

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ “ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ”**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΑΓΙΩΝΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (6549)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΔΟΥΣΜΠΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ, ΜΕΔ.,
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

Πάτρα, Φεβρουάριος 2023



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου από τον προπτυχιακό φοιτητή Μαγιάνο Γεώργιο με επιβλέπουσα την κα. Δούσπη Βασιλική. Αποτελεί την κριτική ανάλυση επάνω στην ερευνητική μελέτη και κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή σκυροδέματος, έπειτα από μετάφραση αυτής, του μεταπτυχιακού φοιτητή Lars Henrik Anell του πανεπιστημίου Λουντ της Σουηδίας από το τμήμα Επιστημονικού Σχεδιασμού της σχολής Μηχανικών.

Το θέμα της ήταν η κατασκευή ενός πρωτότυπου τρισδιάστατου εκτυπωτή σκυροδέματος, ο οποίος θα μπορούσε να συμβάλει στην κατασκευή μεγάλων σε μέγεθος αντικειμένων με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον, οικονομικό, γρήγορο, ακριβή και με δυνατότητα παραγωγής. Μια τέτοια τεχνολογία είναι το μέλλον της κατασκευαστικής αφού είναι γεγονός πλέον η κατασκευή ακόμα και κτιρίων με μεγάλα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις συμβατικές παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής που έχουν μεγαλύτερο κίνδυνο κατασκευαστικών λαθών, ελλιπή μελέτη σχεδίων κατασκευής, εργατικών ατυχημάτων, απαιτήσεις σε εργατικό προσωπικό και συχνά σπατάλη υλικών. Έγινε προσπάθεια ανάλυσης και βελτίωσης των εξαρτημάτων και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του εκτυπωτή αυτού.

Ο λόγος που με οδήγησε στην επιλογή της διπλωματικής αυτής είναι το ενδιαφέρον που παρουσιάζω πάνω στις προσθετικές τεχνικές τρισδιάστατης κατασκευής αλλά και στην ευκαιρία να εξοικειωθώ περαιτέρω στην Αγγλική ορολογία της μηχανικής. Ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα. Δούσπη Βασιλική του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για την πολύτιμη βοήθειά και καθοδήγηση που μου προσέφερε αλλά και τον φοιτητή του Πανεπιστημίου Λουντ Lars Henrik Anell, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να προβώ στην μετάφραση της μελέτης του.

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι ο συγγραφέας της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής

Μαγιώνος Γεώργιος



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αποτελεί την κριτική ανάλυση μελέτης και σχεδιασμού σχετικά με την κατασκευή ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή που τυπώνει στρώσεις σκυροδέματος δημιουργώντας από κάτω προς τα επάνω μία λεπτομερή και ανθεκτική κατασκευή, το σχέδιο της οποίας μπορεί να δημιουργηθεί με λογισμικό CAD, ή με σάρωση ενός προϋπάρχοντος αντικειμένου με σκοπό την ακριβή αντιγραφή του χρησιμοποιώντας κάποιο ανάλογο λογισμικό.

Το τελικό προϊόν έδινε την δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων ανάλογων της κλίμακας της μηχανής όπως έπιπλα δρόμου, λόγω της αντοχής του υλικού στις κακουχίες και τις καιρικές συνθήκες, ή και μακέτες κτιρίων με μεγάλη ταχύτητα, λεπτομέρεια και χαμηλό κόστος υλικού και διαδικασίας. Η επιτυχία του εγχειρήματος αυτού θα μπορούσε να έχει δώσει βάσεις για την δημιουργία εκτυπωτών σκυροδέματος μεγαλύτερης κλίμακας τα οποία θα είχαν την δυνατότητα να τυπώσουν μεγάλα αντικείμενα ή και κτίρια με την ταχύτερη και φθηνότερη τεχνική αυτή. Ως μία αυτοματοποιημένη διαδικασία και φιλική προς το περιβάλλον θα είχε πολλά πλεονεκτήματα στον κατασκευαστικό τομέα σε σχέση με τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους. Η ευκολία μαζικής εκτύπωσης πρωτοτύπων και σε συνδυασμό με το χαμηλότερο κόστος κατασκευής και την απαίτηση ελάχιστου ανθρώπινου δυναμικού θα έδινε στην τεχνολογία αυτή μία νέα θέση στον κατασκευαστικό τομέα.

Η συσκευή αποτελείται από τον εξωθητήρα από όπου βγαίνει το σκυρόδεμα, ο οποίος είναι ενωμένος σε ρομποτικό βραχίονα για να έχει την δυνατότητα να κινείται στους επιθυμητούς άξονες. Έγινε μελέτη και δοκιμές σχετικά με το σχήμα του στομίου του εξωθητήρα και τη διάταξη των πλευρικών σπατουλών όπου κατανέμουν και στρώνουν το εξωθούμενο σκυρόδεμα, καθώς και ο τρόπος που θα δημιουργείται η ροή του σκυροδέματος προς το στόμιο εξόδου. Ο ρομποτικός βραχίονας με την σειρά του είναι τοποθετημένος σε κυλιόμενη στιβαρή μεταλλική κατασκευή επάνω στην οποία βρίσκεται το δοχείο που περιέχει το προς εξώθηση σκυρόδεμα αλλά και ο ηλεκτροκινητήρας που κινεί τον μηχανισμό δημιουργίας ροής προωθώντας το σκυρόδεμα προς το στόμιο του εξωθητήρα.

Ο κατάλληλος ηλεκτροκινητήρας επιλέχθηκε επίσης ύστερα από δοκιμές, καθώς η πυκνότητα του μίγματος απαιτούσε όλο και μεγαλύτερη ισχύ. Το δοχείο του εξωθητήρα το οποίο περιέχει και τον μηχανισμό δημιουργίας ροής έπρεπε επίσης να εξετασθεί και να διαμορφωθεί καταλλήλως καθώς η γεωμετρία του και στην είσοδο και στον πυθμένα του έπαιζε σημαντικό ρόλο στην ευκολία ροής του μίγματος. Ο μηχανισμός δημιουργίας ροής επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπόψη την απλότητα και την αποτελεσματικότητα στην παραγωγή πίεσης.

Η κατάλληλη αναλογία κονιάματος και προσμίξεων ήρθε έπειτα από πολλές δοκιμές καθώς έπρεπε να επιτευχθεί η ανάλογη ρευστότητα διότι έπαιζε σημαντικό ρόλο και το βάρος του κονιάματος. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε μίγμα άμμου και νερού

για τις πρώτες δοκιμές του πρωτοτύπου λόγω της ανακυκλωσιμότητάς του και των παρόμοιων ιδιοτήτων του με το σκυρόδεμα.

Η κριτική ανάλυση αναφέρεται στα εξαρτήματα που επιλέχθηκαν κατά την κατασκευή του τρισδιάστατου εκτυπωτή, στον σχεδιασμό αυτών, το υλικό τους καθώς και στο βέλτιστο μείγμα σκυροδέματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

Περίληψη

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
1 Μεθοδολογία	3
1.1 Η διαδικασία ανάπτυξης	3
1.2 Παραγωγή ιδεών για το σχέδιο	3
1.3 Επιλογή προϊόντος σχεδίου	4
1.4 Έννοια δοκιμής του προϊόντος	4
2 Προδιαγραφές προϊόντος, παραγωγή και επιλογή σχεδίου	7
2.1 Προδιαγραφές του προϊόντος	7
2.2 Δημιουργία σχεδίου	7
2.2.1 Στόμιο εξωθητήρα	7
2.2.2 Πλαϊνές σπάτουλες	8
2.2.3 Μηχανισμός δημιουργίας ροής	8
2.3 Αξιολόγηση και επιλογή ιδέας	9
2.3.1 Διατομή	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2.3.2 Πλαϊνές σπάτουλες	10
2.3.3 Μηχανισμός δημιουργίας ροής	11
2.3.4 Τελικό σχέδιο	11
3 Εννοιολογική σχεδίαση	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1 Σχεδιασμός CAD	13
3.2 Τεχνική ανασκόπηση, εξαρτήματα και υλικά	14
4 Δοκιμή πρωτοτύπου, ανάλυση και βελτιώσεις	15
4.1 Σκοπός της δοκιμής	15
4.2 Πρώτη δοκιμή	15
4.2.1 Ανάλυση και βελτιώσεις	18
4.3 Δοκιμή με ισχυρότερο ηλεκτροκινητήρα	18
4.3.1 Ανάλυση και βελτιώσεις	20

4.4	Δοκιμή με τον κωνικό πυθμένα	21
4.4.1	Ανάλυση και βελτιώσεις	23
4.5	Δοκιμή με τον εξωθητήρα συνδεδεμένο στο ρομπότ ABB	23
4.5.1	Ανάλυση και βελτιώσεις	25
4.6	Δοκιμή με σωλήνα σχήματος γ	25
4.6.1	Ανάλυση και βελτιώσεις	27
4.7	Δοκιμή με χυλό	27
4.8	Δοκιμή με τυπικό σκυρόδεμα	29
4.8.1	Ανάλυση και βελτιώσεις	30
4.9	Δοκιμή με τυπικό σκυρόδεμα με προσθήκη νερού	30
4.9.1	Ανάλυση και βελτιώσεις	31
4.10	Δοκιμή με κονίαμα	31
4.11	Δοκιμή με τσιμέντο EPS.....	32
4.11.1	Ανάλυση και βελτιώσεις	34
4.12	Δοκιμή με ειδικό μίγμα σκυροδέματος	34
4.13	Δοκιμή με το ειδικό μίγμα σκυροδέματος και τον εξωθητήρα προσαρτησμένο στο ρομπότ	35
4.13.1	Ανάλυση και βελτιώσεις	41
4.14	Δοκιμή με το ειδικό μίγμα σκυροδέματος και τον εξωθητήρα τοποθετημένο στο ρομπότ και στον σωλήνα	42
4.14.1	Ανάλυση και βελτιώσεις	43
5	Αποτελέσματα.....	43
5.1	Τελικό προϊόν	43
5.2	Κατασκευή του τελικού πρωτοτύπου	44
5.3	Δεδομένα του τελικού σκυροδέματος.....	46
5.4	Λεπτομέρειες τελικών προϊόντων	46
6	Συμπέρασμα, συζήτηση και συστάσεις	47
6.1	Συμπεράσματα	47
6.2	Συζήτηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	47
7	Κριτική Ανάλυση.....	49
7.1	Μηχανισμός κίνησης στις τρεις διαστάσεις.....	49
7.2	Μηχανισμός δημιουργίας ροής εξώθησης.....	53
7.3	Μείγμα σκυροδέματος.....	53
7.4	Σχεδιασμός εξωθητήρα.....	54
8	Συμπεράσματα.....	61

9 Αναφορές	63
Παράρτημα Α : Συνταγή για το ειδικό μίγμα σκυροδέματος.....	65
Παράρτημα Β : Τεχνικές ιδιότητες του ηλεκτρικού κινητήρα του εξωθητήρα.....	67

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ή αλλιώς προσθετική κατασκευή είναι η διαδικασία δημιουργίας στερεών τρισδιάστατων αντικειμένων που προέρχονται από ένα ψηφιακό σχέδιο. Η κατασκευή του τρισδιάστατου αντικειμένου επιτυγχάνεται με προσθετικές μεθόδους. Σε μία προσθετική μέθοδο το αντικείμενο δημιουργείται προσαρμόζοντας διαδοχικές στρώσεις υλικού έως να ολοκληρωθεί το επιθυμητό αντικείμενο. Κάθε στρώση μπορεί να περιγραφεί σαν μία λεπτή οριζόντια διατομή του τελικού αντικειμένου. Η διαδικασία ξεκινά με την δημιουργία του ψηφιακού σχεδίου του αντικειμένου που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε. Αυτό το σχέδιο μπορεί να είναι ένα αρχείο CAD (Computer-Aided Design). Αυτό το αρχείο CAD δημιουργείται χρησιμοποιώντας μία εφαρμογή τρισδιάστατης σχεδίασης (SolidWorks, Cura κ.α.), ή με την βοήθεια τρισδιάστατου σαρωτή όταν θέλουμε να κάνουμε ακριβή αντιγραφή ενός αντικειμένου. Ο τρισδιάστατος σαρωτής μπορεί να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο ψηφιακό αντίγραφο ενός αντικειμένου.[1]

Η δημιουργία πρωτοτύπων στην βιομηχανική παραγωγή είναι απαραίτητη και καθοριστική, καθώς εξετάζουμε το αντικείμενο σχεδιαστικά, το αναλύουμε και έχουμε την δυνατότητα να του κάνουμε δοκιμές. Η πρωτοτυποποίηση τυπικά γίνεται σε μηχανουργείο με την αφαιρετική μέθοδο, που τα αντικείμενα συνήθως κατασκευάζονται με την βοήθεια φρέζας και τόρνου, ξεκινώντας από ένα συμπαγές τεμάχιο που αφαιρώντας συνετά υλικό φθάνουμε τελικά στο επιθυμητό γεωμετρικό αποτέλεσμα. Νέες εναλλακτικές τεχνολογίες μορφοποίησης αντί της αφαίρεσης υλικού, χαρακτηρίζονται ως τεχνικές ταχείας πρωτοτυποποίησης και πλέον προσθέτουν και ενώνουν υλικό σε στρώσεις έτσι ώστε να δημιουργηθεί το επιθυμητό τελικό σχήμα. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν γνωστοποιηθεί ως προσθετικές κατασκευές, εκτύπωση τριών διαστάσεων, κατασκευή σε στρώσεις κλπ. Αυτές οι προσθετικές τεχνικές προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε διάφορους τομείς σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές αφαίρεσης υλικού. Συμβάλουν στην ικανότητα κατασκευής αντικειμένων περίπλοκης γεωμετρίας με υψηλή ακρίβεια, χωρίς την ανάγκη περίπλοκων και σύνθετων ρυθμίσεων στην μηχανή αλλά ούτε πλέον χρειάζεται η συναρμολόγηση εξαρτημάτων για να φτάσουμε στο τελικό αντικείμενο σπαταλώντας χρόνο αφού θα είναι πλέον συμπαγές. Λόγω των προτερημάτων της έχει γίνει πλέον μία τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς, αφού κερδίζουν χρόνο αλλά και κατανοούν καλύτερα την γεωμετρία του αντικειμένου. Η τεχνολογία αυτή έχει πλέον εξαπλωθεί και σε άλλους κλάδους όπως στην χειρουργική, την αρχιτεκτονική, στις τέχνες και πολλά άλλα. [2]

Οι όροι τσιμέντο και σκυρόδεμα συχνά χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το ίδιο πράγμα, όμως στην πραγματικότητα το τσιμέντο είναι συστατικό του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα είναι ένα μείγμα αδρανών υλικών όπως άμμου ή χαλικιού, κοινού τσιμέντου Portland και νερού. Το τσιμέντο καταλαμβάνει το 10 με 15 τις εκατό σε όγκο ενός μείγματος σκυροδέματος. Κατά την διαδικασία ενυδάτωσης, το

νερό και το τσιμέντο σκληραίνουν και δένουν με τα αδρανή δημιουργώντας μια συμπαγή μάζα. Η διαδικασία σκλήρυνσης συνεχίζεται για χρόνια. Στην αρχή σκληραίνει πολύ γρήγορα αλλά συνεχίζεται η σκλήρυνση του με αργό ρυθμό για πολύ καιρό. Για να υπολογίσουμε την αντοχή του σκυροδέματος θα απαιτούσε να περιμένουμε πολλά χρόνια για να ολοκληρωθεί η σκλήρυνση του, κάτι που δεν είναι καθόλου πρακτικό, έτσι έχει καθορισθεί μια χρονική διάρκεια 28 ημερών που στην οποία κάνουμε τις δοκιμές αντοχής του σκυροδέματος. Για να αλλάξουμε τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος μπορούμε να προσθέσουμε χημικές προσμίξεις στο μείγμα. Οι προσμίξεις κατατάσσονται ανάλογα με την λειτουργία τους. Υπάρχουν πέντε βασικές κατηγορίες προσμιξεων: αερακτικά, μειωτές νερού, επιβραδυντές, επιταχυντές και πλαστικοποιητές. Άλλες κατηγορίες προσμιξεων προστίθενται για να βελτιώσουν συγκεκριμένες ιδιότητες του μείγματος όπως την αναστολή διάβρωσης, την μείωση συρρίκνωσης, την οικοδομησιμότητα, το δέσιμο, στεγανοποίηση, τον χρωματισμό και άλλα.[3]

Στόχος της μελέτης ήταν ο σχεδιασμός ενός εξωθητήρα για έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή για σκυρόδεμα. Συνδέθηκε στο άκρο ενός ρομποτικού βραχίονα ABB που κρέμεται ανάποδα από την οροφή ενός πλαισίου κατασκευασμένου από μεταλλικές δοκούς. Το πλαίσιο μπορούσε να μετακινηθεί αφού διέθετε τροχούς που εφάπτονται με το έδαφος. Οι διαστάσεις του πλαισίου ήταν τέτοιες ώστε να επιτρέπουν την εκτύπωση της τρισδιάστατης κατασκευής που πρόκειται να εκτυπωθεί. Ο συγκεκριμένος εκτυπωτής θα επικεντρωνόταν στην κατασκευή επίπλων δρόμου ή σπιτιών επίδειξης από σκυρόδεμα. Θα συζητηθεί εάν αυτή η τεχνολογία κατασκευής είναι κατάλληλη για την κατασκευή αυτών των αντικειμένων. Έγινε έρευνα στις πτυχές του υλικού του σκυροδέματος για να βρεθεί όσο το δυνατόν ελαφρύτερο σκυρόδεμα.

