Αποφεύγονται λάθη κατά την συναρμογή του μηχανισμού. Μικρότερος όγκος αρχείων και ευκολότερος τρόπος παρέμβασης- τροποποίησης του μηχανισμού.

Από την μια πλευρά φέρει πολύσφηνο τεσσάρων σημείων για να μεταφέρουν τη ροπή κίνησης από τα γρανάζια και ταυτόχρονα λειτουργούν και σαν φρένο ώστε να μην κινείται κατά τον διαμήκη άξονα.

Από την άλλη πλευρά δε συμβαίνει το ίδιο γιατί δε θα ήταν δυνατό να περάσει ο άξονας από τις οπές των κελύφων. Έτσι σχεδιάστηκαν τέσσερις σφηναύλακες και η συγκράτηση της τροχαλίας και της πτερωτής γίνεται με χρήση κοχλία.

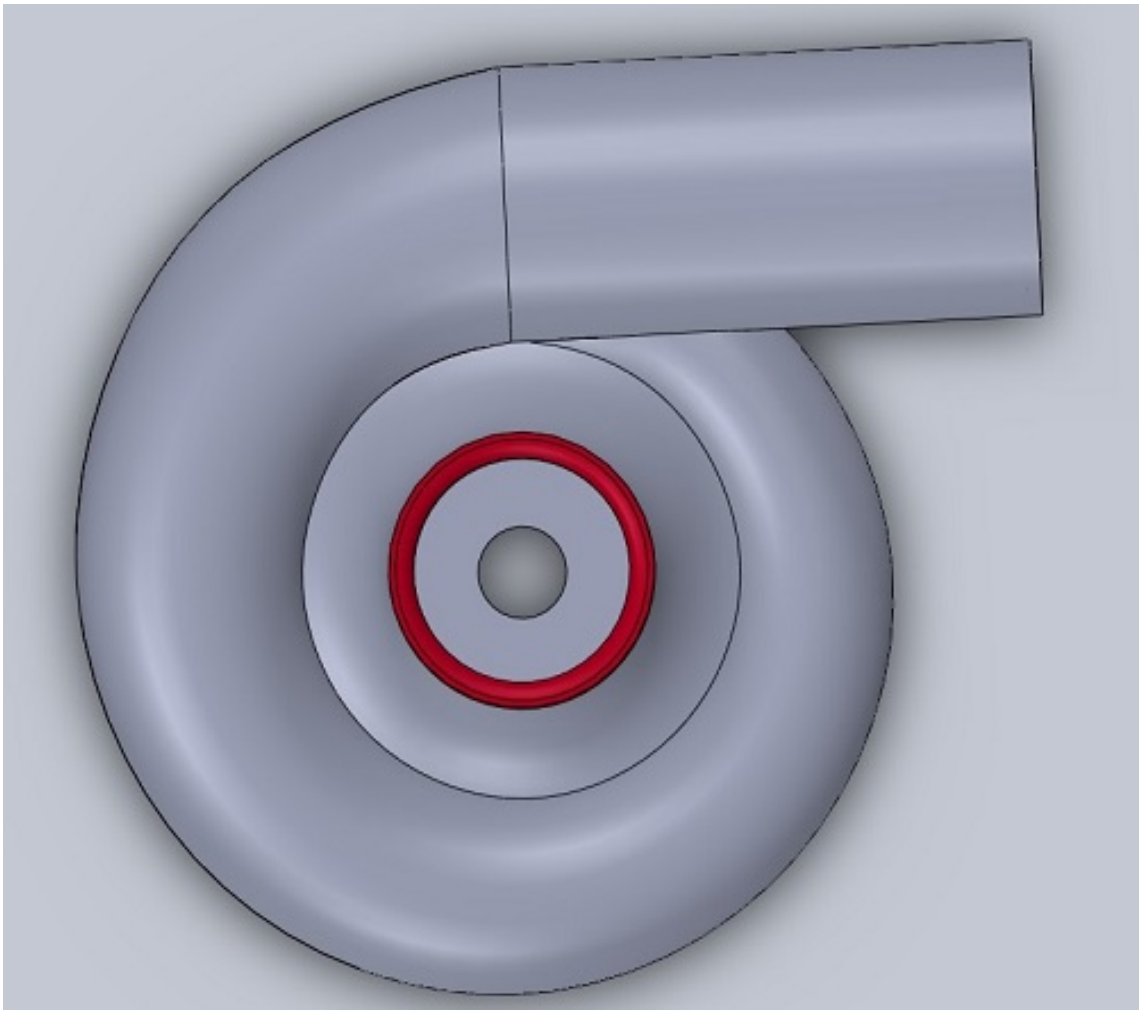


Εικόνα 26: Τροχαλία (Pulley)

Στην εικόνα 26 διακρίνεται η τροχαλία που δίνει κίνηση στο μηχανισμό. Η στήριξή της γίνεται με κοχλία και ροδέλα πάνω στον άξονα όπου σφηνώνει.

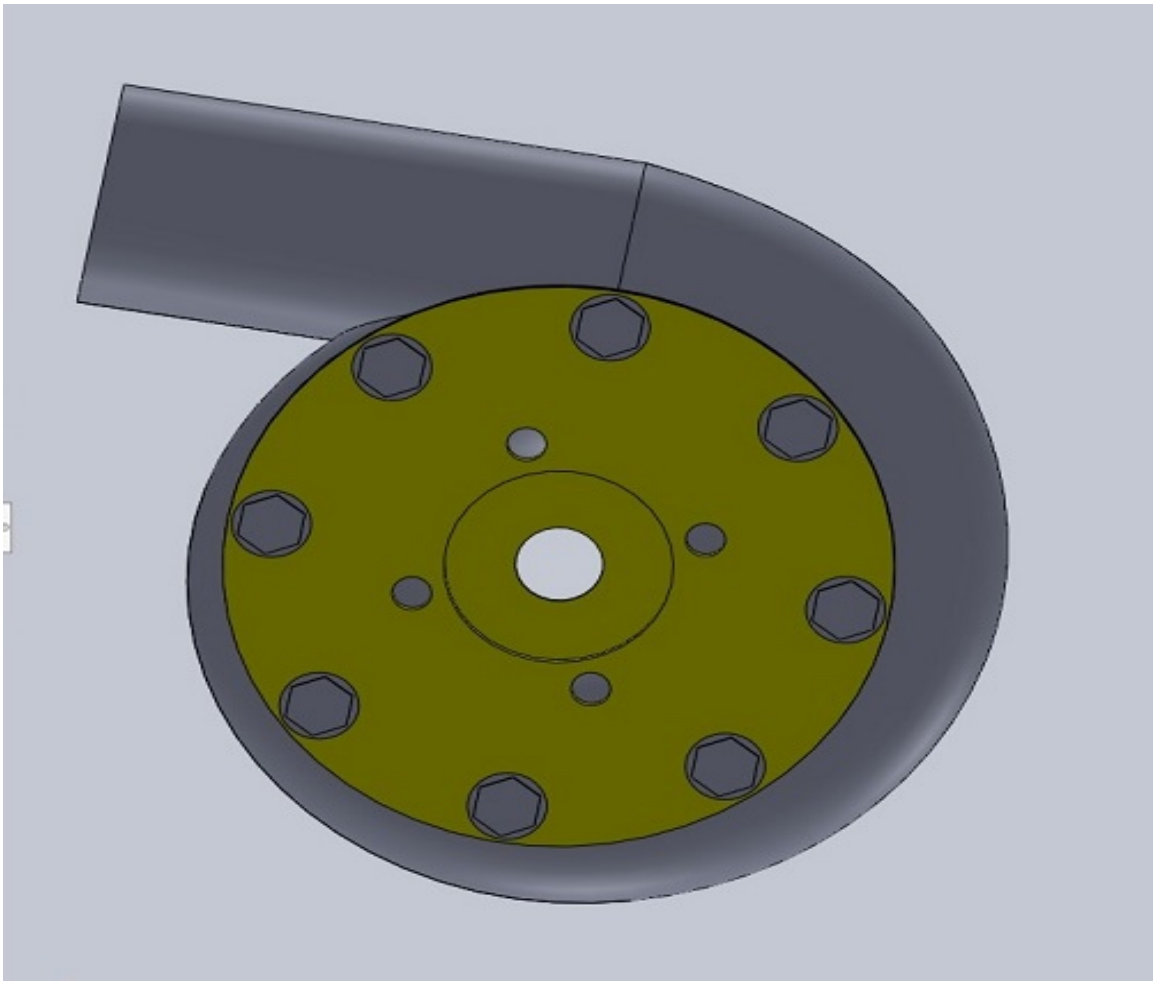
Ο σχεδιασμός της δεν είναι μείζον θέμα γενικότερα, γιατί είναι από τα κομμάτια που εύκολα μπορούν να παραμετροποιηθούν ανάλογα τις ανάγκες ή τις επιθυμίες του μελετητή. Δηλαδή μπορεί να αντικατασταθεί από μια οδοντωτή, ή μια πλατύτερη, ή στενότερη.

Τέλος, η τροχαλία μπορεί να αντικατασταθεί από μια με μεγαλύτερη ή μικρότερη διάμετρο, ώστε να πολλαπλασιάσει ή να υποπολλαπλασιάσει τις τελικές στροφές που θα μεταφερθούν στη πτερωτή. Το μόνο που πρέπει να μείνει ίδιο είναι ο σχεδιασμός του κέντρου, ώστε να είναι συμβατό με τον άξονα ως προς το πολύσφηνο του.



Εικόνα 27: Κέλυφος πτερωτής (Turbo)- Μπροστινή όψη

Στην εικόνα 27 διακρίνεται το κέλυφος του στροβίλου, όπου φωλιάζει η πτερωτή. Στο κέντρο είναι η οπή που περνά ο άξονας για να δώσει κίνηση στην πτερωτή. Με βυσσινί απόχρωση έχει σημαδευτεί η οπή, από την οποία εισέρχεται ο αέρας. Στην οπή αυτή μπορεί να τοποθετηθεί φίλτρο αέρα για να εμποδίσει την εισροή μικρών σωματιδίων εντός της πτερωτής και του θαλάμου καύσης για την αποφυγή επιβλαβών καταστάσεων (πχ: φθορές από αυξημένες τριβές).

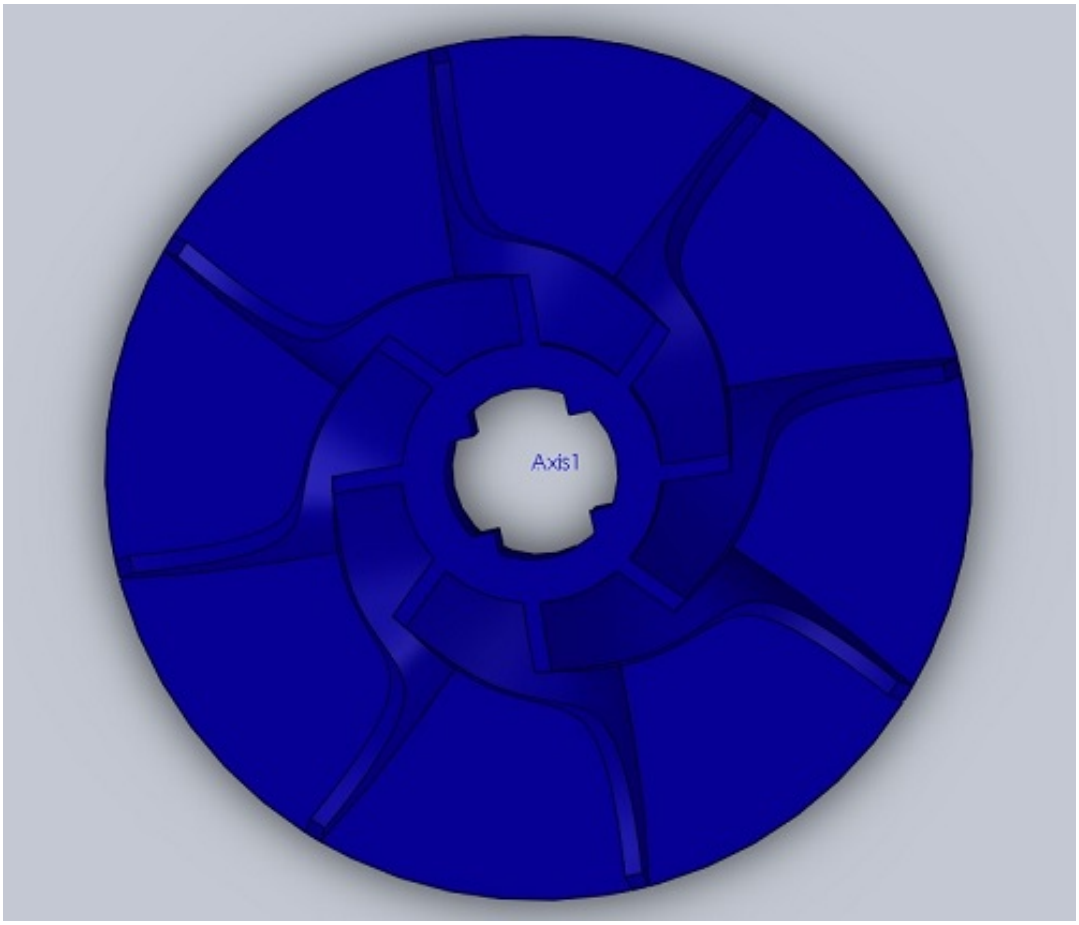


Εικόνα 28: Κέλυφος πτερωτής (Turbo)- Πίσω όψη

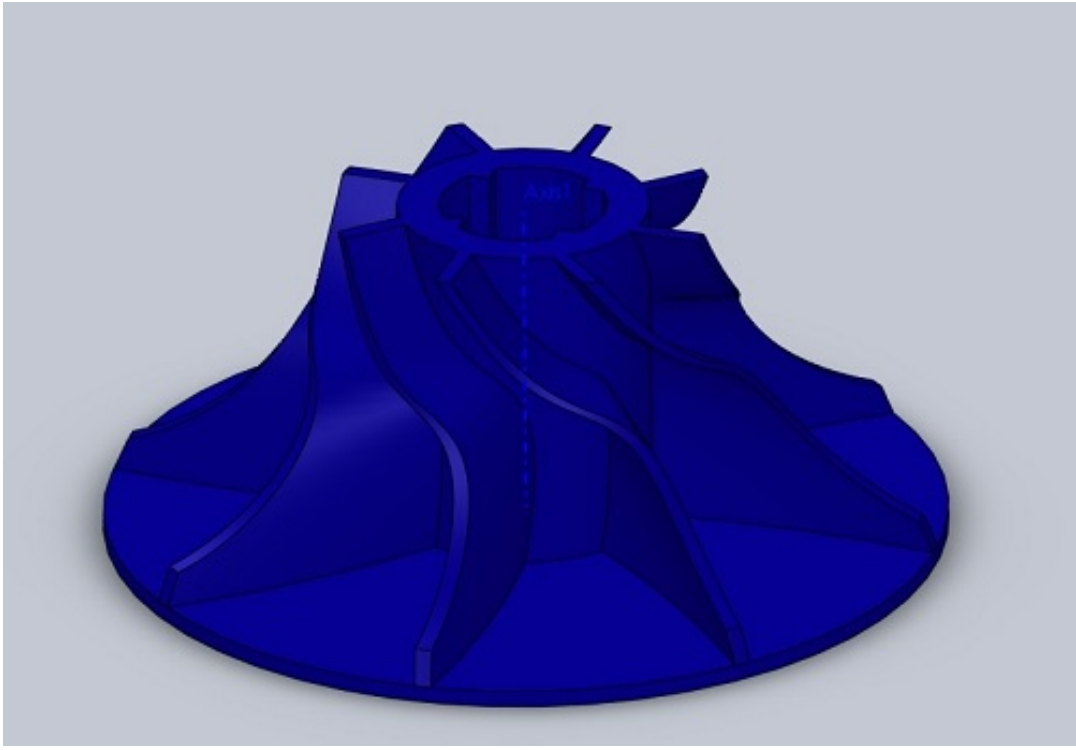
Στην εικόνα 28 διακρίνεται η πίσω όψη του κελύφους του συμπιεστή (γκρι) και ο τρόπος που συνεργάζεται με τη βάση της πτερωτής (κίτρινο). Το κίτρινο τεμάχιο εξυπηρετεί δυο σκοπούς:

1. Με τις τέσσερις οπές που διακρίνονται, εφάπτεται το τεμάχιο πάνω στο κεντρικό κέλυφος του μηχανισμού και σταθεροποιείται.
2. Με τις οχτώ εξάγωνες βίδες που φαίνονται, στερεώνεται το κέλυφος του συμπιεστή πάνω σε ολόκληρη την κατασκευή.

Οι κοχλίες μελετήθηκαν και τοποθετήθηκαν ώστε να στεγανοποιούν και να δίνεται η δυνατότητα να αλλάξει η γωνία τοποθέτησης της εξαγωγής αέρα ως προς τον προσανατολισμό της κατασκευής. Μέσα τους εδράζεται η πτερωτή και μέρος του άξονα που της δίνει κίνηση.



Εικόνα 29: Πτερωτή(Compressor Impeller)-Κάτοψη

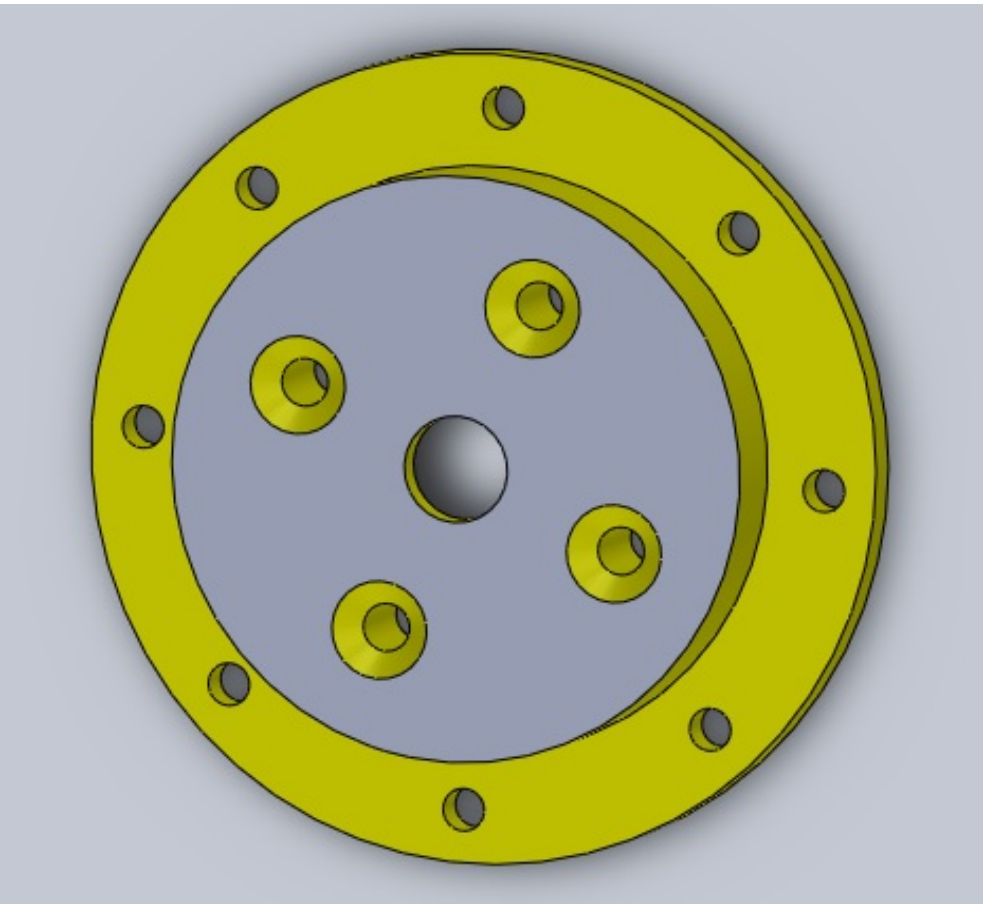


Εικόνα 30: Πτερωτή (Compressor Impeller)-Ισομετρική όψη

Η σχεδίαση δεν είναι αποτέλεσμα αεροδυναμικής και θερμοδυναμικής ανάλυσης, αλλά έχει ληφθεί εμπειρικά.

