



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ »

« Master of Science in Design and Manufacturing of
Sports Vehicle Systems »

«Σχεδίαση και μελέτη κατασκευής, κεφαλής μεταβλητής ανάμειξης σύνθετων υλικών ενισχυμένων με κοντές ίνες, για τρισδιάστατη εκτόπωση τεμαχίων με τοπικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες»

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στη Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων από τον

ΣΑΒΒΑ Δ. ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗ

Ψαχνά, Οκτώβριος 2024

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
« ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ »

« Master of Science in Design and Manufacturing of
Sports Vehicle Systems »

«Σχεδίαση και μελέτη κατασκευής, κεφαλής μεταβλητής ανάμειξης
σύνθετων υλικών ενισχυμένων με κοντές ίνες, για τρισδιάστατη
εκτύπωση τεμαχίων με τοπικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες»

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού
Πανεπιστημίου Αθηνών ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδικεύσεως στη Σχεδίαση και Κατασκευή
Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων από τον

ΣΑΒΒΑ Δ. ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗ

Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα copyright

Ο μεταπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων : του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη εμπορικός, μη κερδοσκοπικός , αλλά εκπαιδευτικός-ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κτλ), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή την γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου

(Υπογραφή)

.....

Ψαχνά, Οκτώβριος 2024



« Σχεδίαση και μελέτη κατασκευής, κεφαλής μεταβλητής ανάμειξης σύνθετων υλικών ενισχυμένων με κοντές ίνες, για τρισδιάστατη εκτόπωση τεμαχίων με τοπικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΣΑΒΒΑ Δ. ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗ

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Κριμπένης Αγαθοκλής

« 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. Φατοής Αντώνιος, ο κ. Αγαθοκλής Κριμπένης και ο κ. Στυλιανός Μαρκολέφας.

« Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Γενικό Τμήμα του ΕΚΠΑ δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα »

Εξεταστική Επιτροπή Διπλωματικής Εργασίας

(Υπογραφή)

.....

Φατοής Αντώνιος
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

(Υπογραφή)

.....

Αγαθοκλής Κριμπένης
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

(Υπογραφή)

.....

Στυλιανός Μαρκολέφας
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

Ψαχνά, Οκτώβριος 2024

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Μηχ/γο Μηχ/κο, κο Κριμπένη Αγαθοκλή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση αυτής της εργασίας, την υπομονετική του στάση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της και την επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε όσες φορές αυτό χρειάστηκε. Ευχαριστώ επίσης θερμά όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος για την υποστήριξη και τις γνώσεις που μου παρείχαν αλλά και για την υποδειγματική τους στάση κατά τη διάρκεια των μαθημάτων.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	3
Εισαγωγή.....	3
1.1 Σκοπός.....	3
1.2 Ορισμοί.....	4
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	4
1.3.1 Μοντέλα ιξώδους και προσομοίωση	4
1.3.2 Τεχνολογία εκτόπωσης σύνθετων υλικών.....	5
1.4 Περίληψη κεφαλαίων.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	7
Κατεργασίες με Πρόσθεση και Αφαίρεση Υλικού.....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Κατεργασίες με Πρόσθεση Υλικού – 3Δ Εκτόπωση.....	7
2.2.1 Τύποι 3Δ εκτόπωσης	7
2.3 Κατεργασίες με Αφαίρεση Υλικού.....	11
2.3.1 Κοπτικά εργαλεία	12
2.3.2 Συνθήκες κοπής.....	12
2.3.3 Τεχνολογικός προγραμματισμός κατεργασίας.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	14
Σχεδίαση, Ανάλυση και Κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή CAD/CAM/CAE.....	14
3.1 Εισαγωγή.....	14
3.2 Computer-aided Design (CAD).....	14
3.2.1 Γενικά.....	14
3.2.1 Γεωμετρική μοντελοποίηση	15
3.2.2 Η έννοια της παραμετρικής σχεδίασης.....	16
3.3 Computer-aided Manufacturing (CAM).....	17
3.4 Computer-aided Engineering (CAE)	17
3.4.1 Προεπεξεργασία.....	18

3.4.2 Επίλυση	18
3.4.3 Μετεπεξεργασία	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	20
Σχεδίαση Κεφαλής.....	20
4.1 Εισαγωγή	20
4.2 Καθορισμός προδιαγραφών κεφαλής εκτόπωσης.....	20
4.3 Σχεδίαση κεφαλής.....	21
4.3.1 Συναρμολόγημα	23
4.3.2 Θάλαμος ανάμειξης.....	23
4.3.3 Βάση στήριξης κεφαλής.....	26
4.3.4. Μηχανισμός τροφοδοσίας σκόνης	27
4.4. Σχόλια - Παρατηρήσεις.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	30
Προσομοίωση ροής.....	30
5.1 Εισαγωγή	30
5.2 Δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης.....	31
5.2.1. Γεωμετρία	31
5.2.2. Υλικά.....	31
5.2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση	32
5.2.4. Συνοριακές συνθήκες	35
5.2.5. Δημιουργία πλέγματος	36
5.2.6. Παραμετρική επίλυση.....	37
5.3. Σχόλια - Συμπεράσματα	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	43
Μελέτη κατασκευής	43
6.1 Εισαγωγή	43
6.2 Κατασκευή επιμέρους εξαρτημάτων	44
6.2.1 Βάση στήριξης	44
6.2.2 Εμπρόσθια πλάκα, αποστάτης και τεντωτήρας.....	45
6.2.3 Άξονας ανάμειξης.....	46

6.2.4 Θάλαμος ανάμειξης.....	47
6.2.5 Μπρακέτο κινητήρα	49
6.2.6 Χιτώνιο	49
6.2.7 Δεξαμενή σκόνης.....	49
.....	51
.....	52
6.2.8 Αντάπτορας	52
6.2.9 Αεραγωγός.....	52
6.2.10 Κοχλίας τροφοδοσίας σκόνης	52
6.2.11 Λοιπά εξαρτήματα.....	55
6.3 Εκτίμηση κόστους	55
6.4 Συμπεράσματα	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	57
Γενικά συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	59
Βιβλία και Δημοσιεύσεις.....	59
Ιστοσελίδες.....	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	61
Κατασκευαστικά Σχέδια της Κεφαλής.....	61

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση των σύνθετων υλικών στο αυτοκίνητο αλλά και στη βιομηχανία γενικότερα, έχει επεκταθεί με την εφαρμογή των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης ή αλλιώς των κατεργασιών πρόσθεσης υλικού. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η σχεδίαση και μελέτη κατασκευής κεφαλής τρισδιάστατης εκτύπωσης μεταβλητής ανάμειξης σύνθετου υλικού με κοντές ίνες, ικανής να εκτυπώνει τεμάχιο με βελτιωμένες τοπικά μηχανικές ιδιότητες αλλά και με κόστος υλικού μικρότερο.

Αρχικά αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία πληροφορίες για τις διάφορες τεχνολογίες εκτύπωσης σύνθετων και απλών υλικών καθώς και για διαθέσιμες διατάξεις ή μηχανισμούς για την ανάμειξη του υλικού ενίσχυσης. Μελετήθηκαν τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση, ο τρόπος παρασκευής τους και οι εφαρμογές τους. Επίσης, αναζητήθηκαν πληροφορίες για τη ροή τηγμένων πολυμερών τα οποία είναι μη - Νευτώνια ρευστά και παρουσιάζουν ιδιαιτερότητα στη μεταβολή τους ιξώδους. Ακολούθησε η συγγραφή του κεφαλαίου για τις σύγχρονες μεθόδους κατεργασιών, πρόσθεσης και αφαίρεσης υλικού. Συμπεριλήφθηκαν οι βασικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς και βασικά στοιχεία για την κατασκευή τεμαχίων με κοπή σε εργαλειομηχανές. Το θεωρητικό μέρος ολοκληρώθηκε με τη συγγραφή του κεφαλαίου σχετικά με τη σχεδίαση και κατασκευή με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Παρουσιάστηκαν πληροφορίες για τη χρήση του υπολογιστή στη σχεδίαση εξαρτημάτων ή μηχανισμών, την ανάλυση της λειτουργίας τους και τη βελτιστοποίηση παραμέτρων και τέλος την κατασκευή τους στο μηχανουργείο από ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές.

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση της κεφαλής αφού ορίστηκαν και διατυπώθηκαν οι προδιαγραφές που πρέπει να έχει ο μηχανισμός. Αξιοποιήθηκαν οι πληροφορίες από τη βιβλιογραφία σχετικά με τις διατάξεις εκτύπωσης και ανάμειξης υλικών για την μορφή που θα πρέπει να έχει ο μηχανισμός. Ακολούθησε η ανάλυση της κατασκευής με κύριο αντικείμενο την προσομοίωση της ροής του μίγματος μέσα στο θάλαμο ανάμιξης. Έγινε εξαγωγή διαγραμμάτων για τη σχέση του χρόνου που απαιτείται για την ανάμιξη σε σχέση με διάφορες παραμέτρους λειτουργίας. Το πρακτικό μέρος ολοκληρώθηκε με τη μελέτη της κατασκευής, υλοποιώντας για κάθε εξάρτημα τα προγράμματα κατεργασίας.

Τέλος, η διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε με την εκπόνηση των κατασκευαστικών σχεδίων που παρατίθενται στο παράρτημα και τη σύνταξη του κεφαλαίου των γενικών συμπερασμάτων και των προτάσεων για μελλοντική έρευνα και εξέλιξη.

ABSTRACT

The use of composite materials in the car, but also in the industry in general, has expanded with the application of 3D printing technologies, or in other words, additive manufacturing. The purpose of this thesis is to design and study the construction of a 3D printing head of variable mixing of composite material with short fibers, capable of printing a part with improved local mechanical properties but also with a lower material cost.

Initially, a literature review performed for information on the various printing technologies of composite and simple materials as well as available arrangements or mechanisms for mixing the reinforcement material. Composite materials used in 3D printing, how they are made and their applications were studied. Also, information was sought on the flow of molten polymers which are non - Newtonian fluids and exhibit particularity in their viscosity change. This was followed by the writing of the chapter on modern methods, additive and subtractive manufacturing. Basic 3D printing technologies were covered as well as basics for making parts using machine tools. The theoretical part was completed by writing the chapter on computer - aided design and manufacturing. Information was presented on the use of the computer in the design of parts or mechanisms, the analysis and optimization of their performance, and finally their manufacture in the machine shop by numerically controlled machine tools. In the practical part of the thesis, the design of the printing head was carried out after defining and formulating the specifications that the device must have. The information from the literature on the printing and mixing of materials was used for the form and shape outline the mechanism should have. This was followed by the analysis of the performance with the main object being mainly the simulation of the flow and mixing inside the mixing chamber. Plots were derived for the relationship of time required for mixing with respect to various operating parameters. The practical part was completed with the implementation of the process planning for each part. Finally, the thesis was completed by drawing up the plans listed in the appendix and writing the chapter of general conclusions and suggestions for future research and development.

1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και μελέτη κατασκευής μιας πρωτότυπης κεφαλής τρισδιάστατης εκτόπωσης με εξώθηση υλικού που θα είναι σε θέση να αναμειγνύει και να μεταβάλλει το ποσοστό κοντών ινών άνθρακα ή υάλου στο τηγμένο πολυμερές σύμφωνα με τον κώδικα G που εκτελείται στη μηχανή, έτσι ώστε τα εκτυπωμένα τεμάχια να έχουν τοπικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

Κατά τη χρονική περίοδο εκπόνησης της εργασίας, στο σύνολο των εκτυπωμένων τεμαχίων με εξώθηση υλικού, γίνεται χρήση υλικών από μία αρκετά μεγάλη γκάμα που περιλαμβάνει είτε ένα μόνο συστατικό είτε ανάμειξη πολυμερούς και κοντών ινών άνθρακα ή υάλου. Τα υλικά που συναντώνται σε μορφή νήματος, περιέχουν μόνο πολυμερές ή και μείγμα πολυμερούς με κοντές ίνες ή ακόμα και σκόνη μετάλλου. Αυτό σημαίνει ότι το εκτυπωμένο τεμάχιο αποτελείται σε όλο του τον όγκο από υλικό συγκεκριμένης σύστασης. Στην περίπτωση δε της χρήσης δύο ή και περισσότερων κεφαλών εκτόπωσης, μπορεί να συναντάται στο ίδιο τεμάχιο συνδυασμός δύο ή και παραπάνω υλικών αντίστοιχα αλλά όχι ανάμειξη αυτών με αποτέλεσμα το τεμάχιο να εμφανίζει ιδιότητες ίδιες σε όλη τη μάζα του. Με την συγκεκριμένη υλοποίηση της κεφαλής εκτόπωσης που προτείνεται εδώ, επιτυγχάνεται η εκτόπωση τεμαχίου όπου η ποσόστωση του υλικού ενίσχυσης δηλαδή των κοντών ινών θα μπορεί να διαμορφώνεται ανάλογα ώστε να βελτιώνονται τοπικά οι μηχανικές ιδιότητες εάν αυτό απαιτείται και συνάμα η κατασκευή θα είναι ελαφρύτερη και οικονομικότερη, ζητούμενο όχι μόνο στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά στον κατασκευαστικό κλάδο γενικότερα.

1.2 Ορισμοί

Κεφαλή εκτόπωσης: διάταξη αποτελούμενη από σύνολο εξαρτημάτων, που προκαλεί τήξη του υλικού εκτόπωσης και εναπόθεση αυτού στην επιφάνεια εκτόπωσης.

Εκτόπωση με εξώθηση υλικού: είναι η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτόπωσης όπου το υλικό σε μορφή νήματος διέρχεται από την κεφαλή εκτόπωσης, ρευστοποιείται και εξέρχεται μέσω ενός ακροφυσίου προς την επιφάνεια εκτόπωσης.

Κοντές ίνες άνθρακα: πρόκειται για μείγμα ινών άνθρακα και πούδρας γραφίτη. Οι διαστάσεις των ινών είναι της τάξης των 220 μm μήκους και 7 μm διαμέτρου. Οι ίνες αποτελούν το 85% του μείγματος.

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Εκτεταμένη έρευνα γίνεται πάνω στο αντικείμενο της τρισδιάστατης εκτόπωσης σύνθετων υλικών, δηλαδή πλαστικών ενισχυμένων με συνεχείς ή κοντές ίνες άνθρακα ή υάλου, καθώς αυτά συνδυάζουν μικρό βάρος και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και βρίσκουν πολλές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα αυτή αφορά πεδία όπως η επίδραση της ποσοστώσης των ινών στις μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων, ο προσανατολισμός των ινών κατά την εξώθηση του υλικού, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την εξώθηση αλλά και την προσθήκη και μίξη υλικών ενίσχυσης, τα μοντέλα προσομοίωσης της ροής κατά την εκτόπωση και επαλήθευση αυτών με πειραματικά δεδομένα κ.α.

1.3.1 Μοντέλα ιξώδους και προσομοίωση

Τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτόπωση όπως το ABS και το PLA, είναι υλικά που σε ρευστή μορφή εμφανίζουν διατμητική λέπτυνση δηλαδή κάτω από την επίδραση διατμητικών δυνάμεων, μειώνεται το ιξώδες τους. Τέτοια ρευστά αποκαλούνται μη Νευτώνεια. Κατά συνέπεια πρέπει να αναζητηθούν μοντέλα προσομοίωσης του ιξώδους τους. Οι Hofstatter, Thomas κ.α. [1], πραγματοποίησαν προσομοιώσεις ροής σε κεφαλή εκτόπωσης και χρησιμοποίησαν το διαδεδομένο για παρόμοιες περιπτώσεις μοντέλο ιξώδους Cross-WLF. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + (\eta_0(T)\dot{\gamma} / \tau)^{1-n}} \quad (1)$$

$$\eta_0(T) = D_1 \exp \left[\frac{-A_1(T - Tr)}{A_2 + (T - Tr)} \right] \quad (2)$$

$\eta, A_1, A_2, D_1, D_2, D_3$	σταθερές του υλικού
$\dot{\gamma}$	ρυθμός διάτμησης
τ	χρόνος χαλάρωσης

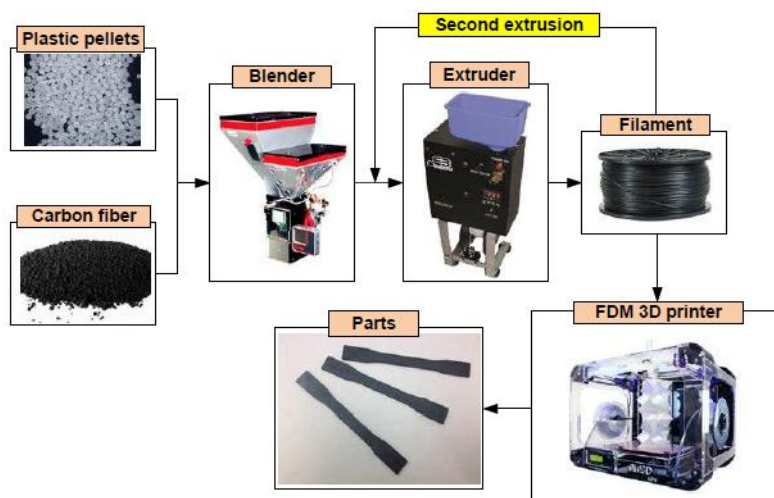
Αντίστοιχα οι Ases Akas Mishra, Affaf Momin, Matteo Strano και Kedarnath Rane [10] και άλλοι [11][12], πραγματοποίησαν προσομοίωση ροής μέσα στο ακροφύσιο του εκτοπωτή και εξήγαγαν διαγράμματα μεταβολής της πίεσης και του ιξώδους για τυπικές τιμές παραμέτρων λειτουργίας και για υλικά PLA και ABS. Οριακές τιμές στις παραμέτρους εκτόπωσης όπως η δύναμη εξώθησης σε σχέση με την ταχύτητα εκτόπωσης αναφέρονται στη [15]. Οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν για την τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

1.3.2 Τεχνολογία εκτόπωσης σύνθετων υλικών

Για την κατασκευή τεμαχίων από σύνθετα υλικά με τρισδιάστατη εκτόπωση υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ανάλογα με τον εξοπλισμό αλλά και το στάδιο στο οποίο θα γίνει η ανάμιξη του πολυμερούς με το υλικό ενίσχυσης δηλαδή τις ίνες.

Οι Katarzyna, Elbieta κ.α. [2], συνοψίζουν αυτές τις μεθόδους, τις σχετικές με την τεχνολογία εξώθησης υλικού που αφορά και την παρούσα εργασία. Υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής τεμαχίων από σύνθετα υλικά με μία κεφαλή εκτόπωσης ή με δύο. Επίσης μπορεί να γίνει και εμποτισμός του υλικού ενίσχυσης μέσα στο πολυμερές, στο ακροφύσιο πριν βγει το υλικό από την κεφαλή. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε συνεχή ίνα για υλικό ενίσχυσης.

Όπως αναφέρουν οι Fuda Ning, Weilong Cong, Junhua Wei, Shiren Wang, Meng Zhang στην αναφορά [3], η παρασκευή της πρώτης ύλης για κατασκευή σύνθετων τεμαχίων, γίνεται με ανάμιξη σφαιριδίων (pellets) πλαστικού και κοντών ινών άνθρακα στην επιθυμητή αναλογία μέσα σε ειδικές συσκευές ανάμιξης. Έπειτα το μίγμα διοχετεύεται σε εκβολείς (extruders),



Εικόνα 1.1 Παρασκευή νήματος σύνθετου υλικού

εξωθείται σε μορφή νήματος και τυλίγεται σε καρούλι και διατίθεται προς χρήση σε εκτυπωτές. Στην εν λόγω αναφορά, μελετήθηκε η επίδραση του ποσοστού ινών καθώς και των διαστάσεων τους, σε μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων όπως το όριο θραύσης, το όριο διαρροής, το μέτρο ελαστικότητας, η σκληρότητα και η ελατότητα. Στην [4], οι Kok και Tze, μελέτησαν και κατασκεύασαν μηχανισμό προσαγωγής κοντών ινών επάνω στο πολυμερές την ώρα της εκτύπωσης χωρίς όμως να αναμειγνύεται. Καθώς το εκτυπωμένο τεμάχιο έχει πορώδες, οι ίνες έρχονται να καλύψουν αυτά τα κενά και να ενισχύσουν την αντοχή του τεμαχίου. Οι Khairul Izwan Ismail, Tze Chuen Yap, Rehan Ahmed [5], προσδιορίζουν τρεις τρόπους ενσωμάτωσης κοντών ινών ενίσχυσης σε εκτυπωμένα τεμάχια. Πριν την εκτύπωση με ανάμειξη με πλαστικά σφαιρίδια, κατά την εκτύπωση μέσα στην κεφαλή ή το ακροφύσιο και μετά την εκτύπωση ανάμεσα στις στρώσεις του πολυμερούς. Οι Khairul Izwan Ismail, Suganti Ramarad και Tze Chuen Yap [6], κατασκεύασαν μηχανισμό δοσομέτρησης που προσθέτει επί τόπου την ώρα της εκτύπωσης ίνες ενίσχυσης ανάμεσα στις στρώσεις του πολυμερούς. Ο μηχανισμός τοποθετείται σε εκτυπωτή χωρίς να αλλοιώνονται οι δυνατότητές του σχετικά με τον όγκο και την ταχύτητα εκτύπωσης. Και σε αυτή την περίπτωση δεν προβλέπεται ανάμειξη των ινών. Στην [7], περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας νημάτων πολυπροπυλενίου (PP) για εκτύπωση με διαφορετικές κάθε φορά περιεκτικότητες και μετριέται στο τέλος η μηχανική αντοχή των δειγμάτων. Η αύξηση του ποσοστού ινών συνοδεύεται από αύξηση της αντοχής μέχρι το 22% αλλά έπειτα παρατηρείται πτώση. Η μείξη των δύο συστατικών πραγματοποιείται σε εκβολείς διπλού κοχλίου. Στην [8] αναφέρονται οι τρεις εναλλακτικοί μηχανισμοί για την εξώθηση πλαστικού σε εκτυπωτή που είναι οι τύπου σύριγγας, νήματος και κοχλίου. Ανάμειξη σωματιδίων με ρευστό επιτυγχάνεται μεταξύ άλλων και με στατικούς αναμεικτές [13] που είναι συσκευές που τοποθετούνται in-line στη διαδικασία.

1.4 Περίληψη κεφαλαίων

Στο 2^ο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι επτά βασικές μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης και οι κλασσικές κατεργασίες με αφαίρεση υλικού. Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται η συμβολή του υπολογιστή στην σχεδίαση, κατασκευή και βελτιστοποίηση των προϊόντων μια διαδικασία που επικρατεί αποκλειστικά πλέον εδώ και δεκαετίες. Ακολουθεί το πρακτικό μέρος όπου στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται η διαδικασία σχεδίασης της κεφαλής εκτύπωσης βάση των προδιαγραφών που τίθενται. Στο 5^ο κεφάλαιο ακολουθεί η ανάλυση της κατασκευής, με την υλοποίηση της προσομοίωσης ροής και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την λειτουργία. Στο 6^ο κεφάλαιο μελετάται η κατασκευή σύμφωνα με τις μεθόδους κατεργασιών που αναφέρονται 2^ο κεφάλαιο και γίνεται μια εκτίμηση του κόστους κατασκευής. Τέλος στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικότερα συμπεράσματα και προτείνεται μελλοντική δουλειά και εξέλιξη της παρούσας εργασίας.

Κατεργασίες με Πρόσθεση και Αφαίρεση Υλικού

2.1 Εισαγωγή

Με τον όρο «Τρισδιάστατη Εκτόπωση» ή αλλιώς «Κατεργασία με Πρόσθεση υλικού» εννοούμε τις σύγχρονες αυτές μεθόδους με τις οποίες προστίθεται ένα στρώμα υλικού πάνω σε ένα άλλο σε μια επιφάνεια υποστήριξης με σκοπό τη δημιουργία τελικού τεμαχίου ή πρωτοτύπου και γι' αυτό χρησιμοποιείται και ο όρος «Ταχεία Προτυποποίηση» [21]. Σε αντίθεση με την 3Δ εκτόπωση, στις κλασσικές κατεργασίες έχουμε αφαίρεση υλικού από το ακατέργαστο τεμάχιο με διάφορους τρόπους, συνήθως τις περισσότερες φορές με κοπή χρησιμοποιώντας ένα κοπτικό εργαλείο το οποίο αφαιρεί υλικό παραμορφώνοντας πλαστικά το ακατέργαστο τεμάχιο [16].

2.2 Κατεργασίες με Πρόσθεση Υλικού – 3Δ Εκτόπωση

2.2.1 Τύποι 3Δ εκτόπωσης

1. Εξώθηση υλικού (*Material extrusion*)

Είναι η πιο διαδεδομένη και οικονομική μέθοδος 3Δ εκτόπωσης και γι' αυτό χρησιμοποιείται από πολλούς οικιακούς χρήστες. Το υλικό που συνήθως διατίθεται σε καρούλι, προωθείται από κατάλληλο μηχανισμό (βλ. Εικ. 2.1) και εξωθείται μέσα από ακροφύσιο που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία. Στη συνέχεια εναποτίθεται στην τράπεζα εκτόπωσης και προσκολλάται πάνω σε αυτήν ή στο προηγούμενο στρώμα υλικού που ήδη υπάρχει. Το υλικό τοποθετείται στο σωστό σημείο με τη σχετική κίνηση του ακροφυσίου και της τράπεζας. Είναι καθοριστικής σημασίας οι θερμοκρασίες τήξης του υλικού και της τράπεζας εκτόπωσης και η πίεση (πρέπει να είναι συνεχόμενη και σταθερή) με την οποία προωθεί ο μηχανισμός το υλικό

μέσα στο ακροφύσιο ώστε να προκύψει σωστή δομή στο τελικό τεμάχιο. Αποδίδεται με τα αρχικά FDM (Fused Deposition Modeling).