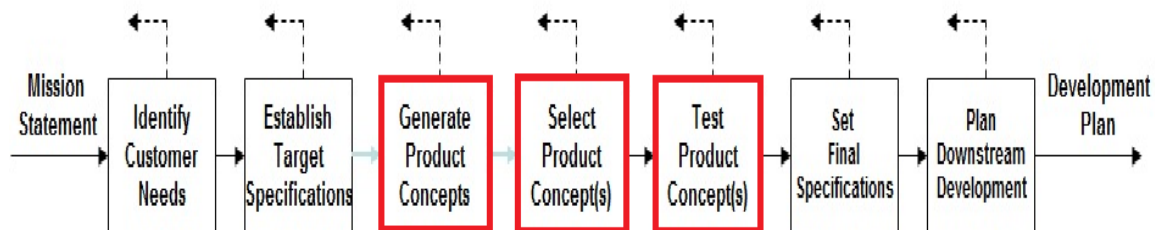
Αρχικά θα δούμε την μεταφρασμένη μελέτη, που περιέχει την μεθοδολογία στην επιλογή υλικών και εξαρτημάτων και ακολουθείται από τις προδιαγραφές του προϊόντος και την σχεδίαση των εξαρτημάτων. Ακολουθεί εννοιολογική σχεδίαση και τεχνική ανασκόπηση στα εξαρτήματα και τα υλικά. Έγινε ο σχεδιασμός του εξωθητήρα του εκτυπωτή το οποίο είναι και το βασικό του εξάρτημα, ο οποίος συνδέθηκε στο άκρο ρομποτικού βραχίονα ABB που κρέμεται από μεταλλικό πλαίσιο με διάσταση ανάλογη των προϊόντων που έχουμε σκοπό να σχεδιάζουμε. Το πλαίσιο που αποτελείται από μεταλλικές δοκούς και διαθέτει ρόδες στο κάτω μέρος για να μπορεί να μετακινηθεί. Γίνεται έρευνα επάνω στην δομή του κατάλληλου μείγματος σκυροδέματος και ακολουθούν συμπεράσματα και συστάσεις των μελετητών.

Έπειτα από την μεταφρασμένη μελέτη αποτυπώνεται κριτική ανάλυση επάνω στην μελέτη και τον σχεδιασμό των εξαρτημάτων και των πτυχών του εκτυπωτή. Γίνεται αναφορά στην επιλογή του ρομποτικού βραχίονα ως μέσω κίνησης και προτείνεται κατασκευή γραμμικής κίνησης με μεταλλικές ράγες V-Rail με σκοπό να εξαλείφουν τα μειονεκτήματα του βραχίονα. Γίνεται αναφορά σχετικά με την σύσταση του μείγματος σκυροδέματος προτείνοντας μείγμα που προέκυψε έπειτα από έρευνα και σχολιάζεται ο τρόπος τροφοδοσίας της μηχανής με σκυρόδεμα και η παροχή στον εξωθητήρα. Έγινε μελέτη στον σχεδιασμό του εξώθητήρα για την βελτίωσή του και ξανασχεδιάστηκε με σκοπό την τρισδιάστατη εκτύπωσή του, λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά που θα συνέβαλαν στην βελτίωση της ποιότητας εκτύπωσης αλλάζοντας την γεωμετρία του στομίου και στην εργονομία συνολικά του εξαρτήματος.

1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

1.1 Η διαδικασία ανάπτυξης

Η διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων θα βασιστηκε στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην Product development and design, Ulrich & Eppinger [4]:



Δήλωση αποστολής, Αναγνώριση των αναγκών του καταναλωτή, Καθορισμός των επιθυμητών προδιαγραφών, Παραγωγή ιδεών προϊόντος, Επιλογή ιδεών προϊόντος, Δοκιμή ιδεών προϊόντος, Καθορισμός τελικών προδιαγραφών, Σχέδιο μελλοντικής εξέλιξης, Σχέδιο προόδου

Εικόνα 1.1 Διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων [4].

Η διαδικασία είναι κάπως τροποποιημένη λόγω της καινοτομίας του προϊόντος στο έργο. Τα βήματα που εκτελούνται είναι Generate product concepts(παραγωγή ιδεών προϊόντος), Select product concept(επιλογή ιδεών προϊόντος) και Test product concept(δοκιμή ιδεών προϊόντος), βλέπε εικόνα 1.1.

1.2 Παραγωγή ιδεών για το σχέδιο

Υπάρχουν διάφορα βήματα σε αυτήν την ενότητα. Αυτά είναι:

1. Διευκρίνιση του προβλήματος
2. Εξωτερική αναζήτηση
3. Εσωτερική αναζήτηση
4. Συστηματική έρευνα
5. Αντανακλάσεις της διαδικασίας

Με τη διασαφήνιση του προβλήματος εννοείται ότι θα επιτευχθεί μεγαλύτερη κατανόηση του προβλήματος αυτού, εάν το μείζον πρόβλημα αναλυθεί σε μικρότερα επιμέρους προβλήματα. Είναι επίσης σημαντικό να αναγνωρίσουμε κρίσιμα μέρη του προβλήματος. Αναζήτηση εξωτερικά σημαίνει ότι αναζητά κανείς ιδέες για το σχέδιο διαβάζοντας βιβλιογραφία, πραγματοποιώντας συγκριτική αξιολόγηση, αναζητώντας διπλώματα ευρεσιτεχνίας με παρόμοια τεχνολογία και παίρνοντας συνεντεύξεις από ειδικούς στον τομέα. Η έννοια της εσωτερικής αναζήτησης είναι ότι κάποιος πρέπει να σκέφτεται μόνος του, να κάνει καταιγισμό ιδεών, να επιθυμεί, να αναρωτιέται και ούτω καθεξής. Διερεύνηση συστηματικά σημαίνει συνδυασμός διαφορετικών σχεδίων και ταξινόμηση διαφορετικών περιοχών του προβλήματος με στόχο την κάλυψη όλων των πιθανών λύσεων. Τέλος, πρέπει να γίνει μια αντανάκλαση της διαδικασίας.

1.3 Επιλογή προϊόντος σχεδίου

Για να επιλέξουμε σχέδιο χρησιμοποιούμε τη μέθοδο *βαθμολόγησης του σχεδίου*. Η διαδικασία είναι ως εξής:

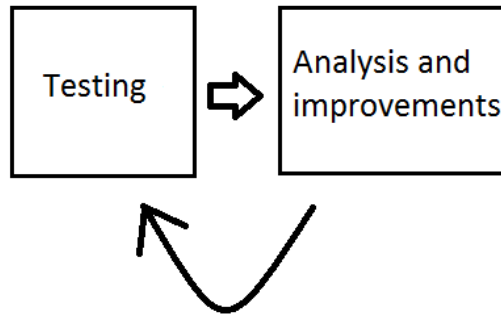
1. Προετοιμασία του πίνακα αξιολόγησης
2. Βαθμονόμηση των σχεδίων
3. Κατάταξη των σχεδίων
4. Συνδυασμός και βελτίωση σχεδίων
5. Επιλογή του σχεδίου
6. Αντανάκλαση της διαδικασίας

Ο πίνακας αξιολόγησης περιέχει τις ιδέες και τα διάφορα κριτήρια με τα οποία θα αξιολογηθούν τα σχέδια. Εάν είναι απαραίτητο, τα κριτήρια μπορούν να σταθμιστούν ανάλογα με τη σχετική σημασία τους. Η βαθμολόγηση θα πρέπει να πραγματοποιείται συγκρίνοντας την ιδέα με μια αναφορά και να διαπιστώνεται εάν το σχέδιο είναι χειρότερο, παρόμοιο ή καλύτερο από την αναφορά στα δεδομένα κριτήρια. Η κατάταξη των σχεδίων γίνεται συνοψίζοντας τα σημεία των ιδεών και ανακαλύπτοντας ποια σχέδια πήραν τους περισσότερους συνολικούς πόντους. Εάν ήταν απαραίτητο, θα μπορούσαμε να συνδυάσουμε τα καλύτερα σχέδια και να τα αναπτύξουμε περαιτέρω. Το σχέδιο με την υψηλότερη βαθμολογία θα επιλεγεί για περαιτέρω ανάπτυξη. Τέλος, πρέπει να γίνει μια αντανάκλαση της διαδικασίας.

1.4 Έννοια δοκιμής του προϊόντος

Κατά τη δοκιμή ενός πρωτοτύπου είναι σημαντικό να εφαρμόζεται «ορθή πειραματική πρακτική». Αυτό σημαίνει να είσαι όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικός και αυτό θα συμβάλει στο να αξιοποιήσεις στο έπακρο τις δοκιμές. Η δοκιμή θα περιλαμβάνει κυρίως τον προσδιορισμό μεταβλητών και ένα σχέδιο για την ανάλυση των δεδομένων εξόδου.

Το κύριο έργο της διατριβής γίνεται σε αυτό το μέρος. Με τη χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας δοκιμάζεται ο σχεδιασμός, γίνεται ανάλυση της δοκιμής και βελτιώσεις της έννοιας. Οι δοκιμές γίνονται ξανά και ούτω καθεξής, βλέπε εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2 Επαναληπτική διαδικασία δοκιμών.

2 Προδιαγραφές του προϊόντος, παραγωγή και επιλογή σχεδίου

2.1 Προδιαγραφές του προϊόντος

Ο εξωθητήρας του τρισδιάστατου εκτυπωτή σκυροδέματος πρέπει να είναι σε θέση να παράγει μια σειρά από σκυρόδεμα, πλάτους 30-40 mm και ύψους 10-20 mm.

2.2 Δημιουργία σχεδίου

Υπάρχουν τρία κύρια χαρακτηριστικά του εξωθητήρα που είναι ζωτικής σημασίας για την εκπλήρωση των προδιαγραφών του προϊόντος. Αυτά είναι:

- Το σχήμα και το μέγεθος του στομίου του εξωθητήρα
- Το σχήμα, το μέγεθος, ο μηχανισμός και ο αριθμός των πλαϊνών σπατουλών
- Ο μηχανισμός δημιουργίας ροής

Κάθε χαρακτηριστικό μπορεί να σχεδιαστεί με πολλούς τρόπους που οδηγεί σε πολλούς πιθανούς συνδυασμούς.

2.2.1 Στόμιο εξωθητήρα

Το στόμιο του εξωθητήρα είναι κρίσιμο για το σχήμα του εξωθημένου σκυροδέματος. Εξετάζονται ορισμένες απλές γεωμετρίες, όπως ελλειπτική και τετραγωνική, βλέπε εικόνα 2.1. Ο λόγος για τον οποίο λαμβάνονται υπόψη μόνο αυτές οι δύο γεωμετρίες είναι επειδή έχουν ήδη αξιολογηθεί στην έκθεση *Experimentation and analysis of Contour Crafting (CC) process using uncured ceramic materials* από τον Hongkyu Kwon.



Εικόνα 2.1 Πιθανά σχήματα του στομίου.

2.2.2 Πλαϊνές σπάτουλες

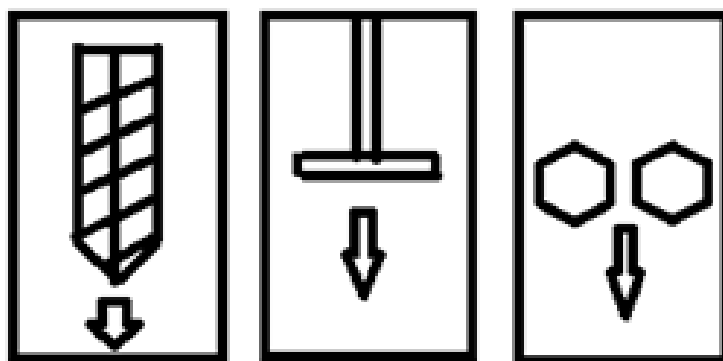
Για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε το επιθυμητό πλάτος της γραμμής κονιάματος χρειάζονται πλευρικές σπάτουλες. Δημιουργούν επίσης ένα καλύτερο φινίρισμα στην επιφάνεια. Τα πιθανά σχέδια των σπατουλών είναι ορθογώνιο ή πιο πολύπλοκο σχήμα, σπάτουλα μόνο στη μία πλευρά ή και στις δύο πλευρές και ρυθμιζόμενη γωνία στη σπάτουλα, βλέπε εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Πιθανά σχήματα των πλαϊνών σπατουλών.

2.2.3 Μηχανισμός δημιουργίας ροής

Για να δημιουργηθεί η ροή του κονιάματος χρειάζεται κάποιο είδος μηχανισμού για την παραγωγή της. Οι δυνατότητες που εξετάζονται είναι ένας κοχλιωτός μηχανισμός, μια αντλία και ένας μηχανισμός με γρανάζια, βλέπε εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3 Πιθανοί τρόποι παραγωγής ροής.

2.3 Αξιολόγηση και επιλογή της ιδέας

Τα τρία κύρια χαρακτηριστικά θα αξιολογηθούν ξεχωριστά. Για αυτό το προϊόν θα υποθέσουμε ότι η καλύτερη επιλογή για κάθε χαρακτηριστικό θα έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη τελική λύση. Οι επιλογές θα βαθμολογηθούν 1-3 για κάθε κριτήριο σε σχέση μεταξύ τους, 1 είναι το χειρότερο και 3 είναι το καλύτερο. Οι επιλογές με τον υψηλότερο συνολικό βαθμό θα χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάπτυξη.

2.3.1 Διατομή

Τα χαρακτηριστικά του στομίου πρόκειται να αξιολογηθούν με βάση το δημιουργούμενο φινίρισμα επιφάνειας στη γραμμή κονιάματος και την ευκολία κατασκευής, βλέπε πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Αξιολόγηση του δείγματος του στομίου.

Κριτήρια/Σχήμα στομίου	Ελλειπτικό	Τετραγωνικό
Φινίρισμα	2	3
Ευκολία κατασκευής	2	3
Σύνολο	4	6

Στην έκθεση: Experimentation and analysis of Contour Crafting (CC) process using uncured ceramic materials του Hongkyu Kwon, είναι σαφές ότι το φινίρισμα που δημιουργείται με το τετραγωνικό στόμιο είναι καλύτερο και ευκολότερο στην κατασκευή σε σύγκριση με το ελλειπτικό. [15]

2.3.2 Πλαϊνές σπάτουλες

Το χαρακτηριστικό της πλαϊνής σπάτουλας πρόκειται να αξιολογηθεί στο δημιουργούμενο φινίρισμα επιφάνειας στη γραμμή σκυροδέματος, η ικανότητα δημιουργίας του επιθυμητού πλάτους και απλότητας, βλέπε πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Αξιολόγηση των πλαϊνών σπατουλών.

Κριτήρια/Πλαϊνές σπάτουλες	Μία σπάτουλα στην μία πλευρά	Δύο σπάτουλες, μία στην κάθε πλευρά	Δύο ρυθμιζόμενες πλαϊνές σπάτουλες, μία στην κάθε πλευρά	Δύο πλαϊνές σπάτουλες με πιο περίπλοκο σχήμα, μία στην κάθε πλευρά
Φινίρισμα επιφάνειας	1	3	3	3
Ικανότητα δημιουργίας επιθυμητού πλάτους	1	3	3	3
Απλότητα	3	3	1	2
Σύνολο	5	9	7	8

Είναι προφανές ότι μόνο μία πλευρική σπάτουλα, θα δημιουργήσει καλό φινίρισμα από τη μία πλευρά μόνο. Επίσης, με μόνο μία σπάτουλα θα είναι δύσκολο να ελεγχθεί το πλάτος το εξωθημένου υλικού. Οι ρυθμιζόμενες πλευρικές σπάτουλες ήταν πιθανώς η επιλογή με το μεγαλύτερο εύρος διαδικασιών, καθώς θα ήταν σε θέση να δημιουργήσουν γωνιακές πλευρές στη γραμμή κονιάματος. Ωστόσο, θα είναι δύσκολο να λειτουργήσουν σωστά. Για την συγκεκριμένη κατασκευή αρκούν δύο πλευρικές σπάτουλες με ορθογωνικό σχήμα. [15]

2.3.3 Μηχανισμός δημιουργίας ροής

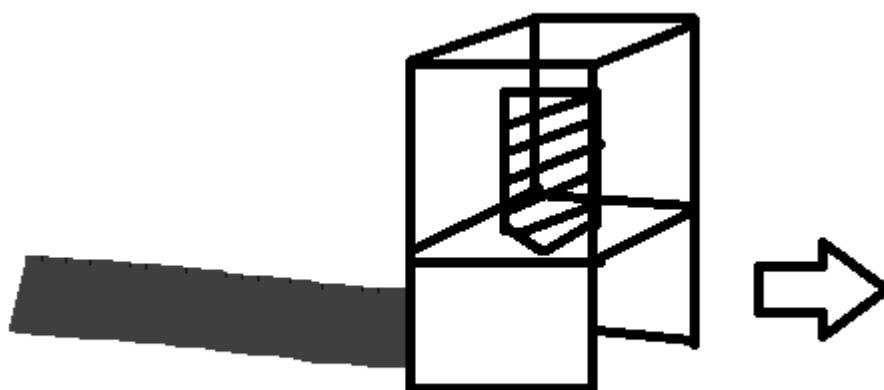
Αυτό το χαρακτηριστικό θα αξιολογηθεί με βάση την παροχή, την απλότητα και την ευκολία κατασκευής, βλέπε πίνακα 2.3.