Επιλέχτηκε ο αριθμός των πτερυγίων στην πτερωτή να είναι οχτώ σε αριθμό. Σίγουρα είναι ένα πολύ σημαντικό τεμάχιο όπου χρίζει μελέτη καθότι καθορίζει την ποσότητα του αέρα που μπορεί να αναρροφήσει και το φάσμα των στροφών περιστροφής της. Η μελέτη αυτή μπορεί να γίνει με ειδικά λογισμικά, αλλά και με πειραματική κατασκευή άλλων πτερωτών με διαφορετικό αριθμό πτερυγίων και με άλλη κλίση. Άλλωστε μέρος του σκοπού της κατασκευής αυτού του πρότυπου μηχανισμού είναι για να θέσει τα θεμέλια για έρευνα και ανάπτυξη στις πτερωτές μέσω της χρήσης νέων τεχνολογιών.

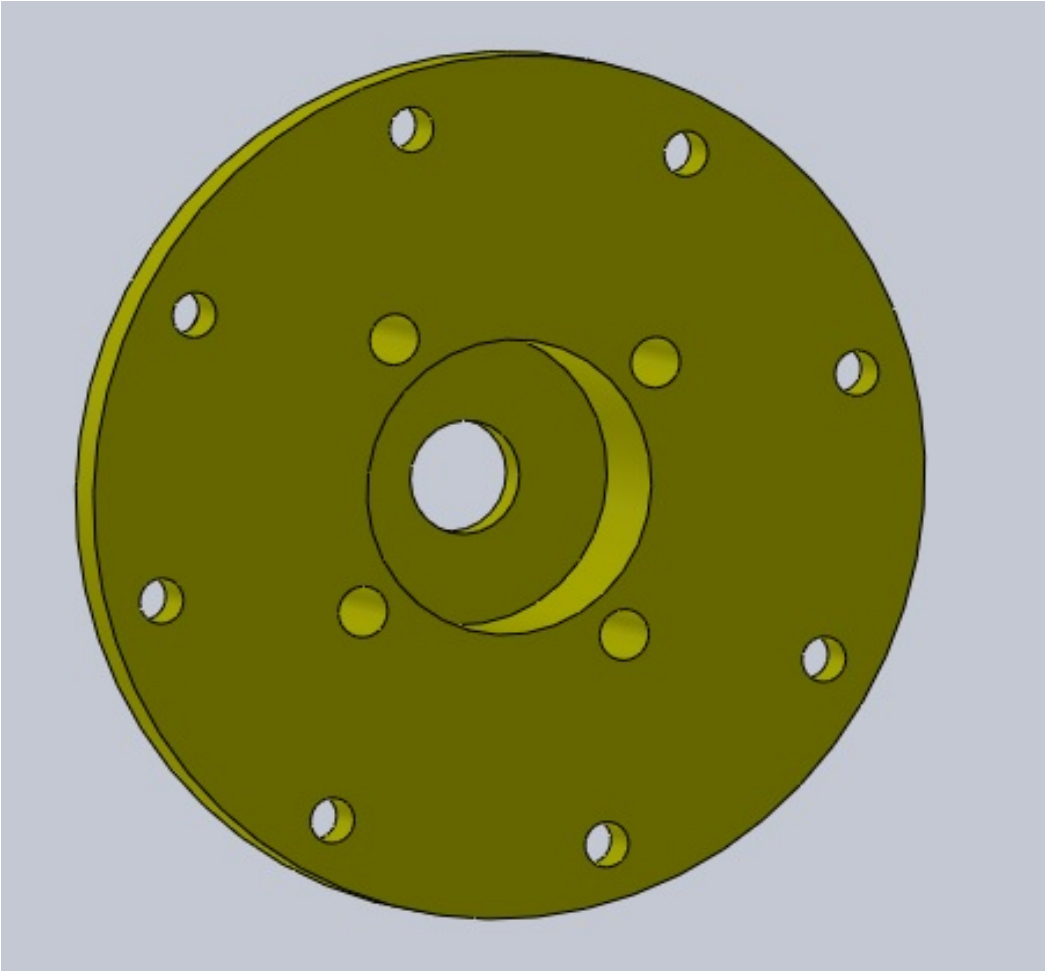
Με τη χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή και ενός σύγχρονου τρισδιάστατου εκτυπωτή μπορούν να κατασκευαστούν πρωτότυπα δείγματα εύκολα, γρήγορα, με διαστασιολογική ακρίβεια και με χαμηλό κόστος. Σε ορισμένες περιπτώσεις ίσως να είναι και το τελικό αντικείμενο ή συναρμολόγημα το εξάρτημα που θα εκτυπωθεί. Αν στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι αναγκαίο να κατασκευαστεί ένας αριθμός διαφορετικών διαστάσεων πτερωτών από μέταλλο, τότε θα πρέπει να το αναλάβει ειδική κατασκευάστρια εταιρία με επίπτωση όμως σε κόστος και χρόνο διότι θα είναι αναγκαία η χρήση εργαλειομηχανών ή καλουπιών χύτευσης. Γενικά, στις μέρες μας είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται η ποιότητα με το λιγότερο δυνατό κόστος έρευνας.



Εικόνα 31: Σύνδεσμος κελύφους και συμπιεστή αέρα (Washer Front)

Στην εικόνα 31 η κεντρική οπή είναι για να συνδεθεί ο άξονας με τη φτερωτή. Με γκρι χρώμα διακρίνεται η πλάτη της φτερωτής, που φέρει τέσσερις οπές σύνδεσης με το κέλυφος.

Παρατηρείται ότι οι οπές αυτές είναι μελετημένες για φρεζάτες, βίδες ώστε να μην εμποδίζουν την περιστροφή της πτερωτής.

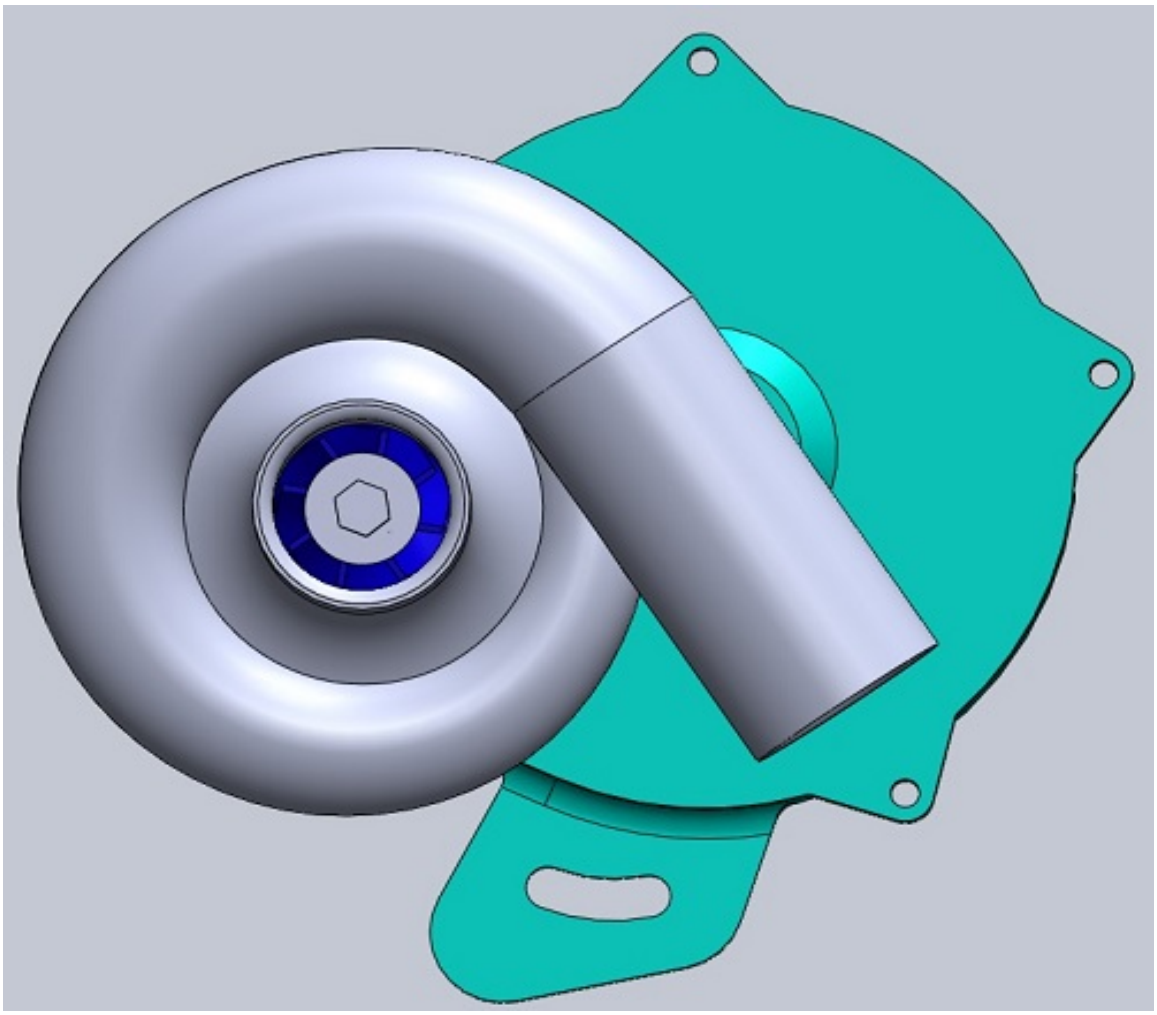


Εικόνα 32: Σύνδεσμος κελύφους και συμπιεστή με φωλιά για ρουλεμάν (Washer back)

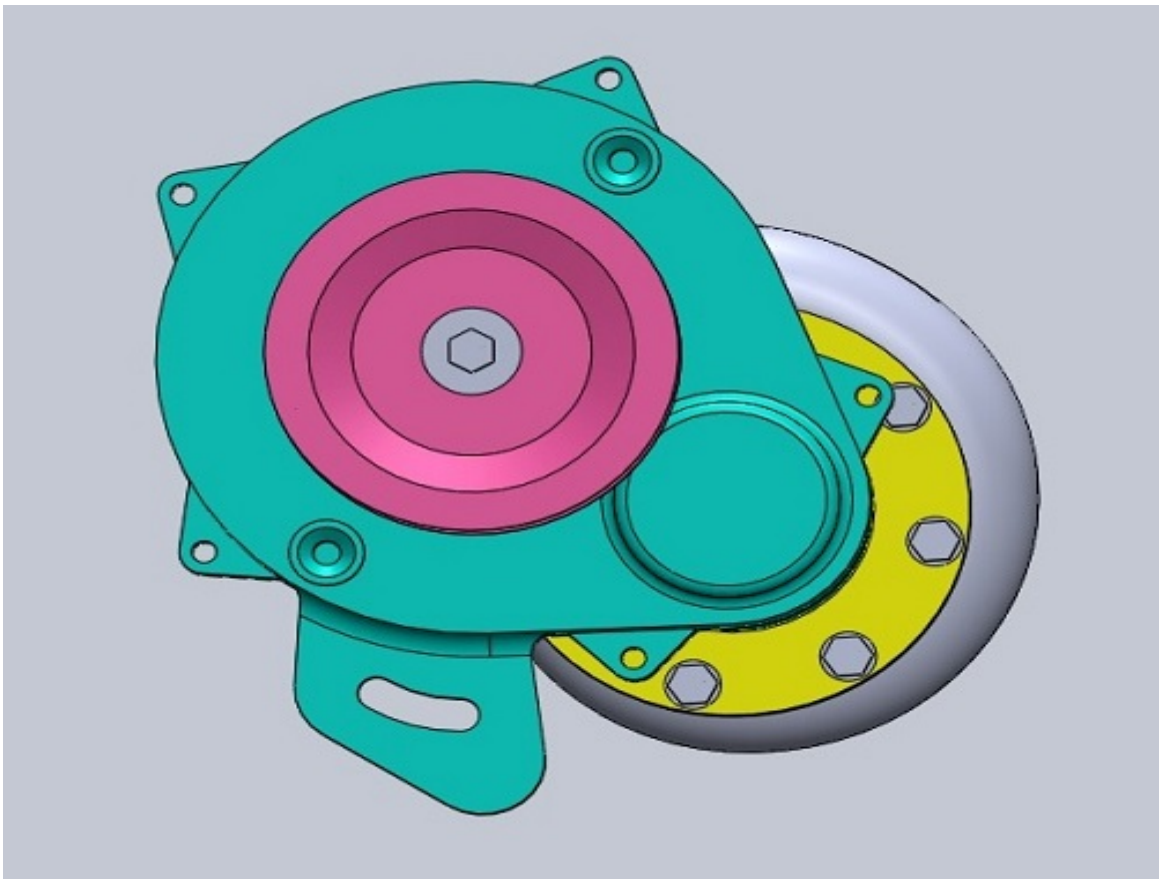
Δεδομένου ότι ο μηχανισμός έχει κατασκευαστεί για να μπορεί να περιστραφεί η πτερωτή σε υψηλό αριθμό περιστροφών, ενδεχομένως να παρουσιαστούν φαινόμενα συντονισμού. Έτσι, για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες συμπεριφορές λόγο αζυγοσταθμίας ή κατασκευαστικών ατελειών, στη μελέτη της κατασκευής αυτής προστέθηκε ένα ακόμα ρουλμάν. Έτσι ακόμα και να υπάρξει θραύση του άξονα, η πτερωτή δε θα φύγει από τη θέση της με καταστρεπτικά αποτελέσματα για την ίδια και το περιβάλλον της. Στο κέντρο του συνδέσμου διακρίνεται η φωλιά του ρουλμάν.

5.3 Ψηφιακή Συναρμολόγηση του μηχανισμού

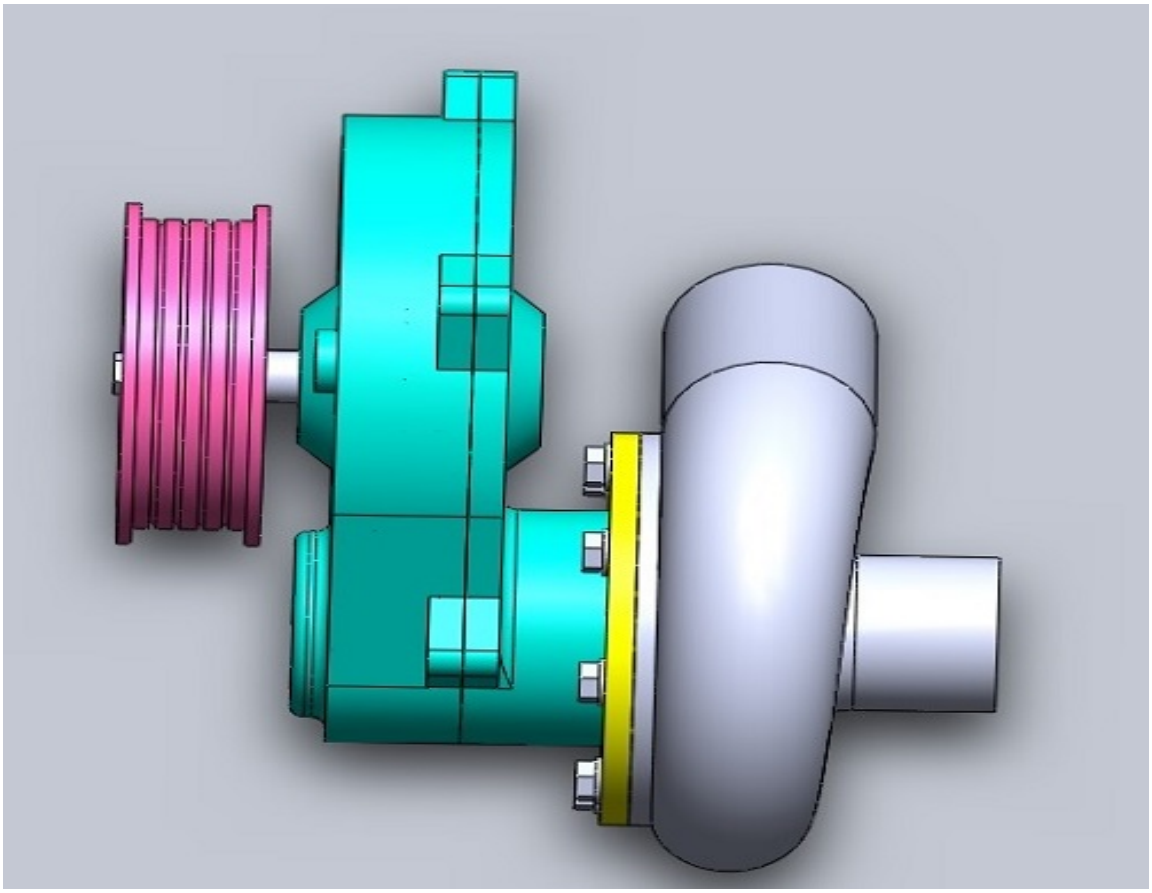
Η συναρμολόγηση των παραπάνω αντικειμένων, εμφανίζεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνες 33 έως 36). Αρχικά υπάρχουν εικόνες όπου δείχνουν τις εξωτερικές όψεις του μηχανισμού που σχεδιάστηκε και στη συνέχεια κατασκευάστηκε. Οι διαφορετικοί χρωματισμοί βοηθούν στη διάκριση των επιμέρους τεμαχίων μεταξύ τους. Έτσι, διακρίνεται ευκολότερα ποιο τεμάχιο συνδέεται με ποιο, πού εδράζεται και με ποιο συνεργάζεται. Δεδομένου όμως ότι υπάρχουν και τεμάχια που είναι στο εσωτερικό του μηχανισμού, ακολουθούν και εικόνες 37 έως 40 με διάφανη τρισδιάστατη απεικόνισή του. Σε αυτές γίνεται εμφανής η ακριβής θέση του κάθε εξαρτήματος. Δίνεται η δυνατότητα εμφανίζονται τα εσωτερικά γρανάζια, οι άξονες, οι βίδες-κοχλίες και τα ρουλμάν.



