



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ανάπτυξη μηχανισμού διαχείρισης σκόνης για μηχανή SLS/SLM

Ψαρομάτης Γιαννακόπουλος Φοίβος

Επιβλέπων Καθηγητής: Βοσνιάκος Γεώργιος

Αθήνα 2016

Περίληψη

Το τοπίο των κατεργασιών προσθήκης υλικού έχει αλλάξει δραματικά τα τελευταία χρόνια, ειδικά με τις τεχνολογίες 3D εκτύπωσης. Σήμερα, οι τεχνολογίες 3D εκτύπωσης χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο, είτε για την παραγωγή ή για προσωπική χρήση. Selective Laser Sintering ή Selective Laser Melting (SLS / SLM) είναι δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα κατεργασιών προσθήκης υλικού υψηλής ακρίβειας. Το υλικό είναι υπό την μορφή λεπτής σκόνης που αποτίθεται ως ένα λεπτό στρώμα πάνω σε μια επιφάνεια και στη συνέχεια συμπιέζεται κατάλληλα. Τέλος, ένα λέιζερ υψηλής ισχύος σαρώνει την επιφάνεια, πυροσυσσωματώνοντας / τήκοντας τη σκόνη ετοπικά, οι δε μη συσσωματωμένες περιοχές παραμένουν για την υποστήριξη των επόμενων στρώσεων. Με αυτόν τον τρόπο ένα περίπλοκο τρισδιάστατο σχήμα μπορεί να παραχθεί στρώμα-στρώμα σύμφωνα με το CAD μοντέλο. Η παρούσα εργασία στοχεύει να σχεδιάσει και να κατασκευάσει έναν αποτελεσματικό μηχανισμό για τη διαχείριση της σκόνης για μια μηχανή SLS / SLM που αναπτύσσεται στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κατεργασιών ΕΜΠ. Αυτό το κομμάτι της μηχανής είναι κρίσιμο διότι επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του τεμαχίου που πρόκειται να παραχθεί, καθώς και την ταχύτητα της παραγωγής. Το σύστημα αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα τα οποία είναι: ο μηχανισμός που εναποθέτει τη σκόνη στο τραπέζι εργασίας, ο μηχανισμός που στρώνει τη σκόνη και η κατασκευή που σφραγίζει το χώρο εργασίας από διαρροή σκόνης. Η φάση του σχεδιασμού είχε δύο στάδια, τη σύλληψη των διαφόρων πιθανών λύσεων και τον λεπτομερή σχεδιασμό. Κατά το στάδιο σύλληψης παρήχθησαν πολλά εναλλακτικά σχέδια. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Analytic Hierarchy Process (AHP), οι εναλλακτικές λύσεις αξιολογήθηκαν με βάση τα κριτήρια που ορίζει ο χρήστης και επιλέχθηκε η πιο κατάλληλη εναλλακτική λύση. Συνέχεια είχε ο λεπτομερής σχεδιασμός χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό πακέτο λογισμικού CAD μέχρι σημείου που ο μηχανισμός να είναι έτοιμος για την κατασκευή. Οριστικοποίηση του σχεδιασμού περιλαμβάνει επιλογή των ηλεκτρονικών για την οδήγηση κινητήρων και τη διαχείριση των αισθητήρων. Το επόμενο βήμα στη διαδικασία της ανάπτυξης ήταν η κατασκευή των εξαρτημάτων σε εργαλειομηχανές CNC, με βάση τον G-κώδικα που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό πακέτο CAM. Στη συνέχεια, έλαβε χώρα η συναρμολόγηση. Το μηχάνημα δοκιμάστηκε σε δύο φάσεις. Η πρώτη δοκιμή ήταν χωρίς σκόνη και με στόχο να ελέγξει τη σωστή λειτουργία των ηλεκτρονικών, καθώς και την συνεργασία τους με τα υπάρχοντα συστήματα ελέγχου του μηχανήματος. Η δεύτερη φάση ήταν μια πλήρους κλίμακας δοκιμή του μηχανισμού με πολυμερές σε μορφή σκόνης, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εναπόθεσης ενός στρώματος. Σε αυτό το στάδιο, οι σημειώθηκαν αδυναμίες της μηχανής και κατηγοριοποιήθηκαν σε υποχρεωτικές ενέργειες πριν από την μηχανική ευθυγράμμιση και εκείνες που είναι απλώς βελτιώσεις. Τέλος προτείνεται σχέδιο βαθμονόμησης των παραμέτρων κατεργασίας χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία Taguchi.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	4
1.1	Σκοπός της εργασίας.....	4
1.2	State of the Art.....	5
1.2.1	“Μηχανική” εναπόθεση σκόνης.....	5
1.2.2	Μέθοδος με χρήση δονήσεων.....	6
2	Μεθοδολογία της εργασίας.....	7
2.1	Analytic Hierarchy Process (AHP) & Κριτήρια Αξιολόγησης.....	8
2.2	Statistical design of experiments.....	8
3	Προκαταρκτικός σχεδιασμός του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης.....	10
3.1	Εναλλακτικοί σχεδιασμοί και αξιολόγηση του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης	10
3.1.1	Σχέδια μη υβριδικών μηχανισμών εναπόθεσης σκόνης.....	10
3.1.2	Σχέδια υβριδικών μηχανισμών εναπόθεσης σκόνης.....	14
4	Αναλυτικός σχεδιασμός και κατασκευή του συστήματος διαχείριση σκόνης	19
4.1	Κομμάτια του μηχανισμού και συναρμολόγηση.....	20
4.2	Διαδικασία εναπόθεσης σκόνης.....	26
4.3	Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του μηχανισμού.....	26
5	Δοκιμή.....	28
6	Συμπεράσματα.....	28
	Αναφορές.....	29

Κατάλογος Εικόνων

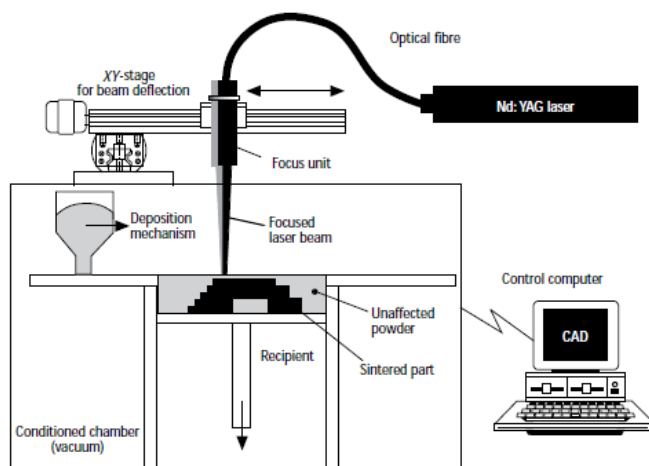
Εικόνα 1: βασική ιδέα μιας μηχανής SLS [12]	4
Εικόνα 2: Μηχανικές μέθοδοι για εναπόθεση σκόνης [12].....	5
Εικόνα 5: Εναπόθεση σκόνης με κύλινδρο και λεπίδα [15].....	6
Εικόνα 6: Powder deposition using a feed bin [16].....	6
Εικόνα 12: Ροή σκόνης με χρήση οριζόντιων και κατακόρυφων δονήσεων	6
Εικόνα 20: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας.....	7
Εικόνα 22: Διάγραμμα ροής Statistical Design of Experiments [49].....	9
Εικόνα 23: μοντέλο CAD της SLS μηχανής	10
Εικόνα 25: Best alternative (HPD23).....	17
Εικόνα 26: Final priority vs. alternative designs	18
Εικόνα 27: Τελικός μηχανισμός.....	19
Εικόνα 55: Δοχείο σκόνης.....	20
Εικόνα 56: Άξονας κωδικοποιητή.....	20
Εικόνα 57: Άξονας τροχαλίας	20
Εικόνα 58: Πλαϊνό σφραγιστικό δοσομετρητή	21
Εικόνα 59: Βάση ρουλεμάν.....	21
Εικόνα 60: Κωδικοποιητής δοσομετρητή	21
Εικόνα 61: Κάτοψη σφραγιστικού δοσομετρητή.....	21
Εικόνα 62: Άνω όψη σφραγιστικού δοσομετρητή	21
Εικόνα 63: Τύμπανο δοσομετρητή.....	22
Εικόνα 64: Δοσομετρητής σκόνης τοποθετημένος στην μηχανή.....	22
Εικόνα 66: Βάση δοσομετρητή μιας δόσης.....	22
Εικόνα 67: Κωδικοποιητής δοσομετρητή μιας δόσης.....	23
Εικόνα 70: Δοσομετρητής μιας δόσης	23
Εικόνα 71: Δοσομετρητής μιας δόσης μηχανισμός.....	24
Εικόνα 73: Γραμμικός κωδικοποιητής.....	24
Εικόνα 74: Άνοψη του σφραγιστικής κατασκευής του χώρου εργασίας	25
Εικόνα 75: Κάτοψη του σφραγιστικής κατασκευής του χώρου εργασίας	25
Εικόνα 47: Powder layering process flowchart.....	26
Εικόνα 78: Διάγραμμα βηματικών κινητήρων	27
Εικόνα 80: κύκλωμα διακοπών.....	27
Εικόνα 81: Ρίψη σκόνης.....	28

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 11: Εναπόθεση με χρήση δονήσεων	11
Πίνακας 20: Μηχανισμός με επίπεδο ιμάντα	12
Πίνακας 28: Ιδιοκατασκευή δοσομετρητή	13
Πίνακας 36: Κάδος τροφοδοσίας	14
Πίνακας 44: σχέδια slot feeder.....	15
Πίνακας 52: Custom dosing mechanism with doctor blade	16
Πίνακας 60: Flat belt mechanism.....	16
Πίνακας 68: Hybrid method using feed bin and doctor blade.....	17

1 Εισαγωγή

Αυτές τις μέρες η μέθοδος Selective Laser Sintering (SLS) είναι μια από τις καλύτερες τεχνικές κατεργασίας προσθήκης υλικού και μια πρόσφατη μελέτη έδειξε ότι η τάση αυτή θα συνεχιστεί και στο μέλλον [1]. Οι βασικές έννοιες της Rapid Manufacturing τονίστηκαν από Chua [2]. Η διαδικασία που υλοποιείται πρέπει να είναι σε θέση να παράγει εξαρτήματα με υψηλή παραγωγικότητα, χαμηλό κόστος, γρήγορη παράδοση, καλή ποιότητα και αποδεκτή επαναληψιμότητα. Η διαδικασία SLS είναι σε θέση να αντιμετωπίσει όλες αυτές οι απαιτήσεις και έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές κατεργασίας προσθήκης υλικού, όπως Stereolithography (SLA) που εισήχθη το 1987[3]. Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου SLS είναι ότι είναι σε θέση να παράγει σύνθετα σχήματα, όχι μόνο σε μέταλλα, αλλά και σε πολυμερή όπως αναφέρεται [4][5]. Τεχνολογίες κατασκευής προσαύξησης υλικού μπορούν να διακριθούν τις τεχνικές σχηματισμού ή αφαίρεσης υλικού και [6] με τρόπο με τον οποίο κάνουν τα προϊόντα, δηλαδή με τη δημιουργία στερεών, όπου είναι απαραίτητο, χωρίς τη χρήση ειδικών εργαλείων. Όπως οι περισσότερες τεχνικές προσαύξησης υλικού, SLS παράγει εξαρτήματα στρώμα-στρώμα. Αυτό επιτρέπει άμεση σύζευξη με το CAD μοντέλο του προϊόντος. Η Εικόνα 1 απεικονίζει τη βασική ιδέα μιας μηχανής SLS.