Κριτήρια/Μηχανισμοί δημιουργίας ροής	Κοχλίας	Αντλία	Γρανάζια
Παραγωγή πίεσης	3	3	3
Απλότητα	2	1	1
Ευκολία παραγωγής	2	2	1
Σύνολο	7	6	5

Η απλούστερη λύση για την δημιουργία ροής του σκυροδέματος είναι η χρήση ενός κοχλιωτού μηχανισμού.

2.3.4 Τελικό Σχέδιο

Από την αξιολόγηση των πιθανών λύσεων το σχέδιο που επιλέξαμε είναι ο εξωθητήρας με τετραγωνικό στόμιο, δύο μη-ρυθμιζόμενες ορθογωνικές πλαϊνές σπάτουλες (μία στην κάθε πλευρά) και ένας κοχλιωτός μηχανισμός για την δημιουργία ροής του σκυροδέματος. βλέπε εικόνα 2.4.

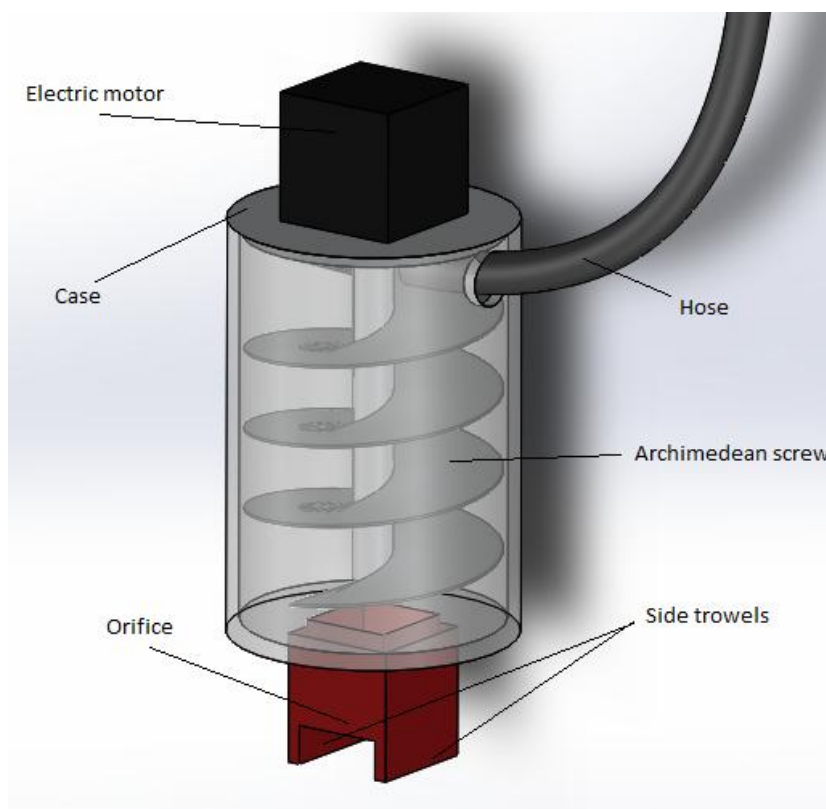


Εικόνα 2.4 Τελικό Σχέδιο.

3 Εννοιολογική Σχεδίαση

3.1 Σχεδιασμός CAD

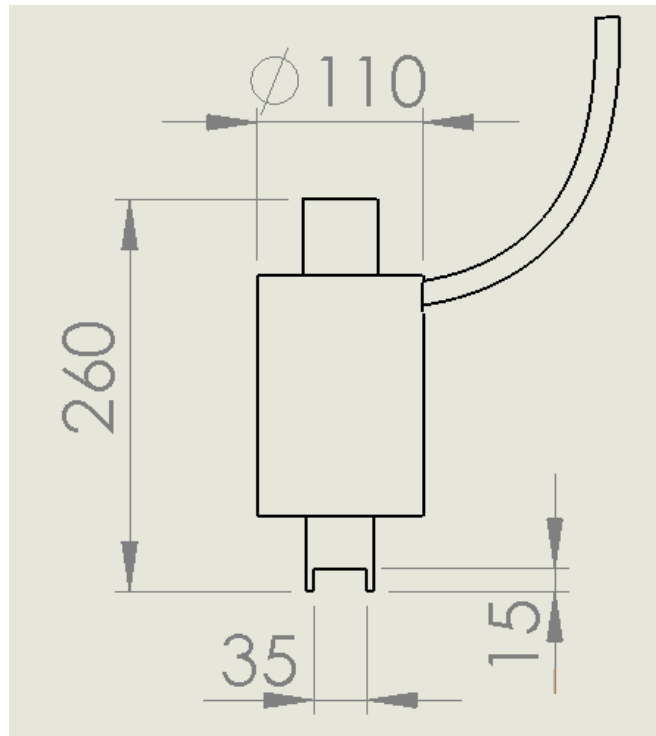
Για να δημιουργήσουμε μοντέλα CAD χρησιμοποιούμε το λογισμικό SolidWorks. Το σκυρόδεμα μεταφέρεται από ένα δοχείο μέσω ενός σωλήνα. Ένας ηλεκτρικός κινητήρας κινεί Αρχιμήδειο κοχλία που σπρώχνει το σκυρόδεμα προς τα επάνω. Το στόμιο και οι πλαϊνές σπάτουλες ορίζουν τη διάσταση της εξωθούμενης γραμμής σκυροδέματος, βλέπε σχέδιο 3.1



Ηλεκτρικός κινητήρας, άνω κλείστρο, λαστιχένιος σωλήνας, Αρχιμήδειος κοχλίας, στόμιο, πλαϊνές σπάτουλες

Εικόνα 3.1 Εννοιολογικός σχεδιασμός του εξωθητήρα για τον 3D εκτυπωτή.

Καθορίστηκαν επίσης οι εκτιμώμενες διαστάσεις, βλέπε εικόνα 3.2



Εικόνα 3.2 Εκτιμώμενες διαστάσεις εξωθητήρα (mm).

3.2 Τεχνική ανασκόπηση: Εξαρτήματα και υλικά

Τα εξαρτήματα και τα υλικά τους που χρειάζονται για τον εξωθητήρα είναι

- **Ηλεκτροκινητήρας**- off the shelf εξάρτημα
- **Σωλήνας**- εύκαμπτο υλικό ανθεκτικό σε καμπτικές κινήσεις
- **Αρίδα**- μεταλλική για στιβαρότητα
- **Σωλήνας με άνω και κάτω κλείστρο**- σκληρό πλαστικό για μείωση κόστους
- **Πλευρικές σπάτουλες**- σκληρό πλαστικό ή μέταλλο για αντοχή
- **Συζευκτήρας**- μεταλλικό για στιβαρότητα
- **Προσαρμογέας στο ρομπότ**- σκληρό πλαστικό ή μέταλλο
- Σπειρώματα, περικόχλια, ακέφαλοι κοχλίες και απλοί κοχλίες

4 Δοκιμή πρωτοτύπου, ανάλυση και βελτιώσεις

4.1 Σκοπός της δοκιμής

Θα γίνει δοκιμή του πρωτοτύπου για να εξετάσουμε εάν ανταπεξέρχεται στις προδιαγραφές του μοντέλου.

4.2 Πρώτη δοκιμή

Η πρώτη δοκιμή έγινε για το αρχικό πρωτότυπο του εξωθητήρα, βλέπε εικόνα 4.1. Η αρίδα τοποθετείται στον ηλεκτροκινητήρα και λειτουργεί εσωτερικά του εξωθητήρα, βλέπε εικόνα 4.2. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μίγμα άμμου και νερού αντί για σκυρόδεμα, βλέπε εικόνα 4.3. Αυτό έγινε λόγω του ότι η άμμος δεν σκληραίνει, επαναχρησιμοποιείται και έχει παρόμοιες ιδιότητες με το σκυρόδεμα.



Εικόνα 4.1 Πρώτη δοκιμή του εξωθητήρα.



Εικόνα 4.2 Αρίδα συζευγμένη στον ηλεκτροκινητήρα.



Εικόνα 4.3 Μίγμα άμμου νερού.

Κατά τη δοκιμή ο κινητήρας δεν είχε αρκετή ισχύ για να κινήσει ακόμα και μικρές ποσότητες του μίγματος άμμου στον εξωθητήρα. Επίσης η διάμετρος του σωλήνα ήταν πολύ μικρή και το μίγμα δυσκολευόταν να κινηθεί.

4.2.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

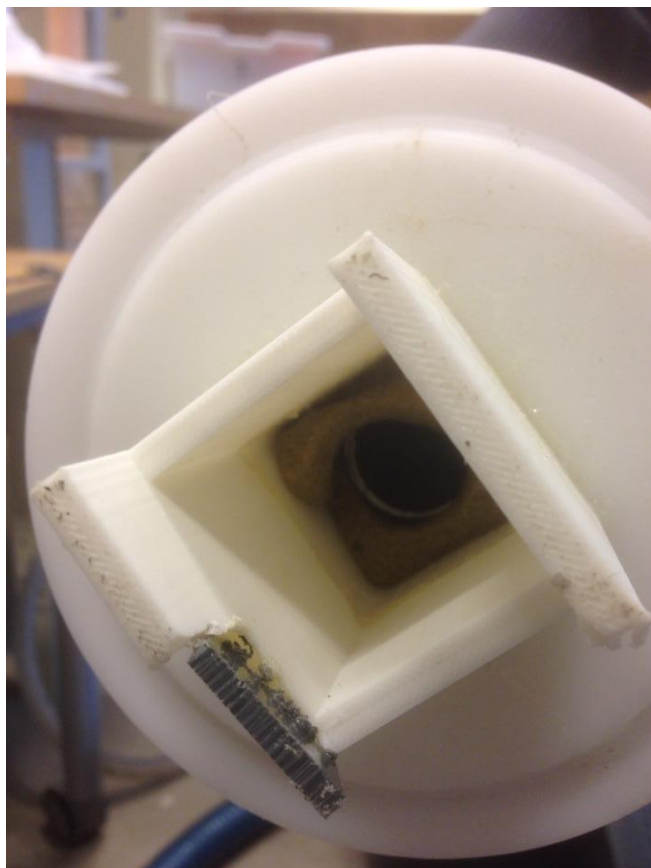
Χρειαστήκαμε σωλήνα μεγαλύτερης διαμέτρου καθώς έπρεπε να προσαρμόσουμε και το στόμιο του εξωθητήρα στην διάμετρο αυτή. Επίσης τοποθετήσαμε και δυνατότερο ηλεκτροκινητήρα. Η αλλαγή του κινητήρα μας οδήγησε στην αλλαγή του συζευκτήρα, της άνω οπής, του άνω κλείστρου και των κοχλιών.

4.3 Δοκιμή με ισχυρότερο ηλεκτροκινητήρα

Η ισχύς του νέου κινητήρα είναι επαρκής, βλέπε εικόνα 4.4. Η μέγιστή του ροπή είναι περίπου 3Nm. Παρόλα αυτά άρχισε να περιστρέφεται μαζί με το άνω κλείστρο αντί να περιστρέψει την αρίδα. Η αρχική λύση για το κλείστρο με τοποθέτηση ελαστικής τσιμούχας στεγανοποίησης δεν ήταν αρκετή. Άλλη μία παρατήρηση ήταν πως το μίγμα άμμου δυσκολευόταν να εξέλθει από τον εξωθητήρα, βλέπε εικόνα 4.5.



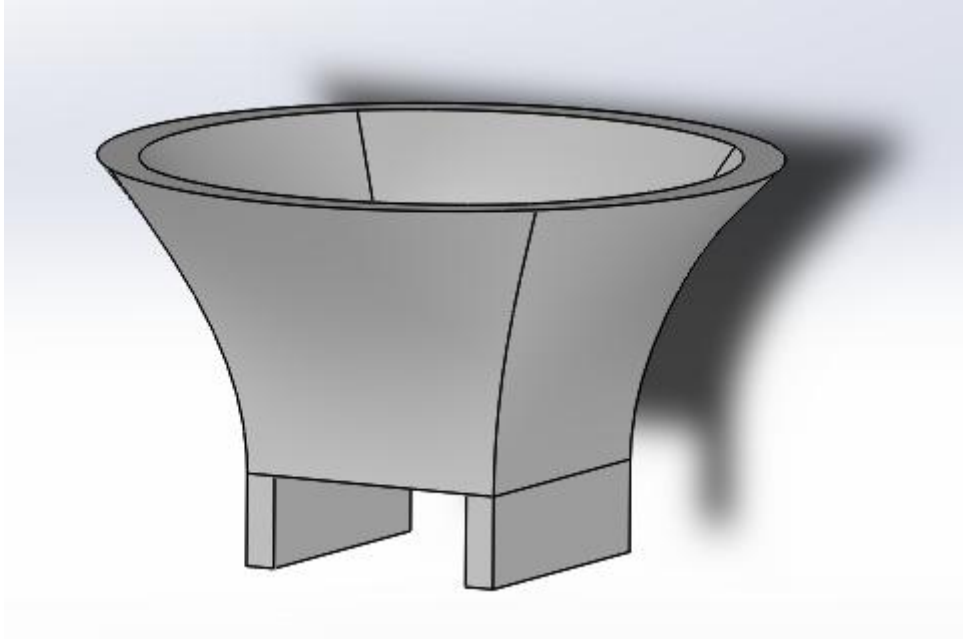
Εικόνα 4.4 Νέος ισχυρότερος κινητήρας τοποθετημένος στον εξωθητήρα.



Εικόνα 4.5 Άνοιγμα εξωθητήρα. Το μίγμα άμμου δυσκολεύεται να εξέλθει.

4.3.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Το επάνω καπάκι θα βιδωθεί μαζί με τον σωλήνα για να το κρατήσει σταθερό. Η δυσκολία του μίγματος άμμου να εξέλθει από τον εξωθητήρα φαίνεται πως οφείλεται στο γεγονός ότι το μείγμα είναι πολύ παχύρρευστο και ότι η επιφάνεια του πυθμένα είναι επίπεδη. Όταν φτάσει στο κάτω μέρος του σωλήνα, κολλάει και συμπιέζεται αντί να βγαίνει από τον εξωθητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σταμάτημα του κινητήρα λόγω υπερβολικής αντίστασης και ελάχιστο μίγμα άμμου να εξέρχεται από τον εξωθητήρα. Επομένως, η δοκιμή θα γίνει με κωνικού σχήματος πυθμένα, έτσι ώστε το μείγμα της άμμου να μπορεί να εξέρχεται πιο εύκολα από τον εξωθητήρα, βλέπε εικόνα 4.6. Ο κωνικός πυθμένας θα κατασκευαστεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με πλαστικό σε μονό κομμάτι.



Εικόνα 4.6 Νέος κωνικός πυθμένας σχεδιασμένος σε CAD.

4.4 Δοκιμή με τον κωνικό πυθμένα

Το επάνω καπάκι είναι πλέον στερεωμένο και δεν κινείται εφόσον βιδώθηκε μαζί με τον σωλήνα. Ο νέος πυθμένας σε σχήμα κώνου είναι ενωμένος με κόλα και ταινία στον σωλήνα. Η ταινία είναι απλώς προσωρινή για να επιταχύνει τη διαδικασία δοκιμής, βλέπε εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7. Εξωθητήρας με το νέο κωνικό πυθμένα.

Δεν υπάρχει πλέον συμπίεση του μίγματος, αντιθέτως οδηγείται εύκολα από το στόμιο του εξωθητήρα. Βλέπε εικόνα 4.8.



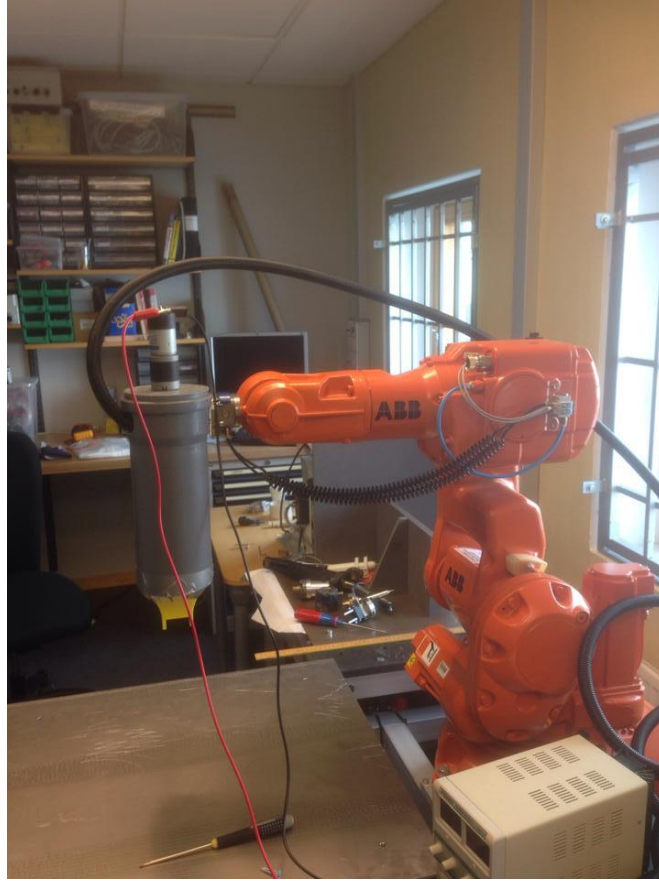
Εικόνα 4.8 Αποτελέσματα της δοκιμής με τον κωνικό πυθμένα.