2. Πολυμερισμός σε δεξαμενή (*Vat photopolymerisation*)

Σε αυτή τη μέθοδο που είναι γνωστή ως SLA (Στερεολιθογραφία), υγρή ρητίνη που βρίσκεται μέσα σε δεξαμενή, δέχεται όπου απαιτείται σύμφωνα με το μοντέλο, υπεριώδες φως (UV) και άμεσα στερεοποιείται με πολυμερισμό (βλ. Εικ. 2.2). Υπάρχει πλατφόρμα εκτόπωσης που μετά από τη δημιουργία μιας στρώσης, κατεβαίνει για να υποδεχτεί την επόμενη. Η δέσμη φωτός κατευθύνεται με τη βοήθεια κατόπτρων στο σωστό σημείο. Επειδή το υλικό είναι υγρό, προκύπτει η ανάγκη για εκτόπωση εκτός του κανονικού μοντέλου και δομής υποστήριξης η οποία μετά πρέπει να αφαιρεθεί.

3. Σύντηξη σε Τράπεζα Σκόνης (*Powder Bed Fusion - PBF*)

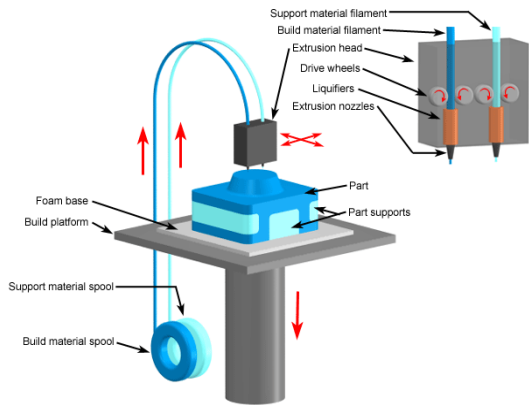
Σε αυτήν τη μέθοδο (βλ Εικ. 2.3), το υλικό βρίσκεται σε κονιορτοποιημένη μορφή μέσα σε κατάλληλο χώρο και απλώνεται με ειδικό μηχανισμό πάνω στην πλατφόρμα εκτόπωσης μετά από τη δημιουργία κάθε στρώσης. Η θερμότητα που απαιτείται για τη σύντηξη του υλικού, παρέχεται από laser ή από δέσμη ηλεκτρονίων. Οι διάφορες παραλλαγές της μεθόδου είναι οι SLS (Selective Laser Sintering - Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ) για πολυμερή, SLM (Selective Laser Melting - Επιλεκτική τήξη με λέιζερ) για μέταλλα, DMLS (Direct Metal Laser Sintering - Απευθείας πυροσυσσωμάτωση μετάλλων με λέιζερ) για μέταλλα και EBM (Electro Beam Melting - Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων) για μέταλλα.

4. Εκτόξευση Υλικού (*Material Jetting*)

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται εδώ είναι κυρίως κεριά και πολυμερή καθώς εκτοξεύονται με τη μορφή σταγονιδίων (βλ. Εικ. 2.4) σε συνεχή ή κατ' απαίτηση μορφή (Drop on Demand - DOD). Η μέθοδος μοιάζει με την εκτόπωση μελανιού στις δύο διαστάσεις πάνω σε χαρτί. Τα σταγονίδια του υλικού μόλις πέσουν στην επιφάνεια εκτόπωσης στερεοποιούνται και με τη δημιουργία μιας στρώσης, η επιφάνεια υποχωρεί για να δεχτεί την επόμενη. Το τεμάχιο χρειάζεται επιπλέον σκλήρυνση με υπεριώδες φως.

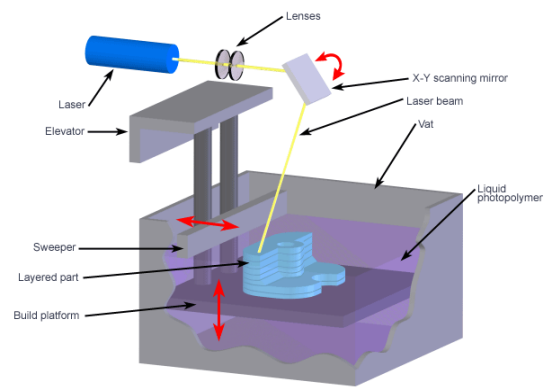
5. Εκτόξευση Συνδετικού Υλικού (*Binder Jetting*)

Με τη μέθοδο της εκτόξευσης συνδετικού υλικού, το τελικό τεμάχιο αποτελείται από το κονιορτοποιημένο υλικό που υπάρχει στο χώρο εκτόπωσης καθώς και από το συνδετικό υλικό που εκτοξεύεται και που είναι σε υγρή μορφή δηλαδή τα δυο υλικά συνυπάρχουν. Η εκτόξευση του συνδετικού υλικού γίνεται με παρόμοιο τρόπο όπως και στη μέθοδο Material jetting δηλαδή με θερμικούς ή πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Η κεφαλή εκτόξευσης κινείται πάνω από την επιφάνεια εκτόπωσης και εκτοξεύει στο κατάλληλο σημείο το συνδετικό υλικό. Με αυτή τη μέθοδο προκύπτουν εύκολα πολύχρωμα τεμάχια. Γενικά τα τεμάχια έχουν περιορισμένη αντοχή και λειτουργικότητα αλλά δεν απαιτείται υποστήριξη κατά την εκτόπωση όπως και στη μέθοδο με σύντηξη σκόνης. Αναφέρεται και ως μέθοδος 3DP και αναπτύχθηκε στο MIT (βλ. Εικ. 2.5).



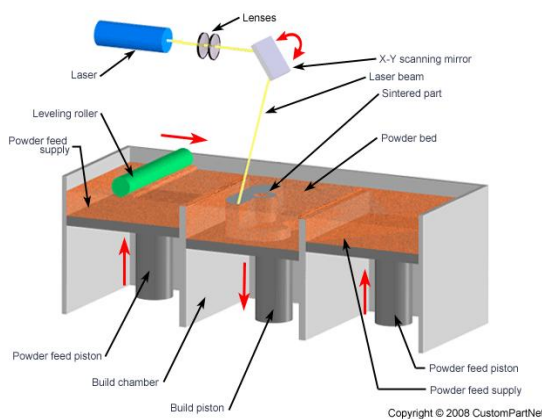
Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 2.1 Εξώθηση υλικού



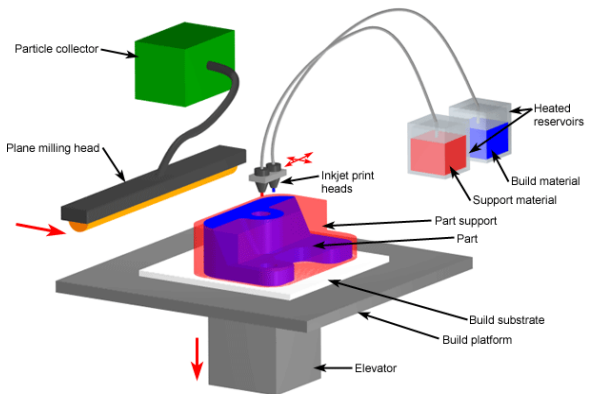
Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 2.2 Στερεολιθογραφία SLA



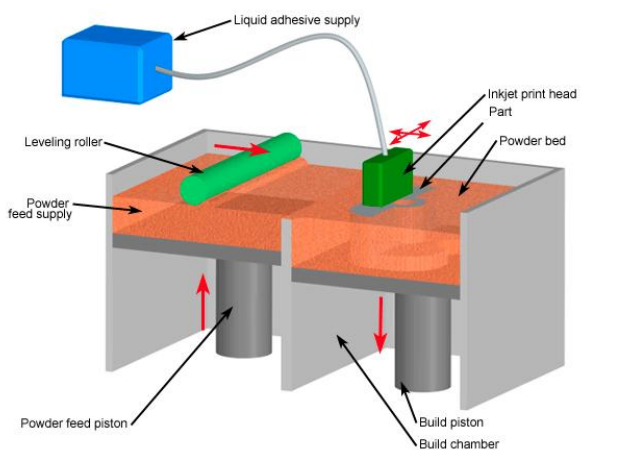
Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 2.3 Σύντηξη σε τράπεζα σκόνης



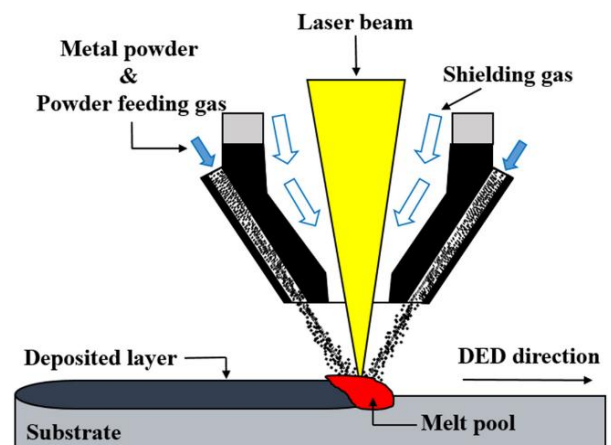
Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 2.4 Εκτόξευση υλικού

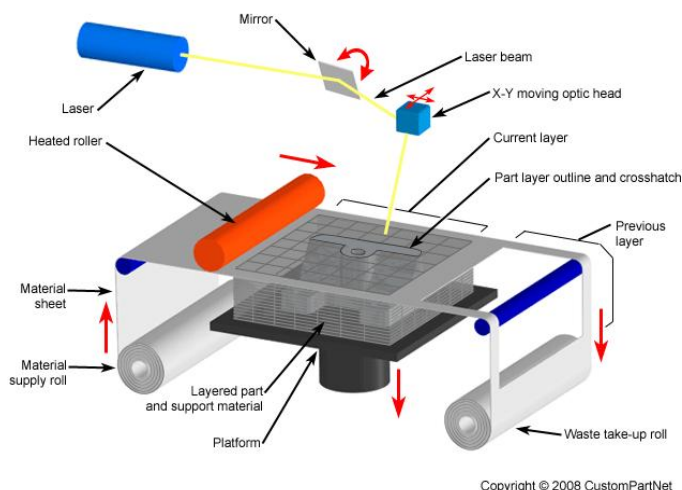


Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 2.5 Εκτόξευση συνδετικού υλικού



Εικόνα 2.6 Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια



Εικόνα 2.7 Στρωμάτωση υλικού

6. Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια (*Directed Energy Deposition - DED*)

Πρόκειται για μια πιο σύνθετη και πολύπλοκη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιείται κυρίως για επιδιόρθωση βλαβών ή ατελειών σε υπάρχοντα τεμάχια ή προσθήκη υλικού σε αυτά. Υπάρχει ένα κατευθυνόμενο σε τέσσερις ή και πέντε άξονες ακροφύσιο (βλ. Εικ. 2.6) που εναποθέτει το υλικό προς εκτύπωση πάνω στο τεμάχιο. Το υλικό μπορεί να είναι σε μορφή σύρματος ή σκόνης. Με αυτή τη μέθοδο μπορούν να εκτυπωθούν όλα τα υλικά αλλά κυρίως εφαρμόζεται για μέταλλα. Η τήξη του υλικού πάνω στο κομμάτι γίνεται με δέσμη ηλεκτρονίων ή λέιζερ. Συνήθως το περιβάλλον γύρω από το σημείο προστατεύεται με αδρανές αέριο. Επιπρόσθετα, η μέθοδος κάποιες φορές απαιτεί κατεργασία αφαίρεσης υλικού (κοπή σε εργαλειομηχανή) για τη πρόσδοση της τελικής μορφής. Παραλλαγές στην ονομασία της μεθόδου είναι οι Laser engineered net shape – LENS, Direct metal deposition – DMD, Directed light fabrication, Electron beam freeform fabrication – EBFF κτλ.

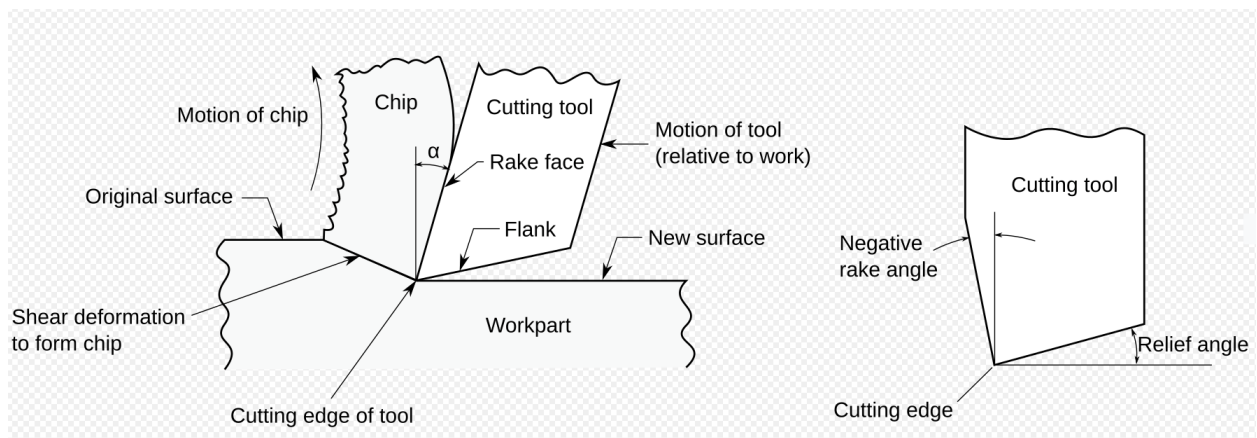
7. Στρωμάτωση φύλλων (*Sheet Lamination*)

Στην στρωμάτωση φύλλων (βλ. Εικ. 2.7), χρησιμοποιείται οποιοδήποτε υλικό είναι διαθέσιμο σε φύλλα και αφού συγκολληθεί το πρώτο στρώμα στην επιφάνεια εκτύπωσης, μια κεφαλή λέιζερ κόβει το προφίλ επάνω στο υλικό. Στη συνέχεια επικολλάται νέο φύλλο και κόβεται το προφίλ του επόμενου επιπέδου πάντα βάσει του κώδικα. Στο τέλος αφαιρείται το πλεονάζον υλικό και προκύπτει το τελικό τεμάχιο. Για εκτύπωση μετάλλου, η συγκόλληση των φύλλων γίνεται με υπερήχους. Για χαρτί, πλαστικό και άλλα, η κοπή γίνεται με λέιζερ. Αντίστοιχα οι μέθοδοι ονομάζονται UAM – Ultrasonic additive manufacturing και LOM – Laminated object manufacturing.

2.3 Κατεργασίες με Αφαίρεση Υλικού



Εικόνα 2.8 Πλάνη (αριστερά) - Ψηφιακά ελεγχόμενος τόνος (δεξιά)
(Wikipedia)



Εικόνα 2.9 Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου - (Wikipedia)

Στις κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, σε ειδικές μηχανές που ονομάζονται «εργαλειομηχανές - ΕΜ» (βλ. Εικ. 2.8), από ακατέργαστο τεμάχιο αφαιρείται υλικό με ελεγχόμενο τρόπο και με τη χρήση κοπτικού εργαλείου, έτσι ώστε να προκύψει η επιθυμητή μορφή του τελικού τεμαχίου. Η αφαίρεση του υλικού συμβαίνει με εισχώρηση σε αυτό της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου το οποίο προκαλεί πλαστική παραμόρφωση του υλικού και με τη σχετική κίνηση του εργαλείου ως προς το κομμάτι προκύπτει η απότμηση του αποβλίττου (περιττό υλικό).

Από τα τέλη του 19^{ου} κάνουν την εμφάνισή τους και χρησιμοποιούνται κατά κόρον οι εργαλειομηχανές (τόννος, φρέζα, πλάνη κ.α.) μέχρι και τις μέρες μας, παίζοντας πρωταρχικό ρόλο στη 2^η βιομηχανική επανάσταση με την κατασκευή πληθώρας βιομηχανικών και μη προϊόντων ανά τον κόσμο.

Σε αντίθεση με την αφαίρεση υλικού με κοπτικό εργαλείο, μεταγενέστερα έρχονται να συμπληρώσουν τις κατεργασίες αυτές πιο σύγχρονες μέθοδοι όπως η ηλεκτροδιάβρωση, η υδροκοπή και η κοπή με κατευθυνόμενη δέσμη ενέργειας (λείζερ).

2.3.1 Κοπτικά εργαλεία



Εικόνα 2.10 Κονδύλια φρέζας - φωτο Seco tools

Το κοπτικό εργαλείο (βλ. Εικ. 2.9) διαθέτει μία ή και περισσότερες κοπτικές ακμές και κατασκευάζεται από υλικό σκληρότερο από αυτό που προορίζεται να κατεργαστεί. Η κοπτική ακμή χρησιμεύει στο να μπορεί να εισχωρεί το κοπτικό μέσα στο ακατέργαστο υλικό και να αφαιρεί το απόβλιττο (γρέζι). Η γεωμετρία της κοπτικής ακμής και κατ' επέκταση του κοπτικού εργαλείου είναι καθοριστικής σημασίας και αυστηρά καθορισμένη. Η γωνία αποβλίττου - rake angle α (βλ. Εικ. 2.9) και η γωνία ελευθερίας - relief angle είναι οι δύο βασικές γωνίες που χρειάζεται ένα κοπτικό για να δουλέψει σωστά. Η πρώτη χρησιμεύει στην κοπή και οδήγηση του αποβλίττου εκτός του τεμαχίου και η δεύτερη στην αποφυγή τριβής του κοπτικού με το κομμάτι και στην δημιουργία σωστής τραχύτητας επιφανείας. Ανάλογα το υλικό του τεμαχίου και το είδος της κατεργασίας, οι τιμές των γωνιών αυτών αλλά και ο αριθμός των κοπτικών ακμών ποικίλουν (εργαλεία τόννου, φρέζας, τρυπάνια, σπειροτόμοι κτλ.) (βλ. Εικ. 2.10).

2.3.2 Συνθήκες κοπής

Για την αφαίρεση του υλικού, είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι συνθήκες με τις οποίες θα γίνει αυτή και εξαρτάται από το υλικό του κομματιού, το υλικό του εργαλείου καθώς και από το είδος και τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής.

Εκτός από τη σχετική κίνηση εργαλείου και υλικού πρέπει να υπάρχει και μια κύρια περιστροφική κίνηση μιας ατράκτου που είτε προσδένεται το κομμάτι είτε το εργαλείο (τόρνος ή φρέζα αντίστοιχα). Οπότε προκύπτουν τρεις συνθήκες κοπής:

- Η κοπτική ταχύτητα V_c σε m/min
- Η πρόωση κοπής F σε mm/min
- Το βάθος κοπής a σε mm

Η κοπτική ταχύτητα συνδέεται με τις στροφές της ατράκτου με τη σχέση

$$V_c = \frac{\pi * D * S}{1000}$$

όπου D η διάμετρος σε mm και S η περιστροφική ταχύτητα της ατράκτου σε rpm.

Ειδικά για το φρεζάρισμα, η πρόωση μπορεί να εκφραστεί ως

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχεδίαση, Ανάλυση και Κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή CAD/CAM/CAE

3.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, οι βιομηχανίες δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στον ανταγωνισμό εκτός εάν τα προϊόντα που παράγουν έχουν καλή ποιότητα με χαμηλό συνάμα κόστος και μικρούς χρόνους ανάπτυξης και παράδοσης. Παράλληλα, η ανάπτυξη των υπολογιστών που πλέον διαθέτουν πολύ μεγάλη επεξεργαστική ισχύ, άφθονη μνήμη και εντυπωσιακά γραφικά, καθιστά την υλοποίηση υπολογισμών αλλά και άλλων πολύπλοκων μηχανολογικών εργασιών όπως η σχεδίαση και κατασκευή, υπόθεση σχετικά εύκολη μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος ανάπτυξης του προϊόντος. Κατά τον κύκλο ανάπτυξης προϊόντος, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται περιγράφονται από τους όρους *Computer-aided Design (CAD)*, *Computer-aided Manufacturing (CAM)* και *Computer-aided Engineering (CAE)*.

3.2 Computer-aided Design (CAD)

3.2.1 Γενικά

Με τον όρο *Computer-aided Design*, νοείται η σχεδίαση αντικειμένων χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή και αναφέρεται σε

1. Εκ νέου σχεδίαση αντικειμένων, δηλαδή στην υλοποίηση μιας νέας ιδέας για κάποιο προϊόν.
2. Τροποποίηση υπαρχόντων σχεδίων που συμβαίνει στην περίπτωση π.χ. της παραγωγής μιας βελτιωμένης ή αναθεωρημένης έκδοσης ενός προϊόντος όπου αλλάζουν κάποια επιμέρους χαρακτηριστικά.
3. Σχεδίαση σε δύο και τρεις διαστάσεις (2Δ και 3Δ).
4. Εξαγωγή εκτυπώσιμων σχεδίων για κατασκευή.

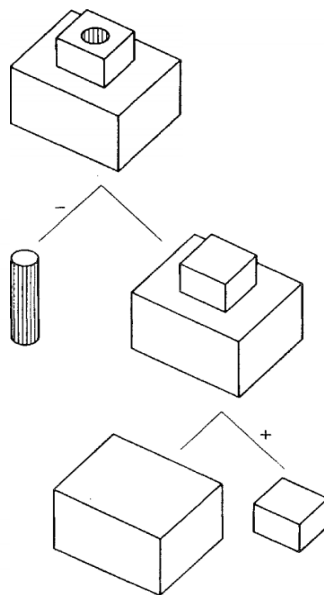
Τα παραπάνω υλοποιούνται σε λογισμικά CAD τα οποία χρησιμοποιούν κατάλληλες βιβλιοθήκες λογισμικού γεωμετρίας, για να παράγουν 3D και 2D γεωμετρικά αντικείμενα και μοντέλα. Στα λογισμικά αυτά, συνήθως συμπεριλαμβάνονται και εργαλεία ανάλυσης (Finite Element Analysis) καθώς και λογισμικά CAM.

3.2.1 Γεωμετρική μοντελοποίηση

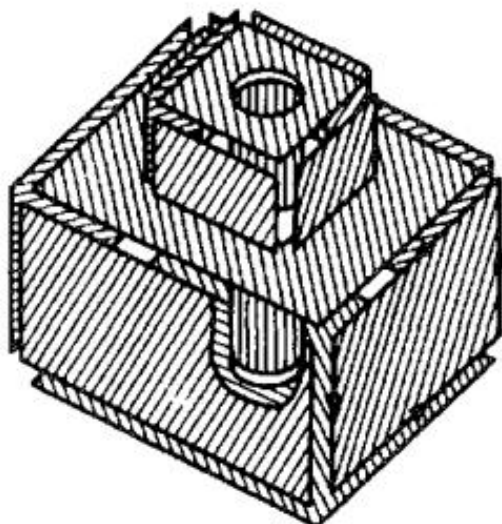
Για τη δημιουργία σχεδίων στον υπολογιστή, χρησιμοποιούνται διάφορες μορφές γεωμετρικής μοντελοποίησης:

- Μοντελοποίηση τύπου «σύρματος» (Wireframe): Απεικονίζονται μόνο οι ακμές – καμπύλες του σχεδίου.
- Μοντελοποίηση με επιφάνειες (Surface modeling): Στο σχέδιο απεικονίζονται μόνο οι εξωτερικές επιφάνειες του αντικειμένου χωρίς να δίνεται πληροφορία για το εσωτερικό του.
- Μοντελοποίηση με στερεά (Solid modeling): Το αντικείμενο απεικονίζεται πλήρως.
- Παραμετρική μοντελοποίηση (Parametric modeling): Γίνεται χρήση διαστασιολόγησης και περιορισμών.

Κατά τη σχεδίαση, επικρατούν δύο βασικοί τύποι γεωμετρικής μοντελοποίησης.



Εικόνα 3.1 CSG Constructive Solid Geometry - Μοντελοποίηση με στερεά



Εικόνα 3.2 B-Rep Boundary representation - Μοντελοποίηση με επιφάνειες

Μοντελοποίηση μέσω στερεών (CSG – Constructive Solid Geometry). Με αυτόν τον τύπο μοντελοποίησης, τα τελικά μοντέλα συντίθεται από απλούστερα μοντέλα όπως αυτά του κύβου, του κυλίνδρου και άλλων στερεών. Η σύνθεση πραγματοποιείται με τελεστές Boole (βλ. Εικ. 3.1)

Μοντελοποίηση μέσω επιφανειών (B-Rep – Boundary representation). Εδώ, το μοντέλο δημιουργείται από την ένωση των εξωτερικών του επιφανειών. Αρχικά σχεδιάζονται οι εξωτερικές επιφάνειες και στη συνέχεια ενώνονται με κατάλληλες εντολές (knit) στο σχεδιαστικό περιβάλλον. Ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα της πρόσδοσης όγκου - υλικού εσωτερικά. (βλ. Εικ. 3.2)

3.2.2 Η έννοια της παραμετρικής σχεδίασης

Στα σύγχρονα λογισμικά σχεδίασης, το μοντέλο απαρτίζεται από ένα σύνολο οντοτήτων. Η κάθε οντότητα (2D σχήματα, επιφάνειες κτλ) περιγράφεται από παραμέτρους στις οποίες προσδίδεται κάποια τιμή. Οι διαστάσεις που αποτελούν τις πιο σημαντικές παραμέτρους μιας οντότητας του σχεδίου, όταν αλλάζονται, ο ανασχεδιασμός του μοντέλου γίνεται αυτόματα. Δεν χρειάζεται το σβήσιμο ακμών και η σχεδίαση εκ νέου, αλλά η αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων. Έτσι εξοικονομείται χρόνος κατά την αρχικό σχεδιασμό αλλά και κατά τις αναθεωρήσεις ενός σχεδίου. Η παραμετρικότητα συνίσταται και σε άλλες δυνατότητες που παρέχουν τα λογισμικά σχεδίασης όπως της προς τα πίσω μετακίνησης χρονικά της κατάστασης του σχεδίου για την πραγματοποίηση αλλαγών και ανασχεδιασμού των επόμενων φάσεων αυτόματα. Επίσης, η χρήση εξισώσεων με τις οποίες συνδέονται οι παράμετροι του σχεδίου, αλλά και η δυνατότητα δημιουργίας παραλλαγών αυτού, συνιστούν παραμετρικότητα.