Εικόνα 1: βασική ιδέα μιας μηχανής SLS [12]

Οι γενικές αρχές της διαδικασίας SLS έχουν ως εξής. Το υλικό είναι υπό την μορφή λεπτής σκόνης η οποία εναποτίθεται σε μια επιφάνεια, τότε συμπιέζεται με μια ορισμένη μέθοδο και στη συνέχεια ένα λέιζερ υψηλής ισχύος σαρώνει την επιφάνεια προκαλώντας τήξη της σκόνης σε τοπικό επίπεδο, οι μη επεξεργασμένες περιοχές παραμένουν για την υποστήριξη των επόμενων στρώσεων και με αυτόν τον τρόπο ένα περίπλοκο τρισδιάστατο σχήμα μπορεί να παραχθεί σύμφωνα με το μοντέλο CAD [7]. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου έχει κατασκευαστεί ολόκληρο το μοντέλο.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η τρέχουσα μελέτη διερευνά τις διάφορες μεθόδους για την εναπόθεση, στρωσίματος και ιδιότητες σκόνης που είναι κρίσιμες για τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας και την πυκνότητα του τελικού κομματιού. Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας αποτελεσματικού και πρακτικού μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης. Στις SLS μηχανές η εναπόθεση της σκόνης είναι μια σημαντική διαδικασία. Η ποιότητα του στρώματος σκόνης είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα για την ακρίβεια και την σταθερότητα της διαδικασίας [8] και επίσης επηρεάζει και την ποιότητα του τελικού κομματιού. Τα βασικά ποιοτικά

χαρακτηριστικά του κάθε στρώματος σκόνης είναι να έχει σταθερό πάχος και να είναι ομογενές. Όμως δεν υπάρχει γενικός τρόπος εναπόθεσης σκόνης μέχρι στιγμής, που να ταιριάζει σε κάθε είδος σκόνης [9]. Είναι γνωστό ότι η υγρασία επηρεάζει το ρυθμό ροής της σκόνης [10]. Η περιοχή

Η περιοχή της σχετικής υγρασίας όπου ο ρυθμός ροής των μεταλλικών και κεραμικών σκόνων δεν επηρεάζεται ουσιαστικά είναι 30-80%[11]. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η βιβλιογραφία στερείται λεπτομερείς μελέτες για το πώς η εναπόθεση σκόνης πραγματοποιείται, οι περισσότερες από τις μελέτες που παραπέμπουν σε ένα πολύ αφηρημένο τρόπο.

Επιπλέον, η εργασία αυτή θα αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της στεγανοποίησης του χώρου εργασίας, που είναι τόσο ζωτικής σημασίας, καθώς και διαδικασία εναπόθεσης σκόνης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, εάν η περιοχή εργασίας δεν είναι ομοιόμορφα σφραγισμένη, κάθε φορά που το τραπέζι εργασίας κινείται προς τα κάτω επιτρέποντας χώρο για ένα νέο στρώμα τα υπάρχοντα στρώματα θα παραμορφώνονται και μπορεί ενδεχομένως να μεταβάλει τις προδιαγραφές του κομματιού.

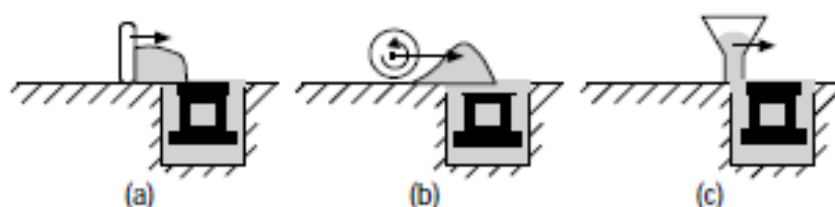
Τέλος, μια πειραματική μεθοδολογία βαθμονόμησης θα αναλυθεί. Αυτή η μέθοδος θα χρησιμοποιεί robust τεχνικές, όπως Statistical Design of Experiments. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι στην τρέχουσα μελέτη μόνο η θεωρία και η σχεδίαση των πειραμάτων θα λάβει χώρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μηχάνημα απαιτεί μία μηχανική βαθμονόμηση πριν να είναι έτοιμο για την βαθμονόμηση των παραμέτρων κατεργασίας (ρυθμός τροφοδοσίας, ισχύ λείζερ, είδος κλπ συμπίκνωση).

1.2 State of the Art

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν οι διάφορες μέθοδοι εναπόθεσης σκόνης σε SLS μηχανές που χρησιμοποιούνται. Με βάση τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης.

1.2.1 “Μηχανική” εναπόθεση σκόνης

Η πιο κοινές και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εναπόθεση σκόνης στις μηχανές SLS είναι «Μηχανική εναπόθεση» στην οποία η σκόνη απλώνεται με μηχανική μέθοδο, όπως μια λεπίδα, έναν κύλινδρο και ένα slot feeder. Αυτές οι μέθοδοι φαίνονται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2). Επίσης η εναπόθεση της σκόνης εξαρτάται από τις ιδιότητες της σκόνης [12].



Εικόνα 2: Μηχανικές μέθοδοι για εναπόθεση σκόνης [12]

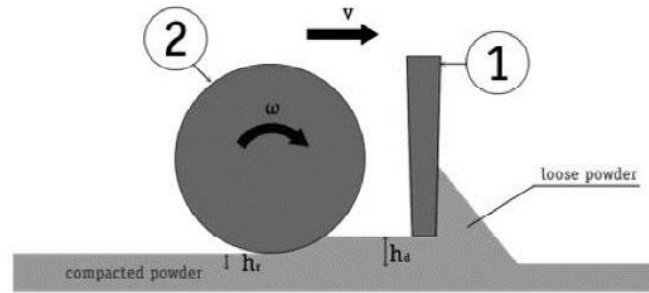
1.2.1.1 Εναπόθεση σκόνης με slot feeder με κύλινδρο

Η μέθοδος εναπόθεσης σκόνης που χρησιμοποιήθηκε από τους B. Van der Schueren και J.P. Kruth [12] χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των μεθόδων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείτε slot feeder και κύλινδρο. Η διαδικασία εναπόθεσης σκόνης αρχίζει με την προς τα κάτω μετακίνηση του τραπέζιου εργασίας λίγο παραπάνω από ότι είναι το πάχος του κάθε στρώματος. Στη συνέχεια περνάει από πάνω ο slot feeder και

απλώνει ένα χαλαρό στρώμα σκόνης. Στη συνέχεια η τράπεζα εργασίας ανεβαίνει ελάχιστα και περνάει ο κύλινδρος συμπιέζοντας την χαλαρή σκόνη [12]. [13].

1.2.1.2 Εναπόθεση σκόνης με χρήση κυλίνδρου και λεπίδας

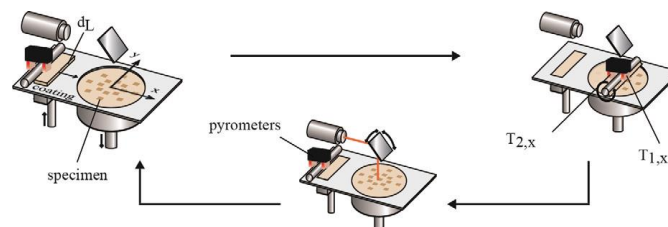
Οι Budding et.al. [15] εξέτασαν επίσης και την πιθανότητα της χρήσης λεπίδας μαζί με κύλινδρο ο οποίος περιστρέφεται προς την φορά της κίνησης. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης όσον αφορά την πυκνότητα ήταν παραπάνω από ικανοποιητικά. Όμως παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να έχει αρνητικά αποτελέσματα όταν ο λόγος συμπίεσης ξεπερνούσε ένα όριο.



Εικόνα 3: Εναπόθεση σκόνης με κύλινδρο και λεπίδα [15]

1.2.1.3 Εναπόθεση με κάδο τροφοδοσίας

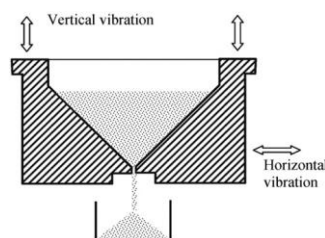
Σε αυτή την μέθοδο η σκόνη προς εναπόθεση βρίσκεται σε ένα κάδο δίπλα από τον χώρο εργασίας. Η διαδικασία της εναπόθεσης ξεκινάει με αυτόν τον κάδο να ανεβαίνει τόσο όσο απαιτείτε ώστε η σκόνη που θα βγει να επαρκεί για μία στρώση. Στη συνέχεια με τη χρήση κυλίνδρου ή λεπίδας στρώνεται η σκόνη [16][17][18]. Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4) αποτυπώνει αυτή την διαδικασία.



Εικόνα 4: Powder deposition using a feed bin [16]