4.4.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Η τρέχουσα σχεδίαση έχει ως αποτέλεσμα το βάρος ολόκληρου του εξωθητήρα χωρίς υλικό στο εσωτερικό να είναι περίπου 1,5 kg. Ο όγκος του είναι περίπου 2,5 λίτρα. Το βάρος του μίγματος άμμου καθώς και του τυπικού σκυροδέματος είναι περίπου 2 κιλά ανά λίτρο που οδηγεί σε συνολικό βάρος του εξωθητήρα γεμάτο με σκυρόδεμα να είναι περίπου 5-7 κιλά. Ο βραχίονας του ρομπότ ABB έχει ικανότητα να φέρει βάρος έως περίπου 6 κιλών και επομένως το βάρος του εξωθητήρα πρέπει να ληφθεί υπόψη στις μεταγενέστερες δοκιμές.

4.5 Δοκιμή με τον εξωθητήρα συνδεδεμένου στο ρομπότ ABB.

Η δοκιμή έγινε με τον εξωθητήρα συνδεδεμένο στον ρομποτικό βραχίονα ABB, βλέπε εικόνα 4.9. Συνδέεται στον βραχίονα με ροδέλα και κοχλίες στο πλάι του εξωθητήρα.



Εικόνα 4.9 Δοκιμή με το ν εξωθητήρα συνδεδεμένο στο ρομπότ ABB.

Δημιούργησε μια γραμμή μίγματος άμμου αλλά ο ρυθμός εξώθησης ήταν αργός, βλέπε εικόνα 4.10. Φάνηκε ότι με το εξάρτημα τοποθετημένο στο πλάι του εξωθητήρα θα περιοριστεί το εύρος κίνησής του.



Εικόνα 4.10 Εξωθημένο μίγμα άμμου.

4.5.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Για να αυξηθεί ο ρυθμός εξώθησης χρειάζεται ένας κινητήρας μεγαλύτερων στροφών. Επομένως, θα γίνει αλλαγή κινητήρα και ορισμένων ρυθμίσεων στο άνω καπάκι για να στερεωθεί ο νέος κινητήρας.

4.6 Δοκιμή με σωλήνα σχήματος γ

Αντί να χρησιμοποιήσουμε έναν κανονικό σωλήνα, οι δοκιμές θα γίνουν με ένα σωλήνα σχήματος γ , βλέπε εικόνα 4.11. Αυτό οφείλεται στο πρόβλημα της μεταφοράς του μίγματος άμμου στον εξωθητήρα. Τα πλεονεκτήματα με αυτό το σχέδιο σε σύγκριση με το προηγούμενο είναι ότι η διάμετρος εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερη και ότι δεν υπάρχει μέρος του σωλήνα που να είναι σε οριζόντια θέση. Η γωνία του σωλήνα εισόδου είναι 45° . Η σύνδεση του εξωθητήρα στο ρομπότ γίνεται τώρα βιδώνοντας στο επάνω καπάκι αντί για το πλάι. Αυτό θα επιτρέψει στον εξωθητήρα να μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον κεντρικό άξονά του.



Εικόνα 4.11 Εξωθητήρας με το νέο σωλήνα σχήματος γ.

Ο κινητήρας εξακολουθεί να είναι πολύ αδύναμος και σταματά όταν ο εξωθητήρας είναι φορτωμένος με πολύ μίγμα άμμου. Το κάτω μέρος (κίτρινο μέρος) είναι πολύ εύθραυστο και αρχίζει να σπάει στις βίδες, βλέπε εικόνα 4.12. Αυτό το εξάρτημα επιτρέπει στον εξωθητήρα να περιστρέφεται γύρω από τον κεντρικό του άξονα. Ωστόσο, κατά την περιστροφή θα κινείται επίσης σε κυκλική κίνηση, επειδή ο κεντρικός άξονας του ρομπότ και ο κεντρικός άξονας του εξωθητήρα δεν συμπίπτουν.



Εικόνα 4.12 Σχηματισμός ρωγμών στον πυθμένα.

4.6.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Ένα πρόβλημα με το μείγμα άμμου είναι ότι δεν είναι ομοιογενές. Η άμμος δεν διαλύεται στο νερό και όταν συμπιέζεται έχει ως αποτέλεσμα να ωθείται προς τα έξω το νερό κάνοντας το μείγμα στεγνότερο και πιο παχύρρευστο. Χρειάζεται να βρούμε ένα πιο ομοιογενές υγρό, θα παραγγείλουμε ένα νέο και ισχυρότερο κινητήρα και θα σχεδιάσουμε ένα νέο μεταλλικό πυθμένα για να είναι πιο άκαμπτος. Η δημιουργία μιας προσάρτησης όπου ο κεντρικός άξονας του ρομπότ και ο κεντρικός άξονας του εξωθητήρα συμπίπτουν θα ήταν πολύ καλύτερη λύση από την τρέχουσα.

4.7 Δοκιμή με χυλό

Δοκιμάζοντας ένα πιο ομοιογενές υγρό, τοποθετήσαμε χυλό αντί για μίγμα άμμου, βλέπε εικόνα 4.14. Ένας νέος και ισχυρότερος κινητήρας έχει τοποθετηθεί καθώς κατασκευάσαμε και νέο άξονα του κινητήρα για να ταιριάζει, βλέπε εικόνα 4.13. Ο κινητήρας έχει μέγιστη ροπή περίπου 21 Nm. Ο πυθμένας είναι πλέον κατασκευασμένος από χάλυβα και αλουμίνιο και θα αντέχει πολύ μεγαλύτερες τάσεις από αυτόν που ήταν κατασκευασμένος από πλαστικό.



Εικόνα 4.13 Εξωθητήρας με τον νέο κινητήρα και τον μεταλλικό πυθμένα.

Η δοκιμή πήγε καλά και ο εξωθητήρας δημιούργησε μια σταθερή ροή χυλού. Ο κινητήρας είναι πολύ πιο δυνατός από τον προηγούμενο και ο εξωθητήρας φαίνεται γενικά πιο στιβαρός από πριν.



Εικόνα 4.14 Χυλός που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές.

4.8 Δοκιμή με τυπικό σκυρόδεμα

Αυτή είναι η πρώτη φορά που η δοκιμή πραγματοποιείται με σκυρόδεμα, βλέπε εικόνα 4.15. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήσαμε είναι τυπικό λεπτόκοκκο σκυρόδεμα και η αναλογία νερού-σκυροδέματος είναι περίπου 1:6.

Κατά τη δοκιμή, το σκυρόδεμα αντί να βγαίνει από τον εξωθητήρα, παρέμενε σε αυτόν. Συμπεριφέρεται πολύ σαν το μείγμα της άμμου. Ο κινητήρας περιστρέφεται επίσης με ανομοιόμορφο τρόπο και μερικές φορές σταματά.



Εικόνα 4.15 Τυπικό λεπτόκοκκο σκυρόδεμα

4.8.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Παρατηρούμε το αποτέλεσμα ενός υπερβολικά παχύρρευστου μείγματος, οπού δημιουργεί υπερβολική τριβή για να το σπρώξει ο εξωθητήρας προς τα έξω. Επομένως, θα δοκιμάσουμε το ίδιο σκυρόδεμα αλλά με υψηλότερη αναλογία νερού, καθιστώντας το λιγότερο ιξώδες. Οι ανομοιόμορφες περιστροφές του κινητήρα είναι πιθανώς αποτέλεσμα της παγίδευσης πετρών στο σκυρόδεμα μεταξύ της λεπίδας του κοχλίου και του τοιχώματος του σωλήνα. Το τελικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση πρέπει να έχει μικρά κομμάτια πέτρας για να μην συμβεί αυτό.

4.9 Δοκιμή με τυπικό σκυρόδεμα με προσθήκη νερού

Σε αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιήσαμε ένα τυπικό μείγμα σκυροδέματος με προσθήκη περισσότερου νερού, βλέπε εικόνα 4.16. Το αποτέλεσμα ήταν λίγο καλύτερο από την τελευταία δοκιμή με λιγότερο νερό, αλλά το υλικό εξακολουθούσε να μην εξέρχεται με την επιθυμητή ευκολία.



Εικόνα 4.16 Τυπικό σκυρόδεμα με περισσότερο νερό.

4.9.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Ίσως τελικά το τυπικό σκυρόδεμα να μην είναι κατάλληλο για τρισδιάστατη εκτύπωση. Θα γίνουν περαιτέρω δοκιμές με κονίαμα και ένα είδος μπετόν EPS.

4.10 Δοκιμή με κονίαμα

Αυτή η δοκιμή θα γίνει με κονίαμα αντί για σκυρόδεμα, βλέπε εικόνα 4.17. Η διαφορά από το σκυρόδεμα είναι ότι το πετρώδες υλικό στο σκυρόδεμα αντικαθίσταται με άμμο (λεπτότεροι κόκκοι) στο κονίαμα [6]. Η υφή είναι παρόμοια με το μείγμα άμμου που χρησιμοποιήθηκε πριν.

Η δοκιμή πήγε καλά και ο εξωθητήρας δημιουργούσε μια σταθερή ροή κονιάματος. Αυτό το υλικό φαινόταν λιγότερο παχύρρευστο από τα μείγματα σκυροδέματος που χρησιμοποιούσαμε και μάλλον γι' αυτό λειτουργεί καλύτερα.



Εικόνα 4.17 Κονίαμα.

4.11 Δοκιμή με τσιμέντο EPS

Η δοκιμή θα γίνει με τσιμέντο EPS που είναι ένα είδος ελαφρού σκυροδέματος όπου το υλικό της πέτρας αντικαθίσταται από διογκωμένη πολυστερίνη (πλαστικό), βλέπε εικόνα 4.18. Για να είναι ικανό το ρομπότ ABB να φέρει το βάρος του σκυροδέματος στον εξωθητήρα, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερο. Συγκριτικά, το τσιμέντο EPS έχει πυκνότητα περίπου 350 kg/m³ ενώ το κανονικό σκυρόδεμα έχει πυκνότητα περίπου 2400 kg/m³ [5].

Τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια με τη δοκιμή κονιάματος και λειτουργούσε καλά. Το επιτυχές αποτέλεσμα φαίνεται να σχετίζεται με το μικρότερο ιξώδες του υλικού. Ένας προβληματισμός ήταν το πόσο το ιξώδες του υλικού αλλάζει με την προσθήκη μικρής ποσότητας νερού ή μικρής ποσότητας ξηρού υλικού. Αυτό δείχνει ότι η ανάμειξη του υλικού εκτύπωσης πρέπει να είναι πολύ ακριβής ως προς τις διαφορετικές αναλογίες υλικού και νερού. Μια άλλη σκέψη για το ότι το σκυρόδεμα σε προηγούμενες δοκιμές δεν λειτούργησε πιθανώς να είχε να κάνει με το υψηλότερο ιξώδες του υλικού. Το σκυρόδεμα θα φράξει το στόμιο όταν φτάσει στο στενότερο τμήμα και θα είναι πολύ δύσκολο να σπρώξει προς τα έξω. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το υλικό που χρησιμοποιείται στην εκτύπωση δεν πρέπει να είναι περισσότερο παχύρρευστο από εκείνο που δυσκολευόταν να εξέλθει από το στόμιο. Ωστόσο, με ένα λιγότερο παχύρρευστο υλικό θα είναι πιο πιθανό να κατακυλήσει όταν εκτυπωθεί, πράγμα που σημαίνει ότι θα είναι πιο δύσκολο να κατασκευαστούν κάθετες κατασκευές. Έπρεπε να βρεθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ αυτών των δύο παραγόντων.



Εικόνα 4.18 Τσιμέντο EPS.

4.11.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Για αισθητικούς λόγους ο εξωθητήρας θα βαφτεί με σπρέι χρώματος ασημί. Έχει επίσης κατασκευαστεί μια προσάρτηση για το ρομπότ που με την οποία θα συμπίπτει ο κεντρικός άξονας του εξωθητήρα με τον κεντρικό άξονα του ρομπότ.

4.12 Δοκιμή με ειδικό μίγμα σκυροδέματος

Για να βρεθεί λύση στο πρόβλημα με το ιξώδες δοκιμάσαμε ένα ειδικό μείγμα σκυροδέματος. Η συνταγή περιλάμβανε εννέα διαφορετικά συστατικά, τα οποία είχαν ακρίβεια σε γραμμάρια και αναπτύχθηκε από τον August Hamelius και τον Mikael Backebjörk, πολιτικούς μηχανικούς στο Πανεπιστήμιο του Lund. Τα συστατικά κατά βάρος είναι άμμος Baskarp® (λεπτοί κόκκοι), τσιμέντο, άμμος Baskarp® (χονδροειδείς κόκκοι), νερό, ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη Elkem Microsilica®, υπερρευστοποιητής, επιβραδυντής και ίνες, δείτε το Παράρτημα Β για τη λεπτομερή συνταγή. Το σκυρόδεμα αναμιγνύεται με μηχανικό αναμικτήρα για περίπου 5-7 λεπτά πριν από τη χρήση.

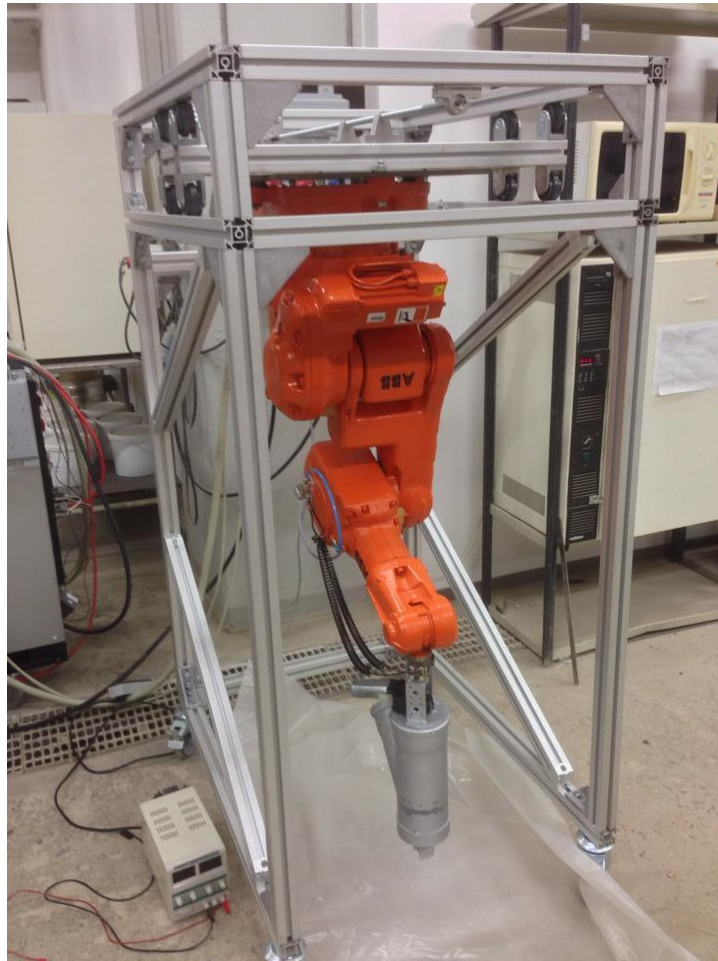
Το τεστ πήγε πολύ καλά. Ο εξωθητήρας μπορούσε να χειριστεί το μείγμα χωρίς πρόβλημα ακόμα κι αν είχε αρκετά υψηλό ιξώδες και ήταν σε θέση να δημιουργήσει πολλά κάθετα στρώματα, βλέπε εικόνα 4.19. Κατά κάποιον τρόπο κατάφερνε να είναι εξωθήσιμο δηλαδή ικανό να εξέλθει εύκολα, αλλά παράλληλα και οικοδομήσιμο, δηλαδή ικανό να χτίσει πολλά στρώματα. Το μείγμα φαινόταν πως σκληραίνει όταν δεν μετακινείται και πως γίνεται λιγότερο παχύρρευστο όταν μετακινείται. Αυτό θα μπορούσε να είναι το κατάλληλο μείγμα για αυτόν τον τύπο εφαρμογής. Ο εξωθητήρας γεμάτος με το ειδικό σκυρόδεμα ζύγιζε λιγότερο από 5 κιλά.



Εικόνα 4.19 Εκτυπωμένο υλικό από το ειδικό μίγμα σκυροδέματος.

4.13 Δοκιμή με το ειδικό μείγμα σκυροδέματος και τον εξωθητήρα προσαρτημένο στο ρομπότ

Το ρομπότ είναι τώρα τοποθετημένο ανάποδα μέσα στο μεταλλικό πλαίσιο, βλέπε εικόνα 4.20. Το μόνο που λείπει είναι ένας σωλήνας και ένα δοχείο από σκυρόδεμα για να γίνει μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία. Σε αυτή τη δοκιμή το σκυρόδεμα θα τροφοδοτηθεί χειροκίνητα στον εξωθητήρα με ένα φτυάρι. Το ρομπότ προγραμματίστηκε να χτίζει έναν τοίχο και μετά ένα τετράγωνο για να δοκιμάσουμε το πόσο καλά το σύστημα καταφέρνει να χτίσει πολλά στρώματα και την ικανότητα να δημιουργεί γωνίες.