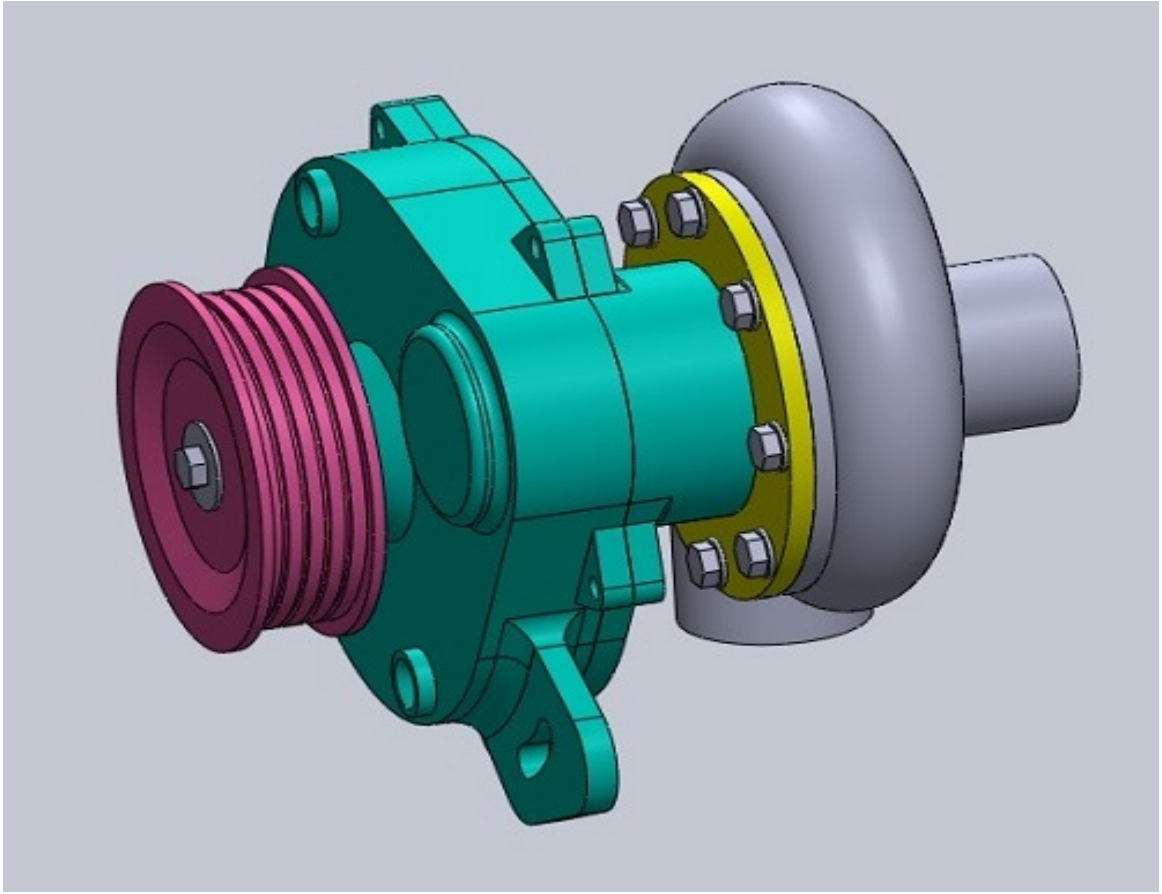
Εικόνα 33: Πρόσοψη



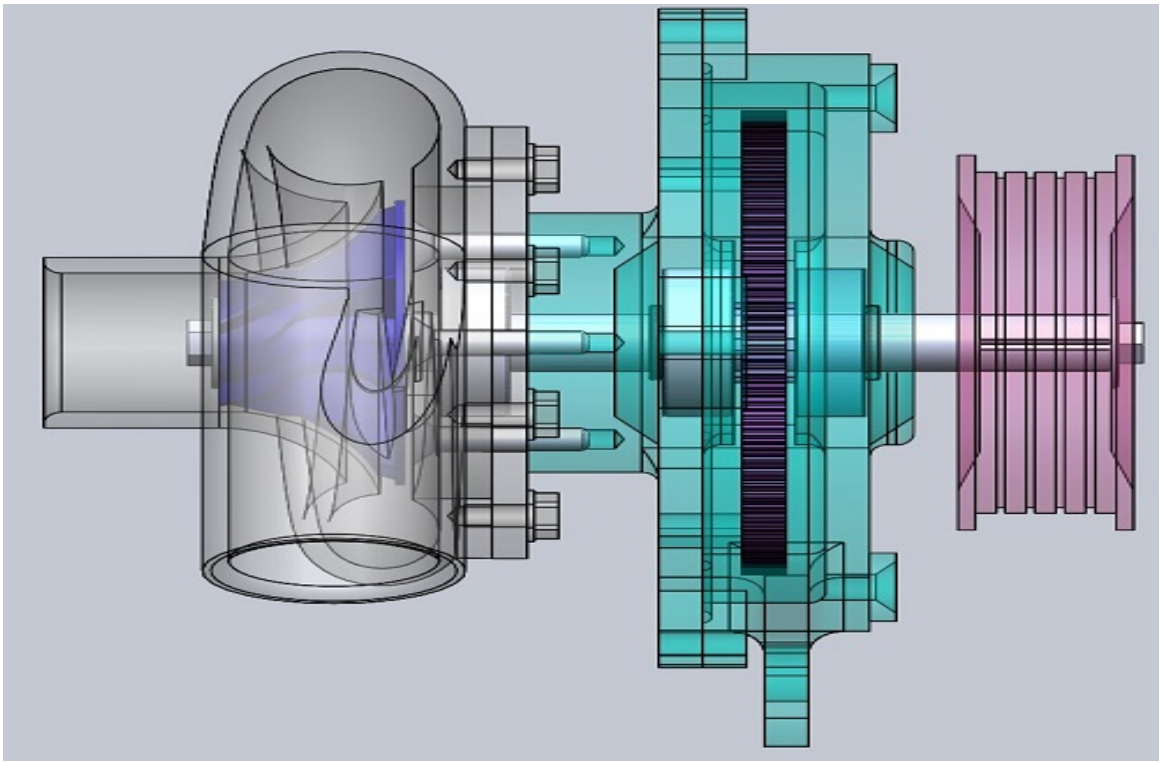
Εικόνα 34: Πίσω Όψη



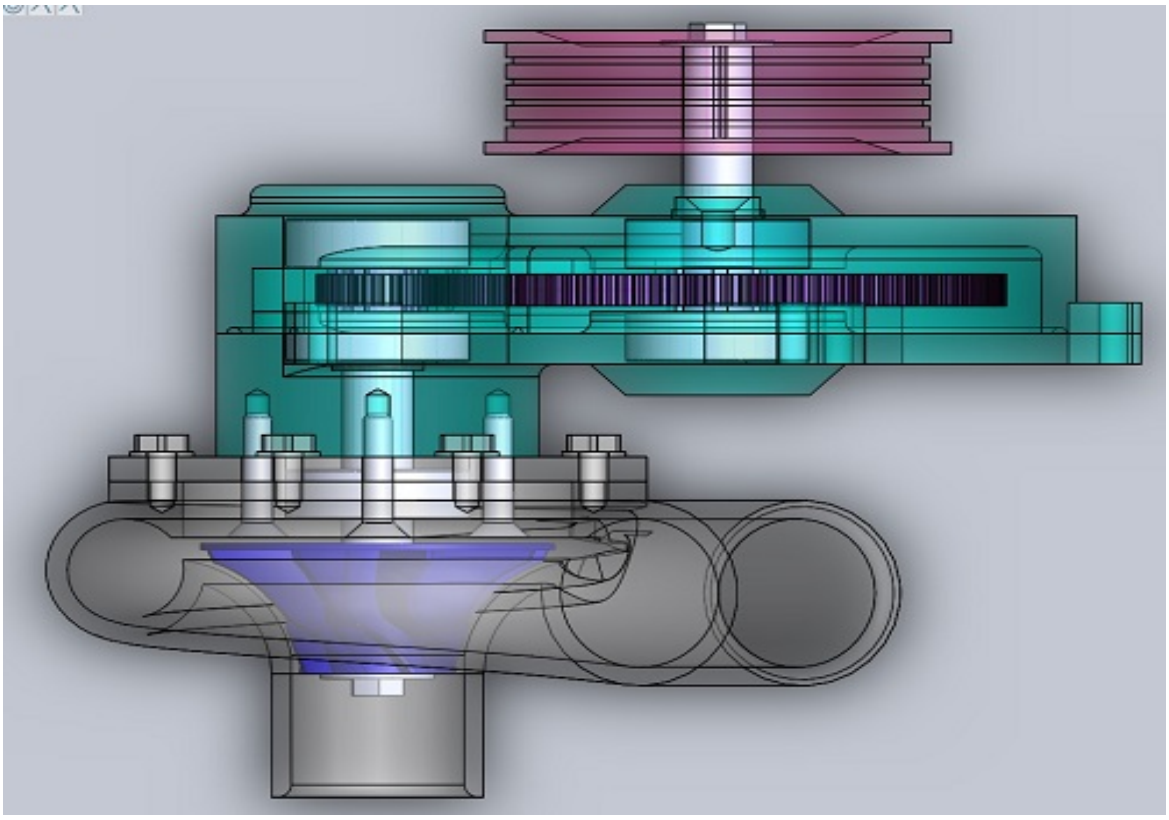
Εικόνα 35: Πλάγια Όψη



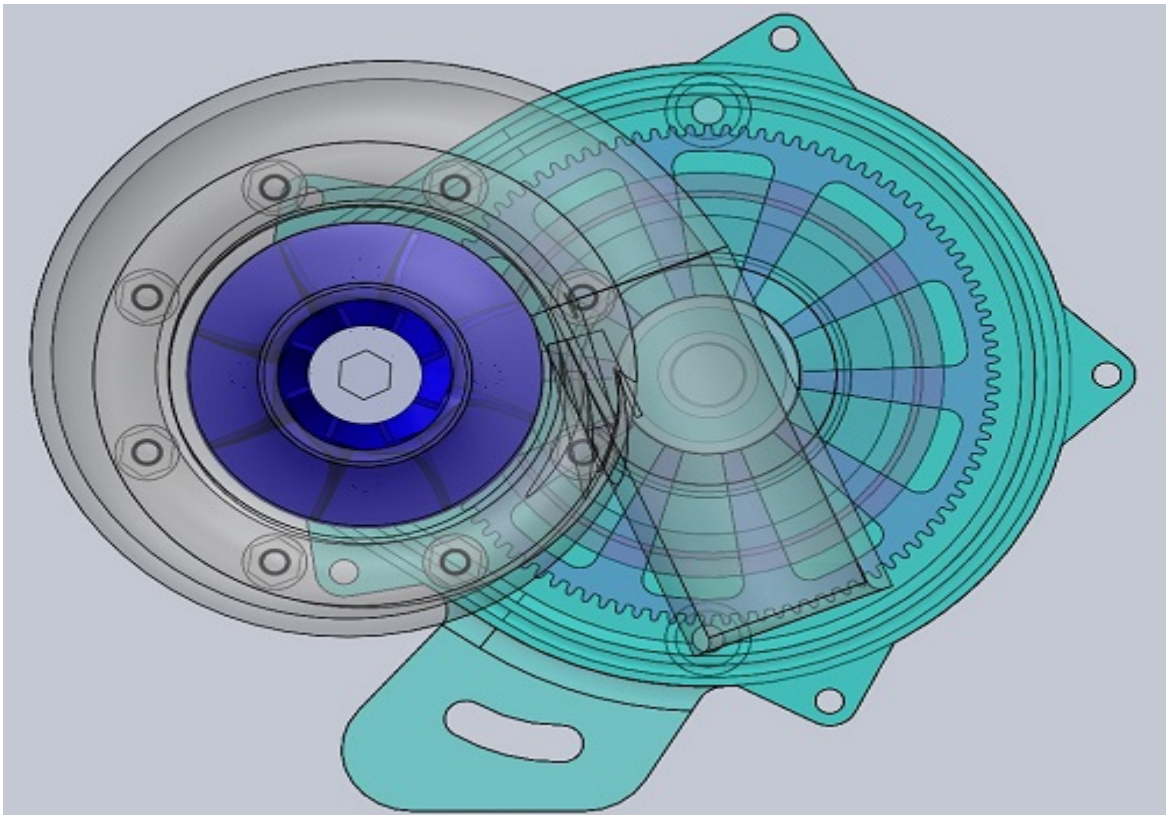
Εικόνα 36: Τρισδιάστατη ισομετρική απεικόνιση



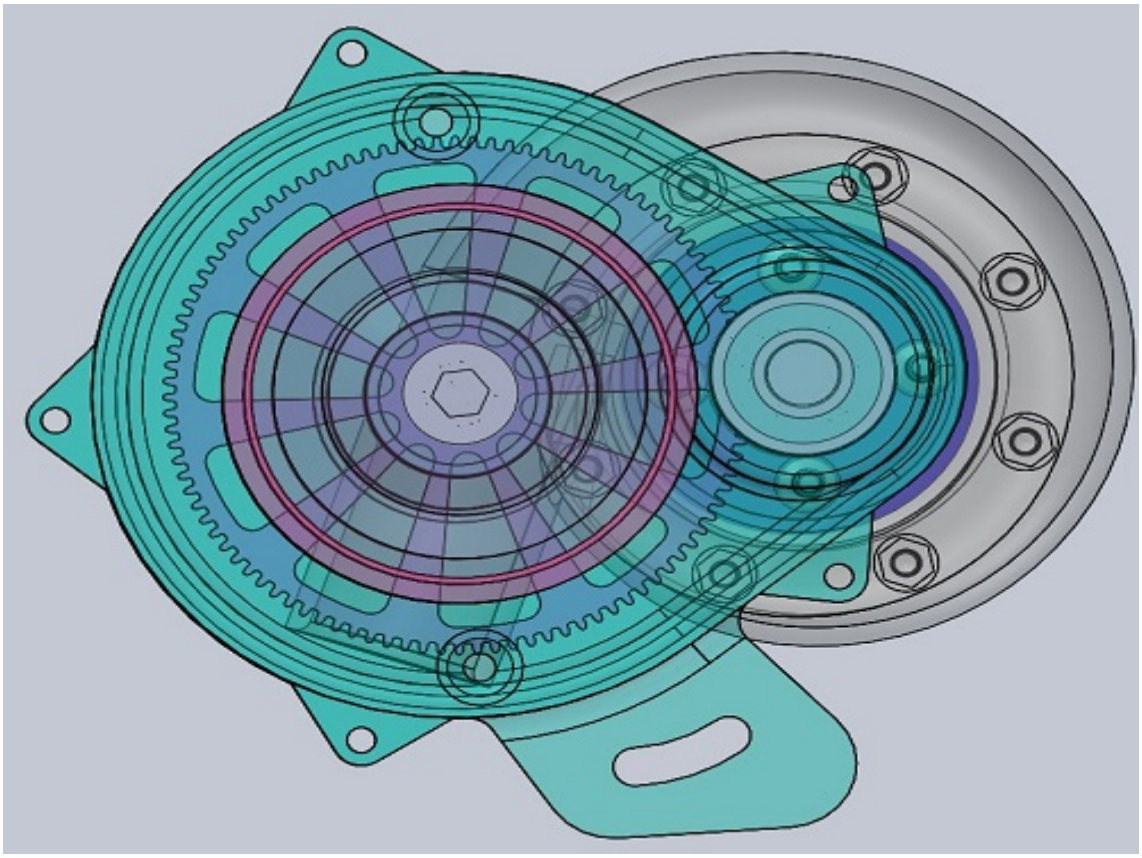
Εικόνα 37: Τρισδιάστατη διάφανη πάνω όψη συνεργαζόμενων εξαρτημάτων.



Εικόνα 38: Τρισδιάστατη διάφανη κάτω όψη συνεργαζόμενων εξαρτημάτων



Εικόνα 39: Τρισδιάστατη διάφανη πρόσοψη συνεργαζόμενων εξαρτημάτων



Εικόνα 40: Τρισδιάστατη διάφανη πίσω όψη συνεργαζόμενων εξαρτημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Κατασκευή και συναρμολόγηση του μηχανισμού

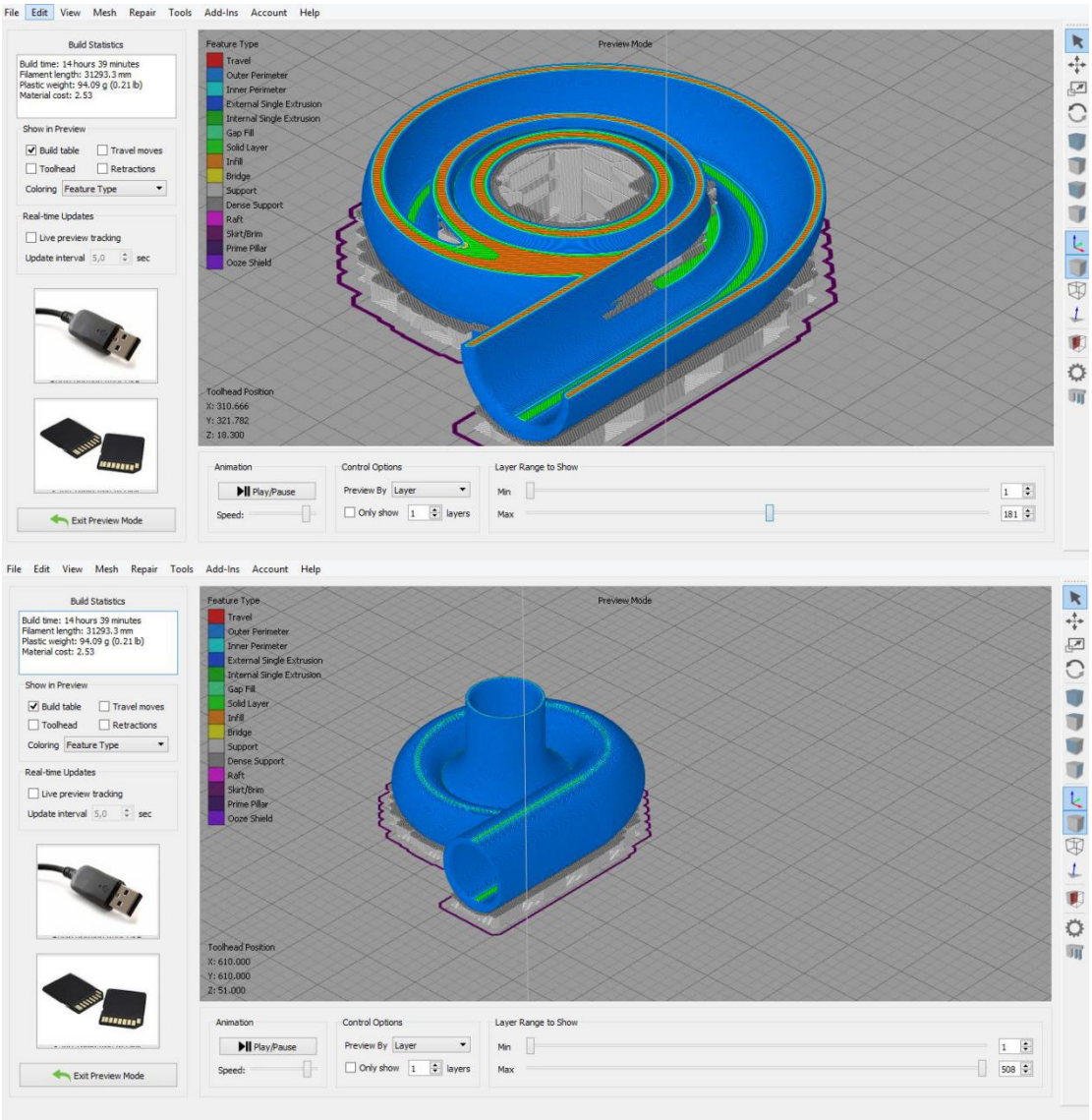
6.1 Περιβάλλον εκτύπωσης

6.1.1 Περιβάλλον εκτύπωσης εξώθησης νήματος

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 41 έως 49) παρουσιάζονται μεμονωμένα τα τεμάχια σε δυο φάσεις ανά δυο εικόνες. Η μία φάση είναι κατά την διάρκεια της εκτύπωσης ώστε να φανεί σε τομή και η επόμενη σαν τελειωμένο προϊόν. Η πρώτη φάση είναι η πάνω εικόνα από κάθε ζεύγος εικόνων και η κάτω το εκτυπωμένο τεμάχιο.

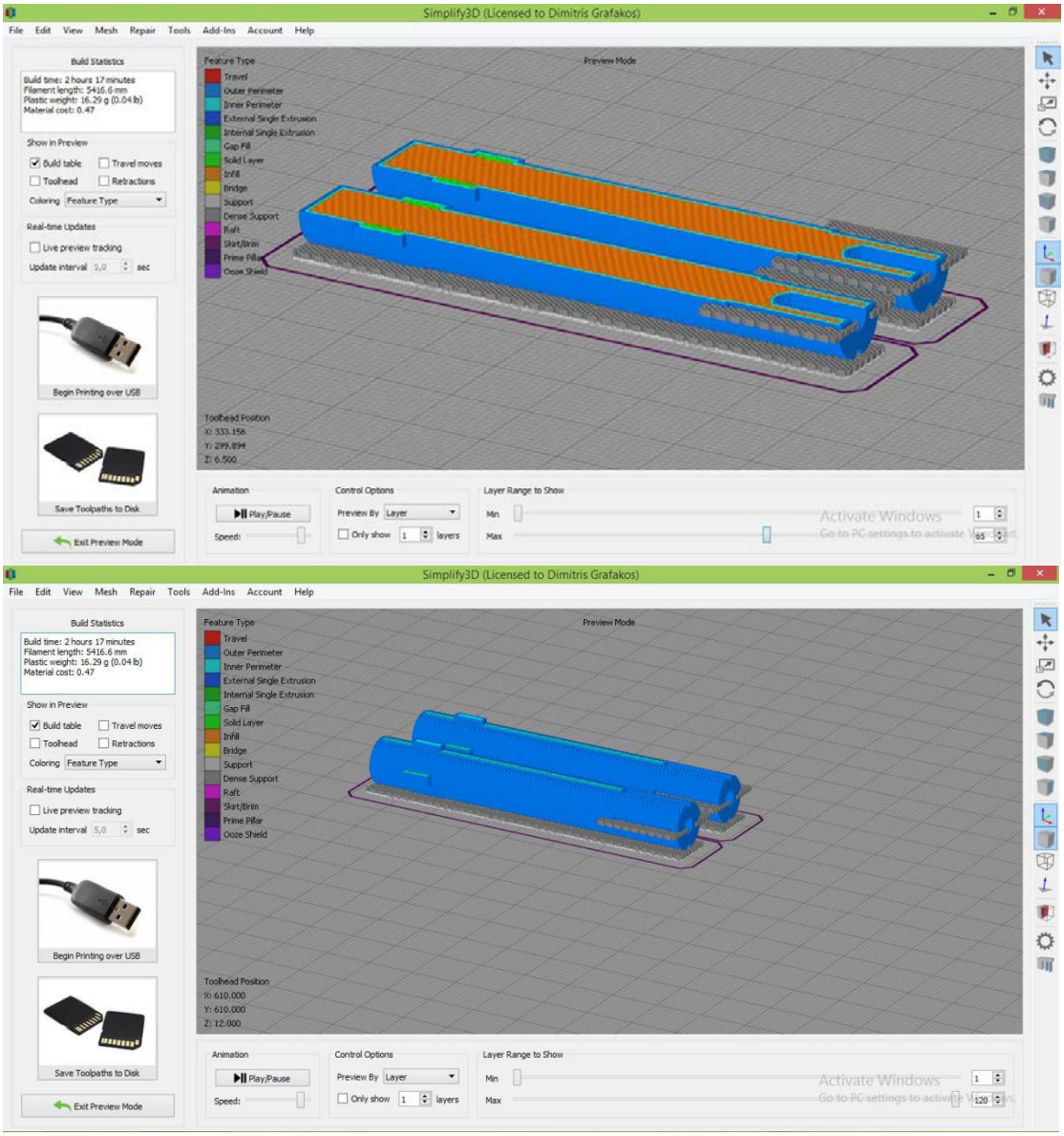
Αριστερά αναγράφεται ανά τεμάχιο ο χρόνος εκτύπωσης (Build time), το μήκος του νήματος που δαπανήθηκε (Filament length) και το τελικό βάρος του τεμαχίου (Plastic weight). Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, το υποστηρικτικό υλικό είναι το ίδιο με αυτό του τεμαχίου, άρα δεν υπάρχει ακριβής αναλογία μεταξύ του συνολικού υλικού που καταναλώθηκε και του εκτυπώσιμου τεμαχίου. Τέλος διακρίνεται ότι το κάθε τεμάχιο έχει διαφορετικά χρώματα σε κάθε φάσης της εκτύπωσης όπως φαίνονται στην παραπάνω Εικόνα 17 και Πίνακα 4. [B9,A3]

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα τεμάχια πως έχουν δοθεί ως σχέδια στο πρόγραμμα του εκτυπωτή με συγκεκριμένο προσανατολισμό στην τράπεζα εκτύπωσης. Ο προσανατολισμός αυτός που επιλέχτηκε θεωρήθηκε ο βέλτιστος ανά εκτυπωμένο τεμάχιο για αυτή την κατασκευή. Ο προσανατολισμός αυτός μπορεί να μεταβληθεί μέσο του προγράμματος και η εκτύπωση να γίνει υπό άλλες γωνίες αλλάζοντας τα επίπεδα εκτύπωσης ανά τεμάχιο. Αυξάνοντας όμως έτσι τον κίνδυνο κατασκευαστικών ατελειών, αστοχίας εκτυπωμένου τεμαχίου ή ακόμα και σημαντική αύξηση της χρήσης νήματος ως υποστηρικτικό υλικό.