1.2.2 Μέθοδος με χρήση δονήσεων

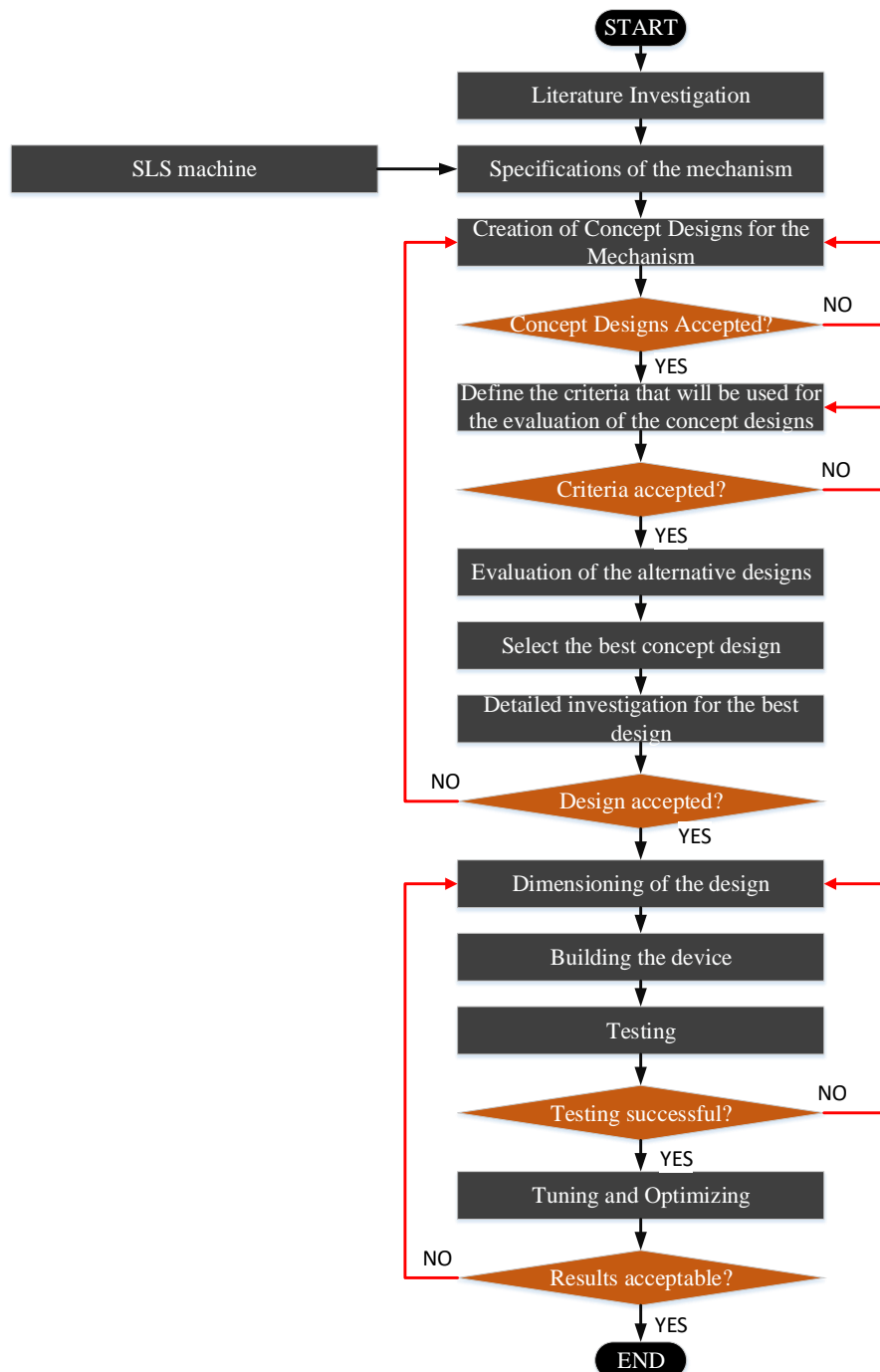
Η πειραματική διάταξη που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 5) χρησιμοποιεί και για την ρύθμιση της ροής και για το πότε θα ρέει σκόνη οριζόντιες και κατακόρυφες δονήσεις [26].



Εικόνα 5: Ροή σκόνης με χρήση οριζόντιων και κατακόρυφων δονήσεων

2 Μεθοδολογία της εργασίας

Πριν την διερεύνηση του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης είναι ζωτικής σημασίας να ορισθεί η μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί, βήμα προς βήμα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό προκειμένου να δομηθεί η μελέτη και να γίνει ευκολότερα κατανοητή. Στο προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο **Error! Reference source not found.**) υπήρξε μια αναλυτική παρουσίαση των πολλών μεθόδων για την εναπόθεση σκόνης. Αυτές οι πληροφορίες θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να παραχθούν κάποια σχέδια για το μηχανισμό εναπόθεσης σκόνης. Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6) απεικονίζει με περιληπτικό τρόπο τα βήματα που θα να εφαρμοστούν κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης.



Εικόνα 6: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας

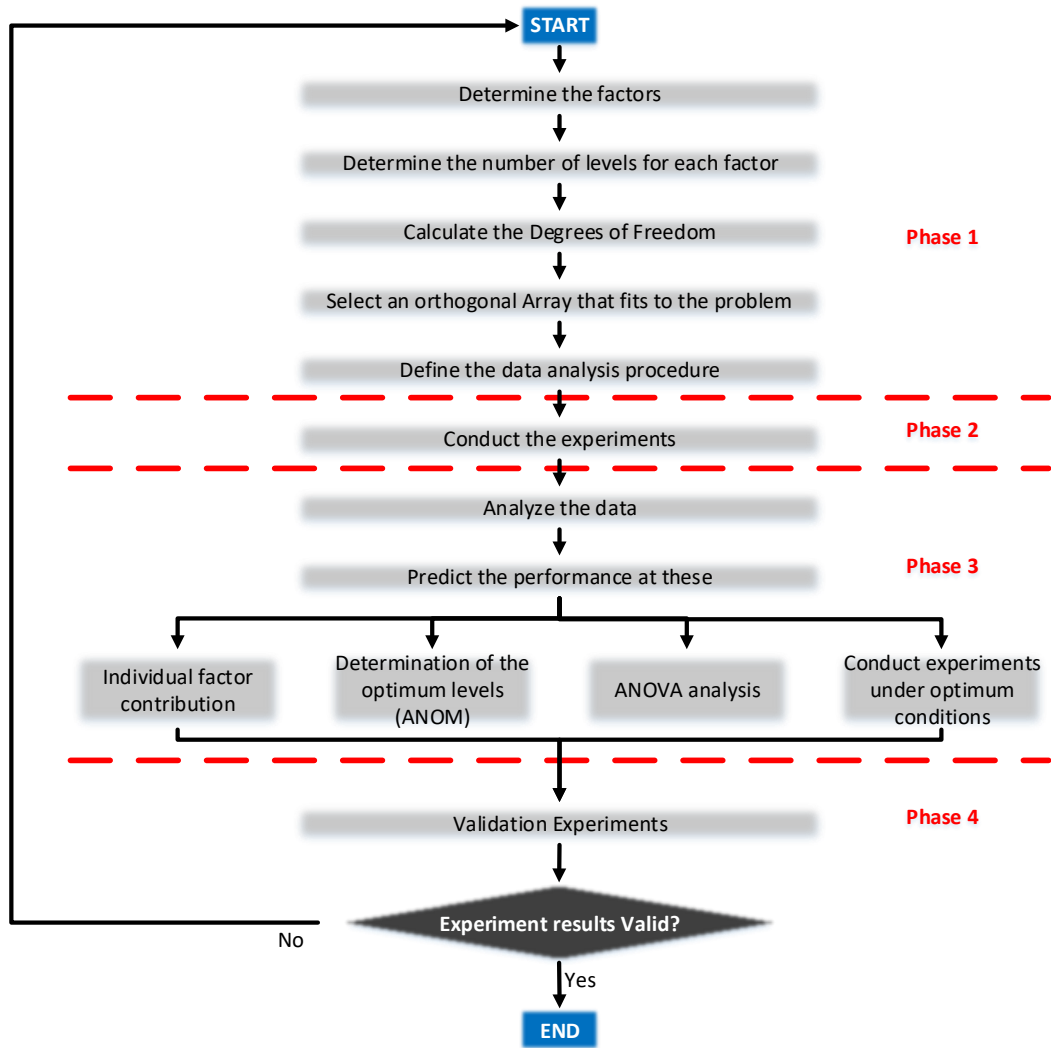
Στο επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 3) θα παρουσιαστούν διάφορα σχέδια έννοια για το μηχανισμό που πρόκειται να σχεδιαστεί. Πριν από τη δημιουργία του μηχανισμού πρέπει να ορισθούν οι προδιαγραφές αυτού. Ο μηχανισμός εναπόθεσης σκόνης πρέπει να είναι σε θέση να εναποθέσει στρώμα 20μm σκόνης. Αυτά τα σχέδια στη συνέχεια θα αξιολογηθούν με βάση ορισμένα κριτήρια. Η αξιολόγηση των εναλλακτικών σχεδίων θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της μεθόδου “Analytic Hierarchy Process (AHP)” [48], το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου θα είναι το καλύτερο σχέδιο ώστε να αρχίσει ο λεπτομερής σχεδιασμός με βάση αυτό. Όταν τα μηχανολογικά σχέδια έχουν τελειώσει η επόμενη φάση είναι η φάση της κατασκευής του μηχανισμού. Το τελικό βήμα αφορά τις δοκιμές του μηχανισμού καθώς και η ρύθμιση και βελτιστοποίηση. Robust τεχνική θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του μηχανισμού. Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική Statistical Design of experiments με την οποία θα μειωθούν ο αριθμός απαιτούμενων πειραμάτων για την βελτιστοποίηση της μηχανής [45].

2.1 Analytic Hierarchy Process (AHP) & Κριτήρια Αξιολόγησης

Η Analytic Hierarchy Process (AHP) είναι μια μέθοδος λήψης αποφάσεων η οποία χρησιμοποιεί πολλαπλά κριτήρια και αναπτύχθηκε από τον Saaty [46][47][48]. Η AHP έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών, κυρίως λόγω των μαθηματικών ιδιοτήτων της μεθόδου και το γεγονός ότι τα απαιτούμενα στοιχεία εισόδου είναι μάλλον εύκολο να βρεθούν. Η AHP είναι ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων απόφασης. Χρησιμοποιεί μια ιεραρχική δομή πολλαπλών επιπέδων. Τα σχετικά στοιχεία προέρχονται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από συγκρίσεις ζευγών. Αυτές οι συγκρίσεις χρησιμοποιούνται για την απόκτηση των βαρών της σημαντικότητας των κριτηρίων, καθώς και των σχετικών μέτρων επιδόσεις των εναλλακτικών σε σχέση με κάθε μεμονωμένο κριτήριο απόφασης. Αν οι συγκρίσεις δεν είναι απολύτως συνεπείς, τότε αυτό παρέχει ένα μηχανισμό για τη βελτίωση της συνέπειας.

2.2 Statistical design of experiments

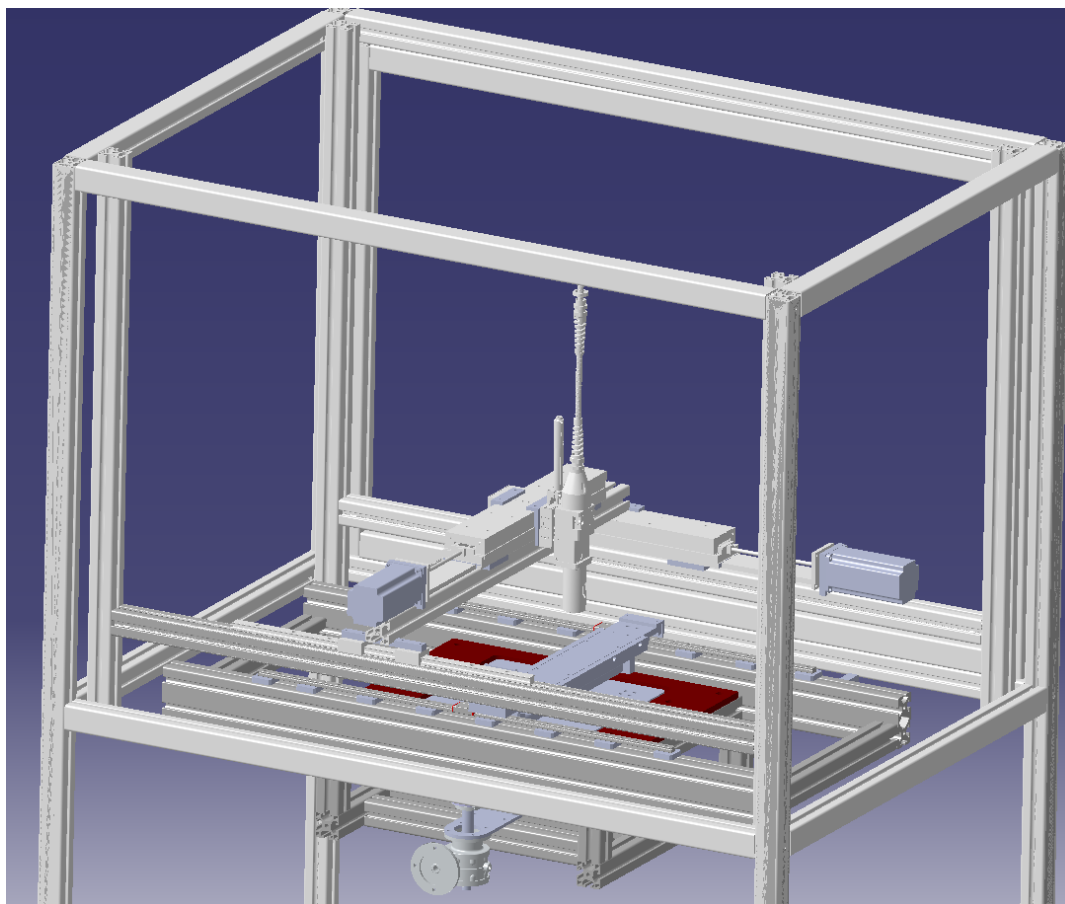
Για την βελτιστοποίηση της μηχανής θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Statistical Design of Experiments (SDoE) σε τέσσερα στάδια με βάση τη μεθοδολογία του Taguchi(Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Διάγραμμα ροής Statistical Design of Experiments [49]