3.3 Computer-aided Manufacturing (CAM)

Με τον όρο CAM, νοείται η χρήση λογισμικών για την κατασκευή ή κατεργασία τεμαχίων. Με τη βοήθεια αυτών των λογισμικών, είναι δυνατή η δημιουργία διαδοχικών φάσεων κατεργασίας (φασεολόγια) στα οποία ορίζονται τα κοπτικά εργαλεία, οι συνθήκες κοπής καθώς και οι στρατηγικές κατεργασίας. Ο υπολογιστής έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει πιθανές συγκρούσεις του κοπτικού εργαλείου υπολογίζοντας ακριβώς την τροχιά του και να πραγματοποιήσει προσομοίωση της κατεργασίας με εντυπωσιακά γραφικά

Η πορεία εργασίας στα λογισμικά CAM υλοποιείται με τα παρακάτω βασικά βήματα

- Εισάγεται το 3D μοντέλο
- Καθορίζονται οι διαστάσεις του ακατέργαστου υλικού (stock)
- Επιλέγεται η εργαλειομηχανή
- Επιλέγονται τα κοπτικά εργαλεία
- Ορίζονται οι διαδοχικές φάσεις κατεργασίας
- Επιλέγονται οι στρατηγικές κατεργασίας για κάθε φάση (εκχόνδριση, ημιαποπεράτωση, αποπεράτωση)
- Εκτελείται η προσομοίωση
- Το πρόγραμμα εξάγει στατιστικά για τις κοπές (χρόνοι κατεργασίας)
- Εξάγεται ο κώδικας που θα εκτελεστεί στην εργαλειομηχανή

3.4 Computer-aided Engineering (CAE)

Με τον όρο “Computer-aided Engineering”, νοείται η χρήση προηγμένων λογισμικών για την ανάλυση και βελτιστοποίηση του σχεδίου του προϊόντος κατά τον κύκλο ανάπτυξης. Τέτοια λογισμικά είναι τα COMSOL, ANSYS, ABAQUS κ.α. Με τη χρήση αυτών των λογισμικών, επιτυγχάνεται η προσομοίωση και ανάλυση της συμπεριφοράς ενός συστήματος, η βελτιστοποίηση μιας ή και περισσότερων παραμέτρων του σχεδίου προτού φτιαχτεί το πρωτότυπο. Δηλαδή από την αρχική ιδέα μέχρι και την οριστική μορφή του προϊόντος, εξοικονομείται χρόνος και χρήμα πριν από τον προγραμματισμό της παραγωγή του.

Ο τεχνολογικός σχεδιασμός (CAE) στηρίζεται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis – FEA ή Finite Element Method – FEM). Πρόκειται για μια μέθοδο με την οποία επιλύονται προσεγγιστικά με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν μαθηματικά την κατάσταση και λειτουργία του υπό σχεδίαση μοντέλου. Για παράδειγμα, μελετάται αεροδυναμικά η μορφή που πρέπει να έχει η αεροτομή ενός αυτοκινήτου ώστε αυτό να εμφανίζει συγκεκριμένη συμπεριφορά. Η ροή του αέρα γύρω από την αεροτομή, περιγράφεται από τις εξισώσεις Navier – Stokes που ως γνωστό δεν μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά. Έτσι, η επίλυση γίνεται προσεγγιστικά με τη χρήση λογισμικού CAE.

Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα, μετατρέπονται σε σύστημα αλγεβρικών [14] εξισώσεων όπου οι τελευταίες επιλύονται σχετικά εύκολα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή αλλά προσεγγιστικά, θυσιάζοντας ένα μέρος της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που στα προβλήματα του μηχανικού είναι ένα σχετικό ζήτημα και ενδιαφέρει στο βαθμό που το προϊόν πληρεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Το CAE, ως βασικό συστατικό της σχεδίασης ενός προϊόντος, υλοποιείται κυρίως σε τρία στάδια: την προεπεξεργασία – *pre processing*, την επίλυση – *solving* και την μετεπεξεργασία – *post processing*.

3.4.1 Προεπεξεργασία

Κατά την προεπεξεργασία, ο μηχανικός εισάγει (input) στο λογισμικό τα απαραίτητα στοιχεία εκείνα για να πραγματοποιηθεί η επίλυση από τον υπολογιστή.

- Καθορίζεται η γεωμετρία η οποία μελετάται και που αποτελεί το υπολογιστικό πεδίο.
- Το υπολογιστικό πεδίο χωρίζεται σε επιμέρους μικρά μη επικαλυπτόμενα στοιχεία που αποτελούν το πλέγμα.
- Καθορίζονται τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, όπως ροή ρευστού, μετάδοση θερμότητας, βαρυτικά ή ηλεκτρικά πεδία κα.
- Ορισμός των υλικών του μοντέλου
- Καθορισμός των συνθηκών του προβλήματος που επικρατούν στα όρια του συστήματος (συνοριακές ή οριακές συνθήκες) όπως ταχύτητα εισόδου της ροής, πίεση στην έξοδο κτλ.

Σε ένα πρόβλημα υπολογιστικής ρευστομηχανικής για παράδειγμα (CFD – Computational Fluid Dynamics), η λύση προκύπτει από τον υπολογισμό ταχύτητας ροής και πίεσης στην απλούστερη περίπτωση, σε κόμβους μέσα στα στοιχεία του υπολογιστικού πεδίου. Όσο πιο πολλά είναι τα στοιχεία που χωρίζεται η γεωμετρία, τόσο πιο ακριβής είναι η λύση που προκύπτει. Αυτό όμως σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος υπολογισμού και καλύτερος ηλεκτρονικός υπολογιστής. Στην πράξη επιδιώκεται το πλέγμα να είναι λεπτομερέστερο στα σημεία που η ροή παρουσιάζει ιδιαιτερότητες και στο υπόλοιπο πεδίο τα στοιχεία να είναι μεγαλύτερου μεγέθους για να εξοικονομούνται υπολογιστικοί πόροι.

3.4.2 Επίλυση

Από τις διαθέσιμες τεχνικές αριθμητικής επίλυσης, αυτή που συναντάται πιο συχνά στα γνωστά υπολογιστικά πακέτα CFD, είναι η μέθοδος πεπερασμένων όγκων. Σε γενικές γραμμές, τα βήματα που ακολουθούνται από αυτόν τον αλγόριθμο είναι τα παρακάτω:

- Ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων της ροής σε κάθε ένα πεπερασμένο όγκο (cell) του υπολογιστικού πεδίου

- Διακριτοποίηση – Μετατροπή των εξισώσεων που προέκυψαν στο πρώτο βήμα, σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων
- Επίλυση του συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων με επαναληπτική μέθοδο

Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων έναντι των άλλων μεθόδων CFD, έχει να κάνει στο ότι βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας για κάθε πεπερασμένο όγκο που είναι και φυσικά ορθό.

Το σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτει λύνεται από τα πακέτα CFD με διάφορες μεθόδους με την πιο δημοφιλή να είναι η μέθοδος επίλυσης τριδιαγώνιου γραμμικού συστήματος (TDMA - tridiagonal matrix algorithm). Αρχικά υπολογίζονται οι ταχύτητες και έπειτα υπολογίζεται η πίεση από τον αλγόριθμο SIMPLE. Στα εμπορικά πακέτα CFD ο χρήστης μπορεί να επιλέξει και άλλες μεθόδους επίλυσης ανάλογα το πρόβλημα, όπως τη μέθοδο Gauss - Seidel.

3.4.3 Μετεπεξεργασία

Από την επίλυση προκύπτουν τεράστιοι όγκοι δεδομένων και αριθμών που για να γίνουν εύκολα αντιληπτοί και χρήσιμοι χρειάζονται μετεπεξεργασία. Όλα τα σύγχρονα πακέτα, διαθέτουν εργαλεία οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων της επίλυσης για να μπορεί ο χρήστης να κατανοήσει ποιοτικά και ποσοτικά αυτά τα αποτελέσματα. Τέτοια εργαλεία είναι:

- Απεικόνιση του υπολογιστικού πεδίου και του πλέγματος
- Διαγράμματα διανυσμάτων που απεικονίζουν ταχύτητα ή άλλα μεγέθη
- Διαγράμματα ισοψών καμπυλών (contour plots)
- 2D και 3D διαγράμματα επιφανειών
- Απεικόνιση τροχιάς σωματιδίων
- Δημιουργία κινούμενων γραφικών animation

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχεδίαση Κεφαλής

4.1 Εισαγωγή

Για τον σχεδιασμό της κεφαλής εκτύπωσης, χρησιμοποιήθηκε το δημοφιλές λογισμικό Solidworks 2021. Πρόκειται για πλήρες μηχανολογικό πακέτο όπου παρέχεται η δυνατότητα χρήσης εργαλείων για παραμετρική σχεδίαση, φωτορεαλισμό καθώς και για υπολογισμό φορτίσεων ή χαρακτηριστικών ροής, για εκπόνηση προγραμμάτων κατεργασιών κοπής κ.α. Από την αρχή της διαδικασίας σχεδίασης, υλοποιήθηκαν παράλληλα αρχεία ψηφιακής συναρμολόγησης (assembly) της κεφαλής και του εκτυπωτή συνολικά, τα οποία βοήθησαν στον καθορισμό της τελικής μορφής του κάθε εξαρτήματος και της κεφαλής. Τα εξαρτήματα σχεδιάστηκαν είτε μεμονωμένα, είτε πάνω στα αρχεία συναρμολόγησης.

4.2 Καθορισμός προδιαγραφών κεφαλής εκτύπωσης

Η εν λόγω κεφαλή εκτύπωσης, θα πρέπει να είναι σε θέση να αναμειγνύει σκόνη κοντών ινών άνθρακα στο τηγμένο πολυμερές. Αυτό θα γίνεται κατά τη φάση της εξώθησης του υλικού σύμφωνα με τις εντολές του προγράμματος που εκτελείται στον εκάστοτε εκτυπωτή. Όλος ο σχεδιασμός στηρίχθηκε στην προοπτική τοποθέτησης της κεφαλής σε υπαρχών εκτυπωτή με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά καθώς και σε οποιονδήποτε παρόμοιο. Έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν τυποποιημένα υλικά και εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στους

τρισεπίστας εκτυπωτές του εμπορίου, πάντα σε συνδυασμό και με τα δεδομένα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, σχετικά με τους μηχανισμούς ανάμειξης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η κεφαλή εκτύπωσης θα πρέπει να διαθέτει τις εξής προδιαγραφές:

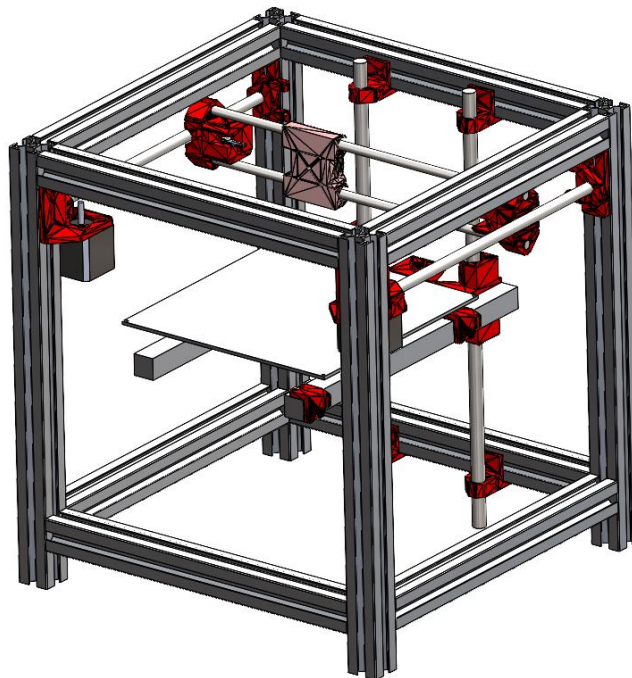
- Συμβατότητα με τον εκτυπωτή *Hypercube Evolution* [1] που είναι και ο προσωπικός τρισεπίστας εκτυπωτής του γράφοντος. Η συμβατότητα αφορά τον τρόπο στήριξης της κεφαλής στο φορείο του Χ άξονα.
- Κατάλληλο μέγεθος έτσι ώστε να μην επηρεάζεται ο ωφέλιμος όγκος εκτύπωσης δηλαδή οι ωφέλιμες διαδρομές στους άξονες Χ, Υ και Ζ να παραμείνουν όσο γίνεται ίδιες.
- Δεξαμενή σκόνης κοντών ινών άνθρακα ή υάλου.
- Κατάλληλο θάλαμο ανάμειξης όπου θα εισέρχεται η σκόνη και θα αναμειγνύεται με το πλαστικό καθώς και μηχανισμό που θα πραγματοποιεί την ανάμειξη.
- Μηχανισμό προσαγωγής της σκόνης μέσα στο θάλαμο ανάμειξης.
- Ψύκτρα για την διατήρηση του νήματος σε χαμηλή θερμοκρασία μέχρι αυτό να φτάσει στην περιοχή τήξης.
- Ακροφύσιο για την έξοδο του τηγμένου πολυμερούς ή του μείγματος.
- Ανεμιστήρα για την ψύξη του τηγμένου πολυμερούς μετά την έξοδό του από το ακροφύσιο.

4.3 Σχεδίαση κεφαλής

Όπως προαναφέρθηκε, η σχεδίαση προβλέπει την τοποθέτηση της κεφαλής σε υπάρχων εκτυπωτή [17] που φαίνεται στο σχήμα 4.1. Αρχικά, για την εκπόνηση των σχεδίων, έγινε εισαγωγή στο λογισμικό σχεδίασης όλων των αρχείων των εξαρτημάτων του εκτυπωτή σε μορφή *stl* για να δημιουργηθεί το ψηφιακό μοντέλο του και να υπάρχει καλύτερη εποπτεία. Τα σχέδια αυτά υπάρχουν και είναι διαθέσιμα ελεύθερα προς χρήση και τροποποίηση. Πάνω εκεί έγινε η ανάπτυξη των σχεδίων της κεφαλής.



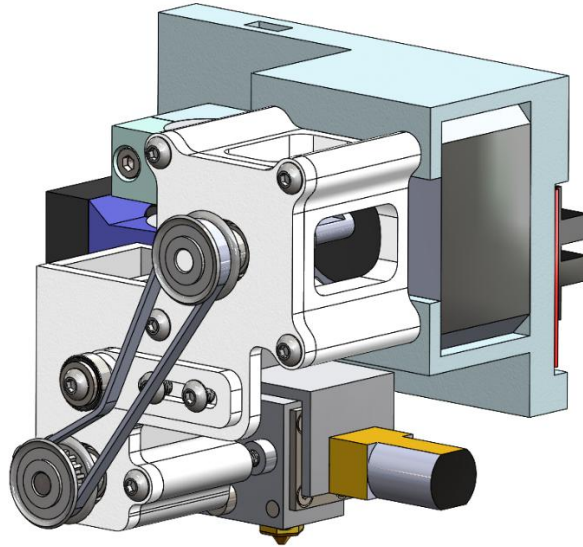
Εικόνα 4.1 Εκτοπωτής Hypercube Evolution, πηγή www.thingiverse.com



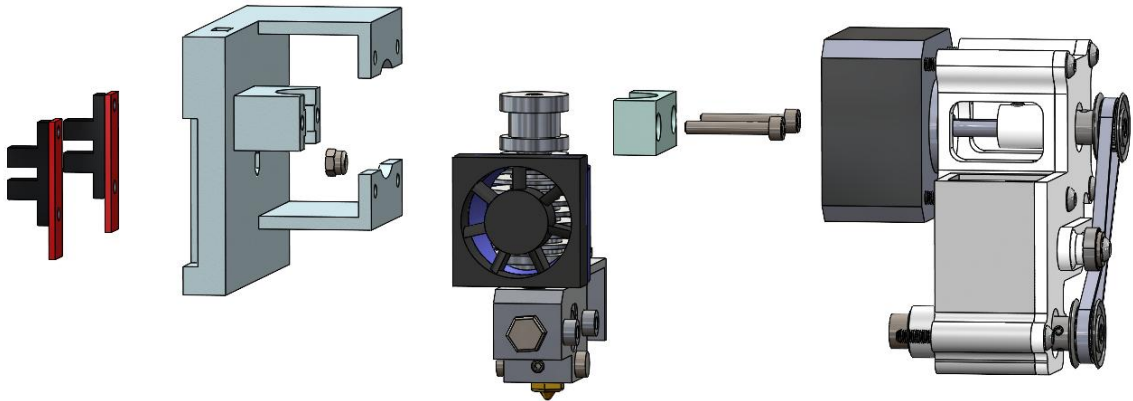
Εικόνα 4.2. Ψηφιακό μοντέλο του εκτοπωτή.

Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται το σχέδιο του εκτοπωτή με το φορείο του X άξονα χωρίς την κεφαλή εκτύπωσης που κανονικά έχει και που φαίνεται στο σχήμα 4.1. Η βάση της νέας κεφαλής σχεδιάστηκε με τρόπο που να ταιριάζει σε αυτό το φορείο και να μην αλλάζουν σημαντικά οι διαδρομές των αξόνων κίνησης κατά X, Y και Z, άρα και ο διαθέσιμος όγκος εκτύπωσης.

4.3.1 Συναρμολόγημα



Εικόνα 4.3. Η κεφαλή εκτύπωσης συναρμολογημένη.

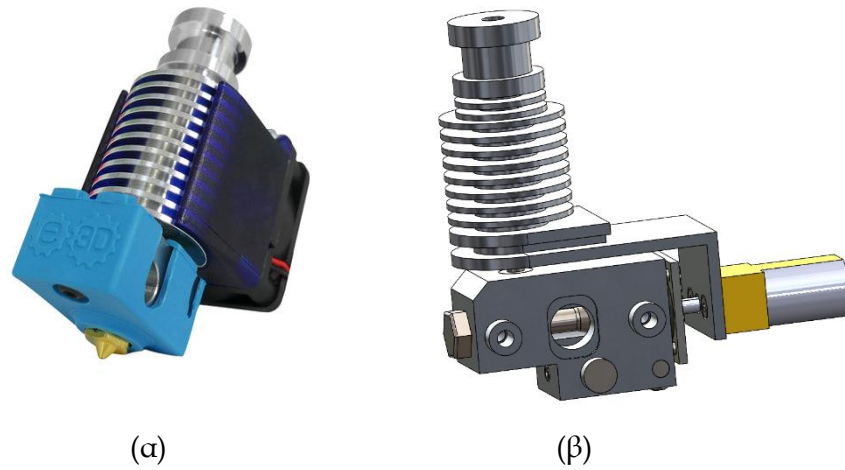


Εικόνα 4.4. Επιμέρους συστήματα της κεφαλής.

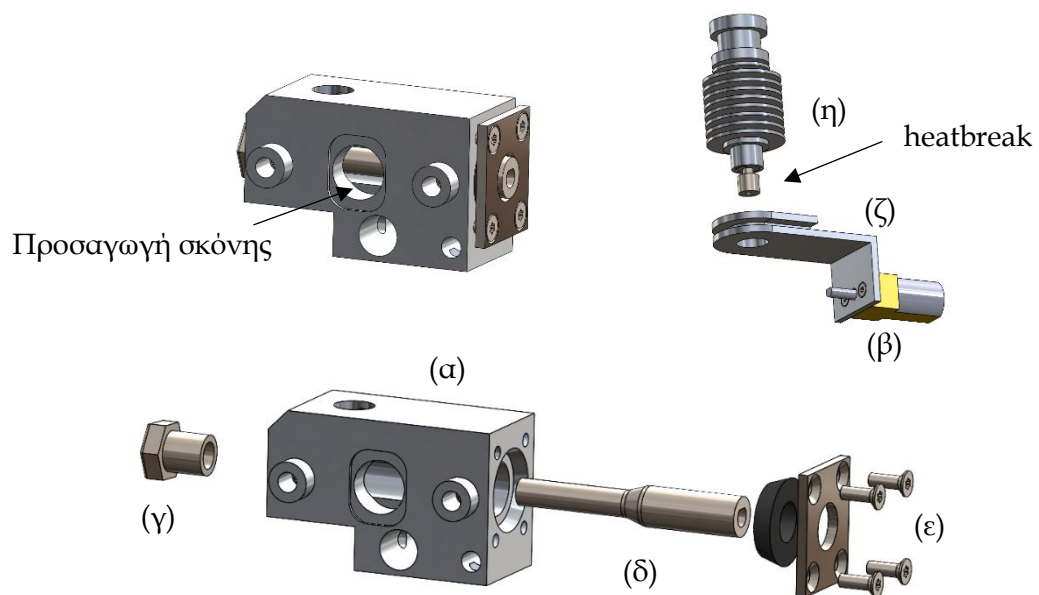
Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η κεφαλή συναρμολογημένη και στο σχήμα 4.4 φαίνονται τα επιμέρους συστήματα, δηλαδή η βάση με τους τερματικούς διακόπτες αριστερά, στο κέντρο το κυρίως μέρος της κεφαλής με την ψύκτρα και το θάλαμο ανάμειξης και δεξιά ο μηχανισμός τροφοδοσίας της σκόνης κοντών ινών άνθρακα ή υάλου. Η σχεδίαση της ψύκτρας και του θαλάμου ανάμειξης, βασίστηκε στην ευρύτατα χρησιμοποιούμενη κεφαλή τριτοδιάστατης εκτύπωσης E3D - V6 [18]. Ο μηχανισμός τροφοδοσίας της σκόνης είναι εξολοκλήρου πρωτότυπος.

4.3.2 Θάλαμος ανάμειξης

Ο θάλαμος ανάμειξης διαμορφώνεται μέσα στο μπλοκ τήξης (heatblock), εξάρτημα που συναντάται σε όλες τις κεφαλές εκτύπωσης. Στην εικόνα 4.5, στην κεφαλή e3d v6 (α), ο θάλαμος τήξης είναι το εξάρτημα κάτω από την ψύκτρα. Σε αυτό το μπλοκ, προσάγεται το πλαστικό σε στέρεη μορφή και λόγω υψηλής θερμοκρασίας λιώνει. Εφόσον απαιτείται ανάμειξη ινών άνθρακα στο λιωμένο πλαστικό, μέσα σε αυτό το μπλοκ, τοποθετείται άξονας ανάμειξης και διαμορφώνεται οπή προσαγωγής της σκόνης.

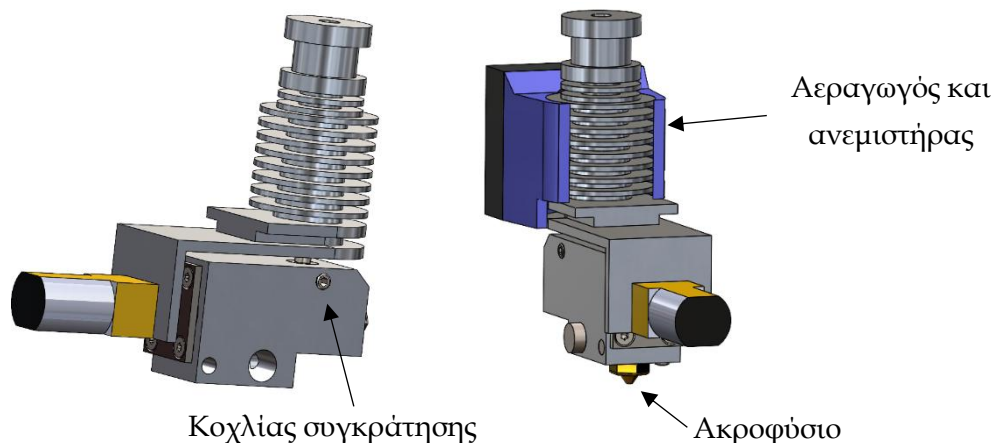


Εικόνα 4.5. (α) Κεφαλή E3d V6. (β) Κεφαλή με άξονα ανάμειξης.