Εικόνα 4.20

Η δοκιμή πήγε πολύ καλά. Ο εκτυπωτής μπόρεσε να κατασκευάσει ένα τοίχιο με πλάτος περίπου 2 cm και ύψος περίπου 45 cm, βλέπε εικόνες 4.21, 4.22, 4.23 και 4.24. Στην δοκιμή αυτή ήταν οι περιορισμοί του ρομπότ που το εμπόδιζαν να χτίσει πάνω από 45 cm. Ο τοίχος ήταν πολύ ίσιος και δεν έγερνε καθόλου προς κάποια πλευρά. Αυτό επιτεύχθηκε από την ακρίβεια του ρομπότ. Μια καλή ιδιότητα αυτού του σκυροδέματος είναι ότι σκληραίνει και γίνεται πιο παχύρρευστο μέσα σε λίγα λεπτά. Τα χαμηλότερα στρώματα σκυροδέματος είχαν σκληρύνει ικανοποιητικά μετά την εκτύπωση και βοηθούσε στην εκτύπωση των επάνω στρώσεων. Είναι καλό για το χτίσιμο σε ύψος, τα χαμηλότερα στρώματα να σκληραίνουν γρήγορα και να μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερο βάρος και όχι να πέφτουν. Αρχικά η ταχύτητα του ρομπότ ήταν 5 mm/sec, αλλά φάνηκε ότι ήταν πολύ αργή λόγω της υπερβολικής ροής σκυροδέματος από τον εξωθητήρα. Μια μικρή αλλαγή στα 10 mm/sec της ταχύτητας του ρομπότ είχε ως αποτέλεσμα μια πολύ καλύτερη εξώθηση όταν ο κινητήρας στον εξωθητήρα λειτουργούσε στη μέγιστη ταχύτητά του στα 24 V. Ολόκληρος ο τοίχος χρειάστηκε περίπου 30 λεπτά για να κατασκευαστεί, συμπεριλαμβανομένων των παύσεων. Έπρεπε να γίνουν παύσεις επειδή διαθέταμε μόνο 3 λίτρα σκυροδέματος κάθε φορά. Η ανάμιξη της επόμενης παρτίδας σκυροδέματος γινόταν ενώ το ρομπότ ήταν ακίνητο. Ένα πρόβλημα ωστόσο ήταν πως ο κινητήρας του εξωθητήρα ζεσταινόταν πολύ κατά την εκτύπωση σε τόσο

μεγάλο χρονικό διάστημα. Όταν κάναμε το τετράγωνο, παρατηρήσαμε πως όταν το ρομπότ περιστρεφόταν κατά 90° σε κάθε γωνία, οι πλευρικές σπάτουλες παρέμβαιναν στο σκυρόδεμα προκαλώντας ρωγμές στη γραμμή εξώθησης, βλέπε εικόνα 4.25. Αυτό έκανε μία από τις πλευρικές σπάτουλες να σπάσει λόγω υπερβολικής τάσης. Ένα άλλο πρόβλημα με τις στροφές είναι ότι τα καλώδια του κινητήρα του εξωθητήρα μπλεκόντουσαν.



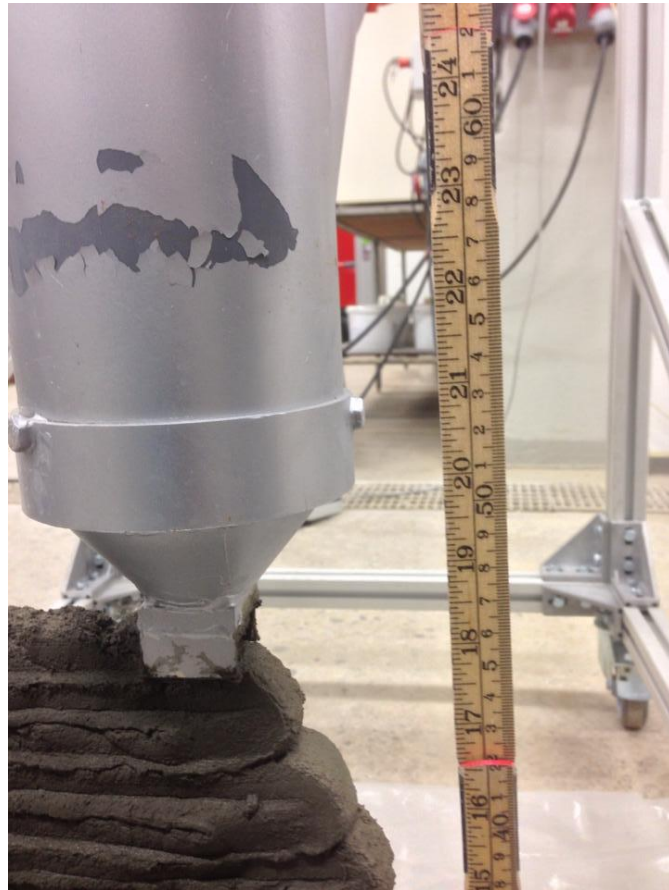
Εικόνα 4.21 Πρόσοψη του τοιχίου.



Εικόνα 4.22 Πλάγια όψη του τοιχίου.



Εικόνα 4.23 Πλάγια όψη του τοιχίου.



Εικόνα 4.24 Το τοιχίο είχε ύψος περίπου 45 cm.



Εικόνα 4.25 Τετραγωνική κατασκευή από τον εκτυπωτή.

4.13.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Ο κινητήρας ζεσταίνεται πολύ, λόγω του ότι η ισχύς του είναι οριακά επαρκής για την εφαρμογή αυτή. Λόγω έλλειψης χρόνου δεν παραγγείλαμε νέο κινητήρα αλλά αντίθετα θα προσπαθούσαμε να τον ψύξουμε προσθέτοντάς του ψύκτρες. Εάν οι πλευρικές σπάτουλες απορριφθούν, δεν θα παρεμβάλλονται στο σκυρόδεμα. Επίσης το ρομπότ δεν θα χρειαζόταν να περιστρέφεται επειδή η πλάγια όψη του στομίου θα ήταν η ίδια και στις τέσσερις κατευθύνσεις. Το πρόβλημα ωστόσο ήταν ότι κατά την αφαίρεση των πλευρικών σπατουλών θα ήταν πιο δύσκολο να ελεγχθεί το πλάτος και το ύψος της εξωθημένης γραμμής σκυροδέματος. Ωστόσο, για το συγκεκριμένο έργο, υπήρχαν περισσότερα οφέλη χωρίς πλευρικές σπάτουλες από ότι με την χρήση αυτών με αποτέλεσμα την απόρριψή τους και τη χρήση απλώς ενός τετράγωνου στομίου.

4.14 Δοκιμή με το ειδικό μίγμα σκυροδέματος και τον εξωθητήρα τοποθετημένο στο ρομπότ και τον σωλήνα

Σε αυτή τη δοκιμή θα δοκιμαστεί ολόκληρο το σύστημα. Ο κάδος στο επάνω μέρος του μεταλλικού σκελετού θα τροφοδοτηθεί με σκυρόδεμα. Ο σωλήνας είναι προσαρτημένος σε αυτόν με σφιγκτήρες και στηρίζεται μόνο στον εξωθητήρα για να μπορεί να επιμηκύνεται και να κονταίνει όταν το ρομπότ κινείται, βλέπε εικόνα 4.26



Εικόνα 4.26

Κατά την τροφοδοσία του κάδου με σκυρόδεμα, παρατηρήθηκε ότι πέφτει στον εξωθητήρα αλλά σταματά στο τμήμα της εισόδου 45° , βλέπε εικόνα 4.27. Το σκυρόδεμα είναι πιθανώς πολύ παχύρρευστο για να ρέει μέχρι κάτω βασιζόμενο στην βαρύτητα. Ακόμη και όταν ο εξωθητήρας τροφοδοτήθηκε με το χέρι, το σκυρόδεμα χρειαζόταν μερικές φορές να ωθηθεί προς τα κάτω στο σημείο του κοχλία. Ο εξωθητήρας χωρίς πλευρικές σπάτουλες λειτούργησε καλά. Το πλεονέκτημα ήταν πως το ρομπότ δεν χρειαζόταν να γυρίσει και να μπερδέψει τα καλώδια. Το μειονέκτημα είναι ότι η γραμμή του σκυροδέματος είναι τώρα λίγο πλατύτερη και ψηλότερη και αυτές οι μετρήσεις είναι πλέον πιο πιθανό να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου λόγω της μεγαλύτερης ροής του σκυροδέματος.



Εικόνα 4.27

4.14.1 Ανάλυση και βελτιώσεις

Για να λειτουργήσει σωστά η μεταφορά του σκυροδέματος από τον κάδο στον σωλήνα, ιδανικά χρειάζεται κάποιο είδος μηχανισμού δημιουργίας ροής για να δημιουργήσει περισσότερη κάθετη δύναμη από τη βαρύτητα. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιούσαμε έναν άλλο κοχλία στο πάνω μέρος του κάδου, θα απαιτούσε ο σωλήνας να γεμίζει πλήρως με σκυρόδεμα όλη την ώρα. Αυτό θα έδινε μεγάλο βάρος στον εξωθητήρα και είναι πιθανό να μην μπορούσε να αντέξει αυτό το βάρος. Λόγω της έλλειψης χρόνου, ο τρισδιάστατος εκτυπωτής θα τροφοδοτηθεί χειροκίνητα.

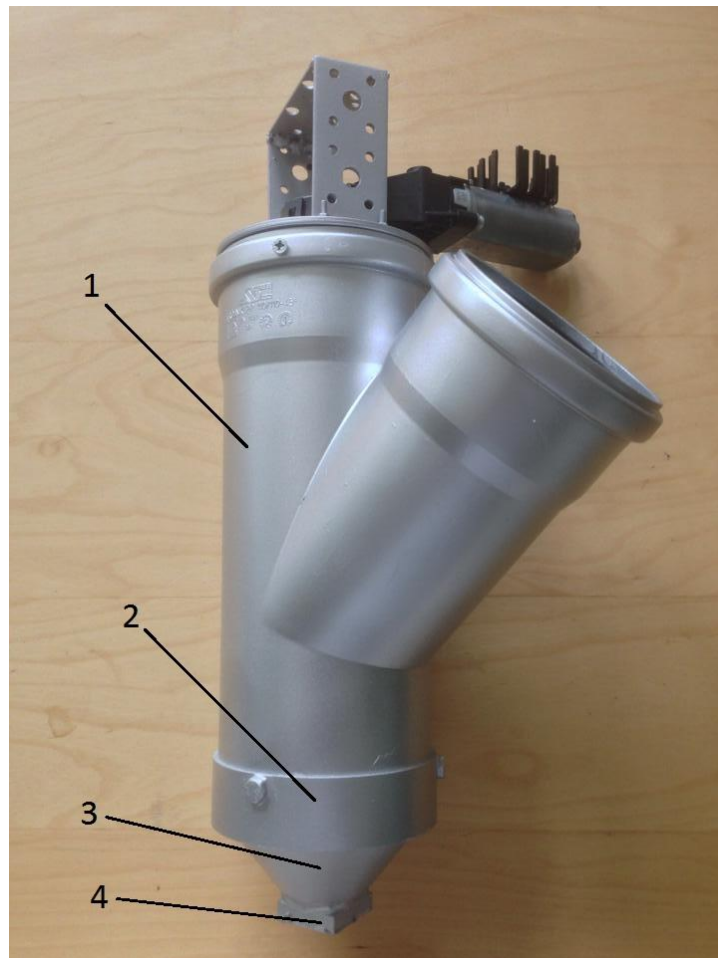
5 Αποτελέσματα

5.1 Τελικό προϊόν

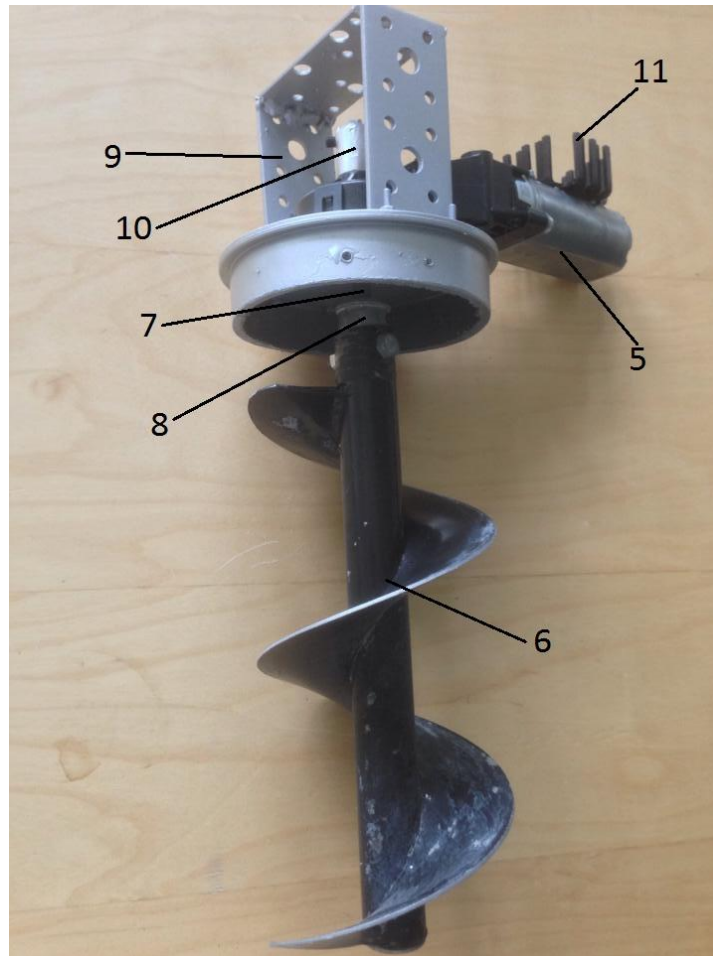


Εικόνα 5.1 Τελικό σχέδιο εξωθητήρα.

5.2 Κατασκευή του τελικού πρωτοτύπου



Εικόνα 5.2 Κατασκευή του τελικού πρωτοτύπου.



Εικόνα 5.3 Κατασκευή του τελικού πρωτοτύπου.

1. Σωλήνας σχήματος Υ με το επάνω καπάκι. Το επάνω καπάκι βιδώνεται επάνω στον σωλήνα, βλέπε εικόνα 5.2.
2. Σύνδεση μεταξύ σωλήνα και κωνικού κομματιού. Κατεργάστηκε σε τόρνο για να χωρέσει στον σωλήνα. Στερεώθηκε στον σωλήνα μόνο με έναν σφικτήρα. Κολλήθηκε με εποξειδική ρητίνη στο κωνικό εξάρτημα, βλέπε εικόνα 5.2.
3. Κωνικό εξάρτημα. Τροποποιημένο χαλύβδινο χωνί, βλέπε σχήμα 5.2.
4. Τετραγωνικό στόμιο. Κόπηκε και κολλήθηκε με εποξειδική ρητίνη στο κωνικό εξάρτημα, βλέπε εικόνα 5.2.
5. Κινητήρας, βλέπε παράρτημα Γ για τεχνικές προδιαγραφές. Βιδώθηκε μαζί με το άνω καπάκι, βλέπε εικόνα 5.3.
6. Αρίδα. Κόπηκε, ανοίχθηκε εσωτερική οπή και φινιρίστηκε για να χωρέσει στο εσωτερικό του σωλήνα, βλέπε εικόνα 5.3.
7. Άξονας. Κατεργάστηκε σε φρέζα για να αποκτήσει τετραγωνική διατομή στο τμήμα του κινητήρα, βλέπε σχήμα 5.3.

8. Σύζευξη. Κατεργάστηκε σε τόρνο και ανοίχθηκαν εσωτερικές οπές, βλέπε εικόνα 5.3.
9. Προσκόλληση στο ρομπότ. Συγκολλήθηκαν μεταξύ τους και τρυπήθηκαν για να συνδεθούν στο ρομπότ. Βιδώθηκαν μαζί με το επάνω καπάκι, βλέπε εικόνα 5.3.
10. Μεταλλικό κομμάτι για την προσάρτηση του άξονα στον κινητήρα κάθετα, βλέπε εικόνα 5.3.
11. Ψύκτρα στον κινητήρα, βλέπε εικόνα 5.3

5.3 Δεδομένα του τελικού σκυροδέματος

Όριο διαρροής σε θλίψη: ~105 MPa [7]

Όριο διαρροής σε εφελκυσμό: ~13 MPa [7]

5.4 Λεπτομέρειες τελικών προϊόντων



Εικόνα 5.4 Τοποθετήθηκαν ξύλινες τάβλες για καθίσματα στις καρέκλες.

6 Συμπεράσματα, συζήτηση και συστάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Η γενική αρχή λειτουργίας του εξωθητήρα είναι κατάλληλη για την τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος. Ένα σημαντικό σημείο είναι η ανάγκη για ένα ειδικό μείγμα σκυροδέματος όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο έργο. Το σκυρόδεμα πρέπει να είναι εξωθήσιμο αλλά και οικοδομήσιμο, κάτι που απέτυχε με το τυπικό σκυρόδεμα για τον εκτυπωτή αυτό.