3 Προκαταρκτικός σχεδιασμός του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι εναλλακτικοί σχεδιασμοί του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης. Στη συνέχεια θα αξιολογηθούν, προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός σε σχέση με τις προδιαγραφές. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει το μοντέλο CAD της μηχανής που έχει ήδη κατασκευαστεί.



Εικόνα 8: μοντέλο CAD της SLS μηχανής

3.1 Εναλλακτικοί σχεδιασμοί και αξιολόγηση του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης

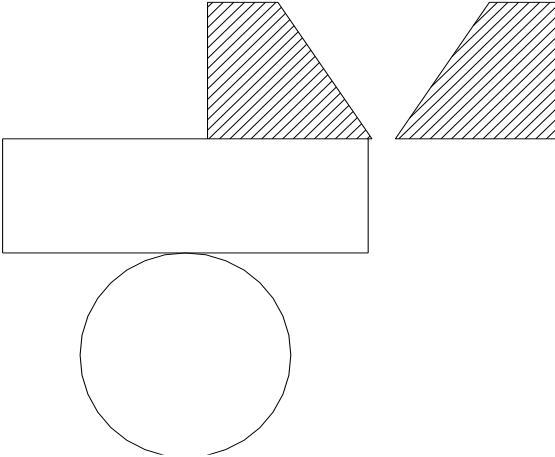
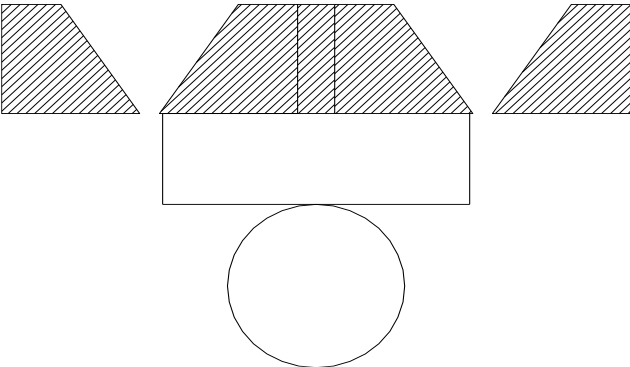
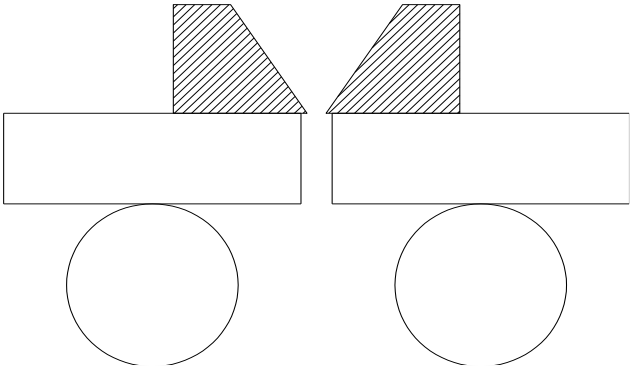
Υπάρχουν δύο τύποι σχεδίων που θα παρουσιαστούν οι μη-υβριδικοί (3.1.1) και οι υβριδικοί (3.1.2) επίσης τα εναλλακτικά σχέδια κατηγοριοποιούνται με βάση τη μέθοδο που χρησιμοποιούν για την εναπόθεση της σκόνης. Λόγω της σημαντικότητας του μηχανισμού αρκετά εναλλακτικά σχέδια δημιουργήθηκαν.

3.1.1 Σχέδια μη υβριδικών μηχανισμών εναπόθεσης σκόνης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα μη υβριδικά σχέδια. Η συμπίεση της σκόνης θα πραγματοποιηθεί με έναν κύλινδρο. Τα ακόλουθα σχέδια χρησιμοποιεί μόνο τον κύλινδρο για συμπίεση και έναν μηχανισμό που διανέμουν πούδρα ώστε ο κύλινδρος για να συμπίεσει.

3.1.1.1 Ταλαντωτή εναπόθεση

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί είτε οριζόντια ή κάθετη δόνηση, ώστε να δημιουργηθεί μια ροή της σκόνης μέσα στο δοχείο σκόνης. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα εναλλακτικά σχέδια.

# No.	Concept design
NHPD11	
NHPD12	
NHPD13	

Πίνακας 1: Εναπόθεση με χρήση δονήσεων

Με βάση την AHP μέθοδο η προτιμότερη εναλλακτική λύση σχεδιασμού είναι η NHPD11, με 35,80%, η οποία είναι ελαφρώς πάνω από τα δύο άλλες εναλλακτικές λύσεις οι οποίες και οι δύο ακολουθεί με 32,09%.

3.1.1.2 Μηχανισμός με επίπεδο ιμάντα

Οι επίπεδοι ιμάντες που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μεταφορά των υλικών από το ένα μέρος στο άλλο. Αυτά τα σχέδια χρησιμοποιούν τις ίδιες αρχές όπως του τροφοδότη σχισμή, η οποία θα παρουσιαστεί αργότερα, δηλαδή τη δύναμη της βαρύτητας και της τριβής μεταξύ των σωματιδίων σκόνης και του ιμάντα. Στο σχεδιασμό Νο1 ο ιμάντας θα είναι σε θέση να κινείται μόνο προς μία κατεύθυνση, ως εκ τούτου, η απόθεση σκόνης θα εκτελεστεί μόνο προς μία κατεύθυνση, σε αντίθεση με το σχεδιασμό Νο2 οποία μπορεί να εναποθέτει σκόνη και στις δύο κατευθύνσεις.

# No.	Concept design
NHPD21	
NHPD22	

Πίνακας 2: Μηχανισμός με επίπεδο ιμάντα

Με βάση την AHP μέθοδο η προτιμότερη εναλλακτική λύση σχεδιασμού είναι η NHPD22 με 53.47% η οποία ακολουθείτε από την NHPD21 με 46.15%.

3.1.1.3 Ιδιοκατασκευή δοσομετρητή

Αυτή η μέθοδος προτείνεται λόγω της ακρίβειας, της επαναληψιμότητας και της ευκολίας της κατασκευής της. Ο μηχανισμός δοσολόγησης είναι κατά κύριο λόγο ένα περιστρεφόμενο τύμπανο με ένα αριθμό σχισμών σε προκαθορισμένο βάθος, το οποίο, κατά την περιστροφή, παίρνει σκόνη από το δοχείο και πέφτει το μπροστά από τον κύλινδρο.

# No.	Concept design
NHPD31	
NHPD32	
NHPD33	

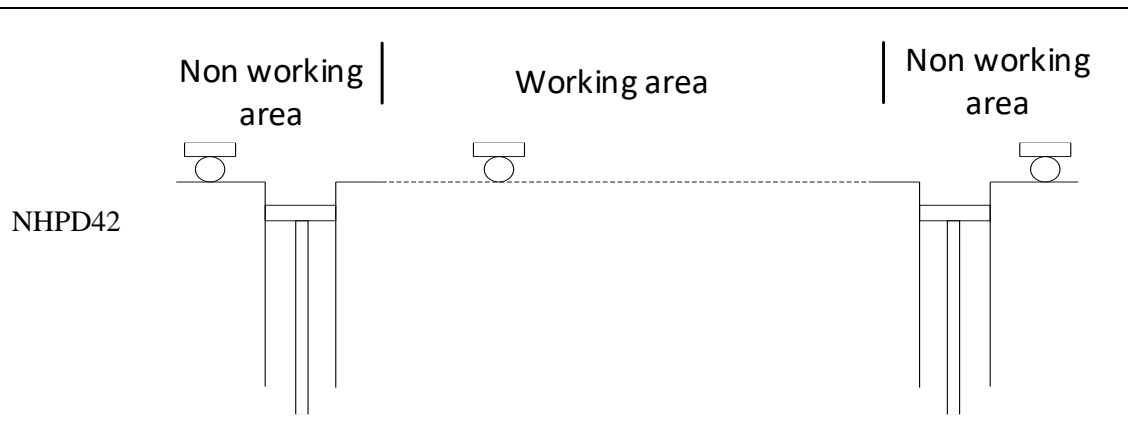
Πίνακας 3: Ιδιοκατασκευή δοσομετρητή

Η AHP μέθοδος ανέδειξε την NHPD33 ως καλύτερη με 44.37%.

3.1.1.4 Κάδος τροφοδοσίας

Ο κάδος τροφοδοσίας αποτελείται από ένα δοχείο σκόνης με ένα έμβολο στο κάτω μέρος, το οποίο μπορεί να κινείται πάνω και κάτω για να τροφοδοτήσει τη σωστή ποσότητα σκόνης στο σύστημα. Υπάρχουν δύο επιλογές για το εν λόγω σχέδιο, που αντιστοιχεί στην παρουσία ενός κάδου τροφοδοσίας στη μια πλευρά ή και στις δύο πλευρές της μηχανής.