Εικόνα 4.6. Εξαρτήματα που απαρτίζουν το θάλαμο ανάμειξης. (α) Μπλοκ. (β) Κινητήρας για την περιστροφή του άξονα ανάμειξης. (γ) Έδρανο στήριξης του άξονα. (δ) Άξονας ανάμειξης. (ε) Στεγανοποιητική διάταξη. (ζ) Μπρακέτο κινητήρα

Μέσα στο θάλαμο ανάμειξης, έχει διαμορφωθεί κατάλληλη κοιλότητα για την προσαρμογή του άξονα ανάμειξης (δ) (βλ. Εικ. 4.6). Στο ένα άκρο του άξονα τοποθετείται βιδωτά έδρανο (γ) για τη στήριξή του από PTFE. Το άλλο άκρο στηρίζεται στον κινητήρα [19] που αναλαμβάνει την περιστροφή του. Ο κινητήρας (β) στηρίζεται σε κατάλληλο έλασμα (ζ) που αποτελεί μέρος της ψύκτρας (η). Η ψύκτρα είναι της E3D αλλά έχουν τοννευτεί τα δύο ακριανά περσόνια για να προσαρμοστεί το έλασμα του κινητήρα. Το heatbreak (βλ. Εικ. 4.6) και αυτό της E3D που χρησιμεύει στο να μην μεταδίδεται η θερμότητα προς το νήμα, τοννεύεται στο σημείο που εισέρχεται στο θάλαμο ανάμειξης έτσι ώστε να αφαιρεθεί το σπειρώμα M6 που διαθέτει και τοποθετείται στο θάλαμο με ακέφαλο κοχλία συγκράτησης allen (βλ. Εικ. 4.7). Το έλασμα (ζ) πρεσσάρεται στην ψύκτρα και ενδιάμεσα εφαρμόζεται μικρή ποσότητα θερμοαγώγιμης πάστας για να

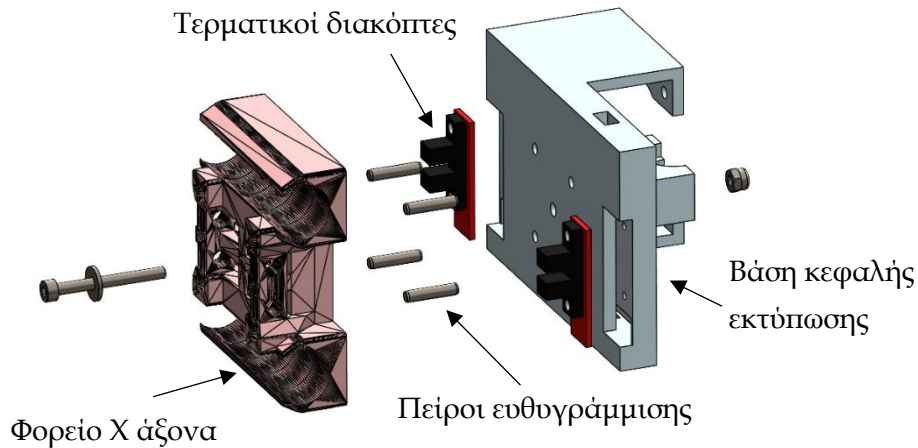


Εικόνα 4.7. Αεραγωγός, ανεμιστήρας και ακροφύσιο από την κεφαλή E3D V6

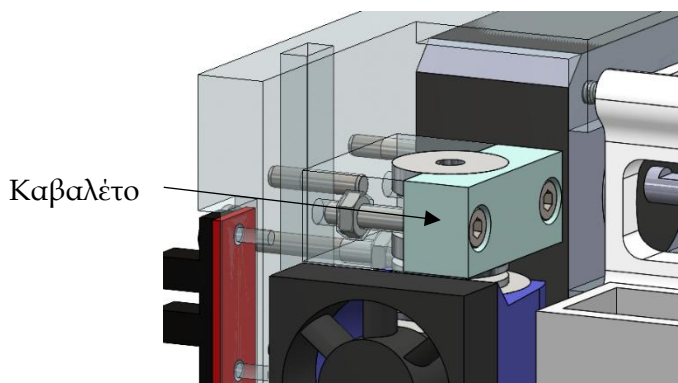
παραλαμβάνεται και η θερμότητα από τον κινητήρα. Προβλέπεται κατάλληλη στεγανοποιητική διάταξη (ε) για την αποφυγή διαρροής λιωμένου πλαστικού από το θάλαμο, δεδομένης της αυξημένης πίεσης που επικρατεί μέσα. Αυτή η διάταξη θα πρέπει να εξασφαλίζει τη στεγανότητα, να αντέχει σε θερμοκρασίες της τάξεως των 250°C και να επιτρέπει ελευθερία περιστροφής του άξονα. Ο αεραγωγός και ο ανεμιστήρας τοποθετούνται για την διατήρηση της θερμοκρασίας της ψύκτρας σε χαμηλά επίπεδα, είναι δανεισμένοι από την E3D και έχει αφαιρεθεί υλικό από τον αεραγωγό για να ταιριάζει το έλασμα του κινητήρα.

4.3.3 Βάση στήριξης κεφαλής

Η βάση της κεφαλής τοποθετείται πάνω στο φορείο χρησιμοποιώντας τέσσερις πείρους ευθυγράμμισης για να μπορεί πάντα να βρίσκεται στην ίδια θέση σε περίπτωση αφαίρεσης και επανατοποθέτησης. Οι πείροι αυτοί είναι τυποποιημένοι με διάμετρο $\varnothing 3$ και η βάση σουφίγγεται με κοχλία M3 και περικόχλιο ασφαλείας από την εμπρός μεριά (βλ. Εικ. 4.8). Επίσης έχουν τοποθετηθεί οπτικοί τερματικοί διακόπτες για τις ακριανές θέσεις του φορείου του Χ άξονα.



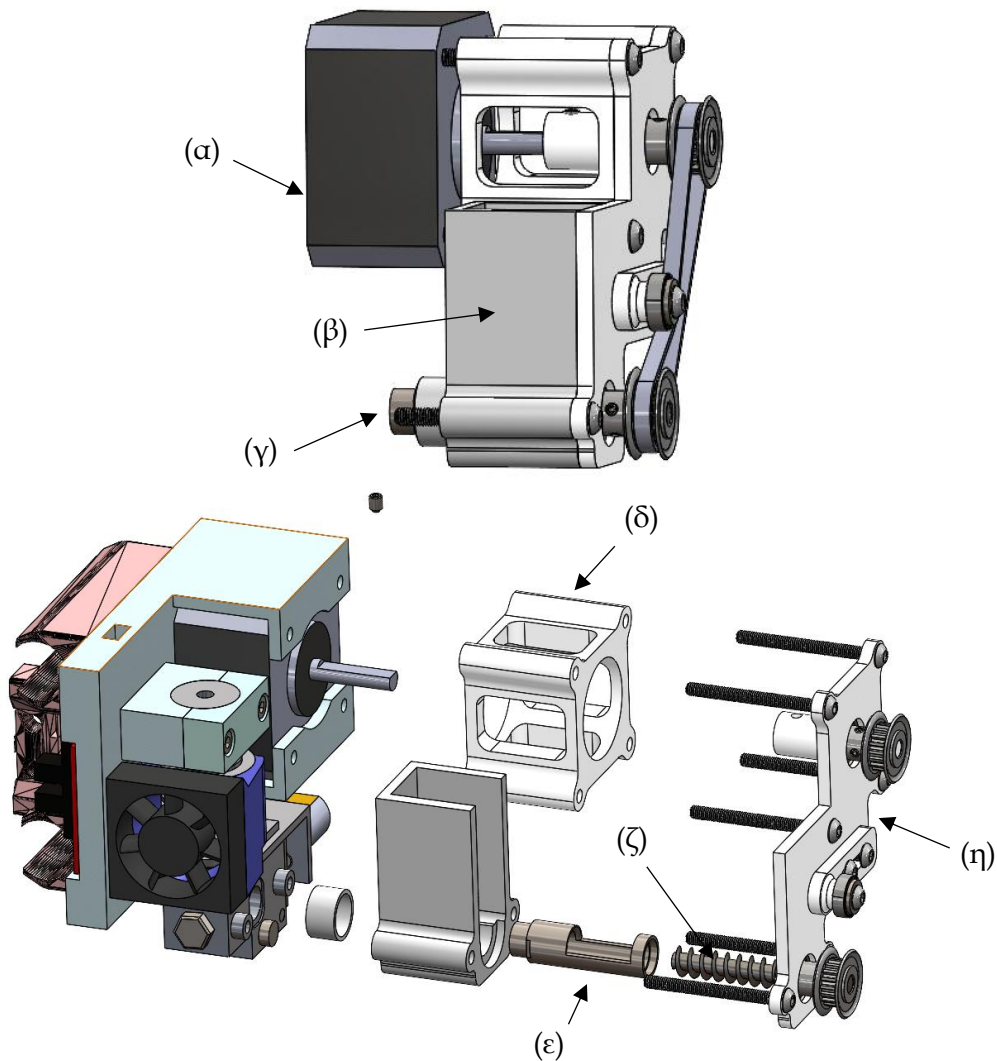
Εικόνα 4.8. Συναρμολόγηση της βάσης στο φορείο του εκτοπωτή.



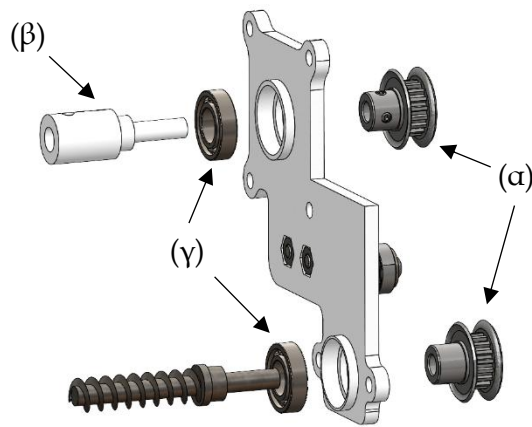
Εικόνα 4.9. Λεπτομέρεια σύφιξης καβαλέτου ψύκτρας

Για τη σύσφιξη της κεφαλής στη βάση, σχεδιάστηκε καβαλέτο που εφαρμόζει στην ψύκτρα και συσφίγγεται με δύο κοχλίες M3 στη βάση. Έχουν τοποθετηθεί μέσα στο υλικό της βάσης, δύο περικόχλια M3 και αυτό θα γίνει κατά τη διάρκεια της τριτοδιάστατης εκτύπωσης με προσθήκη εντολής παύσης του κώδικα G. Μέσα στο σώμα της βάσης, έχουν διαμορφωθεί κανάλια για τη διέλευση των καλωδίων των τερματικών, της αντίστασης θέρμανσης του θαλάμου και του θερμοστοιχείου για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

4.3.4. Μηχανισμός τροφοδοσίας σκόνης



Εικόνα 4.10. Μηχανισμός τροφοδοσίας σκόνης. (α) Κινητήρας. (β) Δεξαμενή. (γ) Στόμιο εξόδου. (δ) Αποστάτης εμπρόσθιας πλάκας. (ε) Χιτώνιο. (ζ) Κοχλίας. (η) Εμπρόσθια πλάκα. (θ) Τανυστήρας



Εικόνα 4.11. Εμπρόσθια πλάκα. (α) Τροχαλίες. (β) Αντάπτορας. (γ) Ρουλεμάν

Η σκόνη ανθρακονημάτων (milled fibers [22]) είναι ένα μείγμα πούδρας γραφίτη και ινών άνθρακα μήκους περίπου 100-200 μm . Η κεφαλή εκτύπωσης περιλαμβάνει δεξαμενή από PTFE (β) (βλ. Εικ. 4.10) για την αποθήκευση της σκόνης και κοχλία (ζ) για τη δοσομέτρηση και τροφοδοσία αυτής μέσα στο θάλαμο ανάμειξης. Το PTFE αντέχει στις θερμοκρασίες λειτουργίας της κεφαλής και έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Έγινε επιλογή βηματικού κινητήρα (NEMA17) για τον μηχανισμό τροφοδοσίας έτσι ώστε να μπορεί με τον ίδιο αριθμό παλμών από τον ελεγκτή να δοσομετρά κάθε φορά την ίδια ποσότητα σκόνης. Στους περισσότερους ελεγκτές τρισδιάστατων εκτυπωτών του εμπορίου υπάρχει διαθέσιμη θύρα σύνδεσης βηματικού για δεύτερο μηχανισμό τροφοδοσίας νήματος. Στην σχεδίαση αυτής της κεφαλής η δεύτερη θύρα διατίθεται για τον κινητήρα του συστήματος τροφοδοσίας σκόνης.

Η σκόνη που περιέχεται στη δεξαμενή, λόγω βαρύτητας κατεβαίνει προς τον κύλινδρο όπου παραλαμβάνεται από τον κοχλία, δοσομετράται και τροφοδοτείται στο θάλαμο. Ο κύλινδρος κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα για να μην εισχωρούν οι ίνες, τεμάχια μεγάλης σκληρότητας στο υλικό της δεξαμενής η οποία φτιάχνεται από PTFE.

Για τη μετάδοση κίνησης από τον κινητήρα στον κοχλία, χρησιμοποιείται ιμάντας χρονισμού και αντίστοιχες τροχαλίες που εδράζονται σε ρουλεμάν (βλ. Εικ. 4.11). Τα τελευταία εξαρτήματα καθώς και ο τανυστήρας συναρμολογούνται στην εμπρόσθια πλάκα η οποία ολοκληρώνει το σύστημα τροφοδοσίας σκόνης. Στο ένα άκρο κοχλιώνεται πάνω στο θάλαμο ανάμειξης ενώ στο άλλο άκρο μέσω του αποστάτη (βλ. Εικ. 4.10) πάνω στον κινητήρα.

4.4. Σχόλια - Παρατηρήσεις

Με την επιλογή του κοχλία ως μέσου τροφοδοσίας της σκόνης ανθρακονημάτων, επιτυγχάνεται θεωρητικά η δημιουργία οποιασδήποτε αναλογίας πολυμερούς - ινών στο εκτυπωμένο τεμάχιο καθώς όσο περισσότερο περιστραφεί, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα ινών θα

προσθέσει η οποία είναι και εύκολα μετρήσιμη καθώς προκύπτει από το βήμα και το βάθος του καναλιού του κοχλίου. Σε περίπτωση που το εύρος της αναλογίας ανθρακονημάτων δεν απαιτείται να είναι μεγάλο, τότε μπορεί να σχεδιαστεί κεφαλή που να αναμειγνύει δύο διαφορετικά νήματα, το ένα σκέτο πολυμερές και το άλλο με συγκεκριμένο ποσοστό ινών που είναι διαθέσιμο στην αγορά. Σε αυτή την περίπτωση, η κεφαλή θα πρέπει να διαθέτει δύο εισόδους νημάτων προς το θάλαμο ανάμειξης. Στην πράξη έχει αποδειχτεί [3] ότι όταν αυξάνεται αρκετά το ποσοστό ινών στο τεμάχιο, αυτό γίνεται ψαθυρό.

Σχετικά με τη μορφή και το μέγεθος του θαλάμου ανάμειξης, θα προκύψουν συμπεράσματα από τη μελέτη ροής. Δηλαδή, από τη στιγμή που εισάγεται η σκόνη, απαιτείται κάποιος χρόνος μέχρι την ομογενοποίηση του μείγματος οπότε οι διαστάσεις του θαλάμου και το σημείο στο οποίο τοποθετείται η οπή του μηχανισμού τροφοδοσίας συστήνουν ένα σύνολο παραμέτρων προς διερεύνηση από τη μελέτη ροής και ανάμειξης.

Η επιλογή του κινητήρα τροφοδοσίας, έγινε με γνώμονα τη διαθεσιμότητα και την τυποποίηση των διαστάσεών του. Πρόκειται για πολύ διαδεδομένο τύπο και μέγεθος βηματικού κινητήρα στην αγορά και στο χώρο της τριδιάστατης εκτύπωσης. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και μικρότερος βηματικός αλλά σε συνδυασμό με πλανητικό μειωτήρα.

Γενικά οι προδιαγραφές που τέθηκαν ικανοποιούνται. Από το συνολικό ψηφιακό συναρμολόγημα βλέπουμε ότι ο ωφέλιμος όγκος εκτύπωσης έχει μειωθεί σε μικρό ποσοστό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Προσομοίωση ροής

5.1 Εισαγωγή

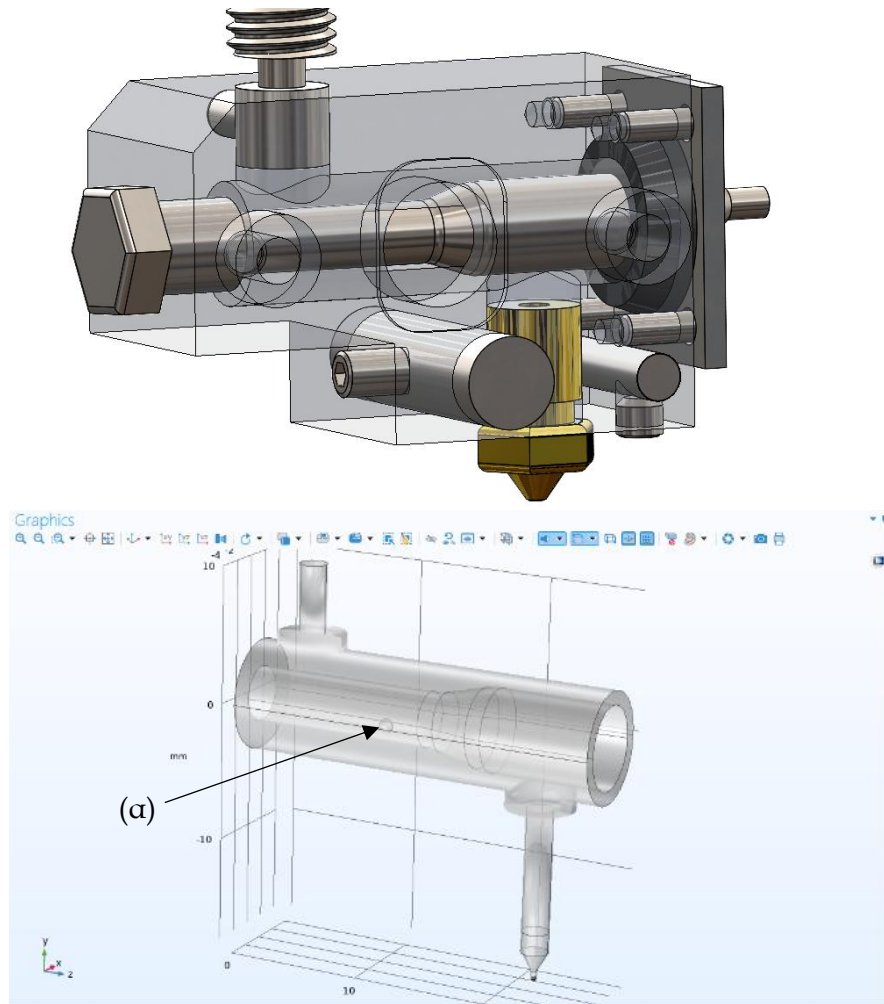
Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στη μελέτη της ροής του λιωμένου πλαστικού μέσα στο θάλαμο ανάμειξης καθώς και του τρόπου με τον οποίο οι κοντές ίνες άνθρακα ή υάλου αναμειγνύονται με αυτό και σε ποιο βαθμό. Η ιδιαιτερότητα και δυσκολία της συγκεκριμένης ροής έγκειται στο γεγονός ότι το πολυμερές παρουσιάζει μεταβλητό ιξώδες όχι μόνο σε σχέση με τη θερμοκρασία αλλά και σε σχέση με τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο ροϊκό πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, πλαστικά όπως το PLA ή το ABS που χρησιμοποιούνται ευρέως στην τρισδιάστατη εκτύπωση, εμφανίζουν διατμητική λείπτυνση (shear thinning), δηλαδή με αύξηση της διατμητικής τάσης, το ιξώδες τους μειώνεται (ψευδοπλαστικά). Επιπλέον, με την προσθήκη των ινών που είναι σωματίδια κυλινδρικού σχήματος αλλά και με την διφασική πλέον θεώρηση ροής η μοντελοποίηση του προβλήματος γίνεται αρκετά σύνθετη. Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση έγινε αναζήτηση για μαθηματικά μοντέλα ιξώδους για τα προαναφερόμενα υλικά έτσι ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση, αλλά και για πειραματικά δεδομένα για επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Τα τοιχώματα του θαλάμου ανάμειξης θεωρείται ότι είναι αδιαβατικά και δεν υπάρχει κάποια πηγή εσωτερικά οπότε η θερμοκρασία είναι σταθερή.

Για την επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό COMSOL Multiphysics 6.0. Το Comsol παρέχει τη δυνατότητα για προσομοιώσεις σε κάθε επιστημονικό

πεδίο αλλά και για σύνθετα προβλήματα που εμπλέκουν παραπάνω του ενός επιστημονικά πεδία.

5.2 Δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης

5.2.1. Γεωμετρία



Εικόνα 5.1. Ροϊκό πεδίο κεφαλής ανάμειξης με (α) το σημείο προσαγωγής των σωματιδίων

Από τα σχέδια της κεφαλής, προκύπτει εύκολα η γεωμετρία του ροϊκού πεδίου που θα επιλυθεί στο Comsol. Για την αποφυγή πύκνωσης του πλέγματος σε σημεία μικρού ενδιαφέροντος της ροής, κάποιες ακμές αγνοούνται με κατάλληλες ρυθμίσεις στο λογισμικό (ignore edges). Επίσης, το σημείο που τροφοδοτούνται οι ίνες άνθρακα, έχει απλοποιηθεί και στη θέση του έχει τοποθετηθεί μια μικρή σφαίρα (βλ. Εικ.5.1) ως ένα επιπλέον πεδίο υπολογισμού (domain) από το οποίο απελευθερώνονται οι ίνες ως σωματίδια με συγκεκριμένη ροή.

5.2.2. Υλικά

Στη ροή αυτή που είναι διφασική και μελετάται η ανάμειξη των δύο φάσεων, συμμετέχουν δύο υλικά, το πολυμερές σε τηγμένη μορφή και η σκόνη με τις ίνες άνθρακα, με ελάχιστη

προσθήκη πούδρας γραφίτη. Για το πολυμερές, χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση του ABS με πυκνότητα 1050kg/m^3 και με δυναμικό ιξώδες υπολογισμένο σύμφωνα με το διαδεδομένο μοντέλο ιξώδους για θερμοπλαστικά υλικά Cross-WLF [23]. Το μοντέλο αυτό περιγράφει την εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία, το ρυθμό διάτμησης και την πίεση και περιγράφεται από τις εξισώσεις

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0(T)\dot{\gamma}}{\tau}\right)^{1-n}} \quad (5.1)$$

$$\eta_0(T) = D_1 \exp\left[\frac{-A_1(T - Tr)}{A_2 + (T - Tr)}\right] \quad (5.2)$$

με η_0 το δυναμικό ιξώδες σε μηδενικό ρυθμό διάτμησης, T η θερμοκρασία, Tr η θερμοκρασία αναφοράς που λαμβάνεται συνήθως ίση με τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης, τ η κρίσιμη διατμητική τάση (critical stress), n ο εκθέτης Power - law (φανερώνει πόσο ψευδοπλαστικό είναι το πολυμερές, για $n = 1$ το ρευστό είναι Νευτώνιο) και A_1, A_2 και D_1 σταθερές του υλικού. Συγκεκριμένα, οι τιμές των σταθερών του υλικού συνοψίζονται στον πίνακα 5.1

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά ABS

Tr	373.15 K
T	503.15 K
τ	3.48e4 Pa
A_1	24.96
A_2	51.6 K
D_1	8.62e11 Pa
n	0.289

Το υλικό ενίσχυσης είναι τεμαχισμένες ίνες άνθρακα διαστάσεων $7\mu\text{m}$ διαμέτρου και $100\mu\text{m}$ μήκους.

5.2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση

Η ροή του πολυμερούς μέσα στο θάλαμο ανάμειξης περιγράφεται από τις εξισώσεις Navier - Stokes και την εξίσωση της συνέχειας που εκφράζουν το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα και τη διατήρηση της μάζας αντίστοιχα. Στη παρούσα σχεδίαση της κεφαλής που διοχετεύεται σκόνη

ινών άνθρακα στο τηγμένο πολυμερές, πρόκειται για διφασική ροή όπου η μία φάση είναι το πολυμερές και είναι το συνεχές μέσο και η δεύτερη φάση είναι οι ίνες όπου είναι η διασκορπιζόμενη (dispersed) φάση και είναι σε μορφή σωματιδίων (particles). Το περιβάλλον του Comsol παρέχει τη δυνατότητα χρήσης διαφόρων μοντέλων υπολογισμού ανάλογα την προσέγγιση που απαιτείται. Αν δηλαδή ο αριθμός των σωματιδίων στο μείγμα είναι σχετικά μικρός και αναζητείται η ακριβής τροχιά τους στο ροϊκό πεδίο τότε επιλέγεται η διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων σωματιδίων και ρευστού. Αυτό απαιτεί σημαντικά μεγάλους υπολογιστικούς πόρους δηλαδή επεξεργαστική ισχύ και μνήμη. Στην περίπτωση της κεφαλής ανάμειξης όπου ο αριθμός των σωματιδίων είναι σχετικά μεγάλος στο μείγμα, μπορεί δηλαδή να ποικίλει από 5 έως 20%, δεν είναι σημαντικό να είναι γνωστή η ακριβής θέση του κάθε σωματιδίου στη ροή αλλά το ποσοστό κατ' όγκο των σωματιδίων στο μείγμα σε κάθε χρονική στιγμή αλλά και σε κάθε σημείο της ροής από την ώρα που προσάγονται στο θάλαμο και μέχρι την έξοδο από το ακροφύσιο. Με τη συγκεκριμένη προσέγγιση, εξοικονομούνται υπολογιστικοί πόροι, οπότε μειώνεται ο χρόνος προσομοίωσης.