6.2 Συζήτηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Όσον αφορά το βάρος του χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος, στόχος ήταν να βρεθεί όσο το δυνατόν πιο ελαφρύ σκυρόδεμα. Δεδομένου ότι η συνταγή του σκυροδέματος ήταν πιο περίπλοκη από το αναμενόμενο κατά την αρχή του έργου και λόγω της έλλειψης χρόνου, ήταν δύσκολο να γίνει κάτι για το βάρος του. Η προσθήκη κάποιου άλλου υλικού προσπαθώντας να το κάνουμε ελαφρύτερο θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε διαφορετικές ιδιότητες για το σκυρόδεμα, κάτι που ήταν ανεπιθύμητο για αυτό το έργο. Ακόμα, θα μπορούσαμε να δοκιμάσουμε την προσθήκη EPS beads (πλαστικές μπάλες) ή κάτι παρόμοιο για το σκοπό αυτό. Όσο πιο ελαφρύ γίνεται το σκυρόδεμα τόσο πιο εύκολο θα ήταν πιθανώς για οποιοδήποτε εκτυπωτή να εργαστεί με το υλικό αυτό.

Καθ' όλη τη διάρκεια του έργου ένα πρόβλημα ήταν η μεταφορά του σκυροδέματος από το δοχείο στον εξωθητήρα. Βασιστήκαμε στην βαρύτητα για να πέφτει το σκυρόδεμα στον εξωθητήρα. Ωστόσο, όταν το σκυρόδεμα ήταν πολύ παχύρρευστο, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο έργο, η βαρύτητα δεν ήταν αρκετή. Το ειδικό μείγμα σκυροδέματος που χρησιμοποιήσαμε το καθιστά ακόμη πιο δύσκολο καθώς γίνεται πιο άκαμπτο όταν μένει ακίνητο για μερικά μόνο λεπτά. Μια λύση για αυτό θα μπορούσε να είναι η κατασκευή ενός πολύ μεγαλύτερου εξωθητήρα και η φόρτωσή αυτού με όλο το σκυρόδεμα που χρειάζεται για την περίοδο εκτύπωσης. Με αυτόν τον τρόπο το σκυρόδεμα θα μετακινείται συνεχώς και θα παραμένει λιγότερο παχύρρευστο. Θα εξαλείψει επίσης την ανάγκη ενός συστήματος μεταφοράς στον εξωθητήρα.

Λόγω έλλειψης πόρων στο έργο αυτό μόνο 3 λίτρα σκυροδέματος μπορούσαν να αναμειχθούν εκείνη τη στιγμή. Δεδομένου ότι ο εκτυπωτής απαιτούσε επιτήρηση κατά την εκτύπωση, έπρεπε να διακοπεί κατά την ανάμιξη της επόμενης παρτίδας σκυροδέματος. Κατά την εκ νέου έναρξη της εκτύπωσης, παρατηρήθηκε ότι το τελευταίο σκυρόδεμα από την τελευταία παρτίδα που είχε απομείνει στον εξωθητήρα είχε σκληρύνει λίγο και έφραζε το στόμιο. Χρησιμοποιήθηκε ένα κατσαβίδι για να τρυπήσει την απόφραξη και να αφήσει το νέο σκυρόδεμα να ρέει μέσω του εξωθητήρα. Θα ήταν καλό να γίνει το τμήμα μεταξύ του κοχλίου και του στομίου του εξωθητήρα όσο το δυνατόν πιο κοντό για να αποφευχθεί η απόφραξη.

Θα μπορούσαν να γίνουν πολλά περισσότερα πειράματα στο στόμιο του εξωθητήρα. Το σχήμα θα μπορούσε να αλλάξει για παράδειγμα σε κυκλικό ή τριγωνικό για να δούμε πώς θα λειτουργούσε σε σύγκριση με το τετραγωνικό στόμιο που χρησιμοποιήθηκε στο έργο αυτό. Θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε ένα καπάκι στο στόμιο για να είναι πιο ακριβές κατά την εκτύπωση αλλά και μετά από αυτή. Θα μπορούσαμε να δοκιμάσουμε ρυθμιζόμενες πλαϊνές σπάτουλες για να διαπιστώσουμε εάν θα μπορούσε να εκτυπώσει γωνιακούς τοίχους. Με τη δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας των πλευρικών σπατουλών, θα μπορούσαν να ανυψωθούν κάθε φορά κάνοντας μια γωνία για να αποτραπεί την παρεμβολή τους με την εξωθημένη γραμμή σκυροδέματος.

Κατά τη διάρκεια του έργου υπήρξε υποτίμηση της απαιτούμενης δύναμης και ακαμψίας του εξωθητήρα για να μπορέσει να λειτουργήσει σωστά με το σκυρόδεμα. Θα πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι η δύναμη που απαιτείται για την εξώθηση του σκυροδέματος μέσω ενός εξωθητήρα όπως αυτός απαιτεί σχετικά υψηλές δυνάμεις. Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται στο τελικό προϊόν είναι πιθανώς μικρότερος από τον απαιτούμενο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν τυπώνονται κατασκευές κάθετα, τα χαμηλότερα στρώματα έχουν χρόνο να σκληρύνουν λίγο καθώς τα υψηλότερα στρώματα εξωθούνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο τοίχος να αποκτά την ικανότητά να υποστηρίξει το βάρος του με την πάροδο του χρόνου. Αυτό είναι ένα καλό στοιχείο για την κατασκευή υψηλών κατασκευών. Μια άλλη τεχνική για την κατασκευή τους θα μπορούσε να είναι ο καθαρισμός του εξωθητήρα, η αναμονή για 24 ώρες για να σκληρύνει το σκυρόδεμα και στη συνέχεια να συνεχιστεί η κατασκευή στρωμάτων. Με αυτή την τεχνική θα μπορούσαμε να χτίσουμε ακόμα υψηλότερες κατασκευές.

Η χρήση ενός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, όπως του ANSYS, θα ήταν χρήσιμη για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων στον εξωθητήρα και εξ αυτού την επιλογή του κατάλληλου υλικού για την εφαρμογή. Ωστόσο, το γεγονός ότι υπάρχουν πολλά διαφορετικά υλικά όπως πλαστικό και μέταλλο και ότι πολλά μέρη συναρμολογούνται με κόλλα πιθανότατα θα δυσκόλευε τους υπολογισμούς. Επίσης το γεγονός ότι το υλικό εκτύπωσης είναι σκυρόδεμα καθιστά δύσκολη την προσομοίωση. Ως εκ τούτου, αποφασίσαμε πως η κατασκευή ενός πρωτοτύπου και η πραγματοποίηση δοκιμών θα ήταν μια καλύτερη λύση.

Ο αριθμός των διαφορετικών λεπτομερειών που θα μπορούσαν να εκτυπωθούν με αυτόν τον εκτυπωτή είναι τεράστιος. Σε αυτό το έργο έχουν γίνει μόνο ευθείες γραμμές αλλά θα μπορούσαμε να κάνουμε και καμπύλα σχήματα. Είναι μόνο η κίνηση του ρομπότ που το περιορίζει. Το συγκεκριμένο ρομπότ δεν είναι ιδανικό για τρισδιάστατη εκτύπωση λόγω των περιορισμών του στην εμβέλεια. Για περαιτέρω έρευνα θα μπορούσαμε να δοκιμάσουμε την ενσωμάτωση στηρίξεων όπως κομμάτια ξύλου στην εκτύπωση για να μπορέσει να δημιουργήσει κοιλότητες στις λεπτομέρειες.

Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος είναι πολύ υψηλή, περίπου 105 MPa. Για χρήση σε έπιπλα δρόμου είναι πολύ μεγαλύτερη από όσο χρειάζεται και αυτό δείχνει το εύρος των εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σκυρόδεμα αυτό. Η εφελκυστική αντοχή είναι πολύ μικρότερη, περίπου 13 MPa.

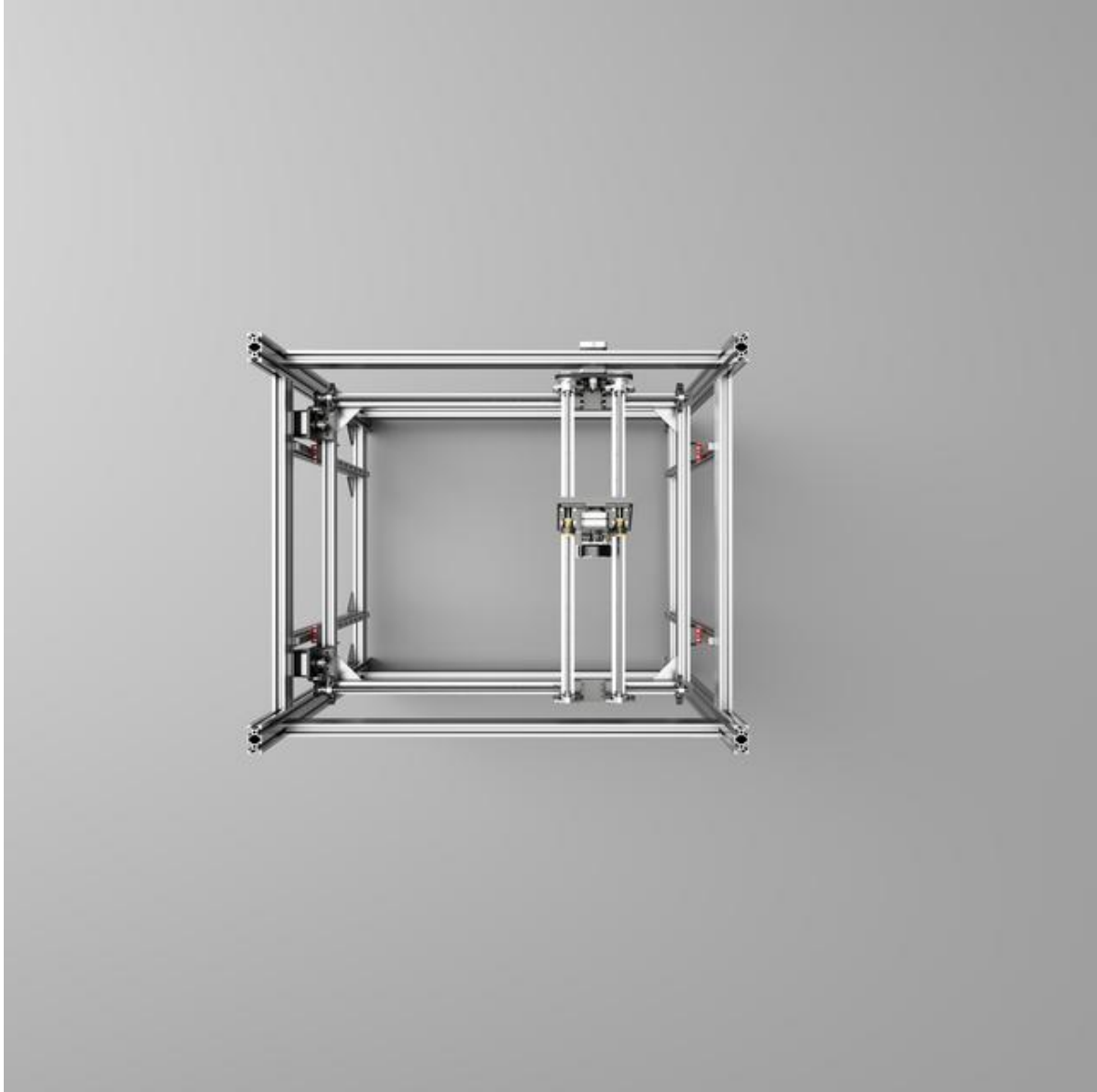
Στο όλο έργο συμμετείχαν τέσσερις μεταπτυχιακοί φοιτητές. Δύο από αυτούς εργάζονταν για την εύρεση κατάλληλου σκυροδέματος για τρισδιάστατη εκτύπωση.

7 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

7.1 Μηχανισμός κίνησης στις τρεις διαστάσεις

Η επιλογή του ρομποτικού βραχίονα ABB έγινε πιθανότατα λόγω της ακρίβειας του στην κίνηση και στην ευκολία τοποθέτησής του απευθείας σε μία σταθερή κατασκευή. Όμως η γεωμετρία του βραχίονα περιόριζε την κίνηση του εξωθητήρα δημιουργώντας και μπέρδεμα στα καλώδια. Εναλλακτικά και εφόσον το συγκεκριμένο σχέδιο προοριζόταν για κατασκευή σχετικά μικρών αντικειμένων, θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα σύστημα γραμμικής κίνησης χρησιμοποιώντας μεταλλικές ράγες τύπου V-Rail και βαγόνια γραμμικής κίνησης. Η κίνηση θα γινόταν με την χρήση ντίζας προσαρτημένης σε ισχυρούς ηλεκτρικούς βηματικούς κινητήρες. Καθώς η ντίζα περιστρέφεται από τους κινητήρες, με την χρήση γραναζιού τοποθετημένου επάνω στο εκάστοτε βαγόνι θα έδινε την επιθυμητή ελεγχόμενη κύλιση των τροχών του βαγονιού επάνω στις μεταλλικές ράγες και έχοντας τους απαραίτητους αισθητήρες στοπ, στο τελείωμα της κάθε ράγας θα ελέγχουμε το εύρος κίνησης στον κάθε άξονα. Το βαγόνι είναι μεταλλική πλάκα που διαθέτει ένα σετ ρόδες στην κάθε πλευρά της ράγας που επιτρέπει την κίνησή του σε μήκος αυτής όπως φαίνεται στην εικόνα 7.3. Στις πλάκες των ραγών μπορεί να στηριχθεί το όλο πλαίσιο διαφορετικού άξονα κίνησης.

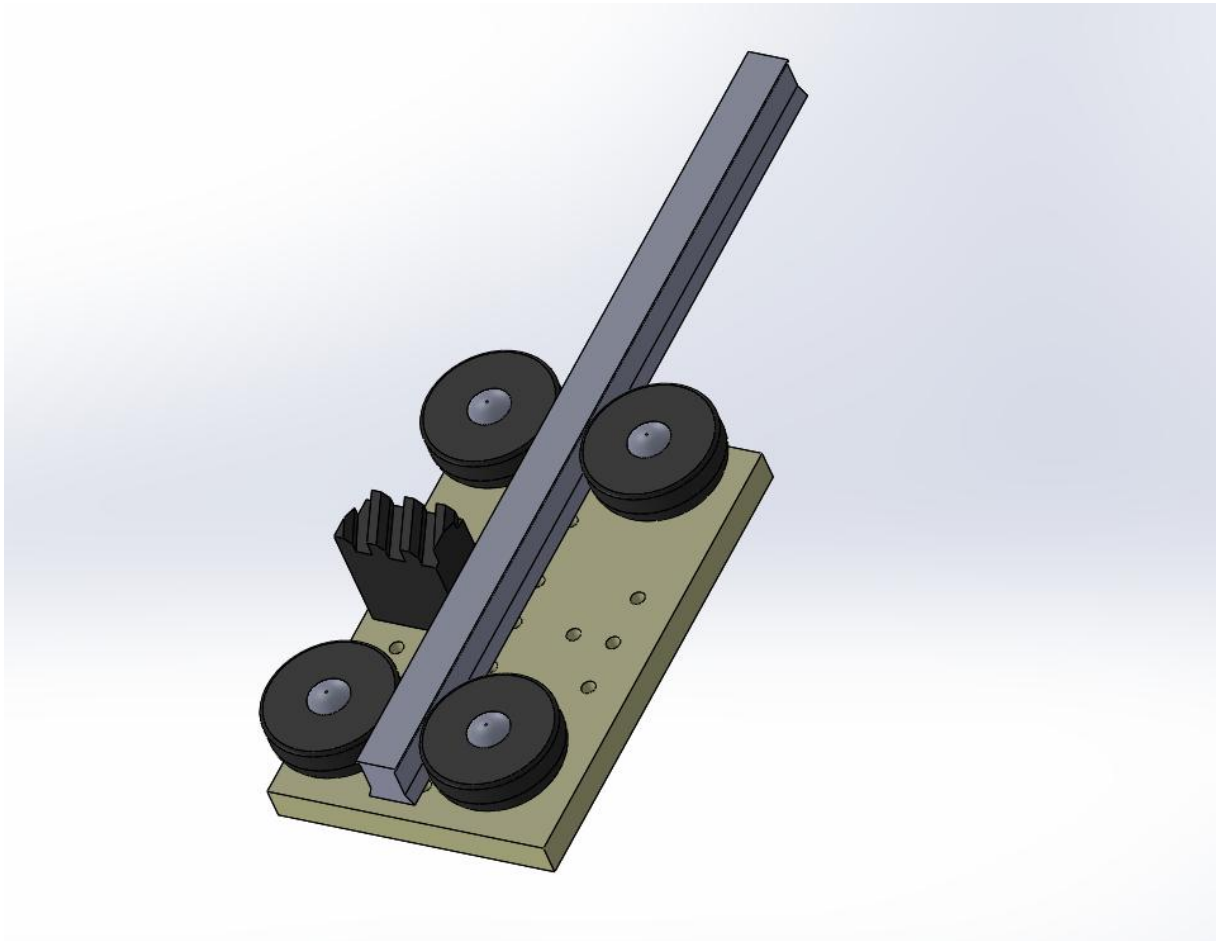
Για τον έλεγχο της κίνησης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πίνακα ελέγχου Arduino με την βοήθεια βηματικών οδηγών και του ανάλογου λογισμικού. Μία τέτοια διάταξη είναι σύνηθες σε μικρής κλίμακας μηχανήματα CNC όπως λέιζερ κοπής router και τρισδιάστατους εκτυπωτές νήματος, όμως στην περίπτωση μας θα μπορούσε να λύσει τα προβλήματα που εμφάνισε ο ρομποτικός βραχίονας. Ένα ακόμα πρόβλημα ήταν και η μεγάλη τάση που δημιουργούνταν στην σύνδεση του βραχίονα με τον εξωθητήρα, καθώς επίσης θα μπορούσε να συγκρατήσει και το βαρύ δοχείο που περιέχει το σκυρόδεμα και τροφοδοτεί τον εξωθητήρα, όπως θα είχαν και μεγαλύτερη ελευθερία κίνησης τα καλώδια τροφοδοσίας του ηλεκτροκινητήρα που δίνει κίνηση στην αρίδα αφού δεν θα μπλέκονταν γύρω από τον βραχίονα καθώς και στον σωλήνα παροχής σκυροδέματος. Παρ' όλα αυτά όμως μία τέτοια κατασκευή θα απαιτούσε πολύ μεγάλη ακρίβεια κατά την συναρμολόγησή της καθώς κακή ευθυγράμμιση ή χαλαρότητα μεταξύ των συνδέσεων θα δημιουργούσε σημαντικά προβλήματα ακρίβειας στο εκτυπωμένο προϊόν δημιουργώντας ατέλειες στις επιφάνειές του. Μελλοντικά εάν επιθυμήσουμε κατασκευή προϊόντων μεγαλύτερης κλίμακας, θα μπορούμε να αλλάξουμε τις μεταλλικές ράγες και τις ντίζες της πλατφόρμας με μεγαλύτερες για να καλύψουμε τις ανάγκες μας. Αντιθέτως στην περίπτωση του ρομποτικού βραχίονα θα πρέπει να αλλαχθεί καθ'εαυτού.