Εικόνα 41: Κέλυφος πτερωτής (Compressor House)

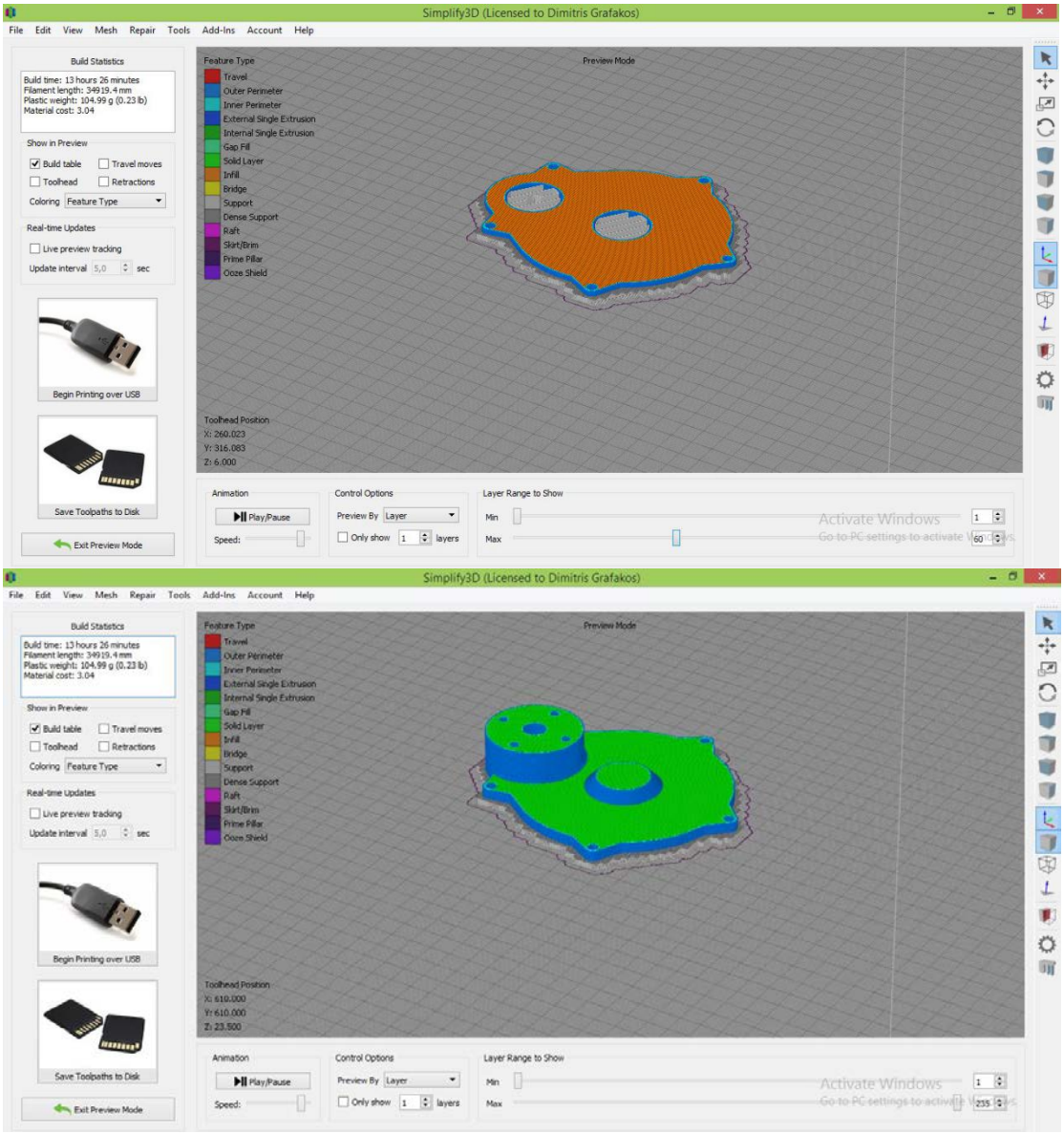
- Material: PETG Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 235°C
- Build time: 14 hours &39 minutes
- Filament length: 3129.3mm
- Plastic weight: 94,09 gr



Εικόνα 42: Άξονες κίνησης (2xAxle)

- Material: PETG Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 235°C

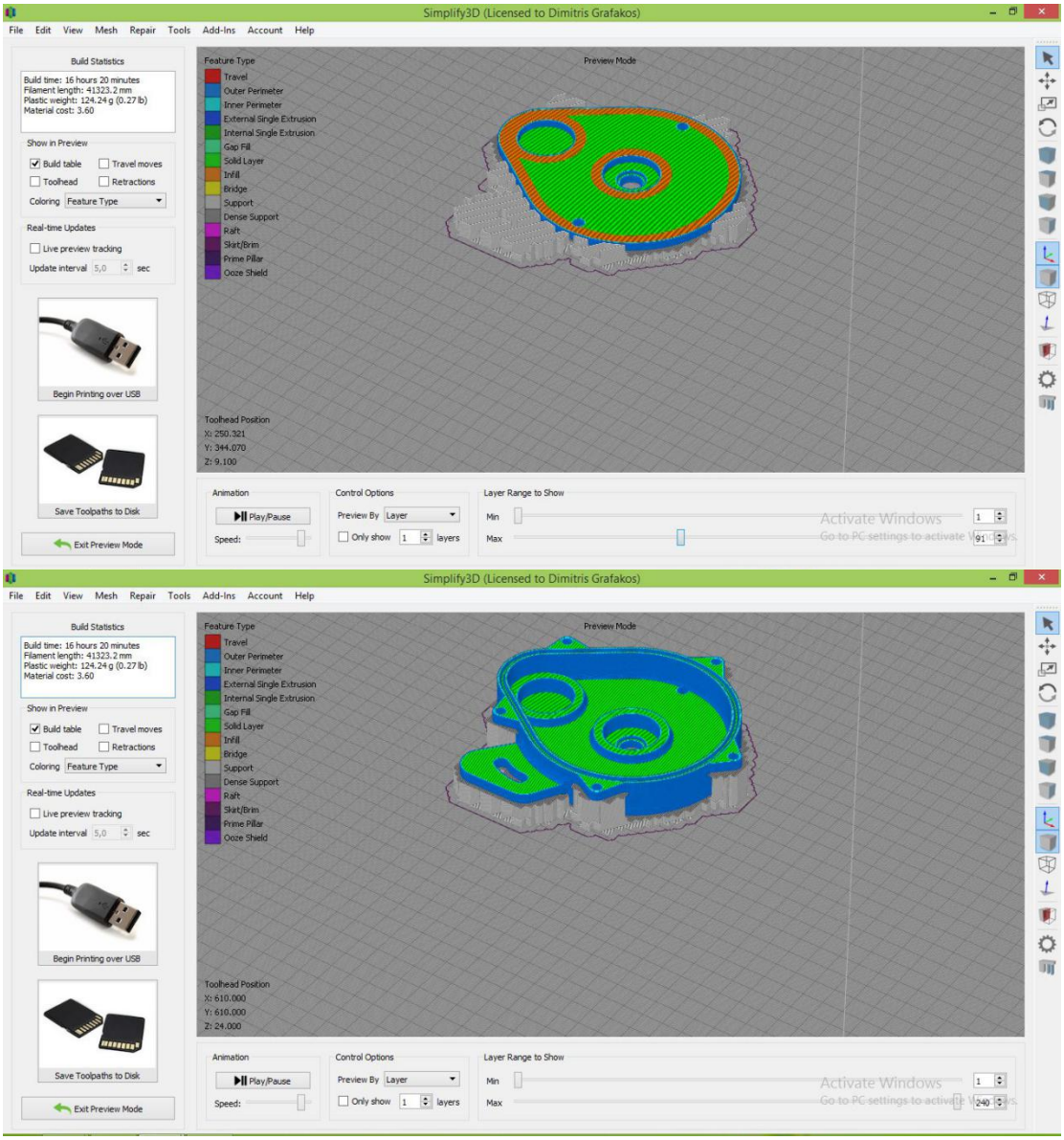
- Build time: 2 hours &17 minutes
- Filament length: 5416,6 mm
- Plastic weight: 94.09 gr



Εικόνα 43: Καπάκι κελύφους γραναζιών (Case Cover)

- Material: PETG Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 235 ^{o}C

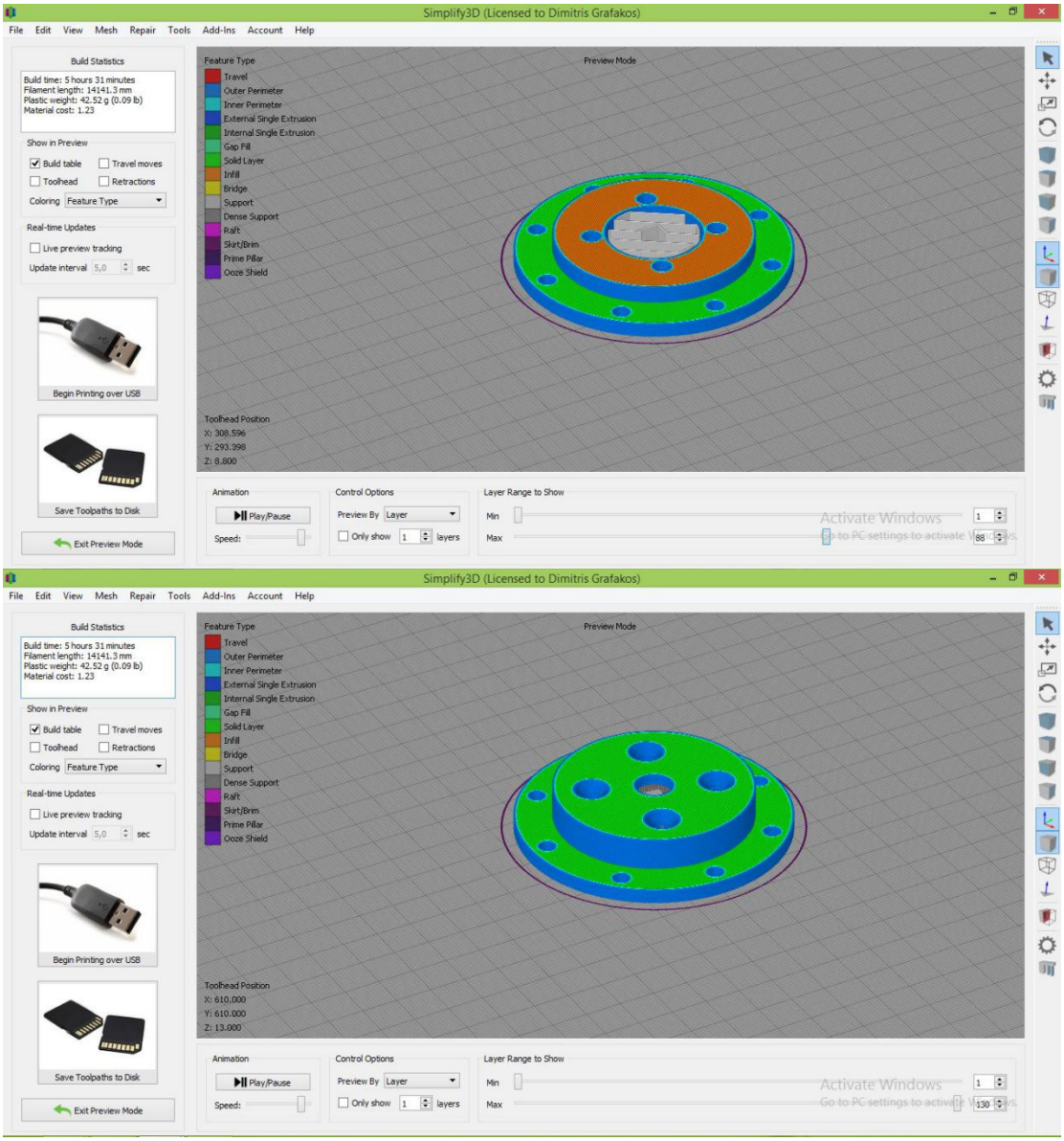
- Build time: 13 hours &26 minutes
- Filament length: 34919.4 mm
- Plastic weight: 104,99 gr



Εικόνα 44: Θήκη γραναζιών (Case)

- Material: PETG Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 235 ^{o}C

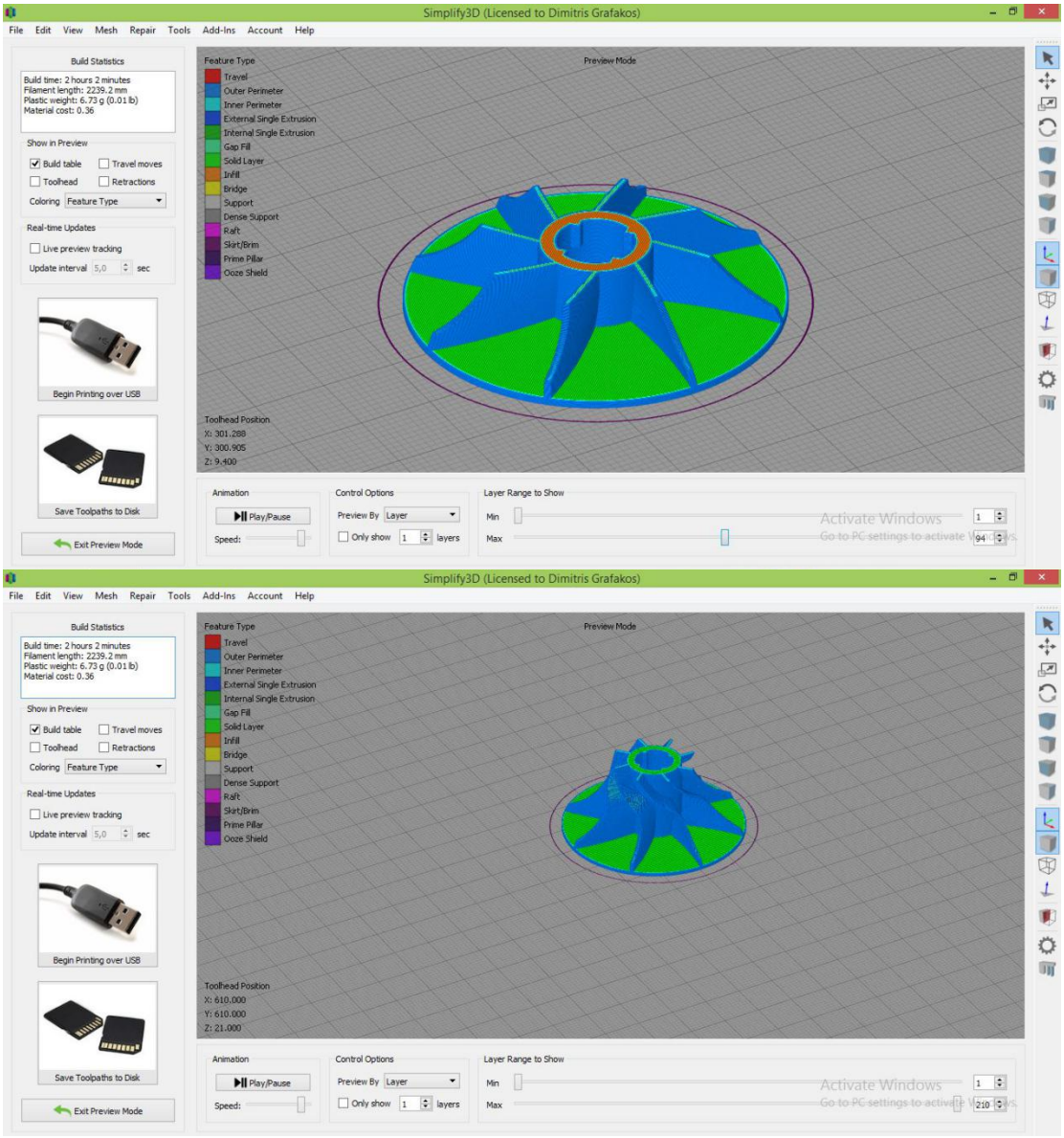
- Build time: 16hours & 20 minutes
- Filament length: 41323.2 mm
- Plastic weight: 124.24 gr



Εικόνα 45: Σύνδεσμος κελύφους και συμπιεστή αέρα (Compressor Base)

- Material: PETG Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 235 ^{o}C

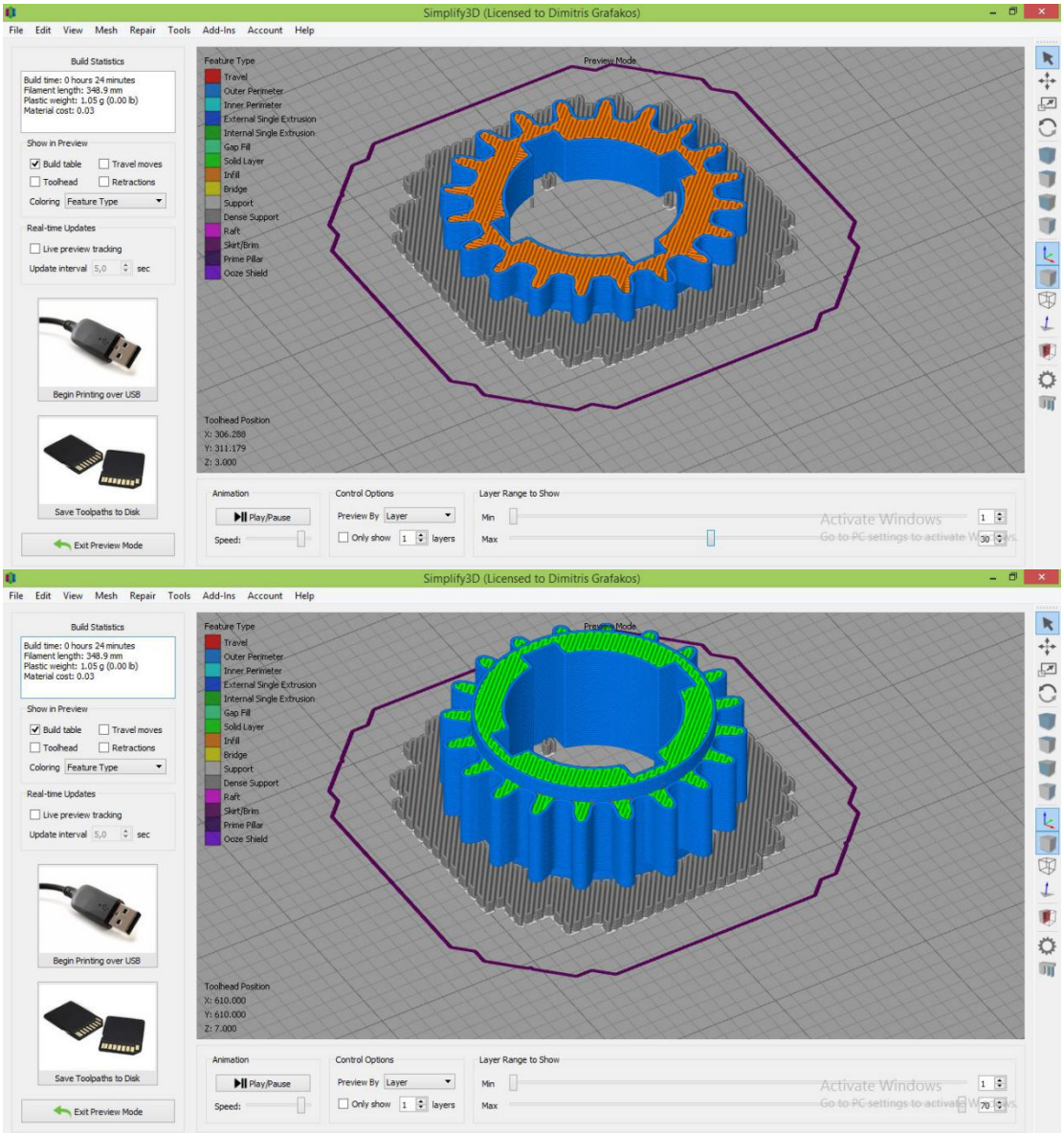
- Build time: 5 hours &31 minutes
- Filament length: 14141.3 mm
- Plastic weight: 425.2 mm gr