# No.	Concept design
NHPD41	



Πίνακας 4: Κάδος τροφοδοσίας

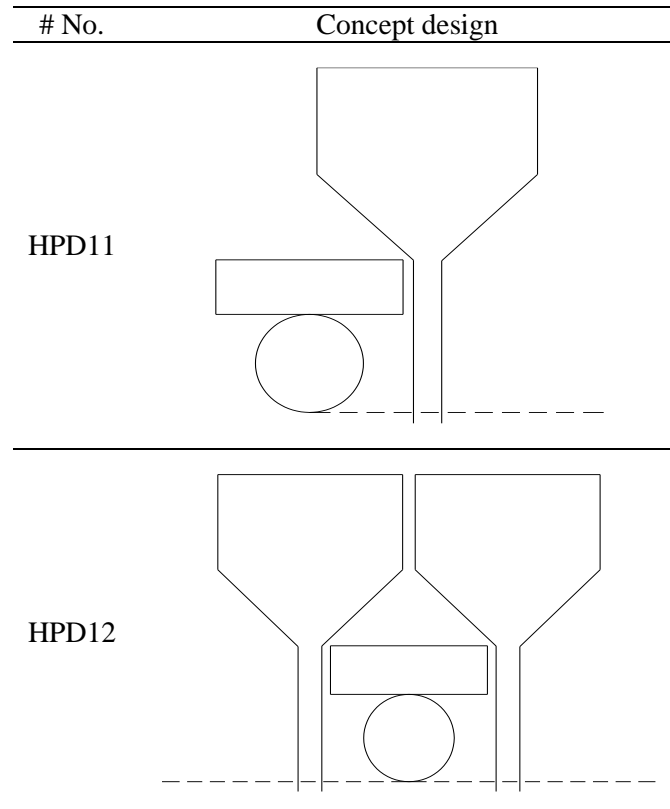
Η AHP μέθοδος ανέδειξε την NHPD41 ως καλύτερη με 53.54%.

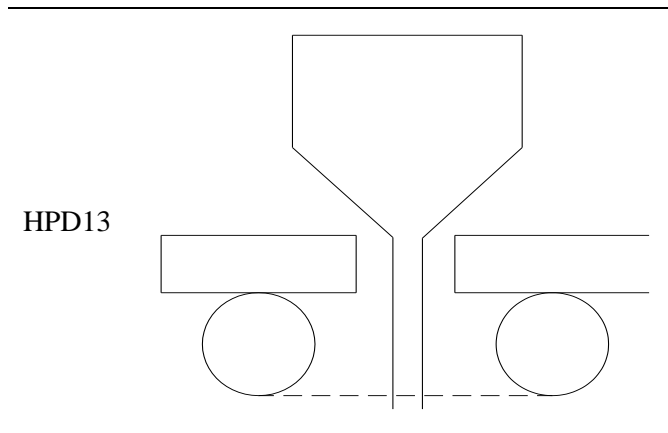
3.1.2 Σχέδια υβριδικών μηχανισμών εναπόθεσης σκόνης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα υβριδικά σχέδια. Τα υβριδικά σχέδια προτείνονται για τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος.

3.1.2.1 Εναπόθεση με slot feeder

Ο slot feeder χρησιμοποιεί τις δυνάμεις της βαρύτητας και τριβής, προκειμένου να εναποθέσει ένα ομοιόμορφο στρώμα. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι η σκόνη είναι συμπιεσμένη με δύο μεθόδους, πρώτα από τον τροφοδότη και στη συνέχεια τον κύλινδρο.





Πίνακας 5: σχέδια slot feeder

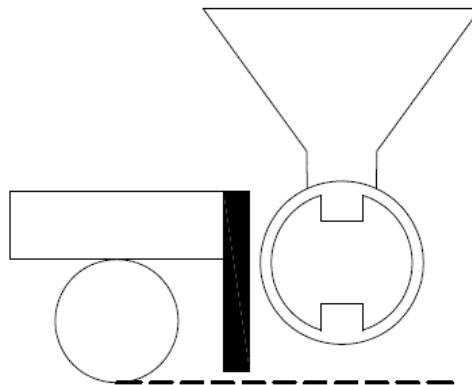
Η καλύτερη εναλλακτική με βάση την AHP μέθοδο είναι η HPD11 με ελάχιστη διαφορά από τις άλλες.

3.1.2.2 Ιδιοκατασκευή δοσομετρητή με λεπίδα

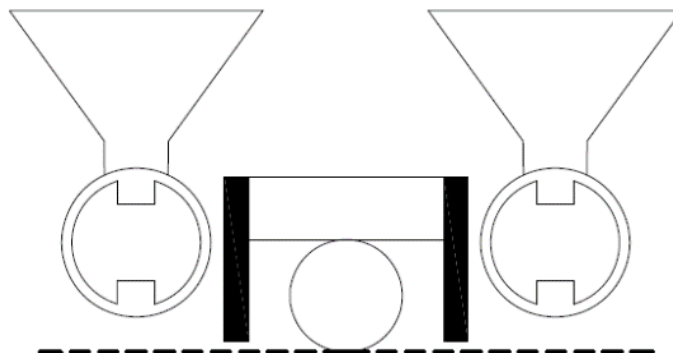
Ο μηχανισμός δοσομέτρησης θα εναποθέτει μία δόση σκόνης μπροστά από την λεπίδα, η οποία θα την στρώνει ομοιόμορφα, και μετά από αυτό ο κύλινδρος θα συμπιέζει ένα πιο ομοιόμορφο στρώμα σκόνης, με αποτέλεσμα την καλύτερη ποιότητα επιφάνειας.

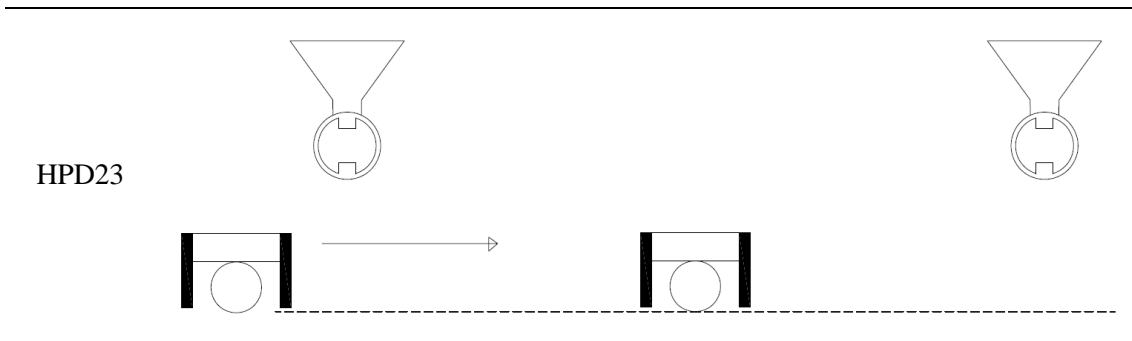
# No.	Concept design
-------	----------------

HPD21



HPD22





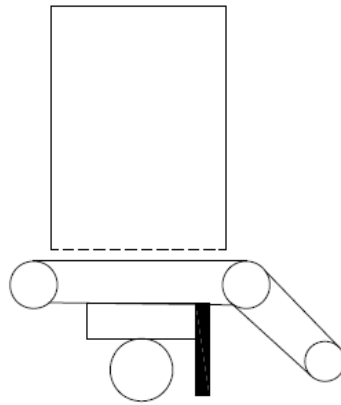
Πίνακας 6: Custom dosing mechanism with doctor blade

Η καλύτερη εναλλακτική με βάση την AHP μέθοδο είναι η HPD23 με ελάχιστη διαφορά από τις υπόλοιπες.

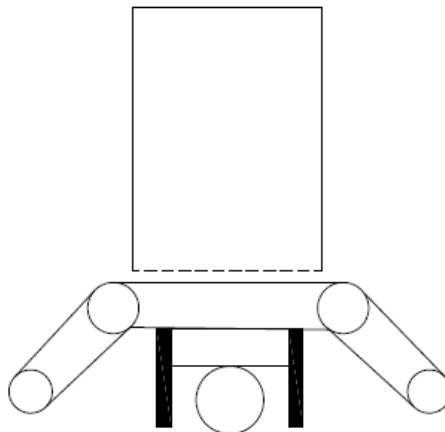
3.1.2.3 Μηχανισμός με επίπεδο ιμάντα και λεπίδα

# No.	Concept design
-------	----------------

HPD31



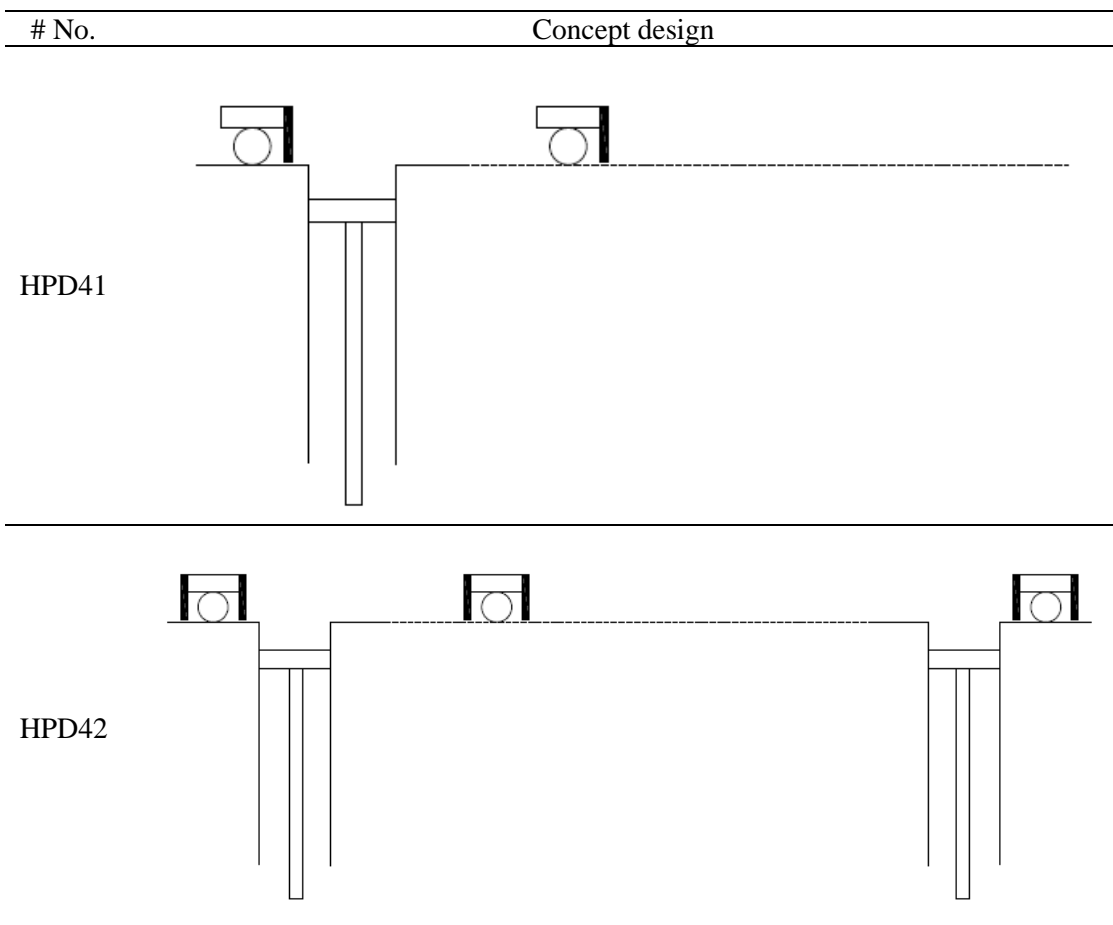
HPD32



Πίνακας 7: Flat belt mechanism

Η καλύτερη εναλλακτική με βάση την AHP μέθοδο είναι η HPD32 με 53.47%.