Εικόνα 7.1 Παράδειγμα συστήματος γραμμικής κίνησης στους τρεις άξονες με μεταλλικούς δοκούς V-Rail.[9]



Εικόνα 7.2 Παράδειγμα κίνησης βαγονιού με ντίζα προσαρτημένη σε βηματικό κινητήρα.[10]



Εικόνα 7.3 Παράδειγμα σχεδίου βαγονιού

7.2 Μηχανισμός δημιουργίας ροής εξώθησης

Η πλειονότητα εκτυπωτών σκυροδέματος πλέον, που χρησιμοποιούνται όμως για μεγάλης κλίμακας κατασκευές, χρησιμοποιούν αντλίες θετικής εκτόπισης για την μεταφορά του κονιάματος από την παροχή προς το στόμιο του εξωθητήρα λόγω της σταθερής πίεσης που παρέχουν. Για το εξεταζόμενο μηχάνημα όμως, και σύμφωνα με την μικρή του κλίμακα, ο Αρχιμήδειος κοχλίας φαίνεται πως κάλυψε αποτελεσματικά την απαιτούμενη παροχή τροφοδοσίας κονιάματος προς εξώθηση. Ένας μεγαλύτερος ηλεκτροκινητήρας για την κίνηση της αρίδας όπως έχει ήδη παρατηρηθεί θα ήταν αναγκαίος.

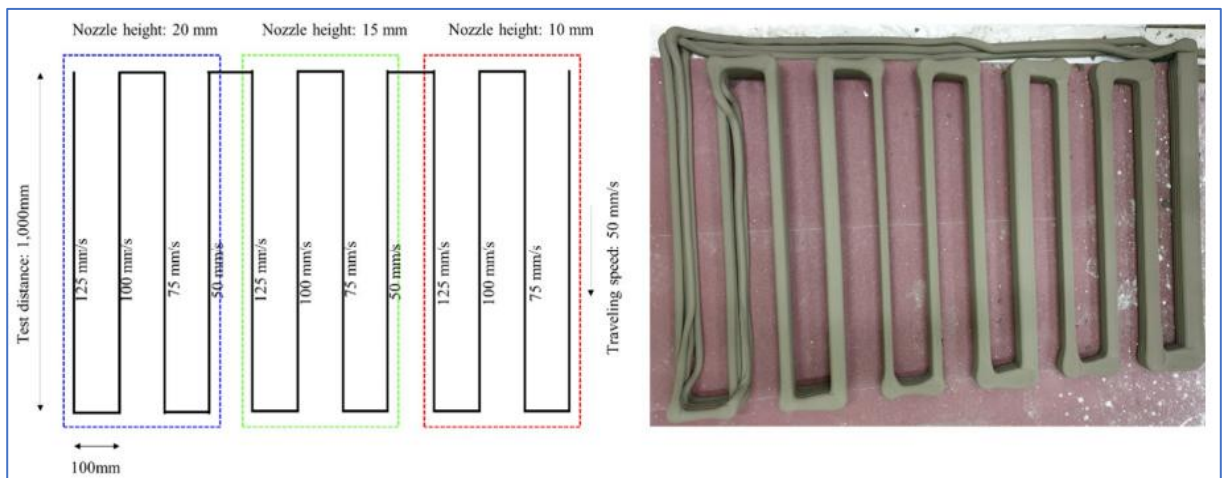
7.3 Μείγμα σκυροδέματος

Τα μείγμα κονιάματος που τελικά χρησιμοποιήθηκε αναφέρεται πως ήταν εξωθήσιμο και οικοδομήσιμο με μεγαλύτερο από το επιθυμητό ιξώδες. Τομέας βελτίωσης είναι επίσης το βάρος του και η μηχανική αντοχή του. Προσπαθώντας να μειώσουμε το βάρος του σκυροδέματος υπάρχει ο κίνδυνος να μειώσουμε την αντοχή του. Ο λόγος που το βάρος αποτελούσε πρόβλημα ήταν η κάθετη κατασκευασιμότητά του αλλά και οι μεγάλες τάσεις που εμφανιζόντουσαν στον ρομποτικό βραχίονα και στο σημείο σύνδεσής του με τον εξωθητήρα, άρα η αντικατάσταση του ρομπότ με ένα σύστημα γραμμικής κίνησης όπως αναφέρθηκε προηγουμένως θα συνέβαλε και σε αυτό το πρόβλημα καθώς η στήριξη του εξωθητήρα θα γινόταν με πιο σταθερό τρόπο αλλά και το σύνολο της κατασκευής θα είχε αρκετά μεγαλύτερη στιβαρότητα.

Μία πρόταση για την σύνθεση του κονιάματος που έχει προκύψει ύστερα από δοκιμές είναι μία αναλογία σε Kg/m^3 232 νερό, 580 κοινός τύπος τσιμέντου Πόρτλαντ, 166 ιπτάμενη τέφρα για να μειώσει το ιξώδες του μείγματος, 83 πυριτική παιπάλη που συμβάλει στην εξώθηση και την σταθερότητα του κονιάματος καθώς μειώνει την συρρίκνωσή του όταν στεγνώνει, 1146 άμμος, 8,29 υπερπλαστικοποιητή που βοηθά στην ρευστότητα και 1,66 πυκνωτικού παράγοντα και προτεινόμενη ταχύτητα εκτύπωσης 125mm/s. Μετά από δοκιμές μηχανικής αντοχής σε εφελκυσμό τα αποτελέσματα 28 ημέρες μετά την εκτύπωση ήταν 2,4-2,97 Mpa για στρώση 20mm και στη δοκιμή θλίψης δείγματος σε καλούπι ήταν 66 Mpa, έχοντας υπόψη πως δεν είχαν προστεθεί ακόμα ίνες για την ενίσχυσή του.[11] Η προθήκη ινών στο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια στην κατασκευαστική βιομηχανία, έτσι μπορούμε και στο κονίαμα να προσθέσουμε ίνες γυαλιού, βασάλτη ή άνθρακα, που η ευθυγραμμισμένη προσθήκη τους θα αυξήσει σημαντικά την αντοχή σε κάμψη. Στην εκτύπωση κτιρίων έχουν διερευνηθεί πολλές τεχνικές ενίσχυσης, όπως η εισαγωγή ράβδων οπλισμού, καρφιών ή ενσωμάτωσης συρμάτων, που έχουν επιτύχει σημαντική μηχανική βελτίωση και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και στον εν λόγω εκτυπωτή ανάλογα με την γεωμετρία του προϊόντος προς εκτύπωση.[13] Η γραμμική διαδικασία εκτύπωσης συμβάλει αυτομάτως και στην

γραμμική κατανομή των ινών που είναι και η επιθυμητή για να έχουμε τις βέλτιστες ιδιότητες. [12]

Το ύψος του στομίου σε σχέση με την προηγούμενη στρώση καθώς και η ταχύτητα εκτύπωσης που είχαν επιλεγεί παίζουν καθοριστικό ρόλο στο αποτέλεσμα της εκτύπωσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από δοκιμές μίας άλλης επιστημονικής ομάδας για το πλάτος και την ποιότητα εκτύπωσης φαίνονται στην εικόνα 7.4.

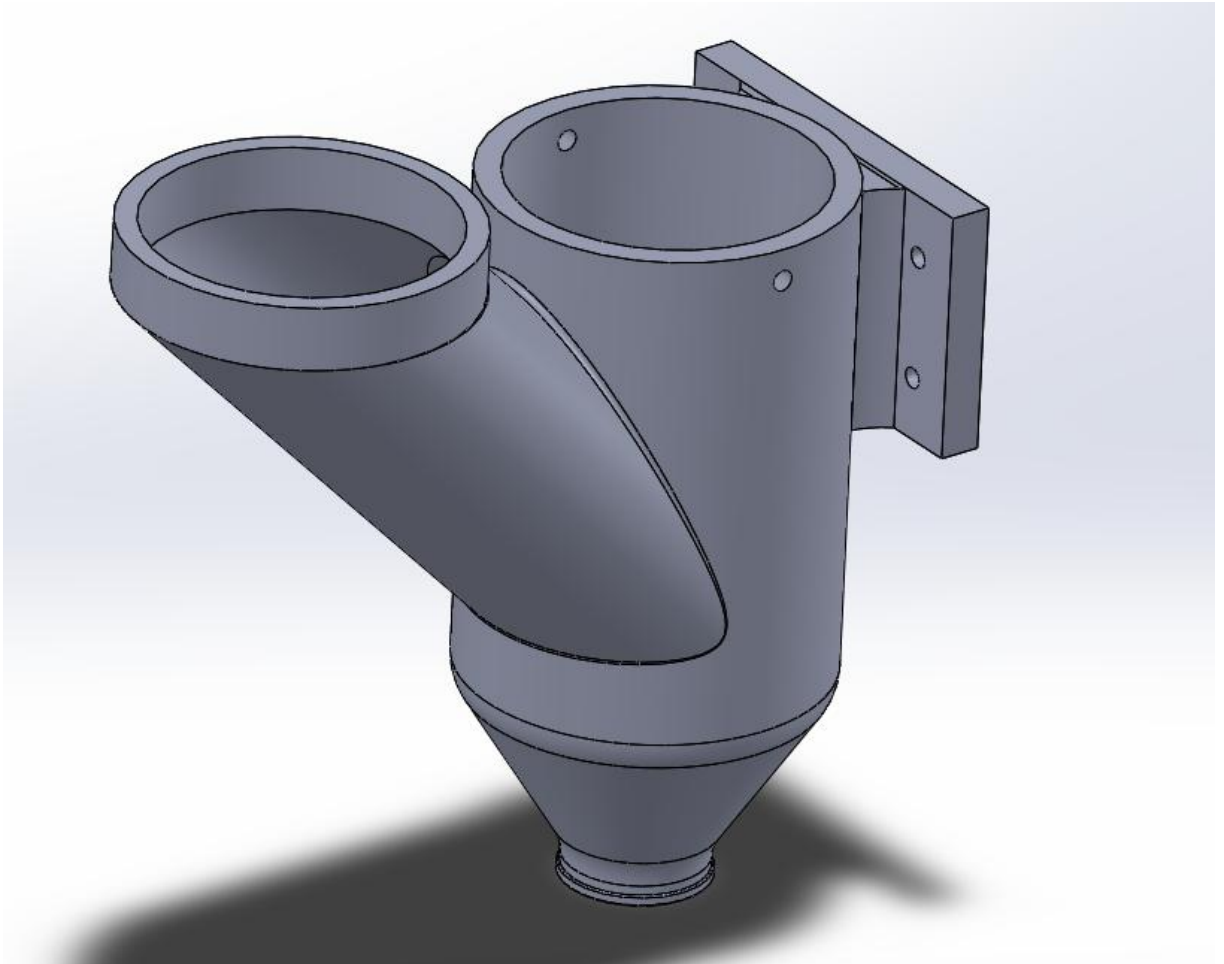


Εικόνα 7.4 Το πλάτος και η ποιότητα εκτύπωσης αναλογικά με την απόσταση του στομίου και την πρόωση του εξωθητήρα. [11]

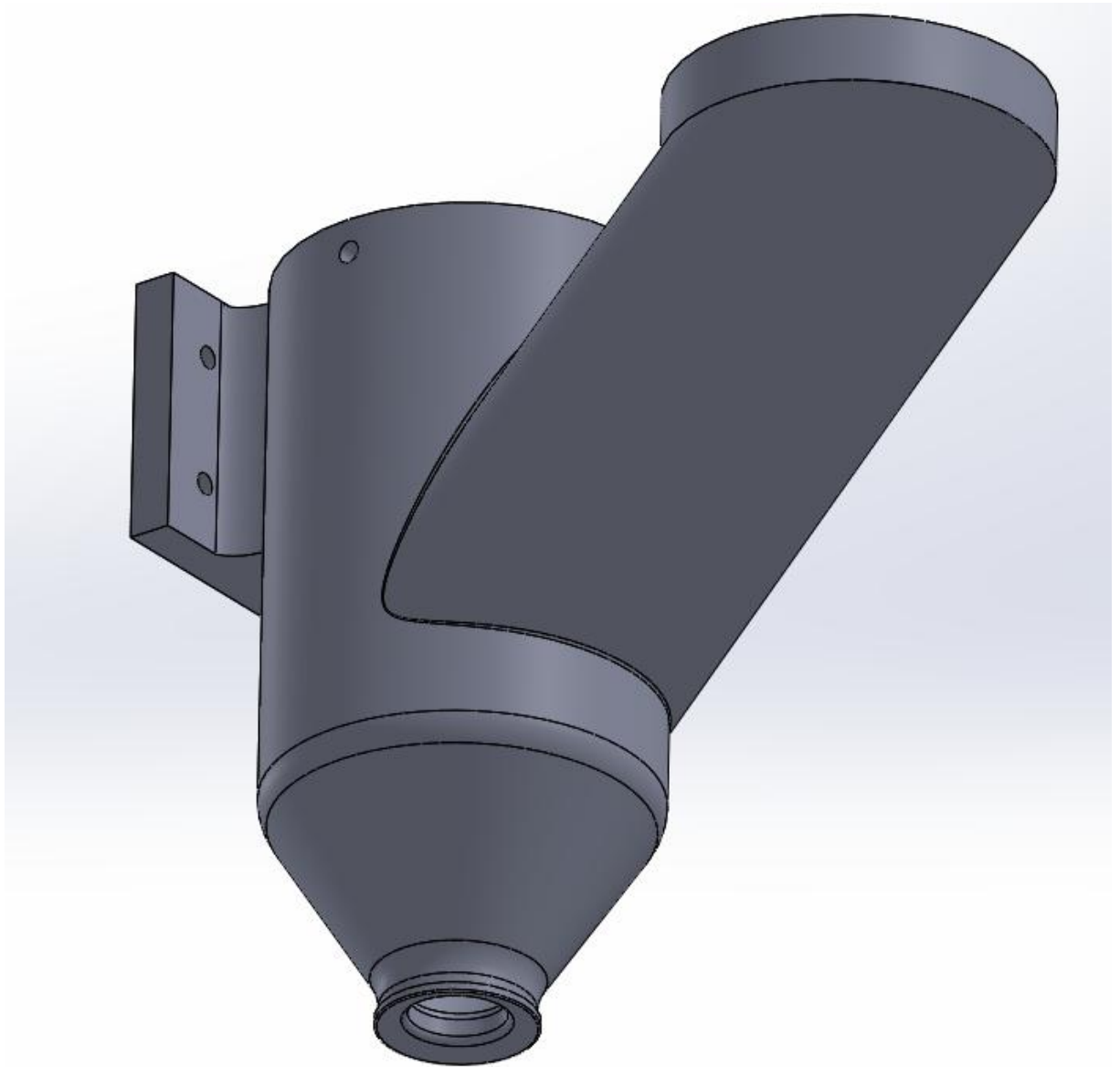
7.4 Σχεδιασμός εξωθητήρα

Το σχήμα του στομίου του εξωθητήρα μπορεί να έχει διάφορες μορφές αλλά χρησιμοποιούνται περισσότερο ορθογωνικές και κυκλικές χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση πλευρικών σπατουλών ανάλογα με το επιθυμητό φινίρισμα. Αρχικά είχε γίνει εκτύπωση του εξωθητήρα σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με πολυμερές υλικό όμως δεν άντεξε της τάσεις που δημιουργούνταν και εμφάνισε ρωγμές. Για αυτό τον λόγω συνέχισαν με την κατασκευή μεταλλικού εξωθητήρα που είχε σημαντικά μεγαλύτερο βάρος. Πλέον όμως η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αναπτυχθεί ραγδαία και υπάρχουν πολλά νέα υλικά εκτύπωσης με νέες ιδιότητες σε σχέση με αυτά που ήταν διαθέσιμα την περίοδο που πραγματοποιήθηκε η μελέτη(2015). Έτσι τώρα θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε ξανά τον εξωθητήρα μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιώντας ένα από τα πιο ανθεκτικά πολυμερή όπως το νήμα πολυανθράκων (PC) με παρουσία ινών άνθρακα (PCFC) το οποίο έχει όριο θραύσης σε εφελκυσμό 70 Mpa έχει και έως 5% μικρότερο βάρος από άλλα υλικά εκτύπωσης λόγω της παρουσίας των ινών άνθρακα. [14] Έγινε σχεδιασμός του εξωθητήρα που θα

μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, στο σχεδιαστικό λογισμικό SolidWorks Εικόνες 7.5 και 7.6.