Εικόνα 46: Πτερωτή (Compressor Impeller)

- Material: CARBON FIBER Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7 Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 200 ^{o}C

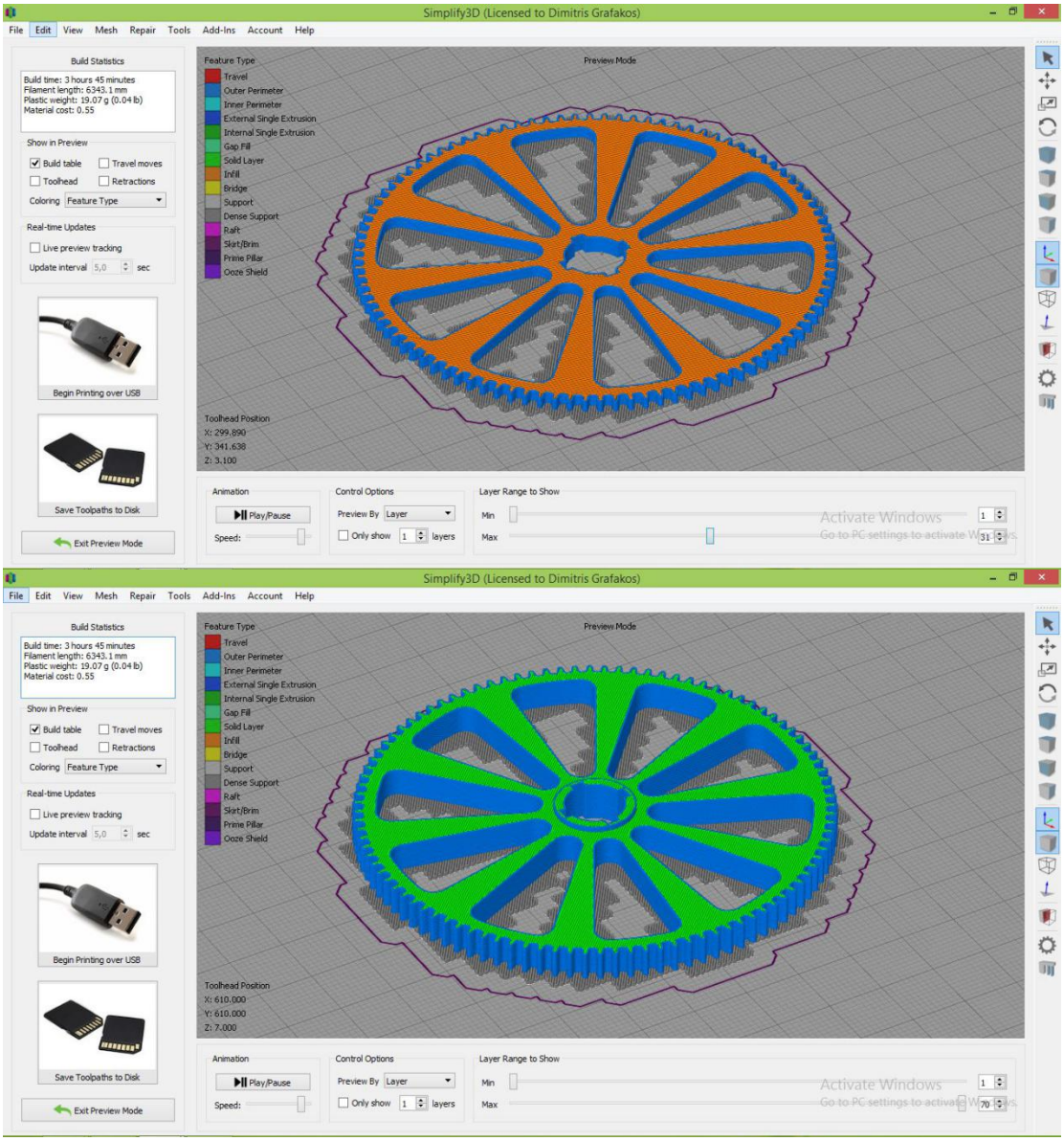
- Build time: 2 hours &20 minutes
- Filament length: 2239,2 mm
- Plastic weight: 6,73 gr



Εικόνα 47: Γρανάζι κίνησης πτερωτής(δευτερεύον-συνεργαζόμενο) (Idle Gear (2nd))

- Material: PETG Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7 Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 235 ^{o}C

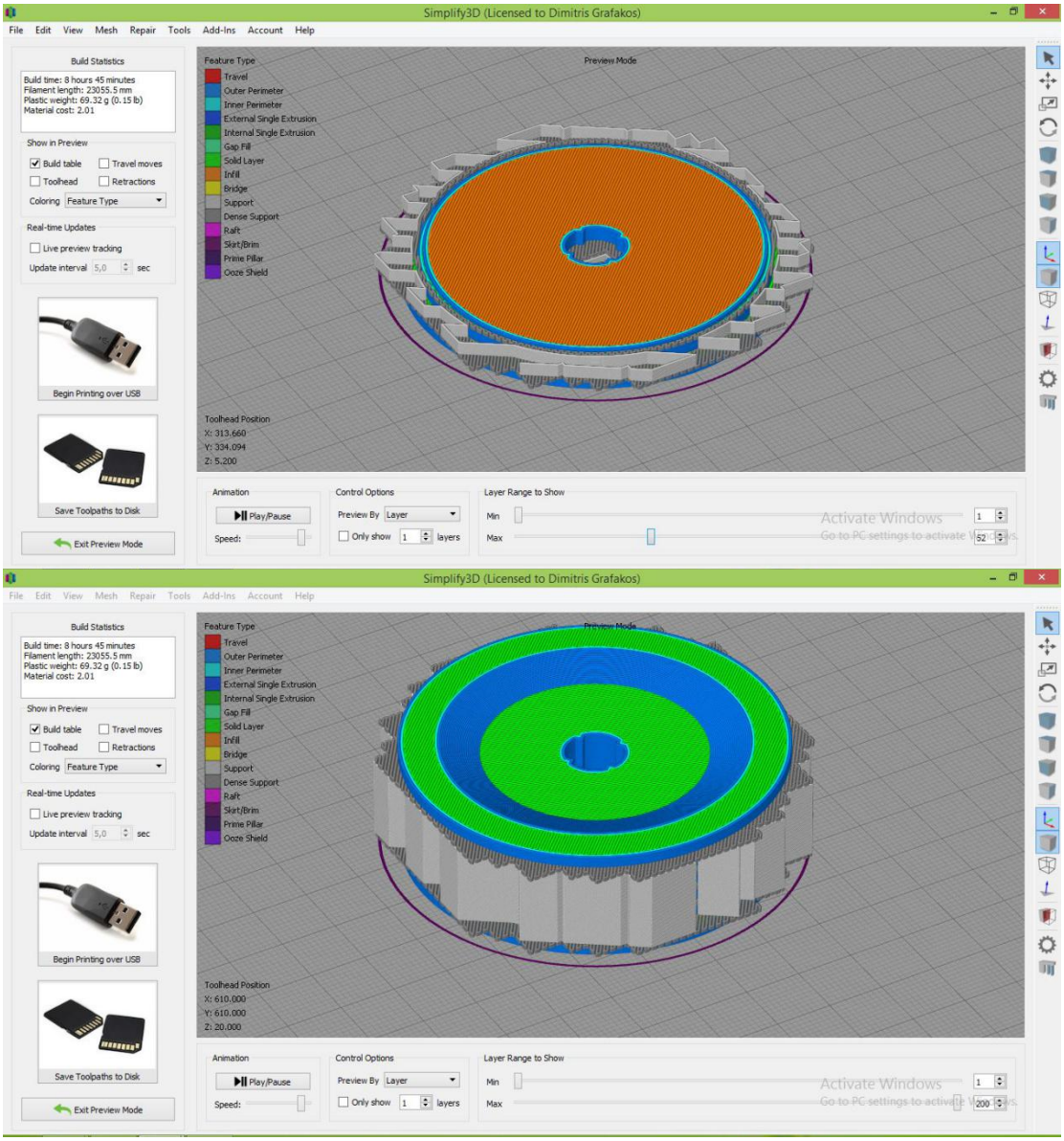
- Build time:0 hours & 24 minutes
- Filament length: 348.9 mm
- Plastic weight: 1.05 gr



Εικόνα 48: Γρανάζι κίνησης τροχαλίας(πρωτεύον-πινιόν) (Power Gear (1st))

- Material: PETG Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7 Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 235 ^{o}C

- Build time: 3 hours &45 minutes
- Filament length: 6343.1 mm
- Plastic weight: 19.07 gr



Εικόνα 49: Τροχαλία (Pulley)

- Material: PETG Transparent
- Infill: 100%
- Support: 5% / Dense Support: 7 Layers - 85%
- Printing Speed: 40mm/s
- Layer Height: 0.100mm
- Temperature: 235 ^{o}C

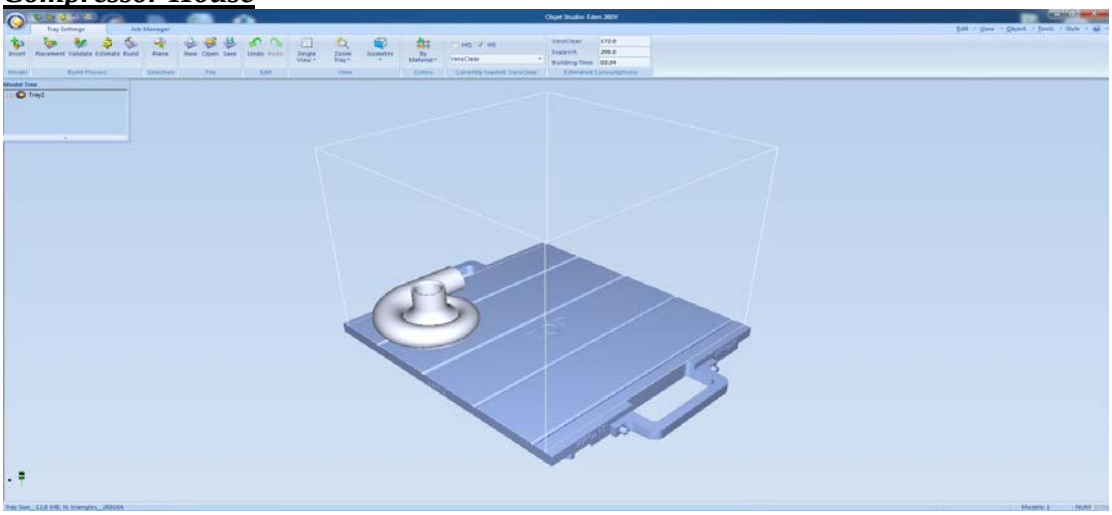
- Build time: 8 hours & 45 minutes
- Filament length: 23055.5 mm
- Plastic weight: 69.32 gr

6.1.2 Περιβάλλον εκτύπωσης πολλαπλής εξώθησης υλικού

Στις παρακάτω εικόνες 50 έως 60 παρουσιάζονται μεμονωμένα τα τεμάχια σαν τελειωμένο προϊόν. Στην πάνω πλευρά της οθόνης, στο κέντρο, αναγράφεται ανά τεμάχιο ένας εκτιμώμενος χρόνος εκτύπωσης (Build time), το βάρος του επιλεγμένου υλικού που δαπανήθηκε για την κατασκευή (Vero Clear) και το βάρος του υποστηρικτικού υλικού (Support) που απαιτήθηκε για την ορθή εκτύπωση. Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, το υποστηρικτικό υλικό είναι διαφορετικό από αυτό του τεμαχίου. Ο όγκος του τελικού τεμαχίου είναι δεδομένος από τα σχέδια. Η απαίτηση όμως υποστηρικτικού υλικού μπορεί να αλλάξει, αν αλλάξει, ο γεωμετρικός προσανατολισμός του τεμαχίου προς εκτύπωση. Έτσι λοιπόν μπορεί να αλλάξει και ο χρόνος εκτύπωσης.

Οι εικόνες 50 έως 58 παρουσιάζουν το κάθε τεμάχιο μόνο του στην τράπεζα εκτύπωσης και είναι εμφανές ότι δεν αξιοποιείται όλη την επιφάνια της. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνουμε τις πληροφορίες μεμονωμένων τεμαχίων, αλλά αυξάνεται ο νεκρός χρόνος μεταξύ δυο εκτυπώσεων. Στις εικόνες 59 και 60 έχουν τοποθετηθεί όλα τα τεμάχια και το όφελος εδώ είναι ότι οι εκτυπώσεις είναι δυο και εκμηδενίζονται οι νεκροί χρόνοι από εκτύπωση σε εκτύπωση. Ως νεκρός χρόνος ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται από μια εκτύπωση στην επόμενη όπου περιλαμβάνει το σταμάτημα της μηχανής, την αφαίρεση του εκτυπωμένου τεμαχίου, τον καθαρισμό της τράπεζας και της κεφαλής και την εντολή νέας εκτύπωσης μέσο προγράμματος μόλις κλείσει πάλι το καπάκι της μηχανής. Σημαντικό είναι η εκτύπωση να μπορεί να λάβει χώρα εντός του εργασιακού καθιερωμένου οχταώρους ώστε να μην υπάρξει ανάγκη για δεύτερο χειριστή, όπως επίσης να μην απασχολείται με ένα μόνο μηχάνημα.