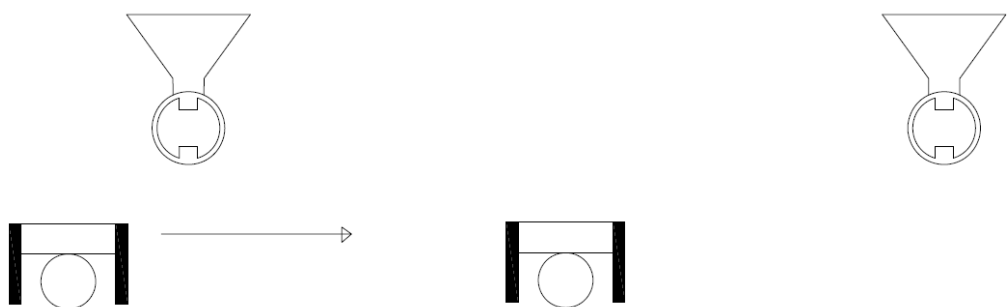
3.1.2.4 Κάδος τροφοδοσίας με λεπίδα



Πίνακας 8: Hybrid method using feed bin and doctor blade

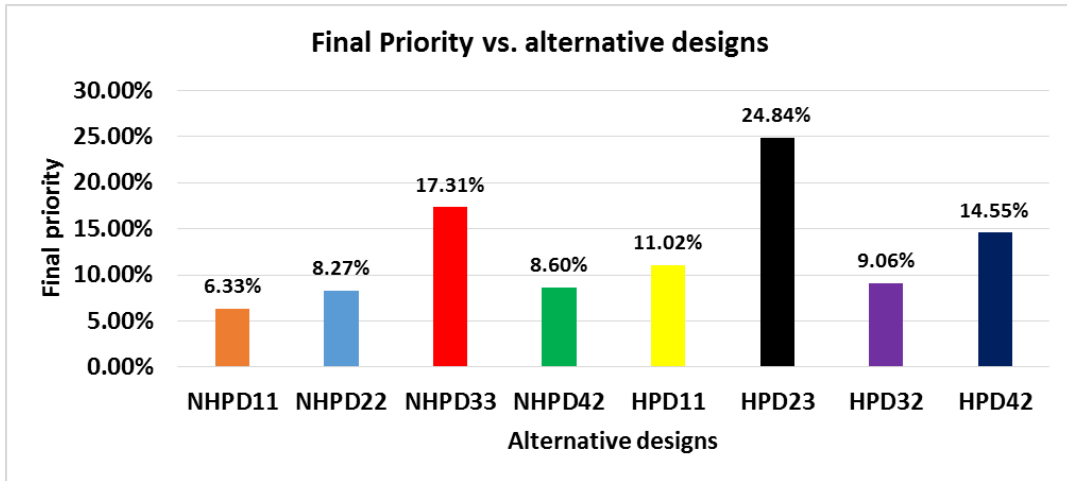
Η καλύτερη εναλλακτική με βάση την AHP μέθοδο είναι η HPD42.

Η καλύτερη εναλλακτική από όλες είναι η HPD23 η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Best alternative (HPD23)

Το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 10) παρουσιάζει τις καλύτερες εναλλακτικές. Το ποσοστό της καλύτερης εναλλακτικής είναι αρκετά παραπάνω από των υπολοίπων 24.84% και ακολουθεί η NHPD33 με 17.31%.



Εικόνα 10: Final priority vs. alternative designs

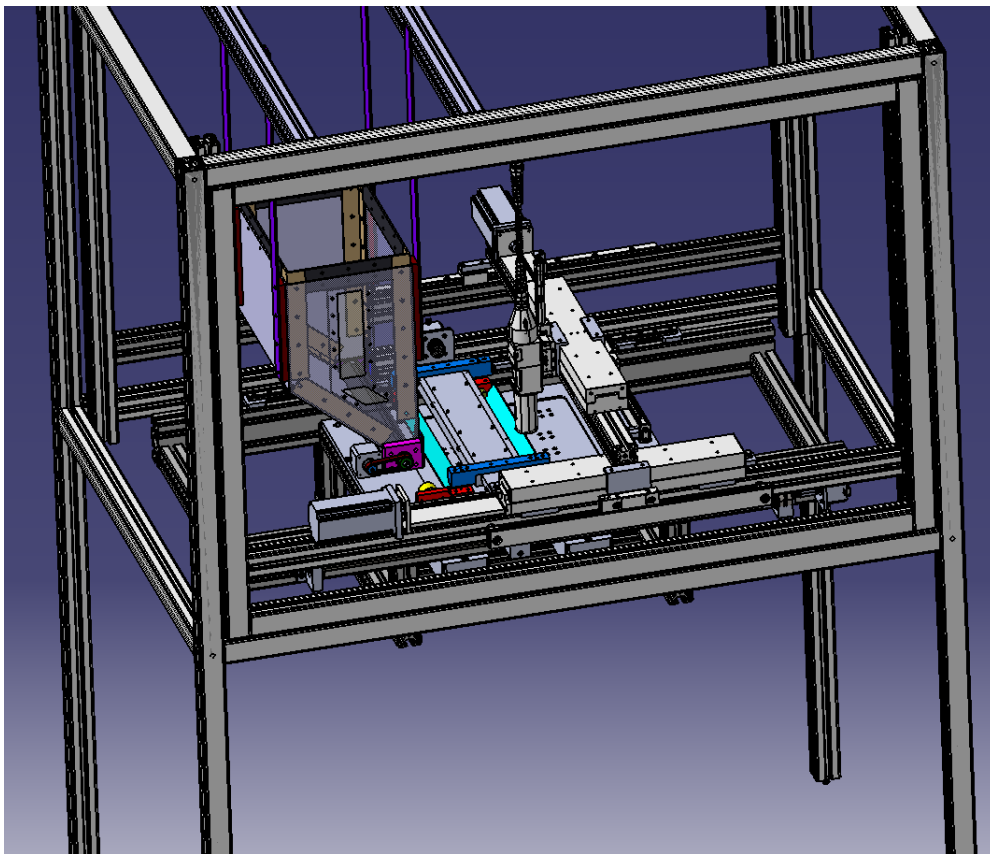
4 Αναλυτικός σχεδιασμός και κατασκευή του συστήματος διαχείριση σκόνης

Με βάση την μέθοδο AHP η καλύτερη εναλλακτική έννοια είναι η HPD23, η οποία είναι η Ιδιοκατασκευή δοσομετρητή σε σταθερή θέση και στα δύο άκρα της μηχανής και του κυλίνδρου με λεπίδα. Μετά από μια πιο λεπτομερή επεξεργασία της καλύτερης εναλλακτικής πραγματοποιήθηκαν ορισμένες αλλαγές, προκειμένου να βελτιωθεί ο όγκος, η αποδοτικότητα το κόστος, ως εξής: υπάρχει μόνο ένας στατικός δοσομετρητής σκόνης αντί για δύο. Επιπλέον, στην κορυφή του κυλίνδρου ένας μηχανισμός θα τοποθετηθεί με δύο ξεχωριστούς δοσομετρητές σκόνης μίας δόσης.

Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν και να ικανοποιηθούν είναι:

- Ο όγκος του δοχείου σκόνης θα πρέπει να είναι ίσος ή μεγαλύτερος από τον όγκο του χώρου εργασίας.
- Ο δοσομετρητής θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παρέχει ποσότητα σκόνης για 20μμ.

Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 11) απεικονίζει τον τελικό μηχανισμό.

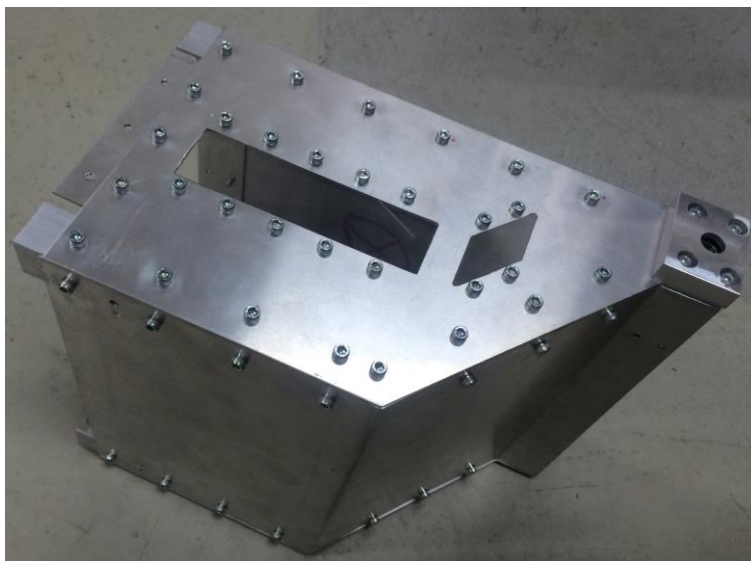


Εικόνα 11: Τελικός μηχανισμός

4.1 Κομμάτια του μηχανισμού και συναρμολόγηση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν ξεχωριστά τα κομμάτια που απαρτίζουν σύστημα διαχείρισης της σκόνης καθώς επίσης και τον μηχανισμό συναρμολογημένο. Για τον σχεδιασμό των κομματιών χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο CATIA V5. Όταν όλα τα κομμάτια σχεδιάστηκαν συναρμολογήθηκαν και έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις για βέλτιστη εφαρμογή. Η κατασκευή των κομματιών πραγματοποιήθηκε σε CNC μηχανήματα.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το δοχείο σκόνης με τον δοσομετρητή (Εικόνα 12). Τα περισσότερα κομμάτια κατασκευάστηκαν από αλουμίνιο εκτός από ορισμένα κομμάτια που κατασκευάστηκαν από πλαστικό.