Με δεδομένα τα παραπάνω, ενεργοποιήθηκαν τα μοντέλα Laminar flow και Phase transport με αμφίδρομη σύζευξη (two way coupling) βάση του μοντέλου Mixture model. Δηλαδή το ροϊκό πεδίο επηρεάζεται από την ύπαρξη και μεταφορά της φάσης των ινών και αντίστροφα, βάση του μοντέλου ανάμειξης.

Η ροή περιγράφεται από τις εξισώσεις διατήρησης ορμής και μάζας (5.3) και (5.4) αντίστοιχα

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \nabla)u = \nabla[-pI + K] + F \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (5.4)$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)I \quad (5.5)$$

με K να είναι οι όροι της τριβής. Ο όρος της πυκνότητας υπάρχει στις (5.3) και (5.4) όχι επειδή αλλάζει με το χρόνο αλλά επειδή στο μοντέλο Mixture model του Comsol δεν είναι διαθέσιμη η ασυμπιεστή ροή. Πρακτικά δεν αλλάζει κάτι στα αποτελέσματα.

Στην περίπτωση της ροής πολυμερούς, επειδή ο αριθμός Re είναι πολύ μικρός, της τάξης του 10^{-4} λόγω μεγάλου δυναμικού ιξώδους, ο όρος της ορμής $\rho(u \nabla)u$ που δεν εξαρτάται από το χρόνο μπορεί να διαγραφεί (δεδομένου ότι μελετάται μη μόνιμη ροή, αλλιώς διαγράφεται όλο το αριστερό μέλος της εξίσωσης). Η ροή αυτή λέγεται έρπουσα (creep flow) ή αλλιώς ροή Stokes.

Επίσης, ο όρος της βαρύτητας στην περίπτωση της κεφαλής ανάμειξης αμελείται. Δίχως να υπάρχει κάποια άλλη δύναμη να επιδρά στο ρευστό, η εξίσωση της ορμής γίνεται

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla[-pI + K] \quad (5.6)$$

Η διατήρησης μάζας για κάθε φάση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \phi_i) + \nabla(\rho_i \phi_i u_i) = Q_i \quad (5.7)$$

με ϕ_i το ποσοστό κατ' όγκο της κάθε φάσης στο μείγμα. Είναι προφανές ότι ισχύει

$$\phi_c + \phi_d = 1 \quad (5.8)$$

Συνεπώς η πυκνότητα του μίγματος είναι

$$\rho = \phi_c \rho_c + \phi_d \rho_d \quad (5.8)$$

Όπου ϕ_c το ποσοστό κατ' όγκο της συνεχούς φάσης δηλαδή του πολυμερούς και ϕ_d το ποσοστό κατ' όγκο της διασκορπισμένης φάσης δηλαδή των ινών.

Η εξίσωση της συνέχειας του μίγματος είναι

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla(\rho u_m) = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (5.9)$$

Με u_m τη μέση ταχύτητα του μίγματος και Q_i πηγή ή απαγωγή της εκάστοτε φάσης.

Το ιξώδες του μίγματος δίνεται από εμπειρικούς ή αναλυτικούς τύπους υπολογισμού με βάση το ποσοστό της διασκορπισμένης φάσης.

Για τον υπολογισμό του ιξώδους του μίγματος χρησιμοποιείται η πολύ διαδεδομένη σχέση υπολογισμού ιξώδους που αφορά μείγμα στερεών σωματιδίων σε υγρό, η σχέση Krieger [24] (εξ. 1.1)

$$\mu = \mu_c \left(1 - \frac{\phi_d}{\phi_{max}}\right)^{-2.5\phi_{max}} \quad (5.10)$$

Με μ_c το ιξώδες της συνεχούς φάσης και ϕ_{max} το μέγιστο ποσοστό σωματιδίων να ισούται με 0.62.

Στις διφασικές ή πολυφασικές ροές, εισάγεται ο όρος της ταχύτητας ολίσθησης μεταξύ της ροής των δύο φάσεων u_{slip} . Στην παρούσα μοντελοποίηση, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υπολογισμού ταχύτητας ολίσθησης κατά Haider - Levenspiel [24] που είναι κατάλληλο για

μείγμα υγρού με στερεά σωματίδια μη σφαιρικά όπως οι ίνες άνθρακα. Το μοντέλο αυτό συσχετίζει τον συντελεστή αντίστασης μεταξύ υγρού και σωματιδίου με την ταχύτητα ολίσθησης της κάθε φάσης και την μέση ταχύτητα u_m του μίγματος. Για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης, λαμβάνεται υπόψη η σφαιρικότητα των σωματιδίων και κάποιοι εμπειρικοί συντελεστές.

Η σφαιρικότητα εκφράζεται από τη σχέση

$$0 < s_i = \frac{A_{sphere}}{A_{particle}} \leq 1 \quad (5.11)$$

Είναι δηλαδή ο λόγος της επιφάνειας σφαίρας ισοδύναμου όγκου με τον όγκο του σωματιδίου προς την επιφάνεια του σωματιδίου.

Αναλυτική περιγραφή των μοντέλων υπολογισμού υπάρχει στο εγχειρίδιο CFD του Comsol [24].

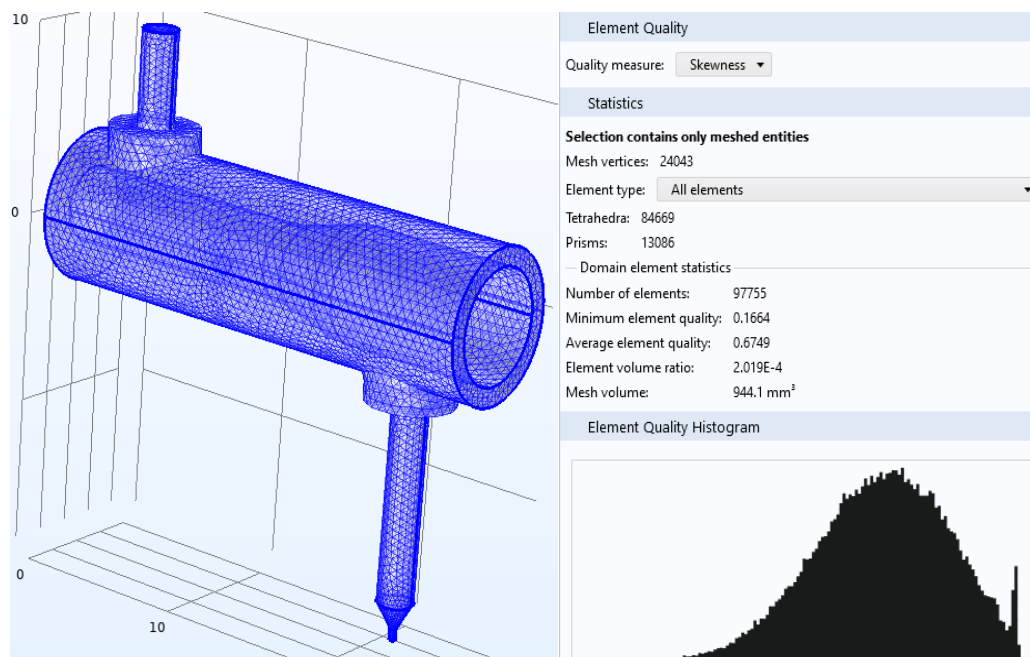
5.2.4. Συνοριακές συνθήκες

Στην ευρύτατα διαδεδομένη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM, η τυπική ταχύτητα εκτύπωσης είναι τα 50 mm/s. Αυτή η ταχύτητα αφορά την ταχύτητα με την οποία κινείται το ακροφύσιο πάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης άρα πρέπει να είναι και η ταχύτητα με την οποία εξέρχεται το λιωμένο πλαστικό από το ακροφύσιο έτσι ώστε να εναποτίθεται στην επιφάνεια εκτύπωσης. Η πιο συχνή επίσης διάμετρος ακροφυσίου που χρησιμοποιείται είναι τα 0.4 mm. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιήθηκαν και στην προσομοίωση της ροής μέσα στο θάλαμο ανάμειξης της κεφαλής. Στην είσοδο της κεφαλής εισέρχεται νήμα που θεωρείται ότι μόλις έχει περάσει στην υγρή φάση, με ταχύτητα περίπου 1.5mm/s που με βάση την εξίσωση της συνέχειας δημιουργεί ροή εξόδου από το ακροφύσιο με ταχύτητα περίπου 50mm/s. Η ολική πίεση στην έξοδο όπως και στις περισσότερες περιπτώσεις μελέτης ροής που η εκροή γίνεται ελεύθερα στο περιβάλλον, λαμβάνεται 1atm.

Σε όλα τα εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου ανάμειξης, λαμβάνεται συνθήκη *μη ολίσθησης* δηλαδή η ταχύτητα ροής είναι ίση με του τοιχώματος. Στα εσωτερικά τοιχώματα που αφορούν τον άξονα ανάμειξης, δίνεται επιπλέον περιστροφική ταχύτητα με σάρωση τιμών από 0.5 έως 3 περιστροφές το δευτερόλεπτο για να μελετηθεί η επίδραση του ρυθμού περιστροφής του άξονα στη ροή και στο βαθμό ανάμειξης.

Η προσαγωγή των ινών άνθρακα, γίνεται με σάρωση τιμών από $4e-7$ έως $8e-7$ kg/s, τιμές που αντιστοιχούν σε ποσοστά κατά βάρος έως 15%. Στο εμπόριο απαντώνται νήματα με 20% ποσοστό κατά βάρος σε ίνες οπότε μελετάται έτσι η συμπεριφορά του θαλάμου σε διαφορετικά ποσοστά. Μεγαλύτερα ποσοστά δεν δίνουν επιθυμητά αποτελέσματα καθώς το τεμάχιο εμφανίζει ψαθυρότητα.

5.2.5. Δημιουργία πλέγματος



Εικόνα 5.5. Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας (αριστερά) και κατανομή των στοιχείων σύμφωνα με τη λοξότητα τους (skewness)

Η δημιουργία πλέγματος είναι πολύ σημαντικό βήμα για την προσομοίωση[14]. Από το αν θα γίνει σωστά το πλέγμα, εξαρτάται η ακρίβεια της λύσης και η ορθότητα των αποτελεσμάτων. Το πλέγμα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε σε σημεία που η ροή παρουσιάζει ιδιαιτερότητα και σημασία, να εμφανίζει πύκνωση έχοντας στοιχεία μικρών σχετικά διαστάσεων και με κατάλληλη μορφή (τετραεδρικά, ορθογωνικά κτλ) για πιο ακριβή λύση. Στο υπόλοιπο ροϊκό πεδίο η διακριτοποίηση της γεωμετρίας γίνεται με πιο αραιό πλέγμα για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων.

Προτιμάται στις προσομοιώσεις ροών και στα σημεία που η γεωμετρία είναι συμμετρική, να εφαρμόζεται δομημένο πλέγμα. Έτσι η λύση θα συγκλίνει πιο γρήγορα και θα είναι πιο ακριβής. Στην υπόλοιπη γεωμετρία που είναι πιο πολύπλοκη, δημιουργείται μη δομημένο πλέγμα με ελεύθερα τετραεδρικά στοιχεία. Ο συνδυασμός των παραπάνω είναι το υβριδικό πλέγμα.

Στην περίπτωση της κεφαλής ανάμειξης, η γεωμετρία εμφανίζει συμμετρία μόνο στην είσοδο του πλαστικού πριν το θάλαμο και στην έξοδο μέσα πλέον στο ακροφύσιο όπου η μορφή είναι κυλινδρική. Μέσα στο θάλαμο η περιστροφή του άξονα ανάμειξης καθώς και η κωνική μορφή του επιβάλλει τη δημιουργία μη δομημένου πλέγματος. Για λόγους πρακτικότητας επιλέχθηκε η αυτόματη δημιουργία πλέγματος από το Comsol με ελεύθερα τετραεδρικά στοιχεία στο σύνολο της γεωμετρίας.

Για τη μελέτη ανεξαρτητοποίησης του πλέγματος, έγινε πύκνωση με διπλασιασμό κάθε φορά του αριθμού των στοιχείων έως ότου η ταχύτητα εξόδου από το ακροφύσιο μετά τον υπολογισμό, να φτάσει την τιμή που προκύπτει από την εξίσωση της συνέχειας. Τα αποτελέσματα

συνοψίζονται στον πίνακα 5.2. Επίσης, στο σχ. φαίνονται τα στατιστικά που αφορούν την ποιότητα του πλέγματος. Σύνηθες κριτήριο για την ποιότητα του πλέγματος είναι η λοξότητα (skewness). Ως λοξότητα ορίζεται η ποιότητα του στοιχείου αναφορικά με τις περιεχόμενες γωνίες του, στο κατά πόσο προσεγγίζει τις γωνίες του ιδανικού στοιχείου. Δηλαδή ένα ισόπλευρο τρίγωνο (επιφανειακό στοιχείο) έχει λοξότητα ίση με 1. Οποιοδήποτε άλλο επιφανειακό τριγωνικό στοιχείο που οι γωνίες του δεν είναι ίσες, αποκλίνει από το 1 με ελάχιστη αποδεκτή τιμή το 0.1. Εδώ η ελάχιστη ποιότητα είναι ίση με 0.16 με μέγεθος πλέγματος finer.

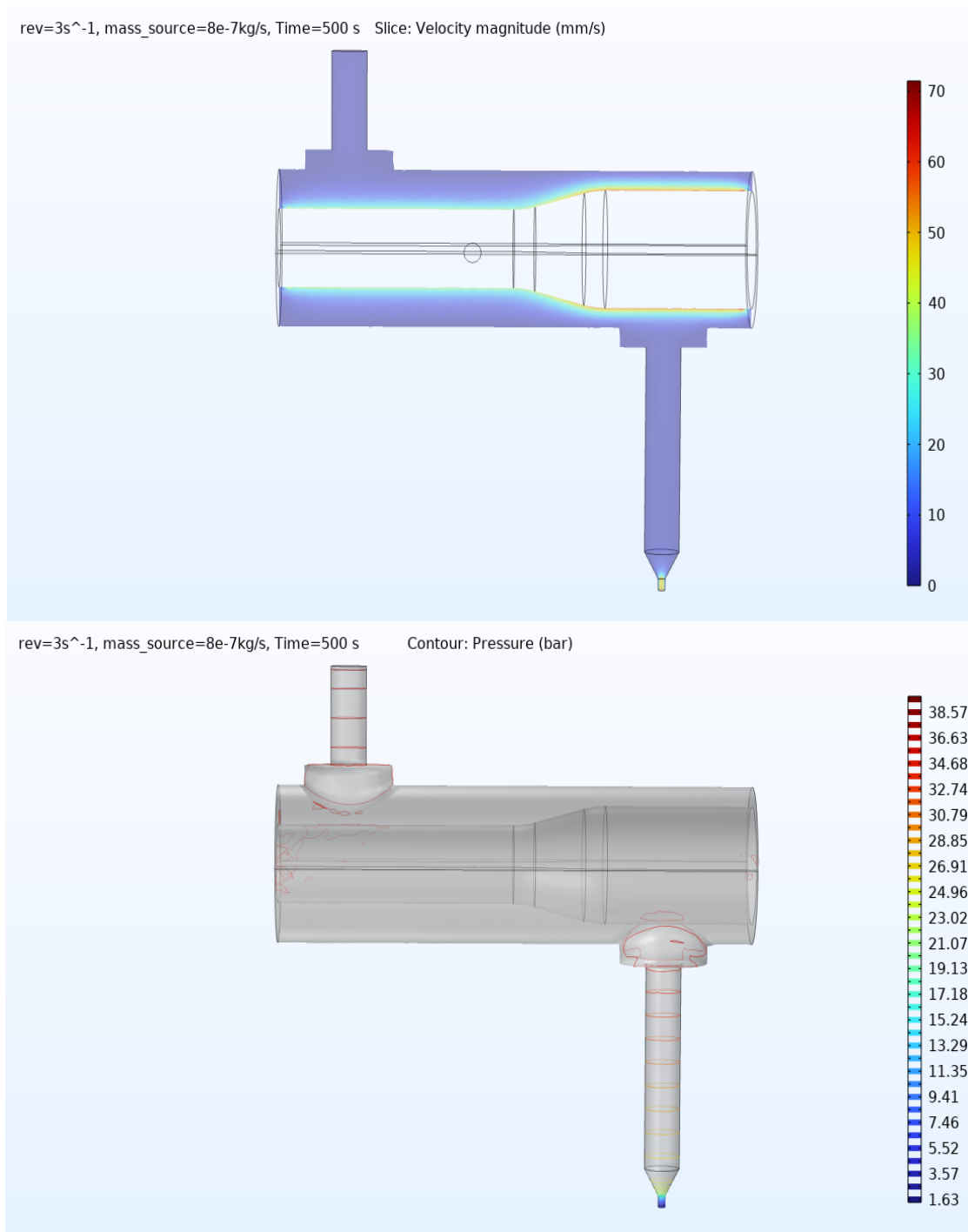
Πίνακας 5.2. Μελέτη ανεξαρτητοποίησης πλέγματος

Μέγεθος πλέγματος	Αριθμός στοιχείων	Ποιότητα στοιχείων (λοξότητα - skewness)	Υπολογισμένη ταχύτητα εξόδου (m/s)
Coarse	9517	0.12	0.089924
Normal	20673	0.1224	0.089801
Fine	38076	0.1215	0.055378
Finer	97755	0.1664	0.053767

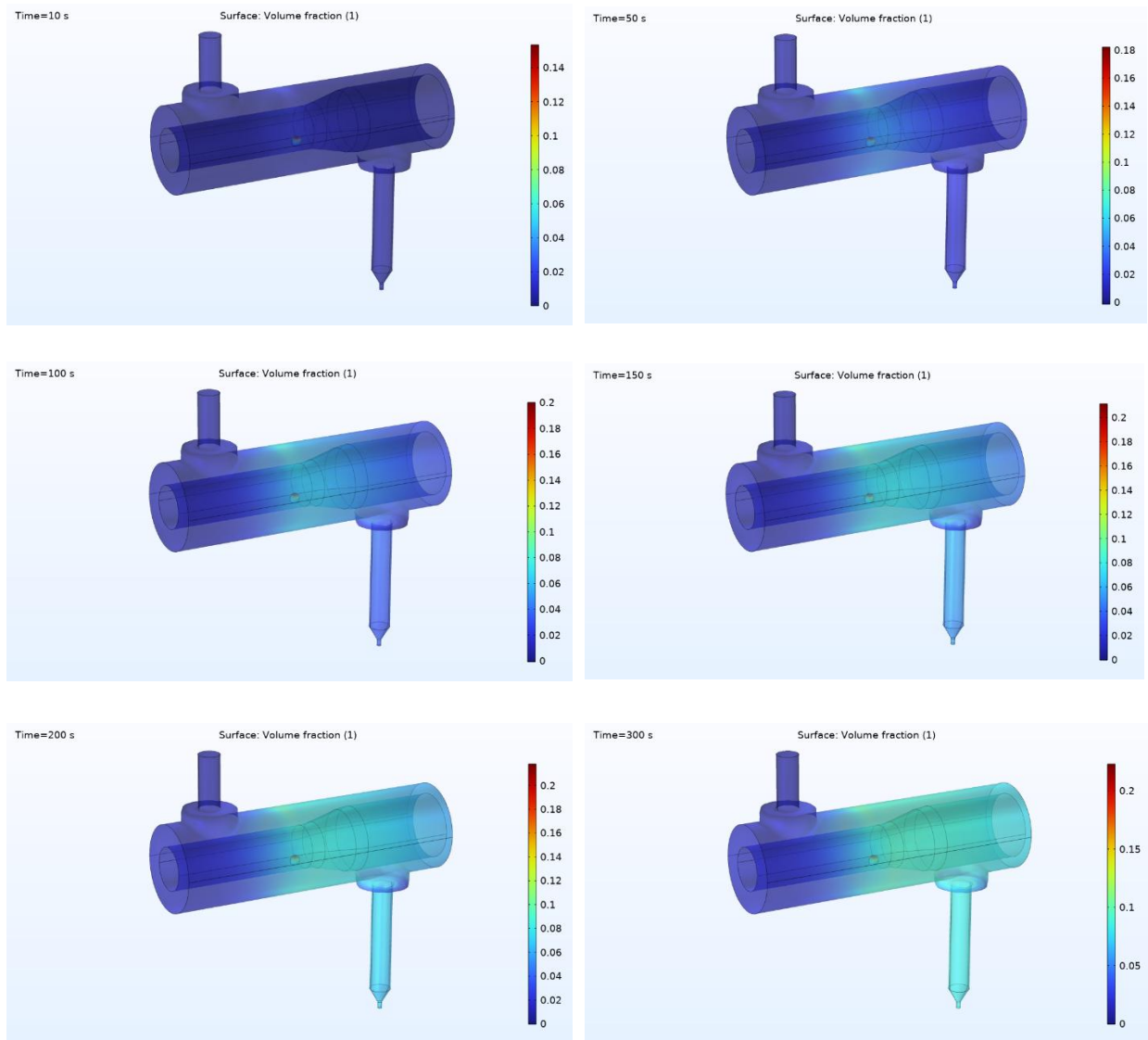
5.2.6. Παραμετρική επίλυση

Η ροή στην περίπτωση του θαλάμου ανάμειξης είναι μη μόνιμη. Αυτό γίνεται γιατί μελετάται η ανάμειξη των ινών στο λιωμένο πλαστικό. Από τη στιγμή που θα εισέλθουν οι ίνες στο θάλαμο και μέχρι να βγουν από το ακροφύσιο, η ποσοστωση των ινών στο μείγμα τοπικά είναι μέγεθος που αλλάζει με το χρόνο. Αν η ροή ήταν μονοφασική μόνο δηλαδή η ροή του πλαστικού, θα ακούσε λύση ανεξάρτητη από το χρόνο δηλαδή μόνιμη.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 20 προσομοιώσεις ως αποτέλεσμα συνδυασμών 4 διαφορετικών ρυθμών περιστροφής του άξονα ανάμειξης και 5 διαφορετικών παροχών μάζας ινών άνθρακα. Με αυτό τον τρόπο μελετάται η επίδραση του ρυθμού περιστροφής του άξονα στη ροή και ανάμειξη για συγκεκριμένη παροχή μάζας ινών αλλά και η επίδραση του διαφορετικού ποσοστού ινών στη λειτουργία της κεφαλής. Ο επιλύτης παράγαγε τα σύνολα δεδομένων σύμφωνα με τη μοντελοποίηση που έγινε, ένα για το πεδίο ταχύτητας, ένα για την πίεση και ένα για το ποσοστό ινών στο μείγμα καθώς και τυπικά γραφήματα ταχύτητας και πίεσης όπως οι περισσότεροι επιλύτες που φαίνονται στη συνέχεια. Με την μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν επιπλέον διαγράμματα που παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο.