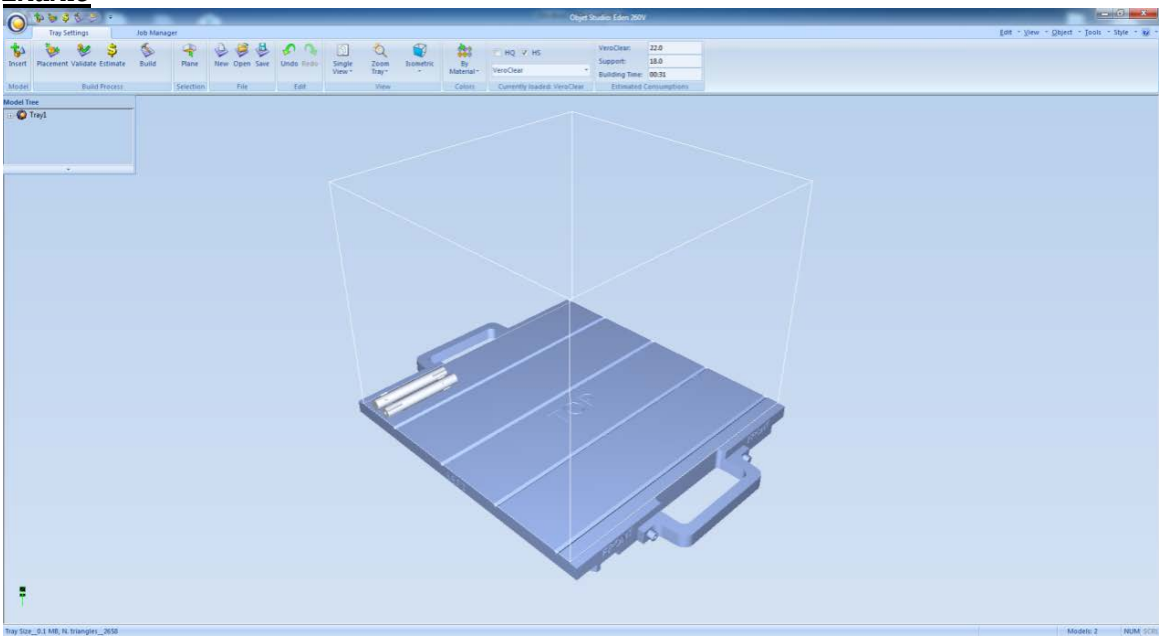
Compressor House



Εικόνα 50: Κέλυφος Πτερωτής

- Vero clear: 172 gr
- Support: 208 gr
- Building time: 3:34 hours

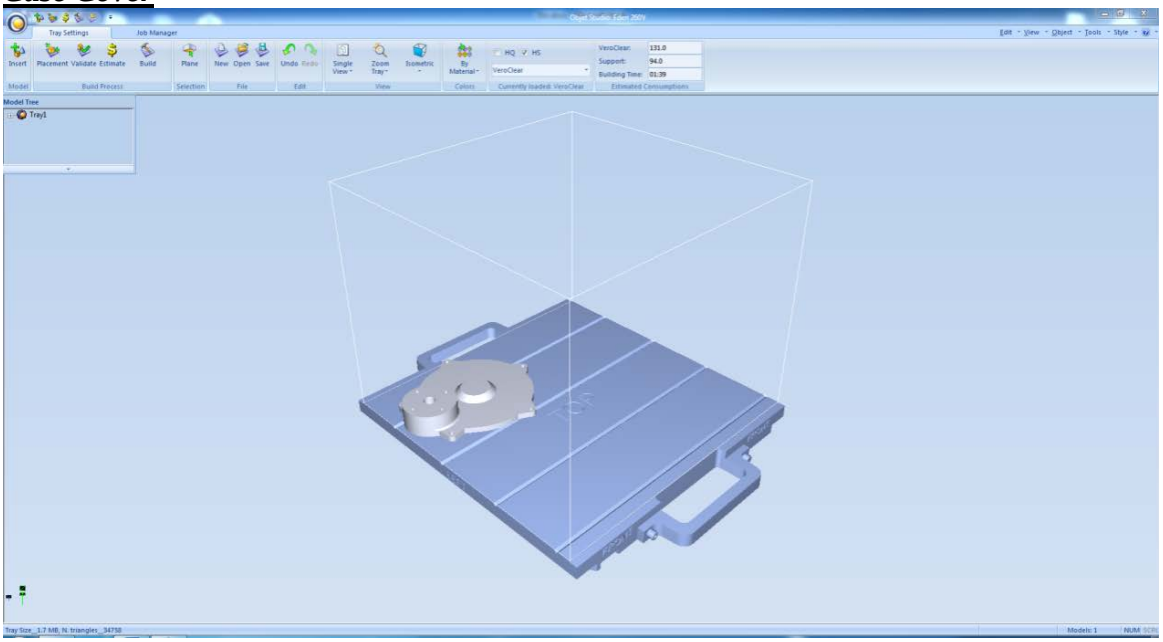
2xaxle



Εικόνα 51: Άξονες

- Vero clear: 22gr
- Support: 18gr
- Building time: 0:31 hours

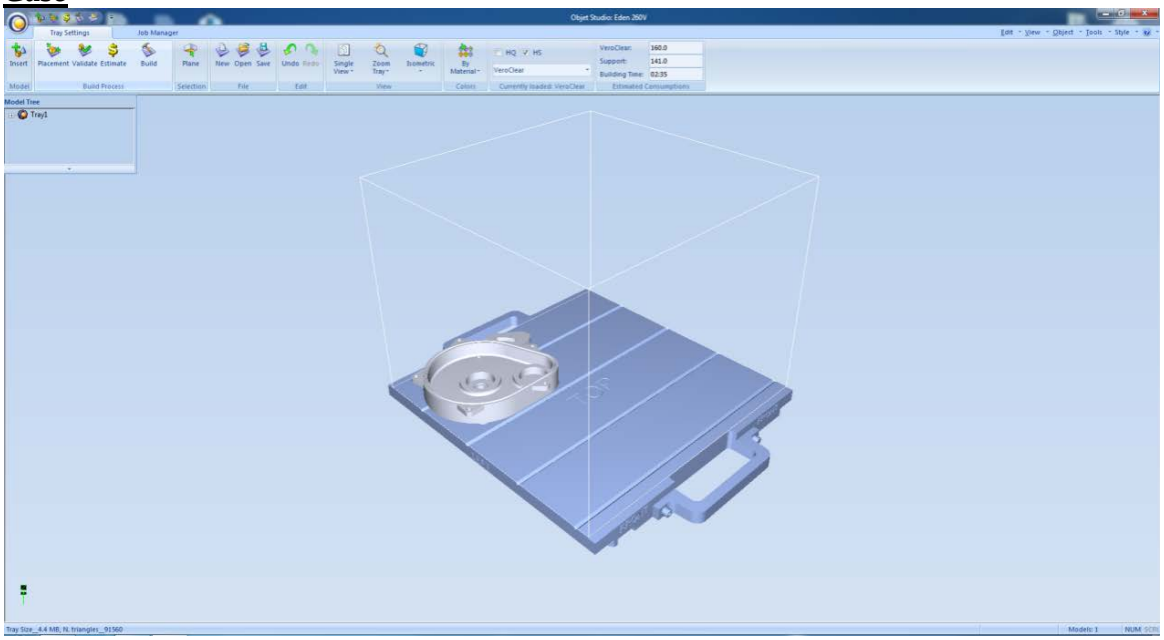
Case Cover



Εικόνα 52: Καπάκι Κελύφους

- Vero clear: 131gr
- Support: 94gr
- Building time: 1:39 hours

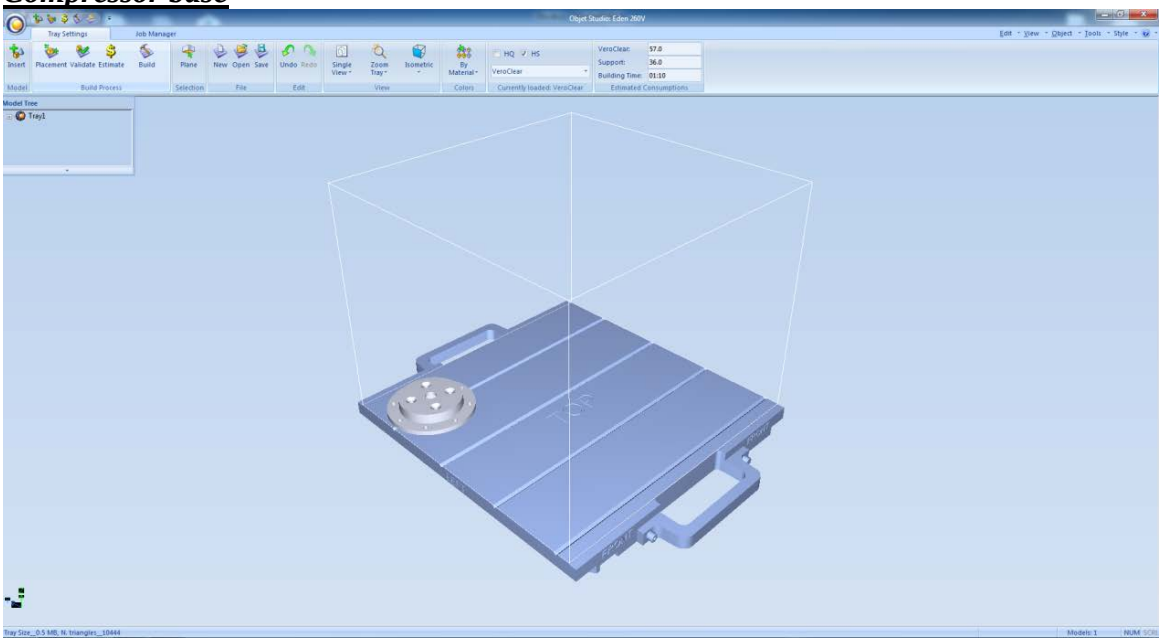
Case



Εικόνα 53: Θήκη

- Vero clear: 160gr
- Support: 141gr
- Building time: 2:35 hours

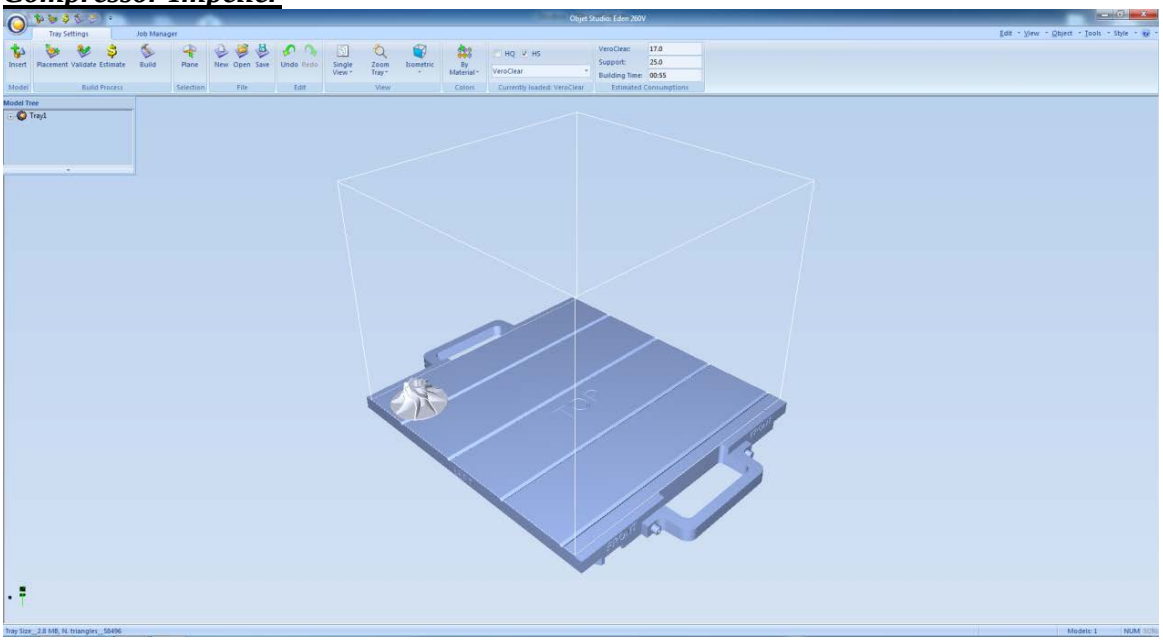
Compressor base



Εικόνα 54: Βάση Κελύφους

- Vero clear: 57gr
- Support: 36gr
- Building time: 1:10 hours

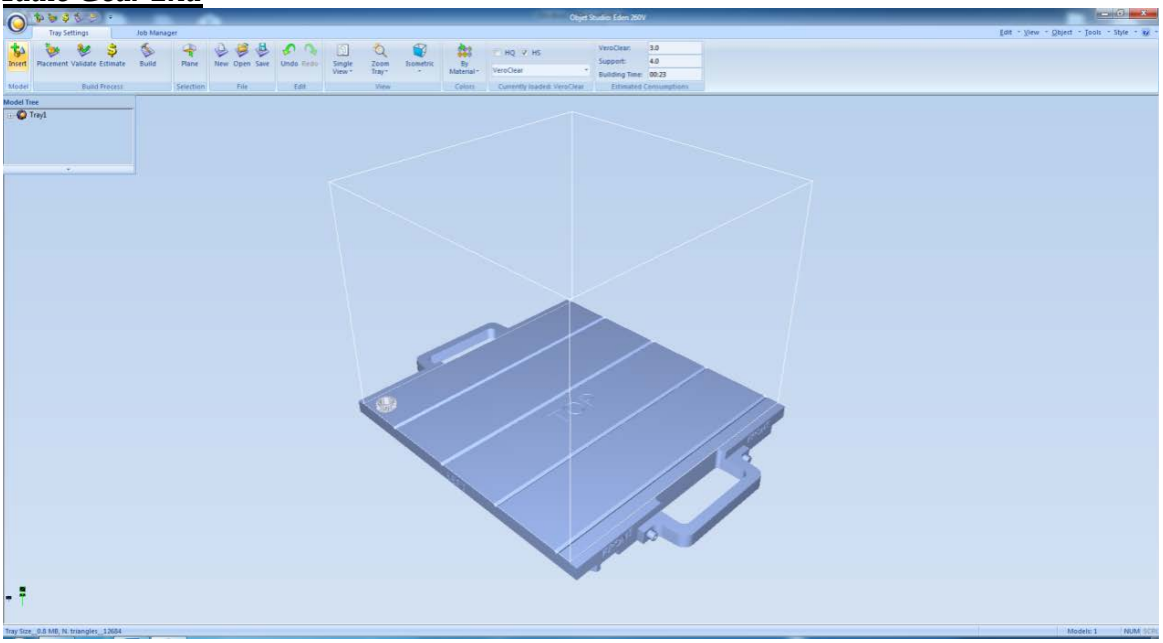
Compressor Impeller



Εικόνα 55: Πτερωτή

- Vero clear: 17gr
- Support: 25gr
- Building time: 0:55 hours

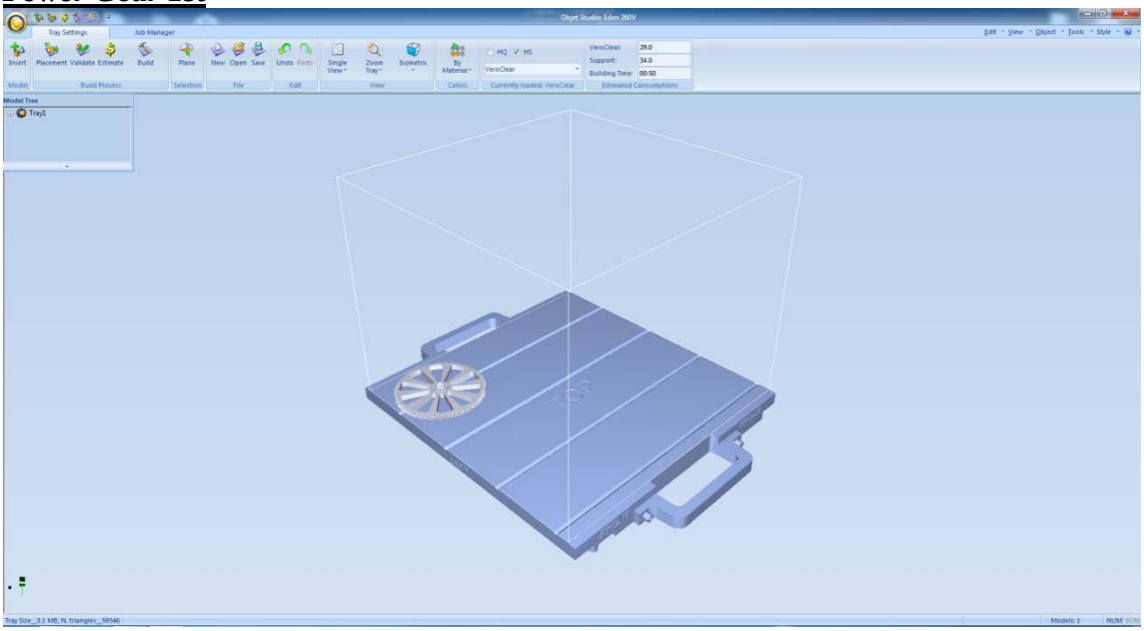
Iddle Gear 2nd



Εικόνα 56: Δευτερεύον Γρανάζι (Συνεργαζόμενο)

- Vero clear: 3gr
- Support: 4gr
- Building time: 0:23 hours

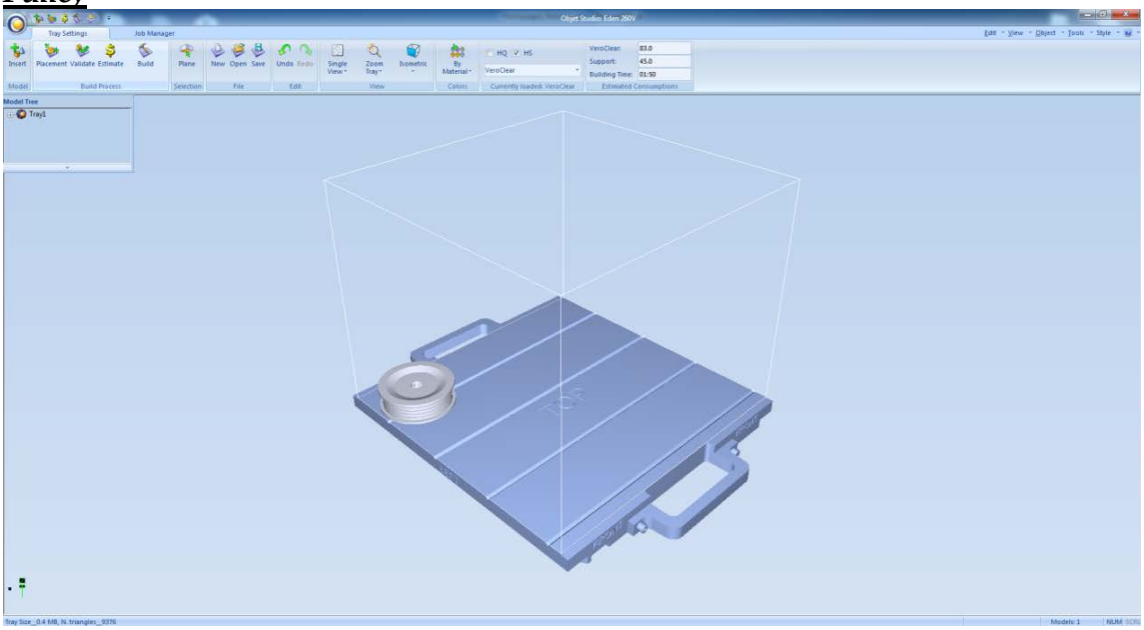
Power Gear 1st



Εικόνα 57: Πρωτεύον Γρανάζι (Πινιόν)

- Vero clear: 29gr
- Support: 34gr
- Building time: 0:50 hours

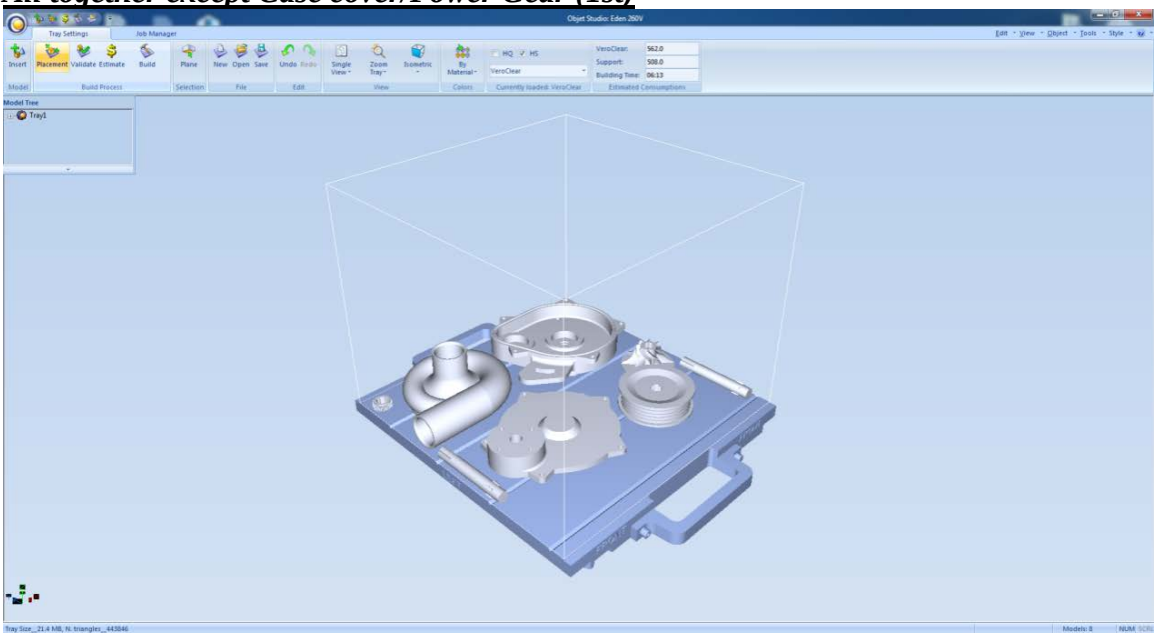
Pulley



Εικόνα 58: Τροχαλία

- Vero clear: 83gr
- Support: 45gr
- Building time: 1:45 hours

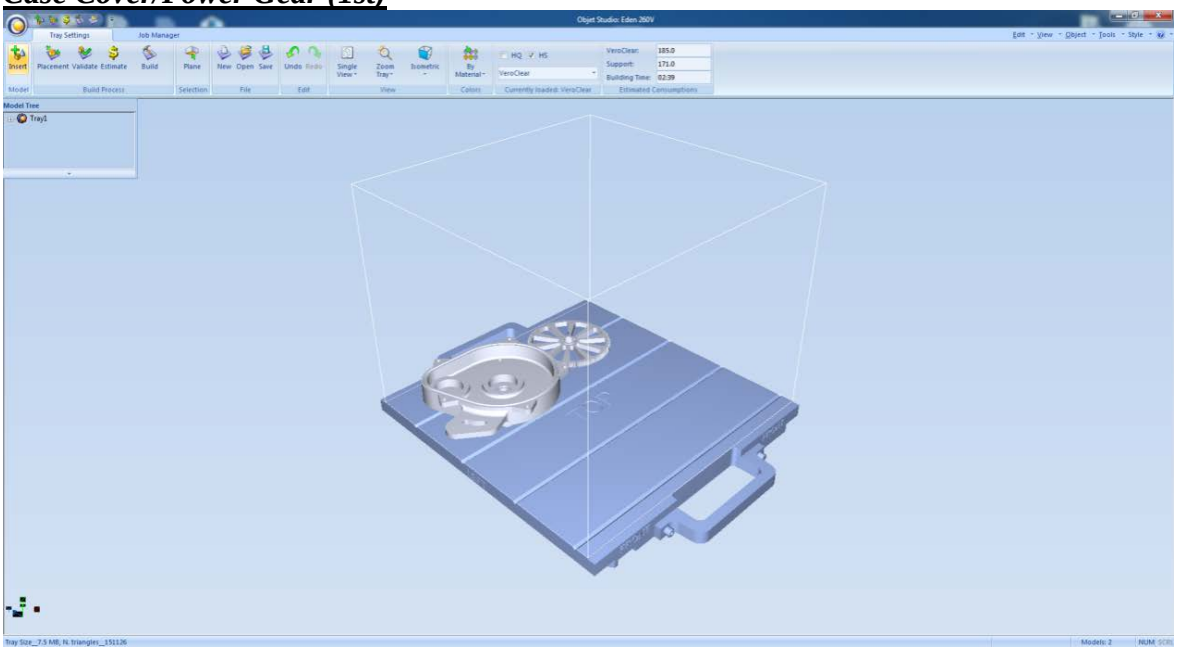
All together except Case cover/Power Gear (1st)



Εικόνα 59: Όλα τα εξαρτήματα σε μια εκτύπωση

- Vero clear: 562gr
- Support: 508gr
- Building time: 6:13 hours

Case Cover/Power Gear (1st)

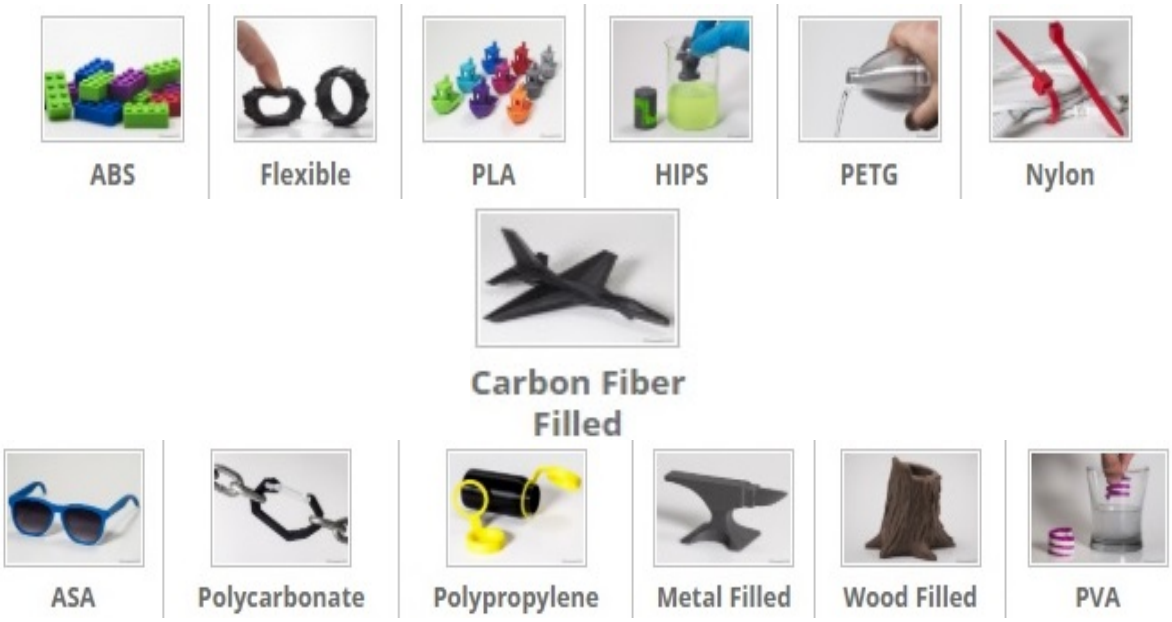


Εικόνα 60: Η θήκη και το πρωτεύον γρανάζι σε δεύτερη εκτύπωση

- Vero clear: 185gr
- Support: 171gr
- Building time: 2:39 hours

6.2 Οικονομοτεχνική μελέτη κατασκευής του μηχανισμού με 3Δ εκτύπωση

Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται δεκατρία υλικά που διατίθενται στο εμπόριο και τις ονομασίες τους, τα οποία θεωρήθηκαν υποψήφια για την κατασκευή του μηχανισμού.