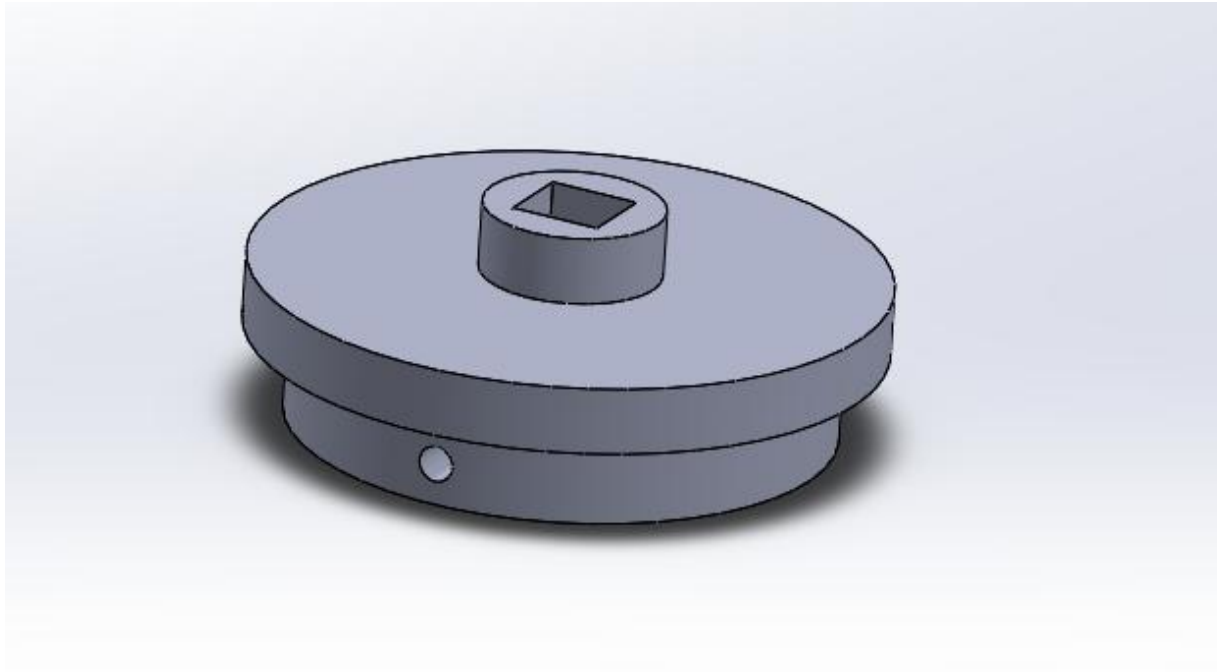


Εικόνα 7.5. Σχέδιο εξωθητήρα προς εκτύπωση.

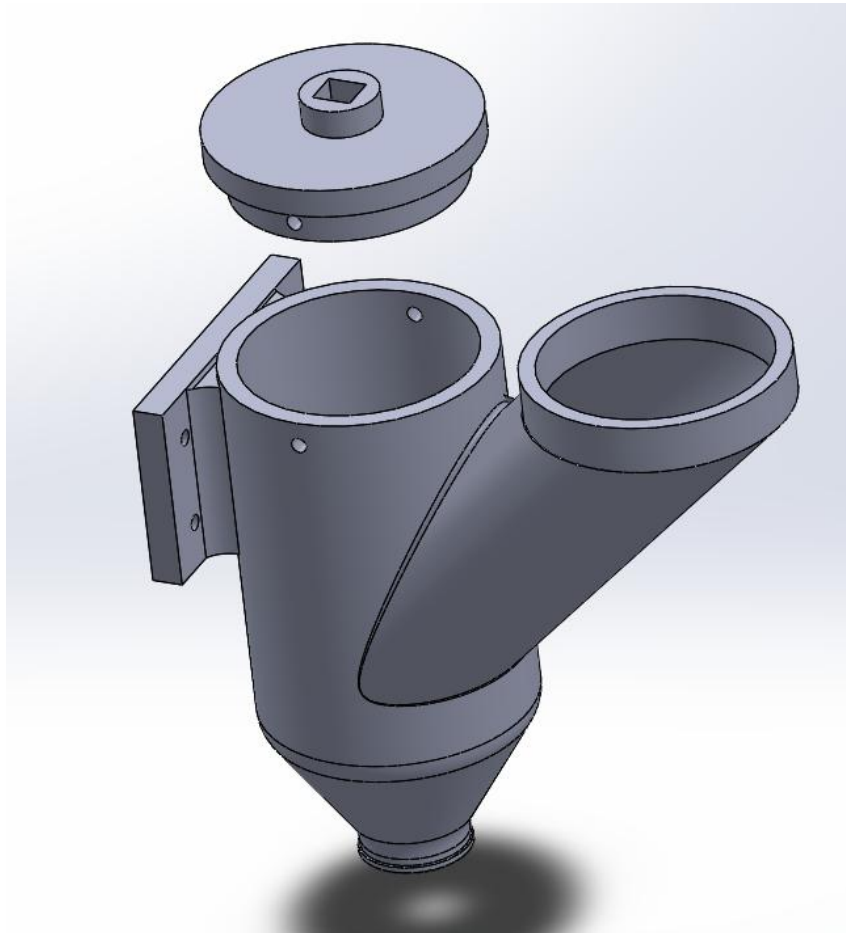


Εικόνα 7.6 Σχέδιο εξωθητήρα προς εκτύπωση.

Διατηρήθηκε το βασικό σχήμα αφού είχε καλά αποτελέσματα εκτύπωσης όπως και τροφοδοσίας εφόσον προστεθεί ένας μηχανισμός μεταφοράς του κονιάματος από το δοχείο στον εξωθητήρα. Στην μία πλευρά του εξωθητήρα έχει σχεδιαστεί βάση για να εφαρμοστεί με βίδες στο βαγόνι της πλατφόρμας ευθύγραμμης κίνησης και επίσης σχεδιάστηκε το καπάκι που θα τοποθετηθεί η αρίδα με τον ηλεκτροκινητήρα Εικόνα 7.7.

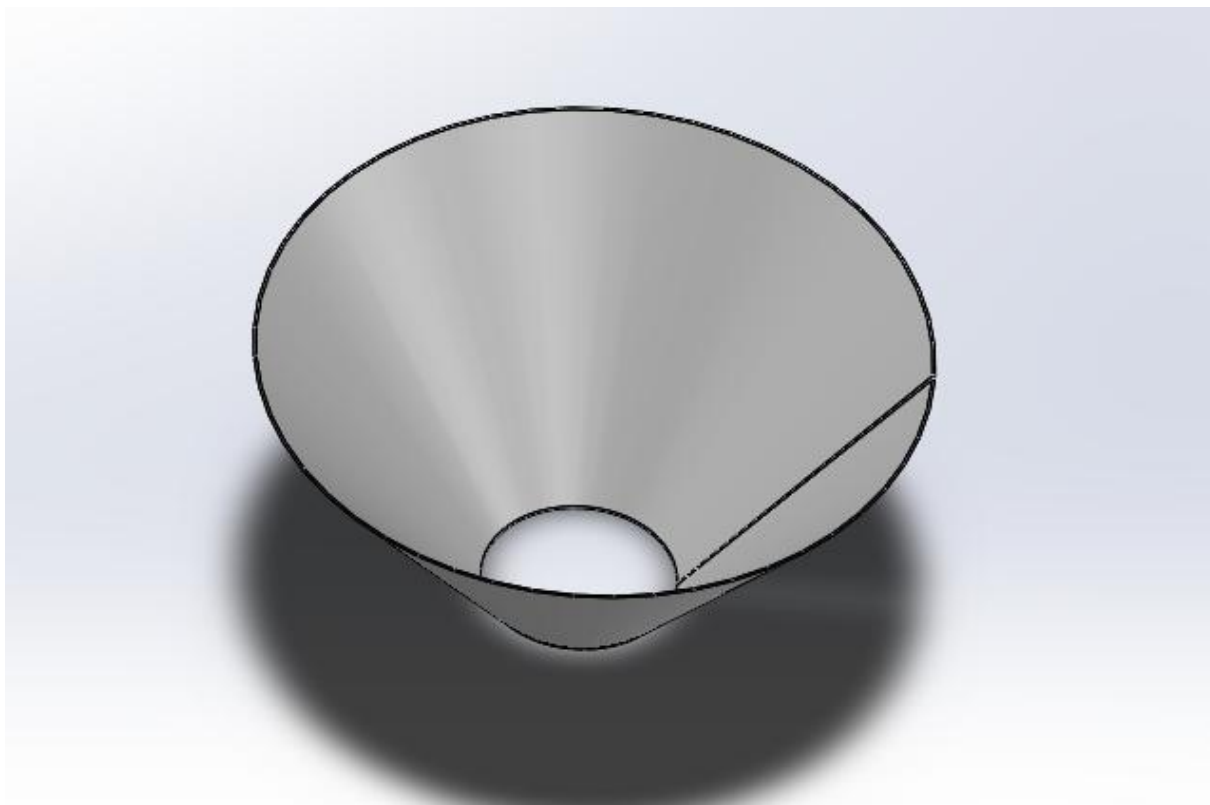


Εικόνα 7.7 Σχέδιο καπακιού εξωθητήρα.



Εικόνα 7.8 Συνολική εικόνα των προς εκτύπωση εξαρτημάτων.

Μετά την εκτύπωση προτείνεται η χειροκίνητη λείανση της εσωτερικής επιφάνειας του εξωθητήρα για την καλύτερη δυνατή ρευστότητα του κονιάματος. Ακόμα θα μπορούσε να προσαρτηθεί ένα κωνικό μεταλλικό κομμάτι στο κάτω μέρος του εξωθητήρα που θα βοηθούσε ακόμη περισσότερο στην ροή λόγω του μικρότερου συντελεστή τριβής του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.9.



Εικόνα 7.9 Μεταλλικός κώνος για ευκολία ροής.

Μία ακόμα προσθήκη που θα μπορούσε να γίνει είναι ένα κλείστρο στο στόμιο του εξωθητήρα που θα βοηθούσε στην συγκράτηση του υλικού έως να ξεκινήσει η εκτύπωση. Επίσης θα κρατούσε τον εξωθητήρα κλειστό κατά την παύση για το γέμισμα του κάδου τροφοδότησης ενώ παράλληλα θα μπορεί να συνεχίσει να περιστρέφει η αρίδα το κονίαμα που υπάρχει ακόμα εντός του εξωθητήρα για την αποφυγή αφυδάτωσης και σκλήρυνσης κατά την παύση.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε κριτική ανάλυση μελέτης πάνω στην κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή μπετόν. Ήταν πολύ ενδιαφέρον το αντικείμενο της μελέτης καθώς είναι μια ραγδαία ανερχόμενη τεχνολογία. Με βοήθησε να κατανοήσω τεχνολογικούς όρους που πριν δεν είχα διαχωρίσει απόλυτα αλλά και να αναγνωρίσω περαιτέρω μηχανολογικούς όρους και ορολογίες εμπλουτίζοντας τις γνώσεις μου. Ήταν εν τέλει μία ευχάριστη διαδικασία παράλληλη την δυσκολία αυτής λόγω των ειδικών όρων αλλά και τις δυσκολίας εύρεσης πολλών πηγών λόγω του ότι είναι μία σχετικά νέα τεχνολογία. Το αποτέλεσμα της εργασίας μου είναι να παρουσιαστούν βασικές λειτουργίες και εξαρτήματα ενός εκτυπωτή μπετόν και τα κριτήρια επιλογής αυτών, που θα μπορούσε να δώσει τις βασικές ιδέες που χρειάζεται κάποιος στην αρχή της ενασχόλησής του με το αντικείμενο αυτό, όπως και να δώσει την δυνατότητα να αναγνωσθεί η αρχική μελέτη από άτομα μη εξοικειωμένα με την αγγλική γλώσσα που θα ήθελαν να μελετήσουν τις βασικές αρχές λειτουργίας των τρισδιάστατων εκτυπωτών προσθήκης υλικού γενικά και ειδικότερα σκυροδέματος.

9 Αναφορές

- [1] 3D Printer by Akula Vaishnaivi
https://www.academia.edu/32314139/3D_PRINTER

- [2] RAPID PROTOTYPING NOTES BY SHASHIDHAR
https://www.academia.edu/36354896/RAPID_PROTOTYPING_NOTES_BY_SHASHIDHAR_2_pdf

- [3] PCA America's Cement Manufacturers <https://www.cement.org/cement-concrete>

- [4] Ulrich, Karl T. & Eppinger, Steven D. (2012). Product Design and Development. McGraw-Hill Education New York, USA

- [5] (2015). CM 630 Lättmassa (Electronic). Produktdatablad, Combimix AB, Bålsta, Sweden.
http://www.combimix.se/pdf/Combimix_CM630_PDB_SV.pdf

- [6] (2015). Murbruk M10 (Electronic). Produktdatablad, Combimix AB, Bålsta, Sweden.
http://www.combimix.se/pdf/Combimix_MurbrukM10_PDB_SV.pdf

- [7] Backebjörk, M. & Hamelius, A. (2015). (Electronic). Concrete for 3D-printing-properties in fresh and hardened state. Master thesis, Civil engineering, Lund University, Lund, Sweden.

- [8] Δημοσιεύσεις του Πανεπιστημίου Λουντ.
<https://www.lunduniversity.lu.se/lup/publication/7456059>

- [9] GrabCad Community <https://grabcad.com/library/3d-printer-light-cnc-wip-1>

- [10] Helix Products <https://www.helixlinear.com/Products/Linear-Actuators/PRA-Linear-Actuators/Profile-Rail-Linear-Actuator-PRA-11D-025~%20PRA-11D-025>

- [11] Evaluation of the Mechanical Properties of a 3D-Printed Mortar
<https://pdfs.semanticscholar.org/fda5/b053d10983f24543547a61bcf93885da8dfb.pdf>
- [12] Properties of 3D_Printed fiber-reinforced Portland cement paste
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946516301093>
- [13] 3D Printing devices and Reinforcing Techniques for Extruder Cement-Based Materials <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/4/453>
- [14] 3dxtech products <https://www.3dxtech.com/product/carbonx-pc-cf/>
- [15] Kwon, H. (2002). Experimentation and analysis of contourcrafting (CC) process using uncured ceramic materials (Electronic). Doctoral thesis. Industrial and systems engineering, University of southern California, USA.
<http://contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/HK-Thesis.pdf>

Παράρτημα Α: Συνταγή για το ειδικό μίγμα σκυροδέματος

Receptnamn	8a	vctekv	0.275				
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2210			Satsstorlek (L)	
						15	
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		228.0	1000	0.2280		3.343
	Bascement		659.0	3000	0.2197		9.885
	Cement						
1	Silikastoft		83.0	2600	0.0319		1.245
1	Flygaska		87.0	2280	0.0382		1.305
	Sika Crackstop 12 mm		1.2	900	0.0013		0.018
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1.26%	8.30	1080	0.0077	40.00%	0.1246
	Sika Tard 932	0.50%	3.30	1160	0.0028	27.00%	0.0494
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4.0%			0.0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80.0%	912	2650	0.3443		13.69
	Baskarp 95	20.0%	228	2650	0.0861		3.42
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						

Παράρτημα Β: Τεχνικές ιδιότητες του ηλεκτρικού κινητήρα του εξωθητήρα



Produkter ▢ Motorer ▢ DC-motorer ▢ Motorer med växel

Bosch AHC 24 V 5 W



- Art.Nr. 0 390 203 311
- Högt startmoment
- 16 rpm, 19,4 Nm startmoment

Beskrivning

AHC-serien med sina "platta" motorkroppar ger väldigt små inbyggnadsmått. Möjliga applikationer är bl.a. handikapputrustning, medicinsk utrustning, låssystem, dörr- och fönstersystem etc.

Tekniska data

Beställningsnummer	0 390 203 311
Spänning	U_n 24 V
Effekt	P_n 5 W
Ström	I_n $\leq 2,3$ A
Startström	I_{max} 7 A
Hastighet	n_n 16 v/min
Moment	M_n 3 Nm
Startmoment	M_a $\geq 19,4$ Nm
Utväxling	i 217 : 1
Rotationsriktning	L/R
Drift	S2 - 5 min
Skyddsklass	IP 50
Vikt	ca 0,50 kg