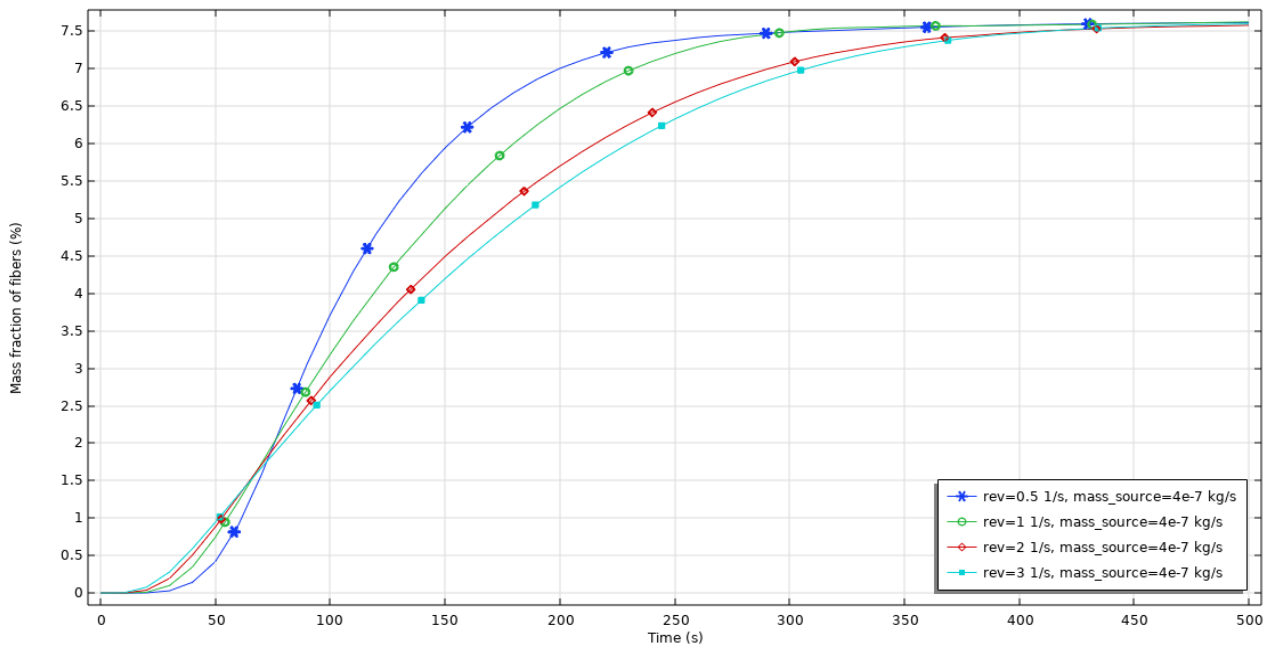
Εικόνα 2 Ταχύτητες και πιέσεις στο θάλαμο ανάμειξης



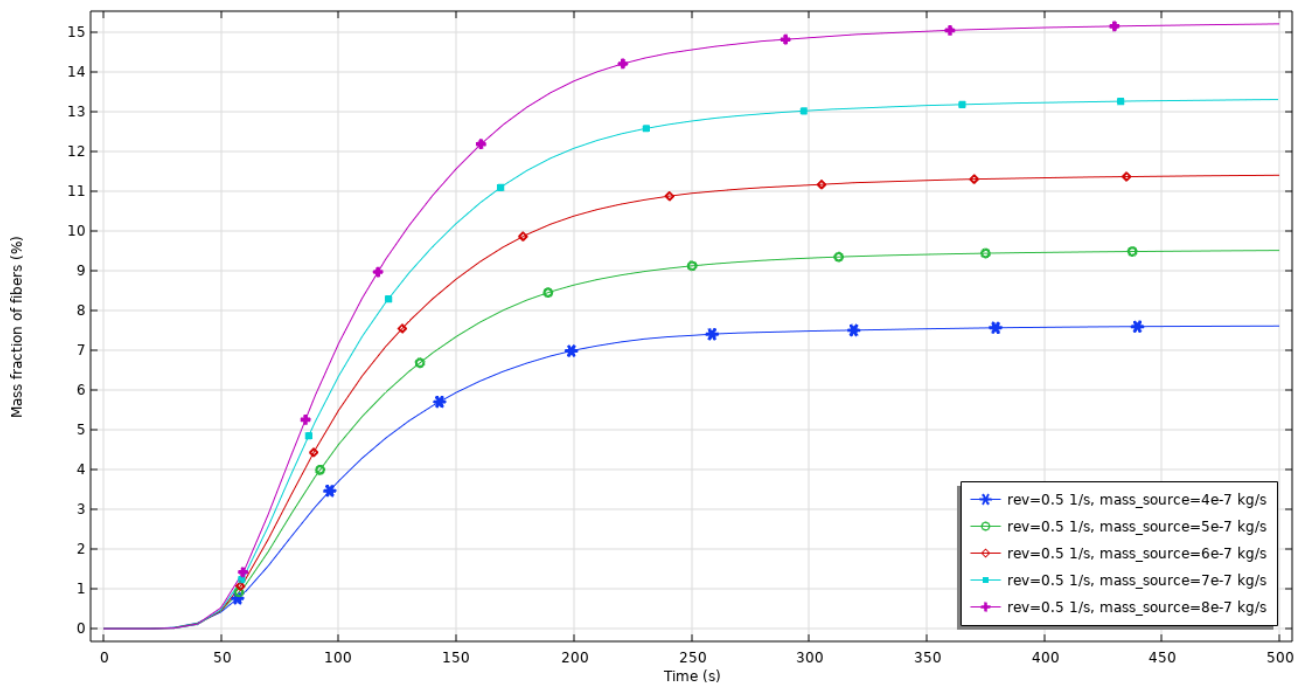
Εικόνα 5.4. Εξέλιξη της ανάμειξης των σωματιδίων στους χρόνους 10s, 50s, 100s, 150s, 200s, 300s.

5.3. Σχόλια - Συμπεράσματα

Από την εικόνα 5.3 φαίνεται ότι ο χρόνος που χρειάζεται το μείγμα για να σταθεροποιήσει την αναλογία του στην έξοδο του ακροφυσίου στο 7.5%, είναι σχετικά μεγάλος περίπου στα 300s ενώ με αύξηση των στροφών ο χρόνος αυτός επιμηκώνεται. Η δακτυλιοειδής διαμόρφωση και οι διαστάσεις του θαλάμου είναι τέτοιες που το πολυμερές θέλει αρκετό χρόνο μέχρι την έξοδο και επιπρόσθετα η περιστροφική κίνηση υπερσχύει της διαμήκουσ ταχύτητας οπότε με την αύξηση του ρυθμού περιστροφής ο χρόνος για να εξέλθει μείγμα μεγαλώνει. Χρειάζεται επανασχεδιασμός του θαλάμου ώστε να μειωθεί ο χρόνος που χρειάζονται οι ίνες να εμφανιστούν στο μείγμα εξόδου δεδομένου ότι η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα τη στιγμή της εκτόπισης όπως καθορίστηκε στις προδιαγραφές.



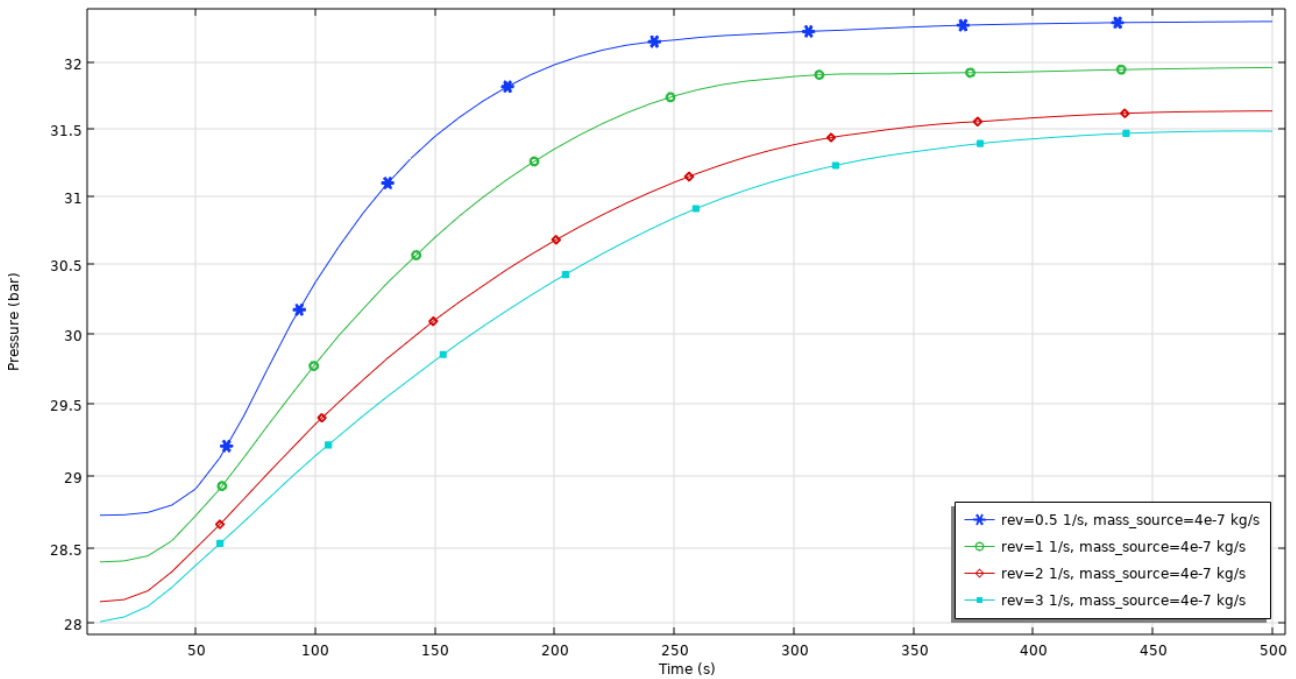
Εικόνα 5.3 Επίδραση του ρυθμού περιστροφής του άξονα ανάμειξης στο ποσοστό σωματιδίων στο μείγμα στην έξοδο του ακροφυσίου.



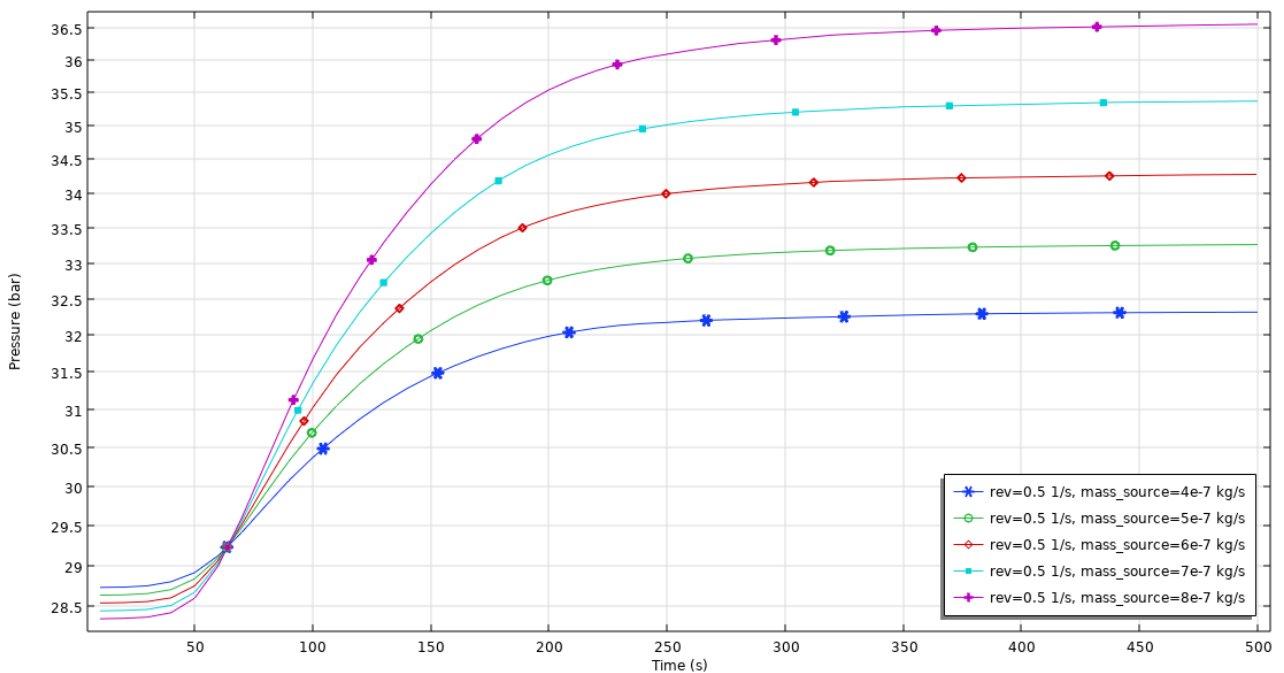
Εικόνα 5.4 Διαφορετικές τιμές παροχής μάζας ινών

Με την αλλαγή της παροχής μάζας (Εικ. 5.4) των ινών άνθρακα, φαίνεται ότι δεν αλλάζει κάτι στη συμπεριφορά της κεφαλής. Χρειάζεται αρκετός χρόνος για την ανάμειξη κάτι που φαίνεται και στο προηγούμενο διάγραμμα.

Η αλλαγή του ρυθμού περιστροφής προκαλεί όπως φαίνεται στην εικόνα 5.5 μεταβολή στην πίεση που αναπτύσσεται στην είσοδο του πλαστικού στην κεφαλή. Η ταχύτητα ροής ακριβώς επάνω στις επιφάνειες του άξονα περιστροφής μεγαλώνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των διατμητικών τάσεων στα κοντινά στρώματα του ρευστού στον άξονα άρα μείωση του



Εικόνα 5.5. Επίδραση του ρυθμού περιστροφής του άξονα ανάμειξης στην πίεση που επικρατεί στην είσοδο του πλαστικού στο θάλαμο.

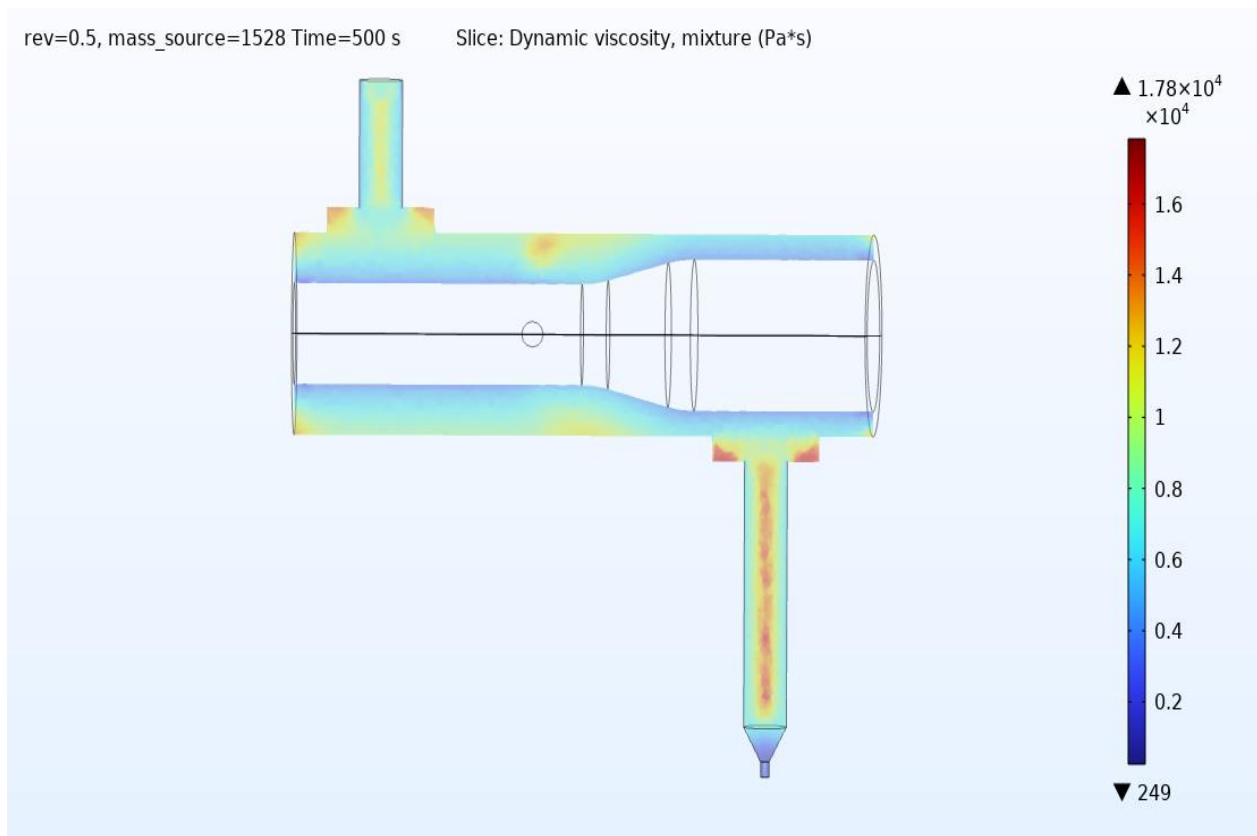


Εικόνα 5.6 Μεταβολή στην πίεση με την αύξηση της παροχής μάζας των σωματιδίων

ιζώδους του μείγματος. Με τη μείωση του ιζώδους η αντίσταση που εμφανίζεται στη ροή είναι μικρότερη οπότε μειώνεται και η πίεση στην είσοδο. Αλλαγή στην πίεση προκαλείται επίσης και από την αλλαγή στην παροχή μάζας των ινών άνθρακα. Από τη σχέση Krieger βλέπουμε ότι με την αύξηση του ποσοστού των σωματιδίων αυξάνεται το ιζώδες του μείγματος. Συνεπώς αναμένεται αύξηση και στην πίεση στην είσοδο γεγονός που φαίνεται στο διάγραμμα στην εικόνα 5.6.

Η επίδραση της παροχής μάζας στην πίεση σε σχέση με αυτή του ρυθμού περιστροφής είναι σημαντικότερη, της τάξεως των 4bar σε σχέση με το 1bar που φαίνεται στην εικόνα 5.5.

Στην εικόνα 5.7 φαίνεται η τιμή του δυναμικού ιξώδους του μείγματος και πώς αυτή μεταβάλλεται στα διάφορα σημεία του θαλάμου ανάμειξης. Κοντά στα τοιχώματα που υπάρχει μεγάλη διάτμηση δηλαδή στον άξονα περιστροφής και στην έξοδο του ακροφυσίου, το ιξώδες είναι μικρό. Με τιμές ιξώδους να κυμαίνονται από 300 έως 15000 Pa*s, ταχύτητα ροής 0.05 m/s και διάμετρο ακροφυσίου 0.4 mm ο αριθμός Reynolds δεν ξεπερνά μεγέθη της τάξεως του 10^{-4} και δικαιολογημένα θεωρείται έρπουσα η ροή.



Εικόνα 5.7 Δυναμικό ιξώδες για παροχή μάζας $8e-7$ kg/s ($1528 \text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$) και ρυθμό περιστροφής 0.5 1/s

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Μελέτη κατασκευής

6.1 Εισαγωγή

Η μελέτη κατασκευής προβλέπει την χρήση μεθόδων αφαίρεσης και πρόσθεσης υλικού με το αλουμίνιο και τον ανοξείδωτο χάλυβα να χρησιμοποιούνται στα θερμικά αλλά και μηχανικά επιβαρυνόμενα μέρη και διάφορα πλαστικά ως υλικό για τα υπόλοιπα εξαρτήματα. Έτσι, εξοικονομείται χρόνος και κόστος για την κατασκευή του μηχανισμού. Ανατρέχοντας στα κεφάλαια 4 και 5 που αφορούν τη σχεδίαση και προσομοίωση λειτουργίας της κεφαλής ανάμειξης, συνάγεται ότι από το σύνολο των εξαρτημάτων της κεφαλής, τα εξαρτήματα που εκτίθενται σε υψηλή θερμοκρασία είναι ο θάλαμος ανάμειξης, ο άξονας ανάμειξης, η δεξαμενή της σκόνης, το χιτώνιο και ο κοχλίας τροφοδοσίας της σκόνης, το heatbreak καθώς και κάποια μικροεξαρτήματα που είναι προσαρτημένα στο θάλαμο και θα αναφερθούν αργότερα. Επίσης, το χιτώνιο, ο κοχλίας και ο άξονας ανάμειξης, επειδή λειτουργούν σε περιβάλλον με κυκλοφορία σκόνης ανθρακονημάτων που είναι υλικό με πολύ μεγάλη σκληρότητα, θα κατασκευαστούν από ανοξείδωτο χάλυβα υλικό που χρησιμοποιείται άλλωστε και για το ακροφύσιο.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τις κοπές σε εργαλειομηχανές είναι το Solidworks Cam που είναι υποπρόγραμμα του Solidworks. Το γεγονός της ενσωμάτωσης του πακέτου Cam στο σχεδιαστικό, βοηθά πολύ γιατί το αρχείο σχεδίασης εισάγεται απευθείας στο cam χωρίς να χάνεται χρόνος και δίχως να απαιτείται μετατροπή του αρχείου. Για την τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα Repetier.

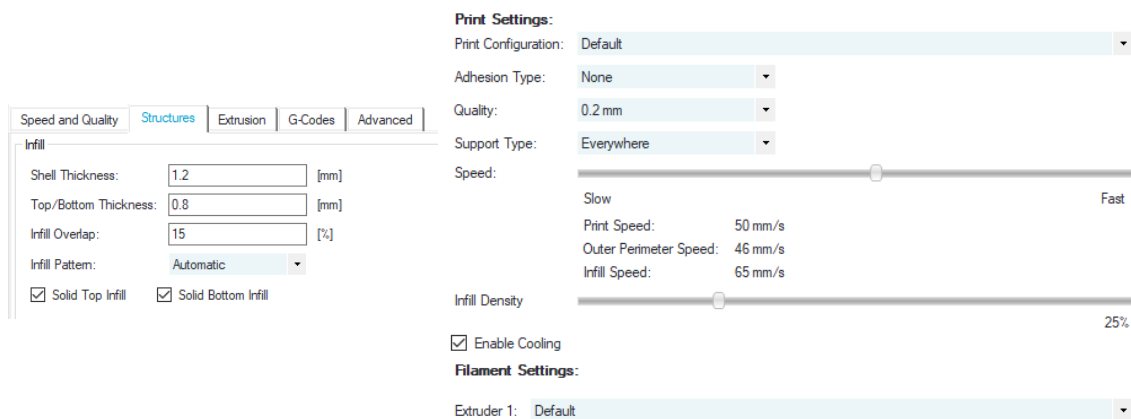
6.2 Κατασκευή επιμέρους εξαρτημάτων

6.2.1 Βάση στήριξης

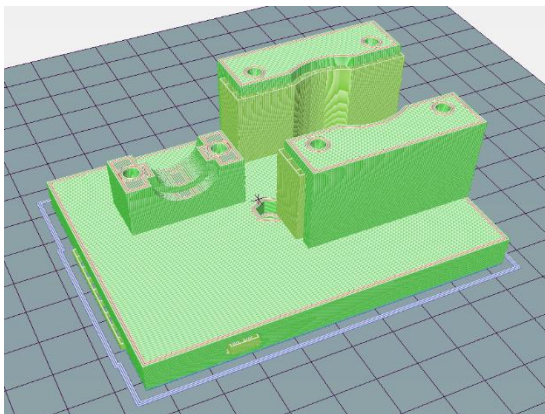
Η βάση στήριξης, χωρίς να επιβαρύνεται θερμικά ή μηχανικά, θα κατασκευαστεί από πλαστικό με τρισδιάστατη εκτύπωση.

Από το Solidworks, το αρχείο σχεδίασης εξάγεται σε μορφή stl και εισάγεται στο Repetier. Η επιλογή των παραμέτρων τεμαχισμού (slicing) (βλ. Εικ.6.1), δηλαδή των παραμέτρων top/bottom thickness, shell thickness, speed και infill density έγινε με γνώμονα τις μηχανικές ιδιότητες που πρέπει να έχει το εξάρτημα και είναι τυπικές για την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM.

Μετά την διαδικασία slicing, παράγεται ο κώδικας G που θα εκτελεστεί στον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Το αρχείο που παράγεται περιέχει όλες τις εντολές που χρειάζονται για να εναποθέσει το ακροφύσιο το υλικό επάνω στο τραπέζι εκτύπωσης για κάθε επίπεδο. Η οπτικοποίηση του τελικού κομματιού καθώς και τα στατιστικά της εκτύπωσης (βλ. Εικ. 6.2) εξάγονται από το Repetier.



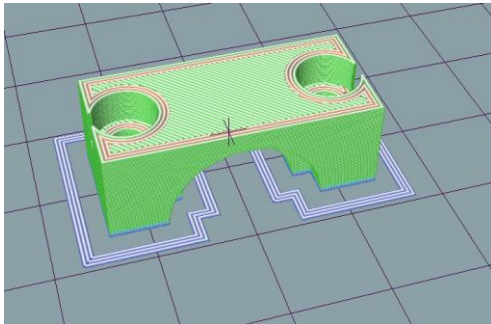
Εικόνα 6.1 Παράμετροι τρισδιάστατης εκτύπωσης



Printing Statistics

Estimated Printing Time:	3h:27m:59s
Layer Count:	182
Total Lines:	145401
Filament needed:	17761 mm
Extruder 1	17761 mm

Εικόνα 6.2 Στατιστικά κατασκευής εξαρτήματος.



Printing Statistics

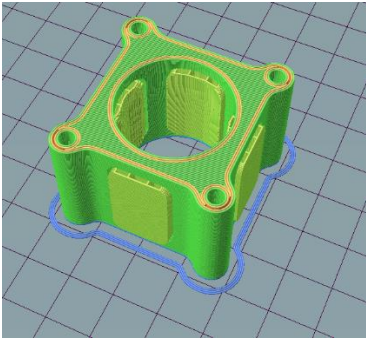
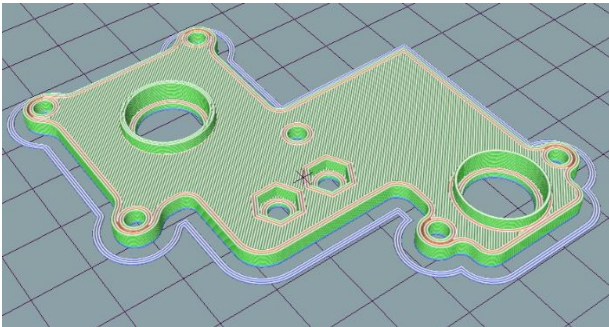
Estimated Printing Time:	9m:27s
Layer Count:	50
Total Lines:	18952
Filament needed:	788 mm
Extruder 1	788 mm

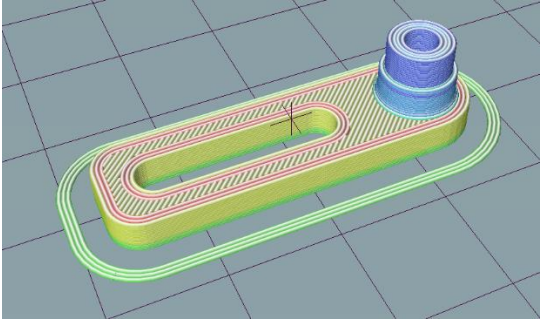
Εικόνα 6.3 Εκτύπωση καβαλέτου ψόκτρας

Από τα στατιστικά λαμβάνεται ο χρόνος κατασκευής καθώς και το απαιτούμενο υλικό έτσι ώστε να υπολογιστεί το συνολικό κόστος.

Επιπλέον με τη βάση στήριξης, εκτυπώνεται και το καβαλέτο στήριξης της ψόκτρας (βλ. Εικ. 6.3).