Εικόνα 61: Υλικά που διατίθενται στο εμπόριο για εκτύπωση με νήμα (Πηγή: [B1])

Στις εικόνες 62 και 63 που ακολουθούν υπάρχουν ενδεικτικές τιμές από τις ιδιότητες των υλικών που διατίθενται στο εμπόριο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ο τρόπος που παρουσιάζονται σε αυτούς τους πίνακες δίνει τη δυνατότητα να αντληθούν πληροφορίες και μάλιστα με τρόπο που μπορεί να υπάρξει άμεση σύγκριση τους.

Ultimate strength:	Μέγιστη δύναμη
Stiffness:	Ακαμψία
Durability:	Αντοχή
Maximum service temperature:	Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης
Coefficient of thermal expansion:	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Density:	Πυκνότητα
Price:	Τιμή κιλού
Printability:	Εκτυπωσημότητα
Extruder temperature:	Θερμοκρασία εξώθησης
Bed temperature:	Θερμοκρασία τραπεζιού
Heated bed:	Θερμαινόμενο τραπέζι
Recommended built surfaces	Συνιστώμενες επιφάνειες εναπόθεσης υλικού

Other hardware surfaces:	Λοιπές επιφάνειες
Flexible:	Εύκαμπτο
Elastic:	Ελαστικό
Impact resistant:	Ανθεκτικό σε κρούση
Soft:	Μαλακό
Composite:	Χημική Σύνθεση
UV resistant:	Αντοχή στις υπεριώδεις ακτίνες
Water resistant:	Αντοχή σε υγροσκοπικά φαινόμενα
Dissolvable:	Διαλυτότητα
Heat resistant:	Αντοχή στη θερμοκρασία
Fatigue resistant:	Αντοχή σε κόπωση
Heated bed not required:	Ανάγκη για θερμαινόμενο τραπέζι εκτύπωσης

Πίνακας 6: Μετάφραση Ορολογίας σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών για τρισδιάστατη εκτύπωση

Το κόστος για τα τεμάχια που ζητήθηκε να εκτυπωθούν από την εταιρία Solid 3D για την τεχνολογία νήματος (FDM) ανέρχονταν σε κόστος 450€, ενώ για εκτύπωση με τεχνολογία πολλαπλής εκτόξευσης υλικού (εκτόξευσης ρητίνης- PolyJet) το κόστος ήταν 1750€.
Παρατηρείται μια σημαντική διαφορά στην τιμή γιατί διαφέρει αρκετά η τιμή της πρώτης ύλης. Στης Εικόνες 10 και 11 που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές νημάτων για εκτύπωση με εκτυπωτή τεχνολογίας νήματος.

Επιλέχτηκε η εκτύπωση των δοκιμίων και των τεμαχίων του μηχανισμού που σχεδιάστηκε να πραγματοποιηθεί με την τεχνολογία νήματος και υλικό PETG.

Η κατασκευή είναι 392γρ αλλά μαζί με το υποστηρικτικό υλικό έφτασε το ένα κιλό.

Το κόστος εκτύπωσης προσεγγιστικά ανά υλικό που μελετήθηκε είναι το ακόλουθο:

- ABS (10-40€)
- PETG (20-60€)
- ASA (40€)
- CARBON FIBER (30-80€)
- PLA (10-40€)

Τιμές εταιρίας που δόθηκαν ανά υλικό.

- ABS = 30 €.
- PETG =50 €.
- ASA =30 €.
- CARBON FIBER =70 €.
- PLA =30€.

Στο κόστος των 450 € εκτός του κόστους εκτύπωσης του μηχανισμού συμπεριλαμβάνονται τα δοκίμια που καταστράφηκαν κατά την τέλεση των πειραμάτων, η φθορά του εκτυπωτή-αναλώσημα του, οι εργατοώρες που χρειάστηκε να εκτυπώσει, η κατανάλωση του ρεύματος, τα ημερομίσθια του χειριστή που επιμελήθηκε τις εκτυπώσεις, τα τεμάχια που εκτυπώθηκαν αλλά παρουσίασαν αστοχίες και τέλος το κέρδος της εταιρίας.

Το κόστος των 1750 € είναι για την τεχνολογία εκτόξευσης ρητίνης, με υλικό το Vero Clear. Η τιμή του στο εμπόριο είναι περίπου 1260 € τα 3,6 κιλά δηλαδή περίπου 1135 € (πλέον έξοδα αποστολής). Σημαντική πληροφορία είναι ότι όταν ανοιχτεί μια συσκευασία για να πραγματοποιηθεί εκτύπωση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί το συντομότερο δυνατό όλο το περιεχόμενο της και με το πέρας της κάθε εκτύπωσης να καθαρίζονται οι κεφαλές του εκτυπωτή, σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνει ο κατασκευαστής. Αν μείνουν υπολείμματα ρητίνης πάνω στην κεφαλή, είναι πιθανό να υπάρξει κίνδυνος στερεοποίησης και φραγής των εκκρινόμενων οπών. Αυτό μεταφράζεται σε αυτόματη αχρηστία των κεφαλών αφού το αποτύπωμα που θα αφήνουν στις μελλοντικές εκτυπώσεις δε θα είναι το ενδεδειγμένο και το αποτέλεσμα θα είναι καταστροφικό για το τελικό εκτυπώσιμο τεμάχιο. Αντίστοιχα λοιπόν υπολογίστηκαν τα δοκίμια που θα καταστρέφονταν κατά την τέλεση των πειραμάτων, η φθορά του εκτυπωτή-αναλώσημα του, οι εργατοώρες που θα χρειάζονταν να εκτυπώσει, η κατανάλωση του ρεύματος τα ημερομίσθια του χειριστή που θα αναλάμβανε τις εκτυπώσεις, τα τεμάχια που θα εκτυπώνονταν αλλά πιθανόν να παρουσίαζαν αστοχίες και τέλος το κέρδος της εταιρίας.

Τέλος υπήρχε ένα επιπλέον συνολικό κόστος 25€ που περιελάμβανε αναλυτικά τα ακόλουθα μηχανολογικά εξαρτήματα.

- 5 Ρουλμάν 6000ZZ
- 5 Βίδες Allen M3*12mm
- 5 Περικόχλια εξάγωνα M3
- 2 Λαμαρινόβιδες 3,5*12mm
- 4 Βίδες φρεζάτες πλαστικών M3,5*25mm
- 2 Ροδέλες D Έσο Έξω 4mm-10mm
- 2 Τσιμούχες στεγανοποίησης 10*2mm

	ABS	Flexible	PLA	HIPS	PETG	Nylon	Carbon Fiber Filled	ASA	Polycarbonate	Polypropylene	Metal Filled	Wood Filled	PVA
	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More
Compare Selected													
Ultimate Strength	40 MPa	26 - 43 MPa	65 MPa	32 MPa	53 MPa	40 - 85 MPa	45 - 48 MPa	55 MPa	72 MPa	32 MPa	20 - 30 MPa	46 MPa	78 MPa
Stiffness	5 / 10	1 / 10	7.5 / 10	10 / 10	5 / 10	5 / 10	10 / 10	5 / 10	6 / 10	4 / 10	10 / 10	8 / 10	3 / 10
Durability	8 / 10	9 / 10	4 / 10	7 / 10	8 / 10	10 / 10	3 / 10	10 / 10	10 / 10	9 / 10	4 / 10	3 / 10	7 / 10
Maximum Service Temperature	98 °C	60 - 74 °C	52 °C	100 °C	73 °C	80 - 95 °C	52 °C	95 °C	121 °C	100 °C	52 °C	52 °C	75 °C
Coefficient of Thermal Expansion	90 µm/m-°C	157 µm/m-°C	68 µm/m-°C	80 µm/m-°C	60 µm/m-°C	95 µm/m-°C	57.5 µm/m-°C	98 µm/m-°C	69 µm/m-°C	150 µm/m-°C	33.75 µm/m-°C	30.5 µm/m-°C	85 µm/m-°C
Density	1.04 g/cm³	1.19 - 1.23 g/cm³	1.24 g/cm³	1.03 - 1.04 g/cm³	1.23 g/cm³	1.06 - 1.14 g/cm³	1.3 g/cm³	1.07 g/cm³	1.2 g/cm³	0.9 g/cm³	2 - 4 g/cm³	1.15 - 1.25 g/cm³	1.23 g/cm³
Price (per kg)	$10 - $40	$30 - $70	$10 - $40	$24 - $32	$20 - $60	$25 - $65	$30 - $80	$38 - $40	$40 - $75	$60 - $120	$50 - $120	$25 - $55	$40 - $110
Printability	8 / 10	6 / 10	9 / 10	6 / 10	9 / 10	8 / 10	8 / 10	7 / 10	6 / 10	4 / 10	7 / 10	8 / 10	5 / 10
Extruder Temperature	220 - 250 °C	225 - 245 °C	190 - 220 °C	230 - 245 °C	230 - 250 °C	220 - 270 °C	200 - 230 °C	235 - 255 °C	260 - 310 °C	220 - 250 °C	190 - 220 °C	190 - 220 °C	185 - 200 °C
Bed temperature	95 - 110 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C	100 - 115 °C	75 - 90 °C	70 - 90 °C	45 - 60 °C	90 - 110 °C	80 - 120 °C	85 - 100 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C
Heated Bed	Required	Optional	Optional	Required	Required	Required	Optional	Required	Required	Required	Optional	Optional	Required
Recommended Build Surfaces	Kapton Tape, ABS Slurry	PEI, Painter's Tape	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glass Plate, Glue Stick, Kapton Tape	Glue Stick, Painter's Tape	Glue Stick, PEI	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glue Stick, PEI	PEI, Commercial Adhesive, Glue Stick	Packing Tape, Polypropylene Sheet	Painter's Tape, Glue Stick, PEI	Painter's Tape, Glue Stick, PEI	PEI, Painter's Tape
Other Hardware Requirements	Heated Bed, Enclosure Recommended	Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed, Enclosure Recommended	Heated Bed, Part Cooling Fan	Heated Bed, Enclosure Recommended, May Require All Metal Hotend	Part Cooling Fan	Heated Bed	Heated Bed, Enclosure Recommended, All Metal Hotend	Heated Bed, Enclosure Recommended, Part Cooling Fan	Wear Resistant or Stainless Steel Nozzle, Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed, Part Cooling Fan
Flexible	—	✔	—	—	—	✔	—	—	—	✔	—	—	✔
Elastic	—	✔	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Εικόνα 62: Ιδιότητες Υλικών που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση (Πηγή: [B1])

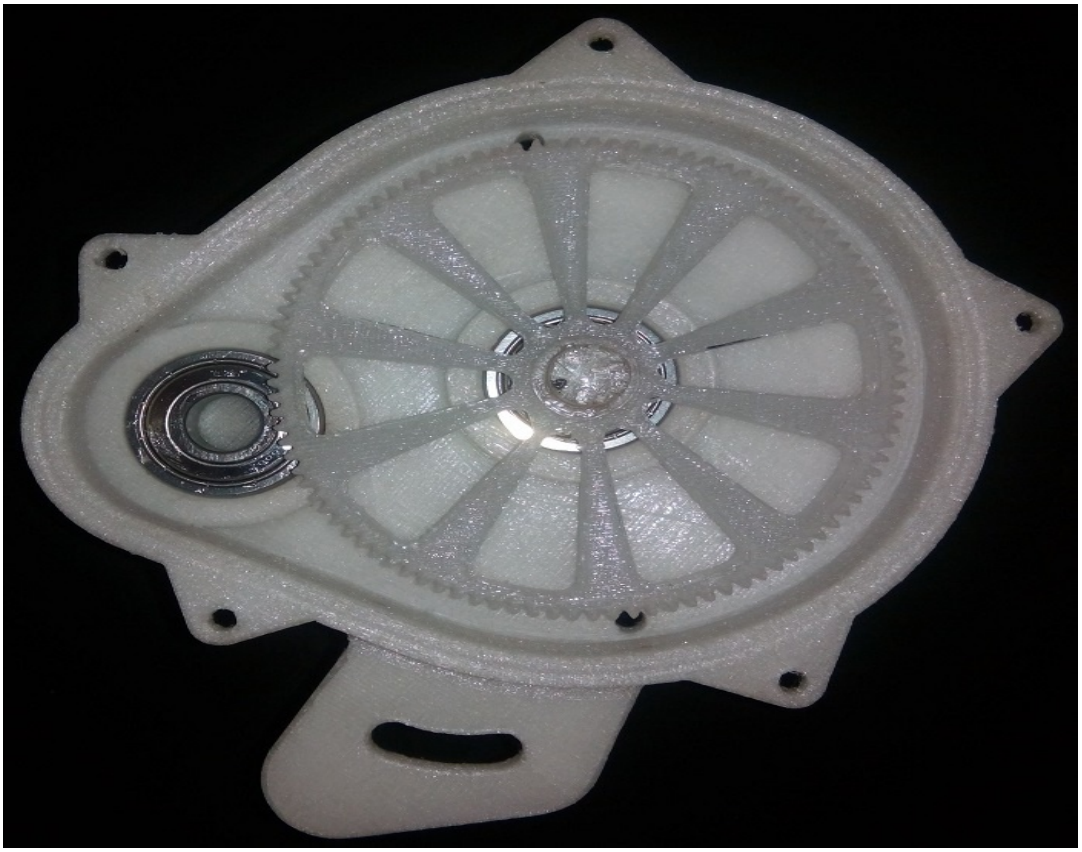
	ABS	Flexible	PLA	HIPS	PETG	Nylon	Carbon Fiber Filled	ASA	Polycarbonate	Polypropylene	Metal Filled	Wood Filled	PVA
	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More
Impact Resistant	✔	–	–	✔	–	✔	–	✔	✔	–	–	–	–
Soft	–	✔	–	–	–	–	–	–	–	✔	–	–	✔
Composite	–	–	–	–	–	–	✔	–	–	–	✔	✔	–
UV Resistant	–	–	–	–	–	–	–	✔	–	–	–	–	–
Water Resistant	–	–	–	–	✔	–	–	–	–	✔	–	–	–
Dissolvable	–	–	–	✔	–	–	–	–	–	–	–	–	✔
Heat Resistant	✔	–	–	✔	–	✔	–	✔	✔	✔	–	–	–
Chemically Resistant	–	–	–	–	✔	–	–	–	–	–	–	–	–
Fatigue Resistant	–	✔	–	–	✔	✔	–	–	✔	✔	–	–	✔
Heated Bed Not Required	–	✔	✔	–	–	–	✔	–	–	–	✔	✔	–
	ABS	Flexible	PLA	HIPS	PETG	Nylon	Carbon Fiber Filled	ASA	Polycarbonate	Polypropylene	Metal Filled	Wood Filled	PVA

Εικόνα 63: Ιδιότητες Υλικών που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση (συνέχεια) (Πηγή: [B1])

6.3 Κατασκευή και συναρμολόγηση

Το τελικό αποτέλεσμα των τρισδιάστατων εκτυπώσεων που πραγματοποιήθηκαν φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνες 64 έως 66). Είναι επιμέρους συναρμολογημένα ώστε να υπάρχει μια ολική εικόνα του τρόπου τοποθέτησης και συνεργασίας τους. Σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουν παρουσιαστεί μεμονωμένα όλα τα τεμάχια του μηχανισμού. Επίσης δεν τελέστηκαν οι εκτυπώσεις από διαφορετικά υλικά στο σύνολο (εξαιρουμένης της πτερωτής) για να μελετηθεί καλύτερα ένα υλικό ως προς τη συμπεριφορά του. Δηλαδή μπορεί να υπήρχαν διαστασιολογικές διαφορές λόγο της εκτύπωσης, που ενδέχεται να δημιουργούσαν προβλήματα κατά τη συναρμογή και κατά την πειραματική λειτουργία.

Το υλικό της εκτύπωσης είναι PETG εκτός από την πτερωτή όπου κατασκευάστηκε από Carbon Fiber. Οι βίδες, κοχλίες περικόχλια, ρουλμάν και όλα τα μεταλλικά υλικά συν τις τσιμούχες στεγανοποίησης χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα από το εμπόριο. Ο λόγος είναι ότι δεν κρίθηκε αναγκαίο να γίνει η κατασκευή τους αφού υπάρχουν στις επιθυμητές διαστάσεις, έχουν καλή ποιότητα και χαμηλό κόστος, ως τυποποιημένα μηχανολογικά προϊόντα. Αξίζει να σημειωθεί ότι με το πέρας της τρισδιάστατης εκτύπωσης και της ορθής συναρμολόγησης, το τελικό αποτέλεσμα ζυγίστηκε και δεν ξεπερνά το μισό κιλό (495gr).



Εικόνα 64: Εσωτερική όψη του μηχανισμού (κέλυφος)

Στην εικόνα 64 παρατηρείται το εσωτερικό του μηχανισμού. Διακρίνεται το πρωτεύον γρανάζι, τα ρουλμάν έδρασης των αξόνων, οι οπές πλήρωσης και αποστράγγισης λιπαντικού, καθώς και το περιμετρικό αυλάκι για την προσθήκη συγκολλητικού υλικού. Για συγκολλητικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί φλατζόκολλα με σκοπό να υπάρξει στεγανοποίηση του μηχανισμού και να μην υπάρξει απώλεια του λιπαντικού υγρού. Τέλος, στο εξωτερικό γίνονται ορατά όλα (5) τα σημεία ένωσης και σύσφιξης των δυο τεμαχίων κελύφων με κοχλίες και περικόχλια. Στο κέντρο του γραναζιού είναι ορατός ο άξονας που περιστρέφεται από την εξωτερική τροχαλία καθώς και το ρουλμάν που εδράζεται.

Εικόνα 65: Εσωτερική όψη του μηχανισμού (καπάκι κελύφους)

Στην εικόνα 65 μπορεί να παρατηρηθεί το εσωτερικό του μηχανισμού. Διακρίνεται το συνεργαζόμενο γρανάζι, τα ρουλμάν έδρασης των αξόνων από την άλλη μεριά του καπακιού του κελύφους, και μέρος από την βάση ένωσης με το κέλυφος της πτερωτής, στα αριστερά της εικόνας. Τα ρουλμάν είναι ανοξείδωτα μονόσφαιρα ατσάλινα. Πίσω από το αριστερό εικονιζόμενο ρουλμάν όπου βρίσκεται το δευτερεύον γρανάζι, εδράζει στεγανοποιητική ροδέλα τύπου O-ring.