Εικόνα 12: Δοχείο σκόνης

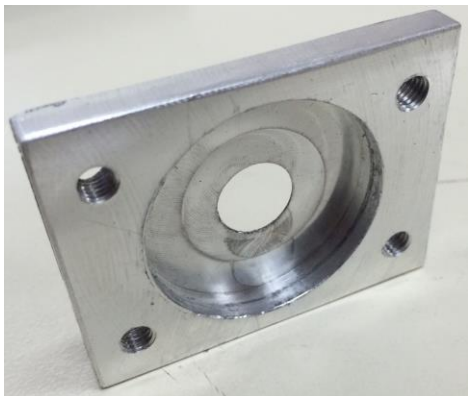
Η Εικόνα 13 και η Εικόνα 14 αποτυπώνουν τους άξονες στους οποίους ο περιστρεφόμενος δοσομετρητής περιστρέφεται



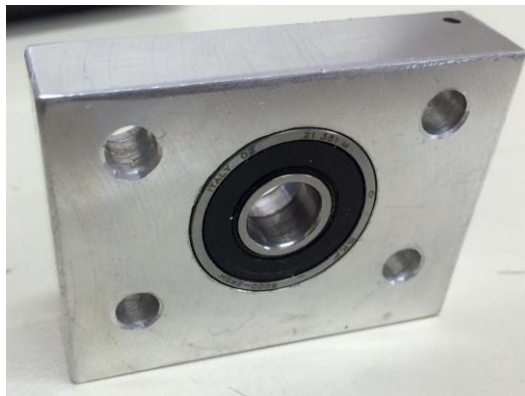
Εικόνα 13: Άξονας κωδικοποιητή



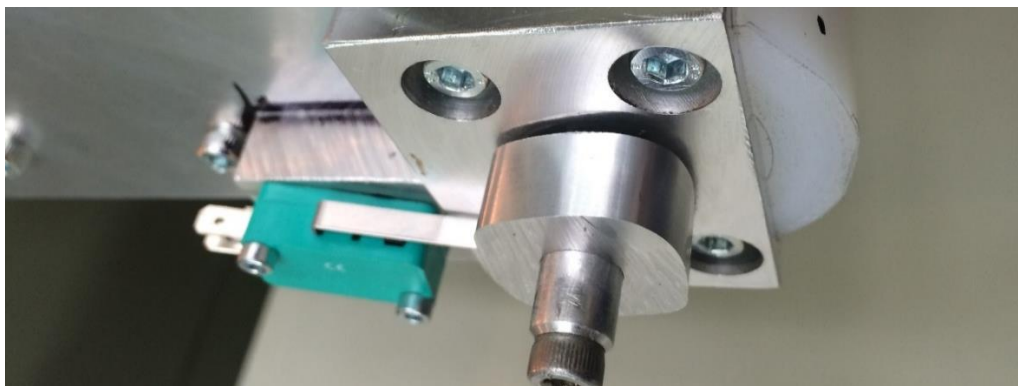
Εικόνα 14: Άξονας τροχαλίας



*Εικόνα 15: Πλαϊνό σφραγιστικό
δοσομετρητή*



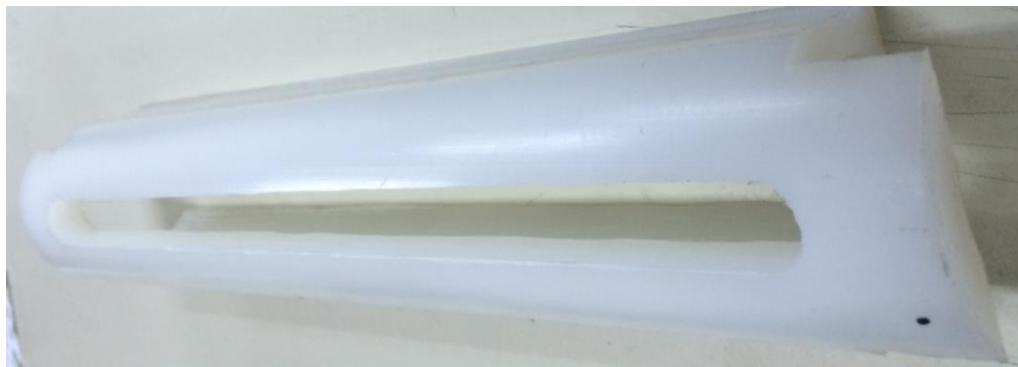
Εικόνα 16: Βάση ρουλεμάν



Εικόνα 17: Κωδικοποιητής δοσομετρητή



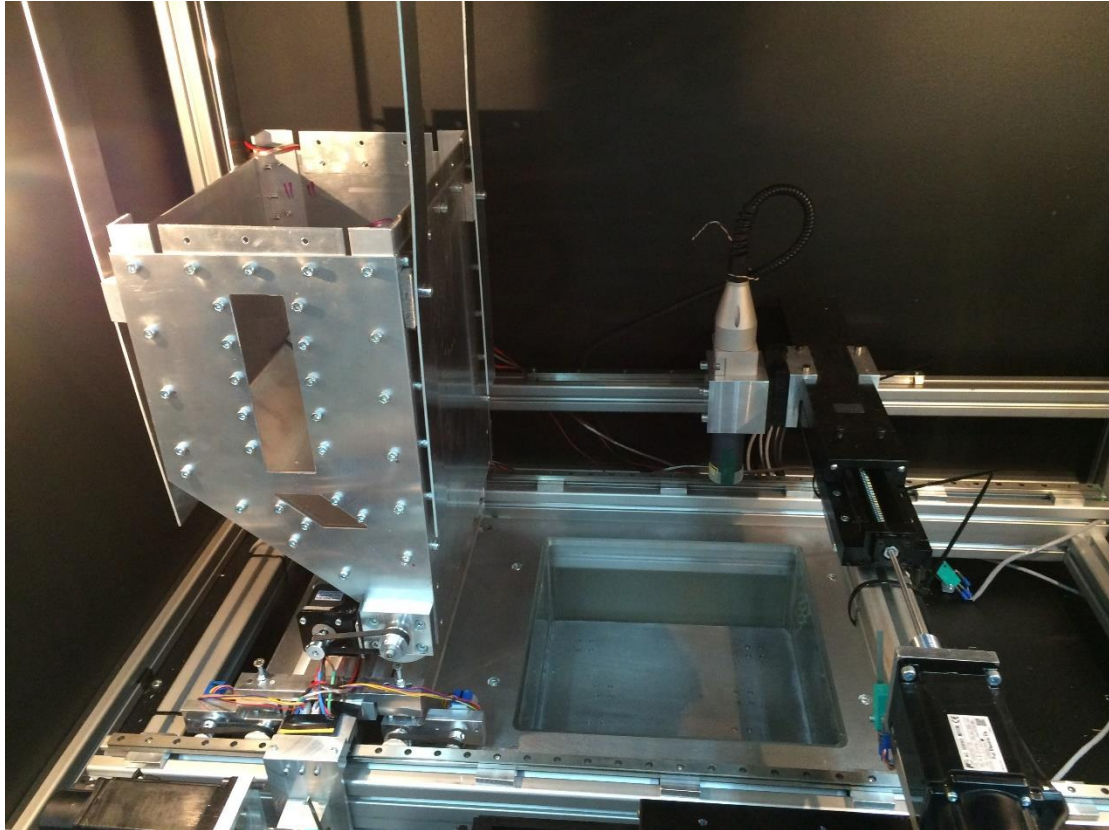
Εικόνα 18: Κάτοψη σφραγιστικού δοσομετρητή