6.2.2 Εμπρόσθια πλάκα, αποστάτης και τεντωτήρας

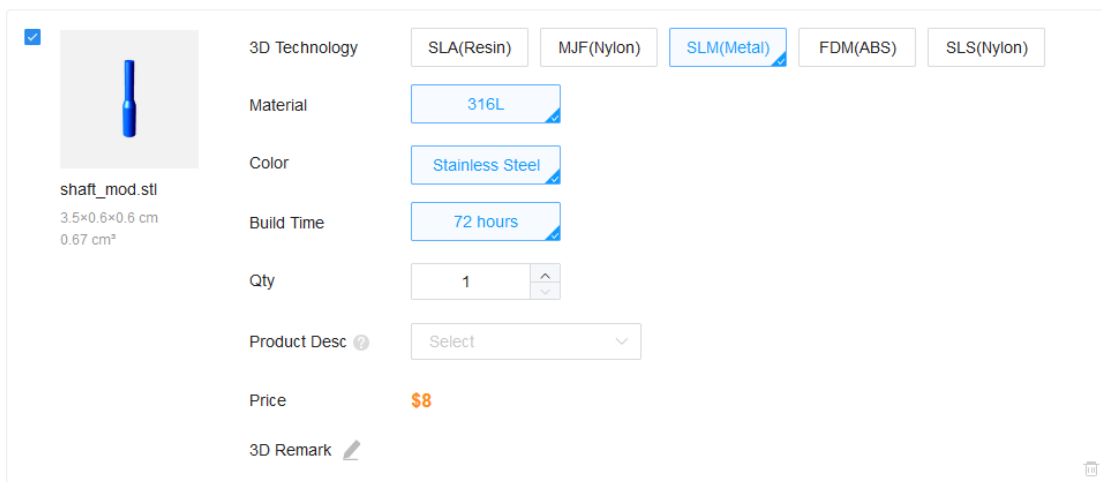
Εξάρτημα	Στατιστικά εκτύπωσης										
Αποστάτης 	Printing Statistics <table> <tr> <td>Estimated Printing Time:</td> <td>1h:1m:13s</td> </tr> <tr> <td>Layer Count:</td> <td>137</td> </tr> <tr> <td>Total Lines:</td> <td>156302</td> </tr> <tr> <td>Filament needed:</td> <td>4855 mm</td> </tr> <tr> <td>Extruder 1</td> <td>4855 mm</td> </tr> </table>	Estimated Printing Time:	1h:1m:13s	Layer Count:	137	Total Lines:	156302	Filament needed:	4855 mm	Extruder 1	4855 mm
Estimated Printing Time:	1h:1m:13s										
Layer Count:	137										
Total Lines:	156302										
Filament needed:	4855 mm										
Extruder 1	4855 mm										
Εμπρόσθια πλάκα 	Printing Statistics <table> <tr> <td>Estimated Printing Time:</td> <td>31m:2s</td> </tr> <tr> <td>Layer Count:</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Total Lines:</td> <td>36391</td> </tr> <tr> <td>Filament needed:</td> <td>2483 mm</td> </tr> <tr> <td>Extruder 1</td> <td>2483 mm</td> </tr> </table>	Estimated Printing Time:	31m:2s	Layer Count:	25	Total Lines:	36391	Filament needed:	2483 mm	Extruder 1	2483 mm
Estimated Printing Time:	31m:2s										
Layer Count:	25										
Total Lines:	36391										
Filament needed:	2483 mm										
Extruder 1	2483 mm										


<p>Τεντωτήρας</p> 	<p>Printing Statistics</p> <table> <tr> <td>Estimated Printing Time:</td> <td>6m:59s</td> </tr> <tr> <td>Layer Count:</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>Total Lines:</td> <td>13220</td> </tr> <tr> <td>Filament needed:</td> <td>398 mm</td> </tr> <tr> <td>Extruder 1</td> <td>398 mm</td> </tr> </table>	Estimated Printing Time:	6m:59s	Layer Count:	45	Total Lines:	13220	Filament needed:	398 mm	Extruder 1	398 mm
Estimated Printing Time:	6m:59s										
Layer Count:	45										
Total Lines:	13220										
Filament needed:	398 mm										
Extruder 1	398 mm										

6.2.3 Άξονας ανάμειξης

Ο άξονας ανάμειξης (βλ. Εικ. 4.6) είναι ένα απλό σχεδιαστικά εξάρτημα αλλά η εσωτερική διαμόρφωση που έχει για τη συναρμογή του με τον κινητήρα ανάμειξης, αποτελεί ιδιαιτερότητα ως προς τον τρόπο κατασκευής. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας γιατί ο άξονας περιστρέφεται μέσα στο θάλαμο ανάμειξης όπου ρέει πλαστικό με ίνες άνθρακα. Εταιρίες όπως οι Pcbway και Jlcpcb παρέχουν υπηρεσίες 3D εκτόπωσης για πλαστικά αλλά και μεταλλικά υλικά με τεχνολογίες εκτόπωσης Resin ή ακόμα και SLM.

Μετά τη δημιουργία του σχεδίου και τη μετατροπή του σε μορφή stl, γίνεται μεταφόρτωση στη σελίδα της εταιρίας και εκτιμάται το κόστος καθώς και ο χρόνος παράδοσης (βλ. Εικ. 6.4). Η εξωτερική επιφάνεια του άξονα στη διάμετρο που συνεργάζεται με τη στεγανοποιητική διάταξη, θα υποστεί λείανση με περιστροφή σε τσοκ τόννου και χρήση λεπτόκοκκου γυαλόχαρτου.



<input checked="" type="checkbox"/>  <p>shaft_mod.stl 3.5x0.6x0.6 cm 0.67 cm³</p>	3D Technology	SLA(Resin) MJF(Nylon) SLM(Metal) FDM(ABS) SLS(Nylon)
	Material	316L
	Color	Stainless Steel
	Build Time	72 hours
	Qty	1
	Product Desc	Select
	Price	\$8
	3D Remark	

Εικόνα 6.4 Εκτίμηση κόστους για 3Δ εκτόπωση του άξονα ανάμειξης από υλικό 316L

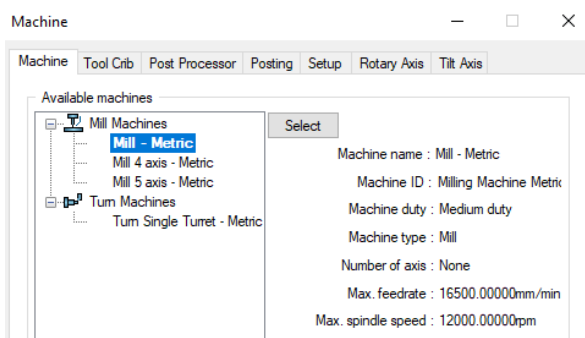
6.2.4 Θάλαμος ανάμειξης

Καθώς ο θάλαμος ανάμειξης είναι ένα εξάρτημα μέσα στο οποίο τήκεται και ρέει πολυμερές, θα κατασκευαστεί από αλουμίνιο λόγω της καλής θερμικής αγωγιμότητας. Επιπλέον καθώς έχει διαμορφώσεις που απαιτούν εσωτερική κατεργασία με διαστασιακή ακρίβεια για τη συναρμολόγηση άλλων εξαρτημάτων, επιλέγεται η κοπή του σε φρέζα ή κέντρο κατεργασίας CNC.

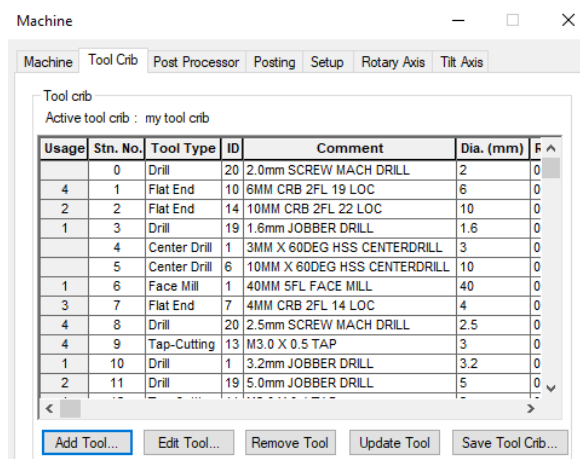
Για την παραγωγή του προγράμματος κατεργασίας του εν λόγω εξαρτήματος, ακολουθείται μια τυπική διαδικασία για αυτές τις περιπτώσεις με βήματα που παρουσιάζονται παρακάτω. Η διαδικασία αυτή σε γενικές γραμμές ακολουθείται σε όλα τα λογισμικά CAM.

Αρχικά καθορίζεται ο τύπος της εργαλειομηχανής (βλ. Εικ. 6.5) και οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται. Μαζί με τον τύπο της εργαλειομηχανής, επιλέγονται αναλυτικά και τα κοπτικά εργαλεία (βλ. Εικ. 6.6) που θα χρησιμοποιηθούν ορίζοντας συγκεκριμένα τις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά τους καθώς και τις συνθήκες κοπής που αυτά θα δουλέψουν.

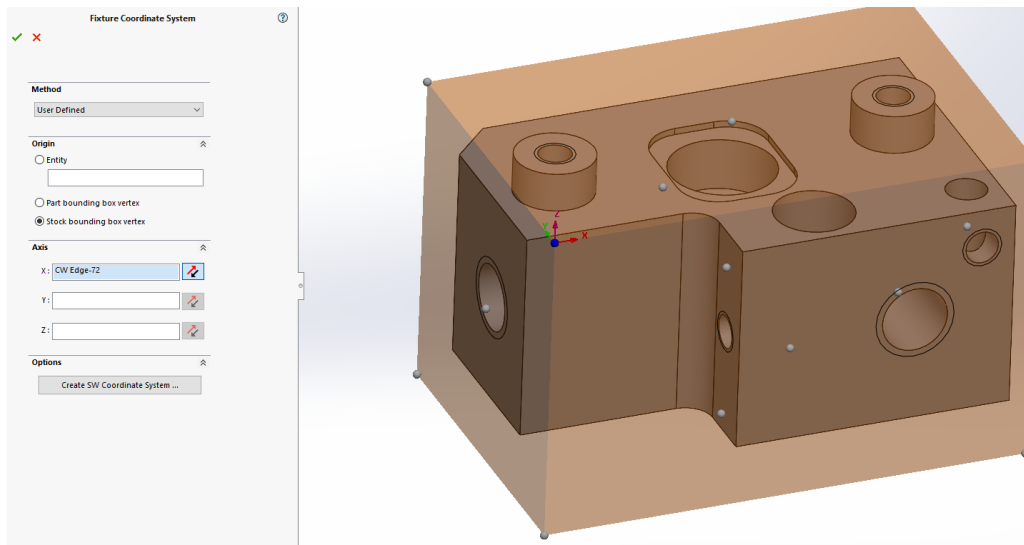
Ακολούθως, επιλέγεται το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του κομματιού (βλ. Εικ. 6.7) επάνω στο σχέδιο και έπειτα επιλέγονται οι διαστάσεις του ακατέργαστου υλικού (βλ. Εικ. 6.8) από το οποίο θα προκύψει το τελικό τεμάχιο μετά από την κοπή. Στη συνέχεια εξάγονται οι διάφορες φάσεις κατεργασίας (φασεολόγιο) που απαιτούνται και η στρατηγική που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο για να κάνει την κοπή της κάθε φάσης. Επιλέγοντας ένα επίπεδο κατεργασίας – setup (βλ. Εικ. 6.9) ουσιαστικά ορίζεται το σύνολο των κοπών που θα κάνει η μηχανή σε αυτό το επίπεδο και οι στρατηγικές που θα εκτελέσει το εργαλείο για να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη φάση (βλ. Εικ. 10,11). Η διαδικασία μπορεί να γίνει αυτόματα από το λογισμικό αλλά και χειροκίνητα από το χρήστη.



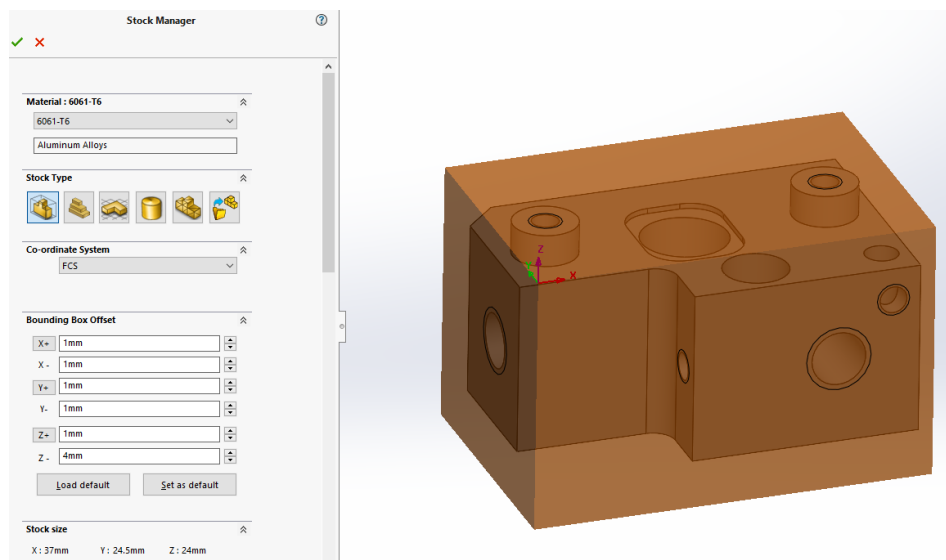
Εικόνα 6.5 Επιλογή τύπου εργαλειομηχανής



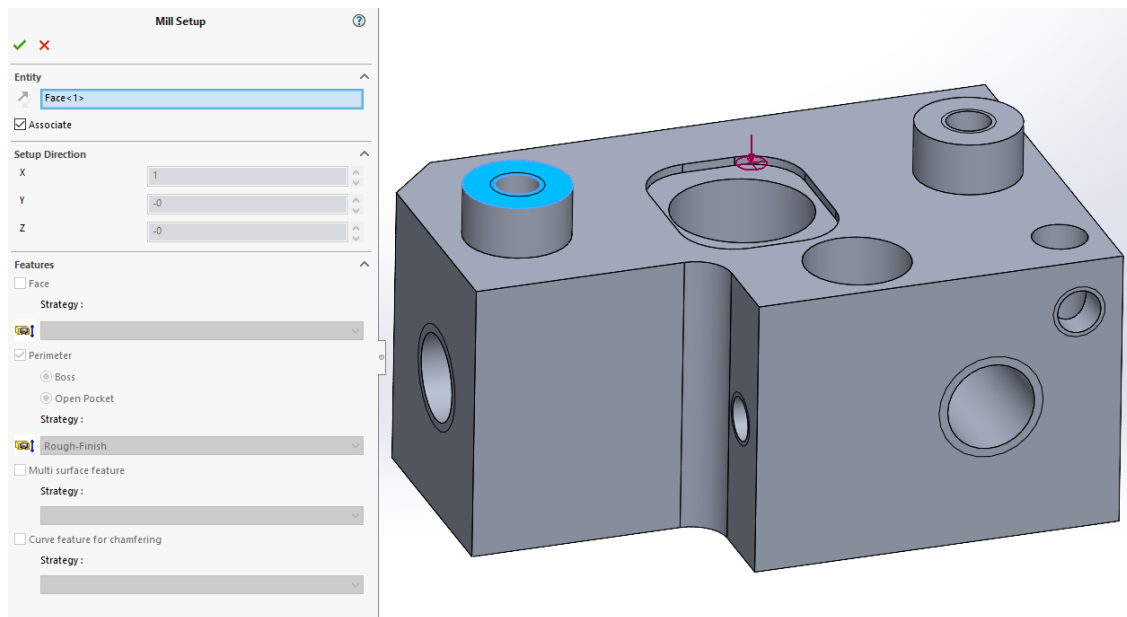
Εικόνα 6.6 Λίστα κοπτικών για την κοπή των διαφόρων φάσεων



Εικόνα 6.7 Καθορισμός του συστήματος συντεταγμένων



Εικόνα 6.8 Καθορισμός του ακατέργαστου υλικού



Εικόνα 6.9 Καθορισμός του επιπέδου κατεργασίας. Καταδεικνύοντας ένα επίπεδο, το λογισμικό αντιλαμβάνεται τις κοπές που θα κάνει σε αυτό.

Με τις απαραίτητες ρυθμίσεις για κάθε στρατηγική σε παραμέτρους όπως κοπτική ταχύτητα, πρόωση, προσέγγιση κοπτικού, κτλ (βλ. Εικ. 6.12) το λογισμικό CAM υπολογίζει την τροχιά του κοπτικού. Στη συνέχεια υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης προσομοίωσης (βλ. Εικ. 6.13, 6.14) όπου ο μηχανικός βλέπει ακριβώς την κίνηση του εργαλείου και αν υπάρχει σύγκρουση με τις ιδιοσυσκευές συγκράτησης. Επίσης εξάγεται από τα στατιστικά ο χρόνος κοπής (βλ. Εικ. 6.15)

6.2.5 Μπρακέτο κινητήρα

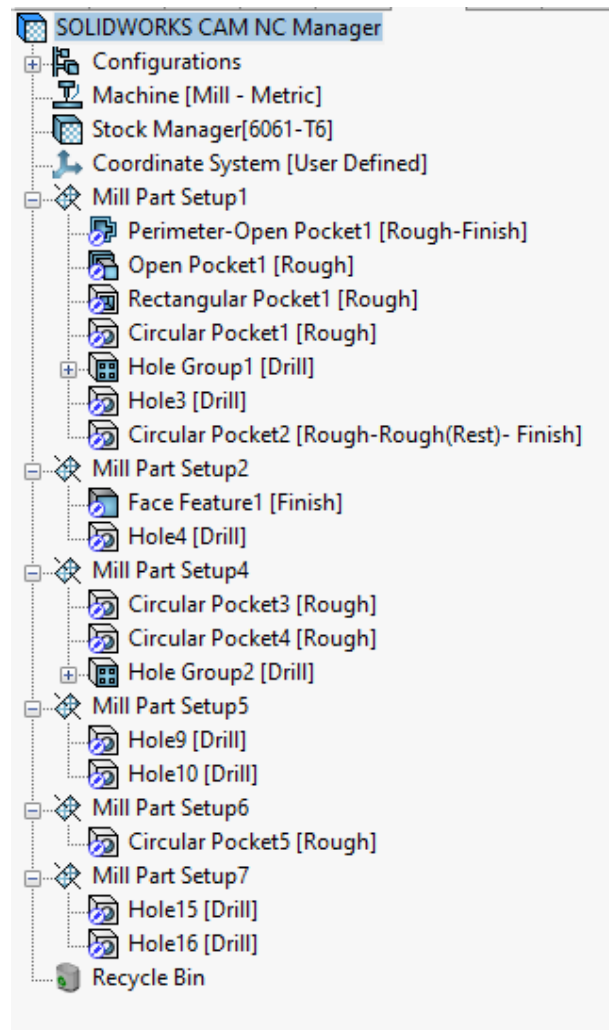
Το εξάρτημα αυτό θα κατασκευαστεί από αλουμίνιο γιατί βοηθά δια μέσου της ψύκτρας, στο να μην ζεσταίνεται ο κινητήρας του άξονα ανάμιξης. Ύστερα από επεξεργασία στο Solidworks Cam προκύπτει ο χρόνος κατεργασίας που φαίνεται στον πίνακα.

6.2.6 Χιτώνιο

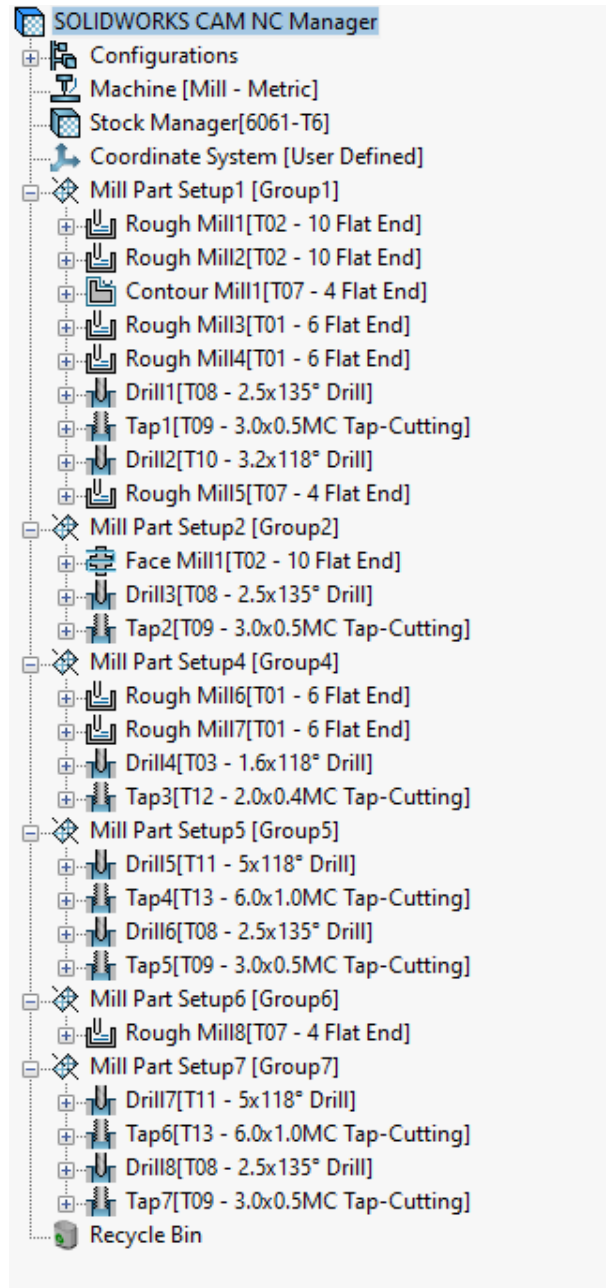
Το χιτώνιο του μηχανισμού τροφοδοσίας σκόνης θα φτιαχτεί από ανοξείδωτο χάλυβα γιατί πρέπει να αντέχει στη φθορά που προκαλείται από τις ίνες. Είναι κυλινδρικής μορφής αλλά διαθέτει λεπτομέρειες κυρίως εσωτερικά που δυσκολεύουν την κατεργασία οπότε η κοπή θα γίνει με μικρή ταχύτητα και πρόωση.

6.2.7 Δεξαμενή σκόνης

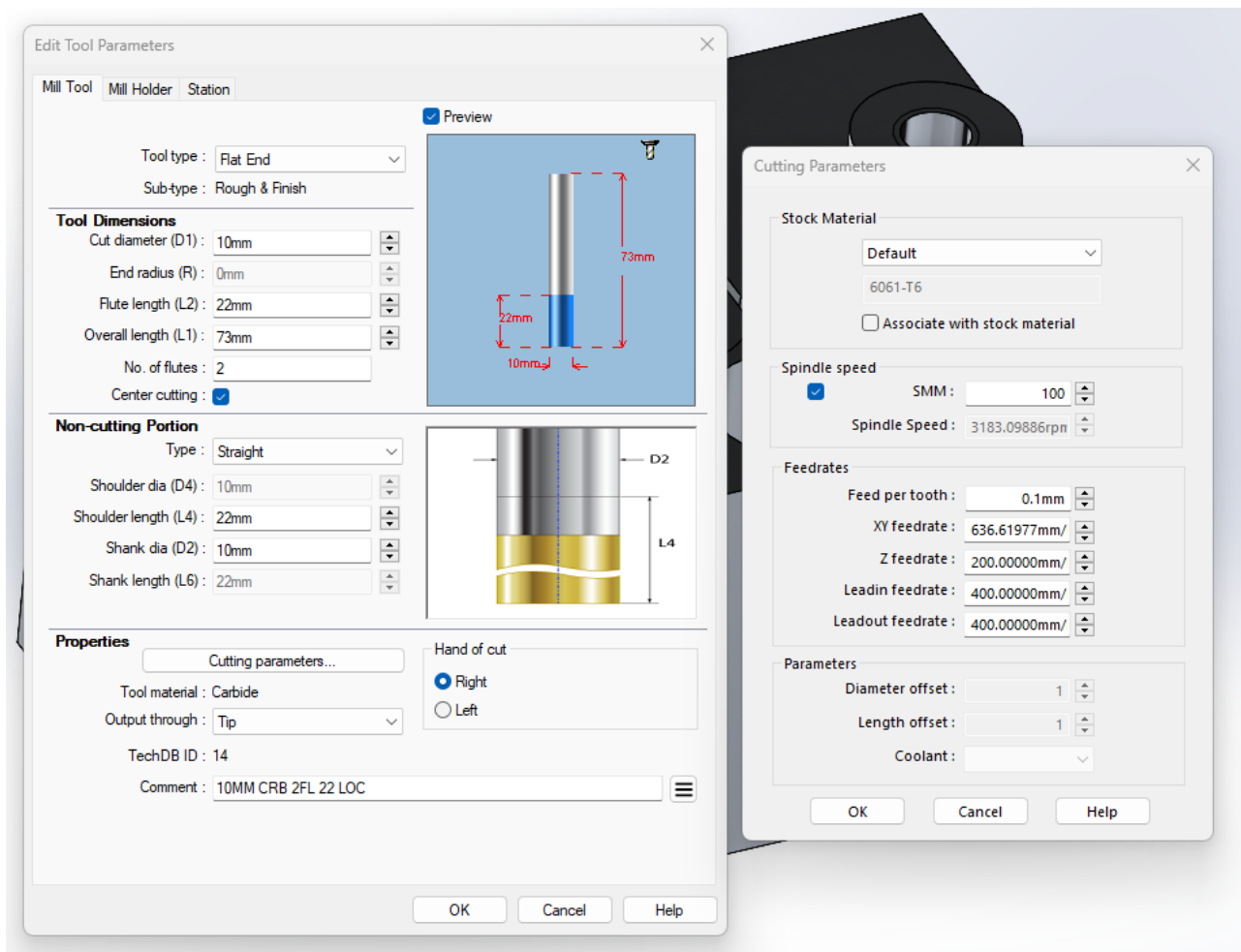
Βρίσκεται πολύ κοντά στο θάλαμο ανάμιξης και εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία αλλά είναι επιθυμητό να έχει όσο γίνεται χαμηλή θερμική αγωγιμότητα γιατί αλλιώς θα λειτουργήσει σαν περσόνιο και ο θάλαμος ανάμιξης δεν θα είναι θερμικά σταθερός. Επιλέγεται ως υλικό το Τεφλόν (PTFE). Έχει καλές μηχανικές ιδιότητες, αντέχει άνετα μέχρι και τους 250°C και έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Απαιτούνται περίπου 50 λεπτά κατεργασίας.