Εικόνα 66: Εξωτερική όψη του μηχανισμού

Στην εικόνα 66 εμφανίζονται σε μερικά συναρμολογήματα η τροχαλία μετάδοσης κίνησης ο μηχανισμός και η πτερωτή αναρρόφησης ατμοσφαιρικού αέρα. Όλα αυτά μαζί με τους κοχλίες σύνδεσης αποτελούν την κατασκευή που σχεδιάστηκε, μελετήθηκε και κατασκευάστηκε από 3Δ εκτυπωτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα – Μελλοντική Σημασία

7.1 Συμπεράσματα

7.1.1 Ο σχεδιασμός

Ο μηχανισμός αυτός είναι μοναδικός σε σχεδιασμό και έγινε με γνώμονα την απλότητα.

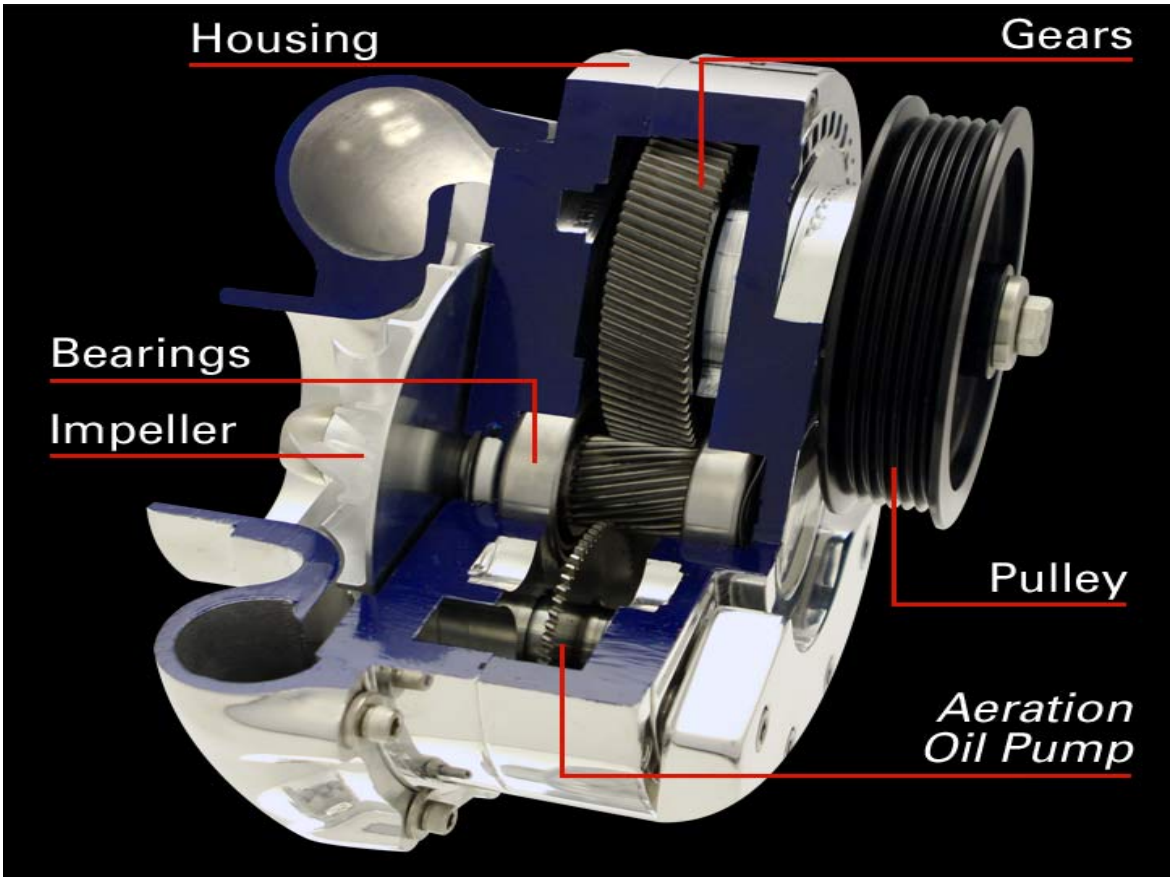
Ένας απλός μηχανισμός έχει μικρότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης. Αποτελείται από δέκα εκτυπώσιμα μέρη εκ των οποίων τα δυο είναι κοινά (άξονες). Υπάρχει η εύκολη δυνατότητα πρόσθεσης και αφαίρεσης λιπαντικού.

Το κόστος είναι χαμηλό ως προς την χρήση ρουλεμάν, βίδες, περικόχλια και στεγανοποιητικών τσιμουχών γιατί είναι εύκολο να βρεθούν στο εμπόριο.

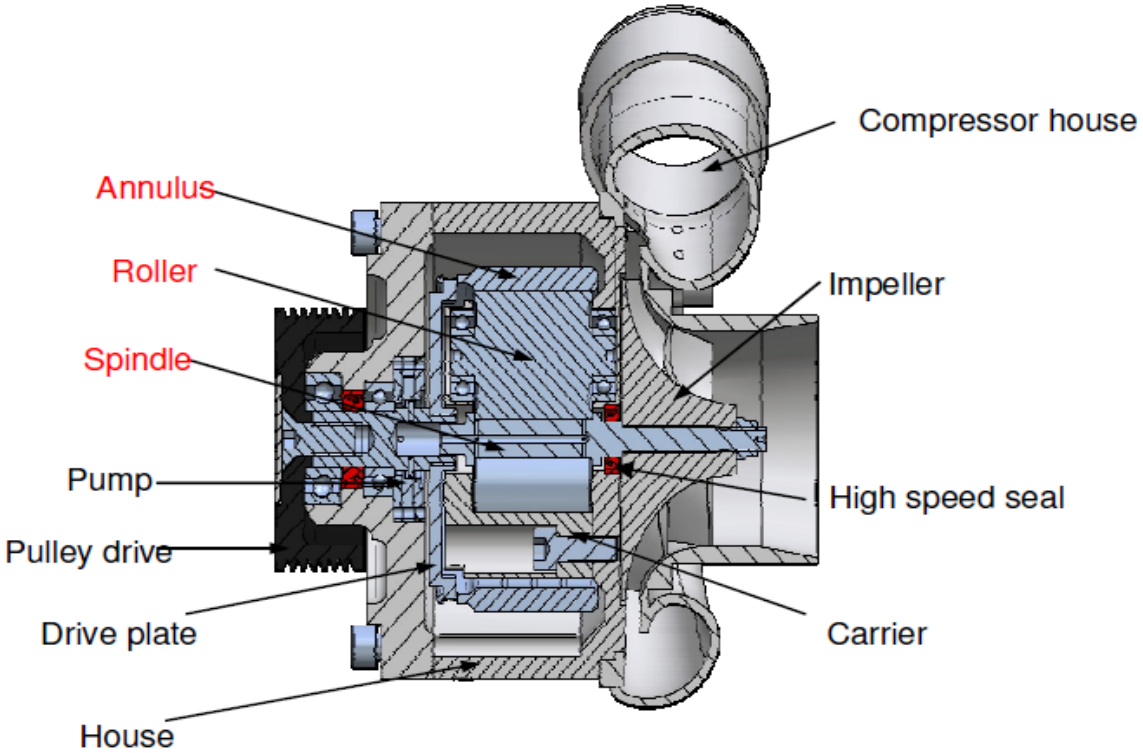
Το κέλυφος της πτερωτής μπορεί να στραφεί 360^0 για καλύτερη εφαρμογή της εξόδου του πεπιεσμένου αέρα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χάρη στο σύνδεσμο με το κέλυφος του γραναζωτού μηχανισμού, όπου φέρει οκτώ περιφερειακές, ίδιες και ισαπέχουσες οπές για την στήριξη του κελύφους της πτερωτής.

Υπάρχουν και άλλοι αντίστοιχοι μηχανισμοί (Rotrex&Vortech), όπου ενώ η κεντρική ιδέα είναι η ίδια, είναι όμως σεβαστά πολυπλοκότεροι. Κίνηση από ιμάντα, πολλαπλασιασμός εισερχόμενων στροφών μέσω πλανητικού συστήματος, κίνηση πτερωτής και πολύπλοκο σύστημα λίπανσης με εσωτερική αντλία. [B25, B26]

Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζεται ένας μηχανισμός της εταιρίας Rotrex για οπτική σύγκριση.



Εικόνα 67: Μηχανισμός εταιρείας ROTREX (Πηγή: [B25])



Εικόνα 68: Μηχανισμός εταιρείας ROTREX (Πηγή: [B25])

7.1.2 Το πείραμα

Από την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε μπορούν να διεξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μεγαλύτερη αντοχή σε ροπή στρέψης παρουσιάζεται στις 15° γωνία εκτύπωσης.
- Τη μεγαλύτερη αντοχή σε ροπή στρέψης την έχει το Carbon Fiber, ακολουθεί το PLA και αρκετά μικρότερη τα PETG, ASA&ABS.

Οι δεκαπέντε μοίρες (15°) γωνία εκτύπωσης που τελέστηκαν τα πειράματα, δεν συνεπάγεται ότι είναι οι βέλτιστες μοίρες για εκτύπωση γενικά. Αυτό θα μπορούσε να είναι η αρχή μιας νέας έρευνας για την αναζήτηση της βέλτιστης γωνίας εκτύπωσης με μια σειρά πειραμάτων με νέα δοκίμια.

Σε όλα τα δοκίμια, η θραύση ξεκίνησε από την περιφέρεια προς τα μέσα όπως ήταν αναμενόμενο.

Στο ένα δοκίμιο από Carbon Fiber παρουσιάστηκε το φαινόμενο της αποκόλλησης στρώματος. Δηλαδή πριν καταστραφεί από την καταπόνηση σε στρέψη παρουσιάζοντας κομμένες ίνες, παρουσίασε αποκόλληση εκτυπώσιμων στρωμάτων. Έτσι το πείραμα σταμάτησε. Οι τιμές του δεν είναι αντιπροσωπευτικό δείγμα της αντοχής του σε στρέψη.

Από αυτή την κατασκευαστική αστοχία γίνεται αντιληπτή η έννοια της εκτυπωσιμότητας (printability). Ενώ το δοκίμιο στην εξωτερική του εμφάνιση δεν υστερούσε σε τίποτα από τα υπόλοιπα, (δεν ήταν ορατή κάποια αστοχία), οι εκτυπωμένες στρώσεις υλικού δεν είχαν ενωθεί ισχυρά μεταξύ τους.

Επίσης στο υλικό PLA παρατηρήθηκε το φαινόμενο της παραμόρφωσης του υλικού πριν την θραύση, αλλάζοντας τις διαστάσεις και το σχήμα του υπό μελέτη δοκιμίου.

7.1.3 Η εκτύπωση

Η διαδικασία παραγωγής τεμαχίων με την μέθοδο Εξώθησης Υλικού είναι μια διαδικασία οικονομικότερη από την διαδικασία του Πολυμερισμού σε δεξαμενή, αλλά υστερεί σε ποιότητα επιφανείας.

Μπορεί να γίνει εύκολα και σε οικιακό περιβάλλον.

Με το πέρας της εκτύπωσης χρειάζεται περαιτέρω κατεργασία(λείανση) η επιφάνεια και κυρίως στα σημεία που χρησιμοποιήθηκε υποστηρικτικό υλικό.

Η μέθοδος Εξώθησης Υλικού είναι μια καλή επιλογή για τις πρώτες εκτυπώσεις ενός τεμαχίου που δεν είναι γνωστή η συμπεριφορά του και είναι πρωτότυπο. Έτσι, με χαμηλότερο κόστος από π.χ. μια χύτευση μπορούν να γίνουν ορατές σχεδιαστικές αστοχίες ή ελλείψεις με στόχο την περαιτέρω βελτίωση των τεμαχίων αυτών από το στάδιο της σχεδίασης τους.

Ανάλογα τις απαιτήσεις βέβαια μπορεί να καλύπτει τις προδιαγραφές που το περιορίζουν και να κατασκευαστεί απευθείας το τελικό τεμάχιο.

Μέχρι στιγμής χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή τεμαχίων που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή καλουπιών για μαζική παραγωγή αλλά και για δείγματα.

Σημαντικό είναι να μην υπάρξει κατασκευαστική αστοχία, όπως αποκόλληση στρωμάτων ή κατάρρευση υλικού λόγω της θερμοκρασίας εκτύπωσης ή άλλων παραγόντων.

Κάθε υλικό έχει διαφορετική θερμοκρασία τήξης και διαφορετικές ιδιαιτερότητες κατά τη διαδικασία εκτύπωσης.

Η διαδικασία της εκτύπωσης δεν πρέπει να διακόπτεται αλλά να είναι συνεχόμενη.

Υπάρχουν εκτυπωτές όπου αν διακοπεί η εκτύπωση μπορούν να συνεχίσουν από το ίδιο σημείο όπου έγινε η διακοπή. Αν όμως έχει περάσει αρκετός χρόνος ώστε να μεταβληθεί αρκετά η θερμοκρασία της τελευταίας επιφάνειας που εκτυπώθηκε, υπάρχει η πιθανότητα να μην κολλήσουν τα δυο στρώματα μεταξύ τους και να παρουσιαστεί αστοχία.

Όταν η εκτύπωση πραγματοποιείται υπό γωνία τότε υπάρχει η επιλογή, η επόμενη στρώση εκτύπωσης να έχει την ίδια γωνία αλλά άλλη φορά. Έτσι μπορούν να επιτευχθούν βέλτιστα αποτελέσματα σε τεμάχια που υπόκεινται μηχανικές καταπονήσεις με την μελέτη και εφαρμογή συνδυαστικών γωνιών εκτύπωσης.

Η αύξηση της ακρίβειας της εκτύπωσης αυξάνει το χρόνο κατεργασίας. Μικρά τεμάχια με μικρή ακρίβεια εκτυπώνονται σε λιγότερο χρόνο.

Τα εκτυπωμένα τεμάχια μπορούν να είναι πιο ελαφριά αν υπάρξει η επιλογή να μην γεμιστούν πλήρως με υλικό, να εκτυπωθούν γρηγορότερα και να κοστίσουν λιγότερο, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα μείωση στις μηχανικές τους ιδιότητες.

Μεγάλα τεμάχια που δε χωράνε στο τραπέζι εκτύπωσης μπορούν να κατασκευαστούν αν χωριστούν σε επιμέρους μικρότερα και συναρμολογηθούν με το πέρας της εκτύπωσης.

Ο μηχανισμός που εκτυπώθηκε και συναρμολογήθηκε είναι πλήρως λειτουργικός. Όλα τα μέρη του συνεργάζονται πλήρως μεταξύ τους, σύμφωνα με τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, και αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο για πειραματική χρήση και περαιτέρω εξέλιξη. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν χρειάζεται να γίνουν αλλαγές στα κατασκευαστικά σχέδια και να αλλάξουν οι διαστάσεις των τεμαχίων και οι ανοχές που έχουν δοθεί.

7.2 Μελλοντική σημασία

Ύστερα από την έρευνα, το σχεδιασμό και την κατασκευή του μοντέλου δίνεται η ευκαιρία για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

Ο αναγνώστης μπορεί να εμβαθύνει το ερευνητικό του πεδίο και είτε να ασχοληθεί με αυτό το αντικείμενο είτε να το χρησιμοποιήσει ως εγχειρίδιο σε επαγγελματικό επίπεδο. Για παράδειγμα, διδάσκοντες αυτού του αντικειμένου μπορούν να το χρησιμοποιήσουν για την καλύτερη αποδοτικότητα στο πεδίο που πραγματεύονται ή να γίνουν πιο παραγωγικοί στη διδασκαλία τους.

Μέσα από αυτή τη διαδικασία δίνεται η ευκαιρία για περαιτέρω μελέτη σε αντικείμενα όπως η τριβή των γραναζιών μεταξύ τους με ίδια ή διαφορετικά υλικά σε συνδυασμούς, η σχεδίαση νέας πτερωτής και η μελέτη ροής πιεσμένου αέρα. Επίσης μπορεί να μελετηθεί η συμπεριφορά διαφορετικών υλικών σε μεταξύ τους συνεργασία και η συμπεριφορά του μηχανισμού, αλλά και των υλικών σε συνθήκες υγρασίας ή αυξημένης θερμοκρασίας.

Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτη λιπαντικών ιδιοτήτων διαφορετικών λιπαντικών. Το γεγονός ότι αυτό το μοντέλο είναι πρωτότυπο και μοναδικό δίνει το κίνητρο για την εξελικτική του εφαρμογή στο πεδίο αντικειμένου του, αλλά και σε άλλα πεδία, όπως η αεροδυναμική, ο σχεδιασμός, η υδροδυναμική, οι μηχανουργικές κατεργασίες, μέχρι και την επιστήμη της ιατρικής.

Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από εταιρίες λογισμικού οι οποίες μπορούν να φτιάξουν εγχειρίδια για το κοινό, στα οποία θα παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την εκτύπωση ενός τέτοιου ή περισσότερο εξελιγμένου μοντέλου για την καλύτερη πρόβλεψη αστοχιών.

Βιβλιογραφία

Βιβλία και Δημοσιεύσεις

[A1] Α. Κριμπένης (2017). Σημειώσεις του μαθήματος ΠΜΣ ΜΣΚ24 Ειδικά κεφάλαια σχεδίασης αγωνιστικών οχημάτων.

[A2] "ISO / ASTM 52900: 2015 (el), Παραγωγή προσθέτων - Γενικές αρχές - Ορολογία", Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO), Γενεύη, Ελβετία, 2015.

[A3] Gibson I., Rosen DW και Stucker B., Additive Manufacturing Technologies. Βοστώνη, MA: Springer ΗΠΑ, 2010.

[A4] LeHP, "Η πρόοδος και οι τάσεις στην τεχνολογία εκτύπωσης με εκτόξευση μελάνης", Journal of Imaging Science and Technology, τομ. 42, όχι. 1, σελ. 49-62, 1998.

[A5] Visser CW, Pohl R., Sun C., Römer G.-W., Huis in 't Veld B., And Lohse D., "Towards 3D Printing of Pure Metals by Laser-Induced Forward Transfer" Υλικά, τομ. 27, όχι. 27, σελ. 4087-4092, Ιουλ. 2015.

[A6] Priest JW, Smith C., καιDubois P., “Liquid Metal Jetting for OíβI Metal Parts”, στοProceedings of the 8thΣυμπόσιο Παρασκευής Ελεύθερου Τύπου Στερεών (Austin, Texas, USA, 1997,9.

[A7] Masters WE, "Computer Automated Manufacturing Process and System", Ευρεσιτεχνία Η.Π.Α. 4,665,492, 12 Μαΐου 1987.

[A8] Gothait H., "Συσκευή και μέθοδος για τρισδιάστατη εκτύπωση μοντέλου", ευρεσιτεχνία ΗΠΑ 6,259,962, 10 Ιουλίου 2001.

[A9] GrothC., KravitzND, Jones PE, GrahamJW και RedmondWR, "Τρισδιάστατη τεχνολογία εκτύπωσης", JournalofClinicalOrthodontics: JCO, τομ. 48, αρ. 8, σελ. 475-85, Αύγουστο 2014.

[A10] Fathi S., Dickens PM, Hague R., Khodabakhshi K., Gilbert M., "Jetting Reactive Materials for Additive Manufacturing Nylon Parts", στο Proceedings of the 25th Διεθνές Συνέδριο για τις Τεχνολογίες Ψηφιακής Εκτύπωσης και Ψηφιακής Παραγωγής (NIP 25), Louisville, Kentucky, USA, 2009, τομ. 2009, όχι. 2, σελ. 784-787.

[A11] Αντοχή των υλικών, Ιωάννης Βελαώρας, Εκδόσεις ΙΩΝ

[A12] Τεχνική Μηχανική –Αντοχή των Υλικών, Παναγιώτης Α.Βουθούνης, Εκδόσεις ΑΘΗΝΑ

Σελίδες στο διαδίκτυο

[B1] https://www.simplify3d.com/

[B2] https://www.google.gr/images

[B3] https://www.stratasys.com/

[B4] http://usglobalimages.stratasys.com/

[B5] https://eclass.aspete.gr/

[B6] https://www.philanthropy.gr/rotrex/el/

[B7] https://vortechsuperchargers.com/

[B8] https://plastics.ulprospector.com/

[B9] http://www.modix3d.com/

[B10] http://canadamakes.ca/

[B11] https://www.digitalalloys.com/

[B12] https://www.lboro.ac.uk/

[B13] https://www.acmeplastics.com/

[B14] https://www.researchgate.net/

[B15] https://www.3dhub.gr/

[B16] https://www.makepartsfast.com/

[B17] https://en.wikipedia.org/

[B18] https://www.pmcplastics.com/

[B19] https://www.sigmaaldrich.com/

[B20] https://markforged.com/

[B21] https://plastics.ulprospector.com/

[B22] https://www.creativemechanisms.com/

[B23] https://all3dp.com/

[B24] https://www.kuraray-poval.com/

[B25] https://www.kearney.com/