Εικόνα 6.10 Το σύνολο των φάσεων για το συγκεκριμένο τεμάχιο



Εικόνα 6.11 Λίστα με τις στρατηγικές κοπής της κάθε φάσης και τα αντίστοιχα κοπτικά εργαλεία



Εικόνα 6.12 Στιγμιότυπο από τον καθορισμό των συνθηκών κοπής για κάθε εργαλείο ξεχωριστά

6.2.8 Αντάπτορας

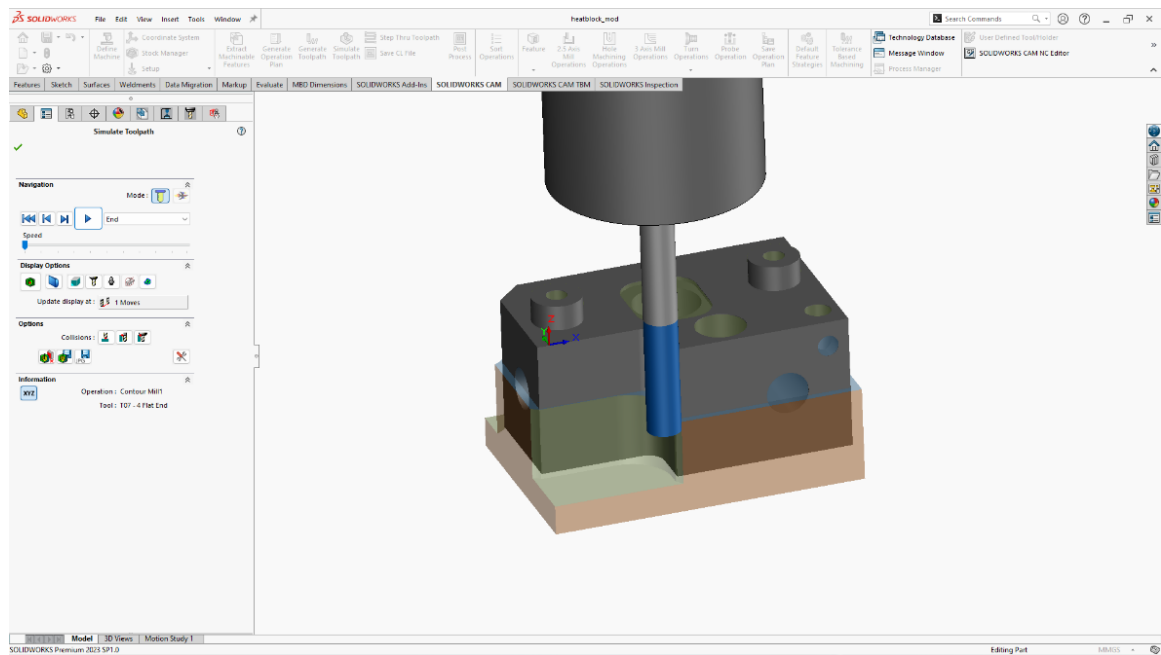
Θα φτιαχτεί από αλουμίνιο για να συγκρατήσει με ασφάλεια τη δύναμη του μάντα και θα ασφαλιστεί στον άξονα του βηματικού με ακέφαλη βίδα allen.

6.2.9 Αεραγωγός

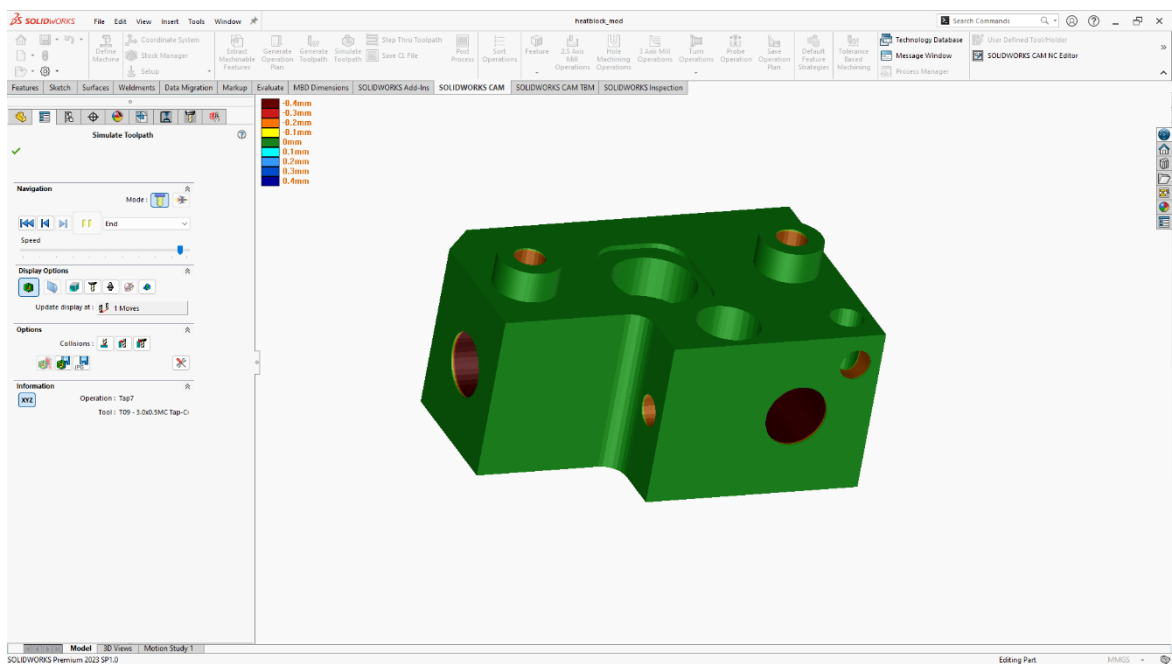
Ο αεραγωγός του ανεμιστήρα μπορεί να είναι ο αεραγωγός που κατασκευάζει η E3D για την κεφαλή V6 που ταιριάζει μαζί με τον ανεμιστήρα της, αλλά επειδή ακουμπάει στο μπρακέτο του κινητήρα ανάμιξης, με ένα αιχμηρό εργαλείο μπορεί να αφαιρεθεί λίγο υλικό. Ειδάλλως μπορεί να εκτοπωθεί από PETG με ελάχιστο κόστος και να ταιριάζει ακριβώς.

6.2.10 Κοχλίας τροφοδοσίας σκόνης

Προκειμένου να εκπονηθεί πρόγραμμα κατεργασίας σε 4-αξονική μηχανή και επειδή το εξάρτημα θα κατασκευαστεί από ανοξείδωτο χάλυβα, προτιμάται η εκτόπωση όπως και στην περίπτωση του άξονα ανάμιξης. Από την εταιρία που θα κάνει την εκτόπωση, λαμβάνουμε το

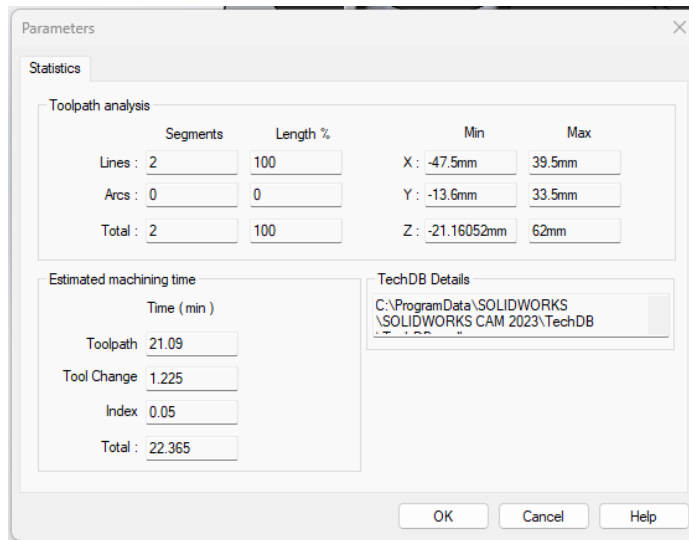


Εικόνα 6.13 Δημιουργία προσομοίωσης

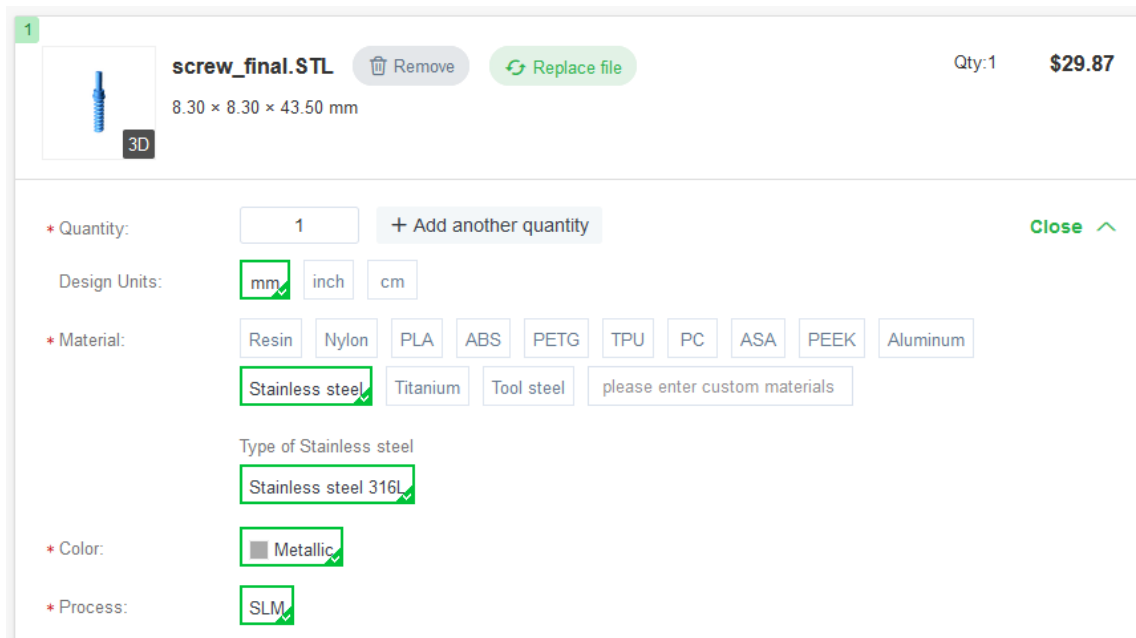


Εικόνα 6.14 Χρωματική απεικόνιση της επιφάνειας του κομματιού μετά την κατεργασία. Πράσινο σημαίνει ακριβώς στη διάσταση ενώ κόκκινο σημαίνει ότι αφαιρέθηκε παραπάνω υλικό. Εδώ τα κόκκινα είναι το σπείρωμα.

εκτιμώμενο κόστος (βλ. Εικ. 6.16). Εναλλακτικά με μικρό κόστος μπορεί να φτιαχτεί από στριφόνι κατάλληλης διαμέτρου.



Εικόνα 6.15 Εξαγωγή των στατιστικών της κατεργασίας του κομματιού. Ο χρόνος κατεργασίας χρησιμεύει στον υπολογισμό του κόστους κατασκευής.



Εικόνα 6.16 Κόστος εκτόπωσης κοχλίου

6.2.11 Λοιπά εξαρτήματα

Η ψόκτρα είναι τυποποιημένη της E3D και στον τόρνο αφαιρούνται τα δύο τελευταία περβύγια για να προσαρμοστεί στο μπρακέτο.

6.3 Εκτίμηση κόστους

Για τον υπολογισμό του κόστους, καταρτίζονται συγκεντρωτικοί πίνακες με τα εξαρτήματα ομαδοποιημένα ανάλογα το είδος της κατεργασίας καθώς και ξεχωριστός πίνακας με τα τυποποιημένα.

Συγκεντρωτικά οι χρόνοι κατεργασίας αφαίρεσης για τα αντίστοιχα κομμάτια φαίνονται στον πίνακα 6.1

Πίνακας 6.1 Χρόνοι κατεργασίας

α/α	Ονομασία	Χρόνος κατεργασίας (min)
1	Θάλαμος ανάμιξης	23
2	Μπρακέτο κινητήρα	15
3	Χιτώνιο	26
4	Δεξαμενή σκόνης	48
5	Αντάπτορας	8

Θεωρείται κόστος εργασίας €15 ανά ώρα και λειτουργίας μηχανής 2 ευρώ ανά ώρα [16] οπότε για τις κοπές συνολικά το κόστος εκτιμάται 34ευρώ.

Για τα τεμάχια που θα εκτυπωθούν εκτιμάται το κόστος με τη βοήθεια του εκτιμητή κόστους της εταιρίας μετά από τη μεταφόρτωση των τρισδιάστατων μοντέλων σε μορφή *stl. Αναλυτικά ανά τεμάχιο τα κόστη φαίνονται στον πίνακα 6.2

Πίνακας 6.2 Κόστος εκτύπωσης

α/α	Τεμάχιο	Κόστος εκτύπωσης
1	Βάση στήριξης	11
2	Καβαλέτο ψόκτρας	8
3	Αποστάτης	8
4	Εμπρόσθια πλάκα	8
5	Τεντωτήρας	8

6	Άξονας ανάμιξης	8
7	Αεραγωγός	8
8	Κοχλίας	30

Το συνολικό κόστος των εκτυπωμένων εκτιμάται στα 89ευρώ.

Πίνακας 6.3 Τυποποιημένα εξαρτήματα

α/α	Εξάρτημα	Αριθμός τεμαχίων	Κόστος/τεμ	Σύνολο
1	Ρουλεμάν 618/7	2	13	26
2	Ψόκτρα	1	---	---
3	Κινητήρας ανάμιξης	1	10	10
4	Ανεμιστήρας	1	2	2
5	Βηματικός τροφοδοσίας	1	20	20
6	Ακροφύσιο	1	10	10
7	Τερματικός διακόπτης	2	3	6
8	Διάφοροι κοχλίες		10	10
9	Τροχαλία χρονισμού	2	15	30

Συνολικά το εκτιμώμενο κόστος εκτός των μεταλλικών υλικών (εκκρεμεί) προκύπτει στα 237 ευρώ.

6.4 Συμπεράσματα

Αν τα εκτυπώσιμα τεμάχια εκτός των ανοξειδωτων εκτυπωθούν σε οικιακό εκτυπωτή θα προκύψει αισθητή μείωση του κόστους εις βάρος όμως του χρόνου κατασκευής. Παρατηρήθηκε ότι αρκετά από τα τυποποιημένα εξαρτήματα είναι σειράς μη εμπορεύσιμης και κατ' επέκταση η διαθεσιμότητά τους κρίνεται αμφίβολη. Τέτοια είναι τα ρουλεμάν και οι τροχαλίες. Ο ανασχεδιασμός της κεφαλής με κοινής σειράς τυποποιημένα εξαρτήματα και με προσανατολισμό περισσότερο στη φιλοσοφία του DFMA είναι απαραίτητος.

Γενικά συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η κεφαλή εκτύπωσης με ανάμιξη κοντών ινών άνθρακα ή υάλου, είναι μια σύνθετη σχετικά συσκευή που η λειτουργία της περιλαμβάνει φαινόμενα ροής και διάχυσης αλλά και μηχανικά καθώς εμπλέκει ροή τηγμένου πολυμερούς και προσαγωγή μη συνεχούς μέσου όπως είναι οι ίνες. Επίσης είναι αρκετά δύσκολο κατά τη φάση της ανάλυσης και βελτιστοποίησης, να επιλυθεί μοντέλο που να προσομοιώνει όλα τα παραπάνω.

Αρχικά, προτείνεται να μελετηθεί περαιτέρω, η θερμική συμπεριφορά του μηχανισμού. Από τη μελέτη και χρήση των απλών κεφαλών εκτύπωσης έχει γίνει γνωστό ότι είναι πολύ σημαντικό η κεφαλή να είναι καλά μονωμένη έτσι ώστε καθώς το νήμα απορροφά θερμότητα, το θερμαντικό στοιχείο να μπορεί να αναπληρώσει την απώλεια για την τήξη αλλά και τις απώλειες προς το περιβάλλον. Στην κεφαλή που σχεδιάστηκε εδώ, απαιτείται ο υπολογισμός αυτών των απωλειών ώστε να διαστασιολογηθεί το θερμαντικό στοιχείο κατάλληλα. Σαφώς και πρέπει να προβλεφθεί η τοποθέτηση κατάλληλης μόνωσης. Άλλωστε χωρίς μόνωση με την ψύξη που δημιουργείται από τον ανεμιστήρα ψύξης του εξερχόμενου υλικού από το ακροφύσιο, η κεφαλή δεν μπορεί να είναι θερμικά σταθερή. Όλα τα προσκείμενα εξαρτήματα στον θάλαμο ανάμιξης όπως ο κινητήρας ανάμιξης, η δεξαμενή της σκόνης και το χιτώνιο (barrel) με τον κοχλία, λειτουργούν ως ψύκτρες (περύγια) αποβολής θερμότητας από το θάλαμο προς το περιβάλλον και γι' αυτό πρέπει να μελετηθεί η ροή της θερμότητας προς αυτά. Η ψύκτρα στην είσοδο του νήματος αντιθέτως επιβάλλεται να υπάρχει γιατί έτσι με την τοποθέτηση του heatbreak, λειτουργεί ως φράγμα

θερμικό και αποτρέπει τη θέρμανση του νήματος πριν αυτό εισέλθει στο θάλαμο ανάμιξης. Επίσης, με τη θερμική ανάλυση θα διαπιστωθεί η θερμική καταπόνηση και των λοιπών εξαρτημάτων όπως η εξωτερική πλάκα, ο ιμάντας κτλ.

Στη συγκεκριμένη σχεδίαση δεν έγινε η πρόβλεψη για ανεμιστήρα ψύξης του υλικού που εξέρχεται από το ακροφύσιο. Για να συμπεριληφθεί στο σχέδιο, πρέπει να γίνει επιλογή συγκεκριμένου μοντέλου από την αγορά και εισαγωγή του στο συναρμολόγημα με δημιουργία αεραγωγού που θα καταλήγει στο πλάι της εξόδου του ακροφυσίου. Σημειώνεται ότι δεν απαιτούν όλα τα υλικά ψύξη μετά την εξώθηση. Τέτοιο υλικό είναι το ABS.

Επίσης δεν έγινε πρόβλεψη αναλυτικά του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί και των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του για τη στεγανοποίηση του θαλάμου με τον άξονα ανάμιξης. Υπάρχει πληθώρα υλικών και τεχνικών για τη στεγανοποίηση περιστρεφόμενων τεμαχίων (π.χ. τσιμούχες άξονα) αλλά ο διαθέσιμος χώρος και η θερμοκρασιακές συνθήκες δυσκολεύουν το πρόβλημα.

Εναλλακτικά του μηχανισμού τροφοδοσίας σκόνης με κοχλία, προτείνεται να μελετηθεί η περίπτωση της σχεδίασης κεφαλής ανάμιξης δύο διαφορετικών νημάτων, δηλαδή ενός σκέτου πλαστικού κι ενός με περιεκτικότητα 20% σε υλικό ενίσχυσης που είναι διαθέσιμο στην αγορά. Το πλεονέκτημα εδώ είναι ότι η κεφαλή θα αναμειγνύει δύο παρόμοια κατάσταση υλικά (τηγμένα και συνεχή) και όχι πολυμερές με σκόνη. Ενδεχομένως η μίξη να γίνεται πιο εύκολα και γρήγορα. Εφόσον έγινε γνωστό το ωφέλιμο εύρος της περιεκτικότητας υλικού ενίσχυσης από τη βιβλιογραφία και δεν πρέπει να αυξάνεται απεριόριστα λόγω ψαθυρότητας, τότε η χρήση έτοιμου νήματος με προσθήκη ινών 20% δεν αποτελεί πρόβλημα.

Στη μελέτη και ανάλυση της κατασκευής, διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος για τη μίξη και την έξοδο μίγματος από το ακροφύσιο είναι μεγάλος. Προτείνεται να γίνει παραμετρική μελέτη κρίσιμων διαστάσεων του θαλάμου και των εξαρτημάτων του και βελτιστοποίηση αυτών ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος. Τέτοιες διαστάσεις είναι η διάμετρος, το διάκενο μεταξύ θαλάμου και άξονα καθώς και το μήκος του θαλάμου. Με την ελάττωση του διακένου αλλά και της διαμέτρου του θαλάμου, θα προκύψει και ελάττωση της μηχανικής καταπόνησης που είναι ζητούμενο για την αξιοπιστία του μηχανισμού.

Το υλικό ενίσχυσης του πολυμερούς, που αποτελείται από τεμαχισμένες ίνες άνθρακα μαζί με πούδρα γραφίτη ενδεχομένως να εμφανίζει τοπικά συσσωματώσεις κατά την προώθηση μέσα στον κοχλία και ιδιαίτερα στο σημείο που υπάρχει κωνικότητα λίγο πριν εισέλθει στο θάλαμο. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς τέτοιων υλικών είναι δύσκολη και απαιτεί χρήση εξειδικευμένων μοντέλων που δεν είναι άμεσα διαθέσιμα στο Comsol. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση της συμπεριφοράς μη συνεχών μέσων είναι η *Discrete Element Method* [25] και κάποιες φορές συνδυάζεται και με το CFD. Όμως απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ για μεγάλο αριθμό σωματιδίων.

Βιβλία και Δημοσιεύσεις

- [1] Hofstätter, Thomas, Pedersen, David Bue, Nielsen, Jakob Skov, Pimentel, Rodrigo, Mischkot, Michael; Hansen, Hans Nørgaard « Calibration of a Numerical Model for Heat Transfer and Fluid Flow in an Extruder»
- [2] Katarzyna Bryll, Elżbieta Piesowicz, Paweł Szymański, Wojciech Ślęczka and Marek Pijanowski «Polymer Composite Manufacturing by FDM 3D PrintingTechnology» <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823702006>
- [3] Fuda Ning, Weilong Cong, Junhua Wei, Shiren Wang, Meng Zhang «Additive Manufacturing of CFRP Composites using Fused Deposition Modeling: Effect of Carbon Fiber Content and Length», Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference, North Carolina, USA, 2015
- [4] Lee, K.S.; Yap, T.C. «Design and Development of Solid Particle Ejector for an FDM 3D Printer» Engineering Archive. Engrxiv 2022.
- [5] Khairul Izwan Ismail, Tze Chuen Yap, Rehan Ahmed, «3D-Printed Fiber-Reinforced Polymer Composites by Fused Deposition Modelling (FDM): Fiber Length and Fiber Implementation Techniques» November 2022
- [6] Khairul Izwan Ismail, Suganti Ramarad and Tze Chuen Yap «Design and Fabrication of an In Situ Short-Fiber Doser for Fused Filament Fabrication 3D Printer: A Novel Method to Manufacture Fiber-Polymer Composite», January 2023
- [7] Bandar Almeshari, Harri Junaedi, Muneer Baig, Abdulhakim Almajid, «Development of 3D printing short carbon fiber reinforced polypropylene composite filaments», March 2023
- [8] H. Valkenaers, F. Vogeler, E. Ferraris, A. Voet, J-P Kruth «A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3D-printing»
- [9] Katsundo Hitomi «Manufacturing Systems Engineering»
- [10] Ases Akas Mishra, Affaf Momin, Matteo Strano, Kedarnath Rane « Implementation of viscosity and density models for improved numerical analysis of melt flow dynamics in the nozzle during extrusion-based additive manufacturing», July 2021
- [11] Thomas Hofstaetter, Rodrigo Pimentel, David B. Pedersen, Michael Mischkot, Hans N. Hansen «Simulation of a Downsized FDM Nozzle»
- [12] Munna Kumar, Prof. Karan Singh Verma, Dr. S.K. Nagpure « Numerical Simulation of Rep-Rap 3D Printer Liquefier to Determine the Thermal Behavior of Heat Sink», 2017
- [13] R. K. THAKUR, Ch. VIAL, K. D. P. NIGAM, E. B. NAUMAN and G. DJELVEH « STATIC MIXERS IN THE PROCESS INDUSTRIES - A REVIEW», August 2003
- [14] H K Versteeg, W Malalasekera «An Introduction to Computational Fluid Dynamics», Second edition

- [15] Jamison Goa, Scott N. Schiffres, Adam G. Stevensa, A. John Harta « Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design», March 2017
- [16] Κριμπένης Α. «Σημειώσεις παραδόσεων CAD-CAM-CNC του ΠΙΜΣ-Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων», Ψαχνά Ευβοίας 2016

Ιστοσελίδες

- [17] <https://www.thingiverse.com/thing:2254103>
- [18] <https://e3d-online.com/products/v6-all-metal-hotend>
- [19] <https://abra-electronics.com/electromechanical/motors/gear-motors/mini-metal-gearmotors/ga12-n20-12v200.html>
- [20] <https://www.3dtechno.in/optical-endstop-light-control-limit-optical-switch.html>
- [21] <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [22] <https://www.easycomposites.co.uk/milled-carbon-fibre-powder>
- [23] <https://help.autodesk.com/view/MFAA/2018/ENU/?guid=GUID-7BC3A8F0-8B41-4FCB-BDF1-F1159E4DD175>
- [24] <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf>
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_element_method

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κατασκευαστικά Σχέδια της Κεφαλής