Εικόνα 19: Άνω όψη σφραγιστικού δοσομετρητή



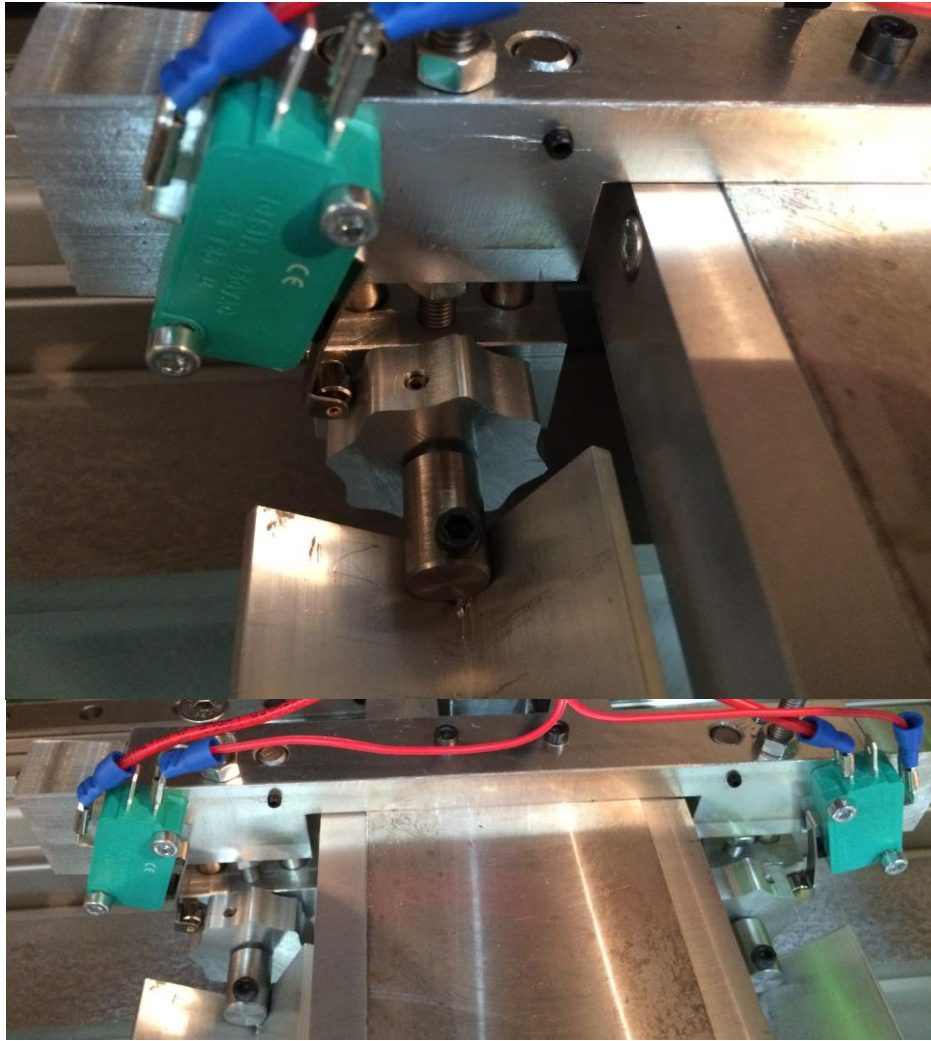
Εικόνα 20: Τύμπανο δοσομετρητή



Εικόνα 21: Δοσομετρητής σκόνης τοποθετημένος στην μηχανή



Εικόνα 22: Βάση δοσομετρητή μιας δόσης



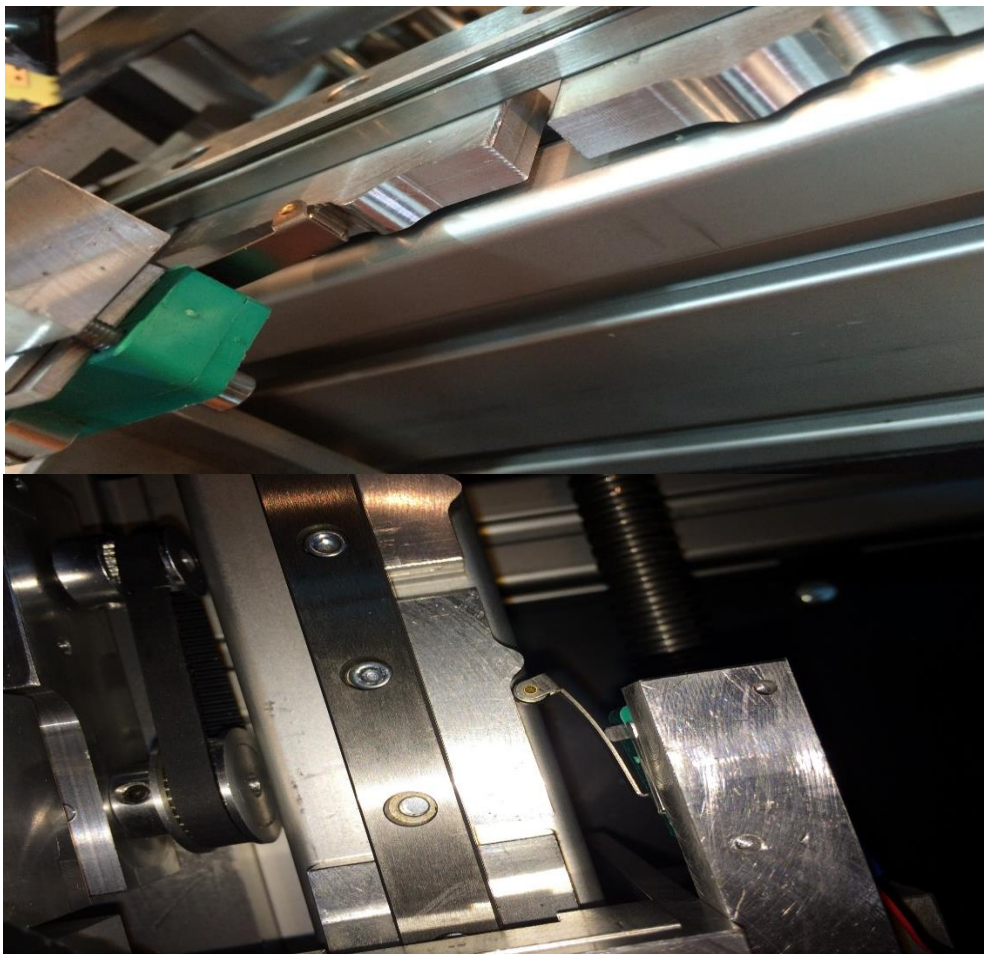
Εικόνα 23: Κωδικοποιητής δοσομετρητή μιας δόσης



Εικόνα 24: Δοσομετρητής μιας δόσης



Εικόνα 25: Δοσομετρητής μιας δόσης μηχανισμός



Εικόνα 26: Γραμμικός κωδικοποιητής



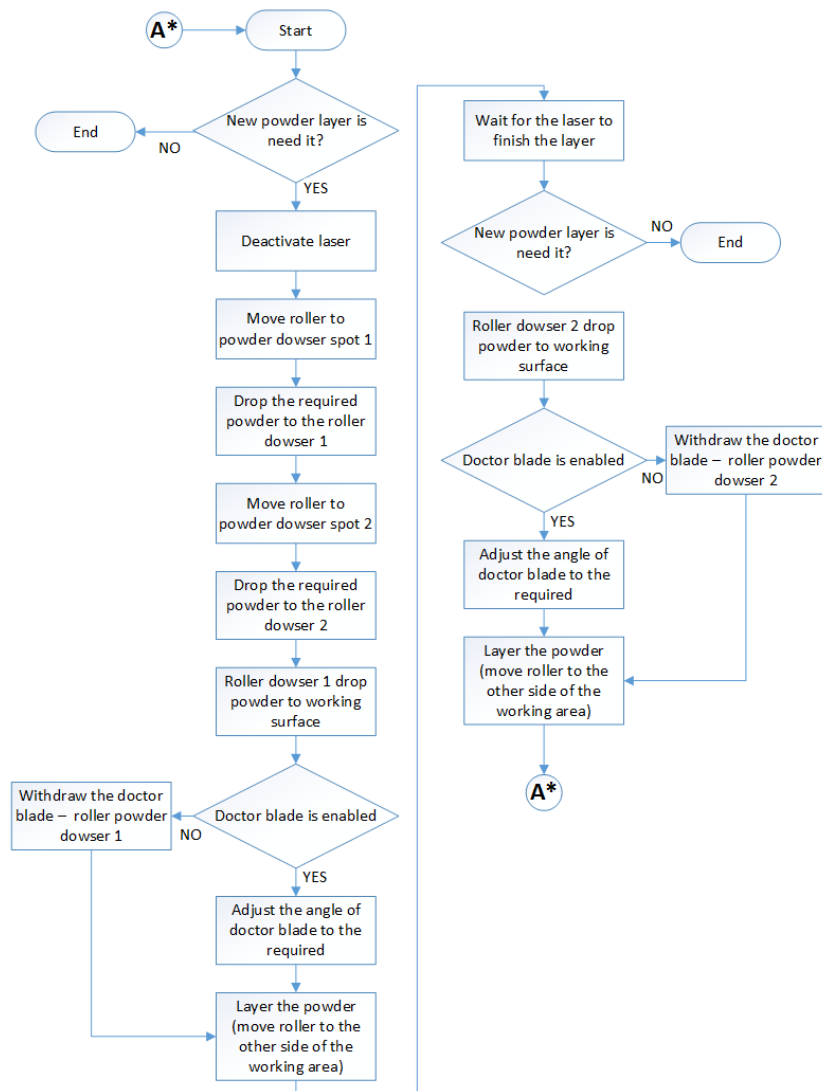
Εικόνα 27: Άνοψη του σφραγιστικής κατασκευής του χώρου εργασίας



Εικόνα 28: Κάτοψη του σφραγιστικής κατασκευής του χώρου εργασίας

4.2 Διαδικασία εναπόθεσης σκόνης

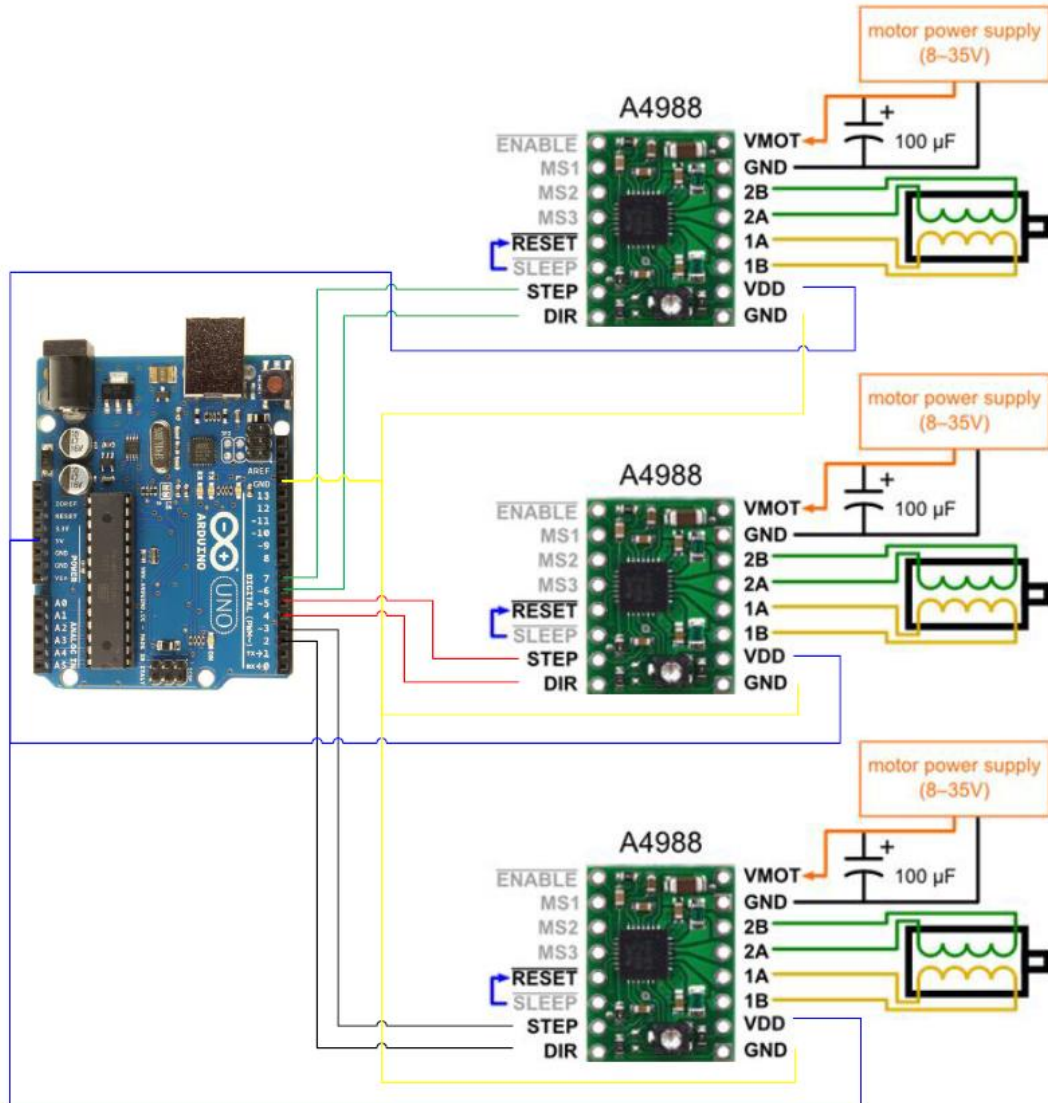
Το παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζει τη διαδικασία εναπόθεσης της σκόνης (Εικόνα 29).



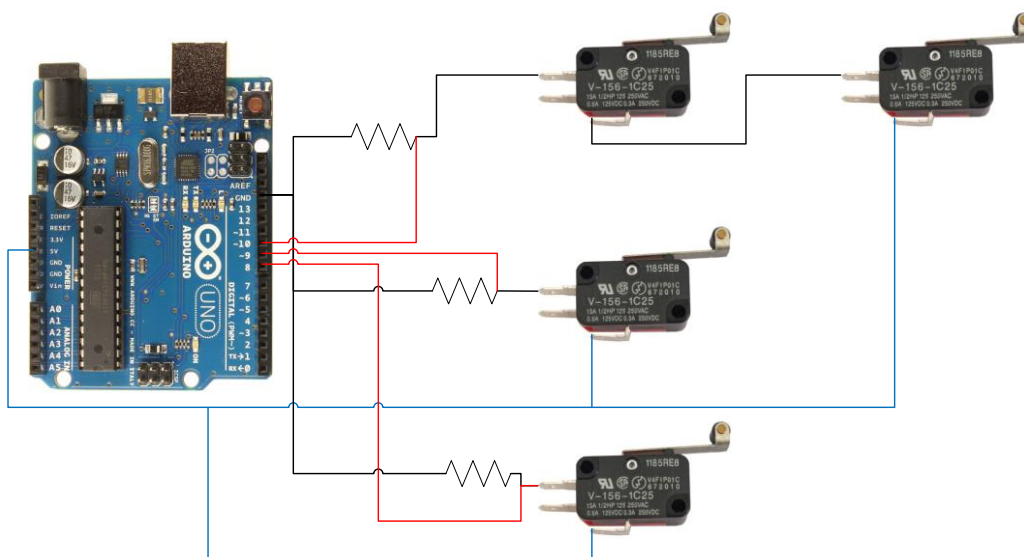
Εικόνα 29: Powder layering process flowchart

4.3 Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του μηχανισμού

Πέραν του μηχανολογικού κομματιού του μηχανισμού αναπτύχθηκε και ένα ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο ελέγχει το σύστημα διαχείρισης της σκόνης. Τα παρακάτω σχέδια παρουσιάζουν τα κυκλώματα τα οποία κατασκευάστηκαν.



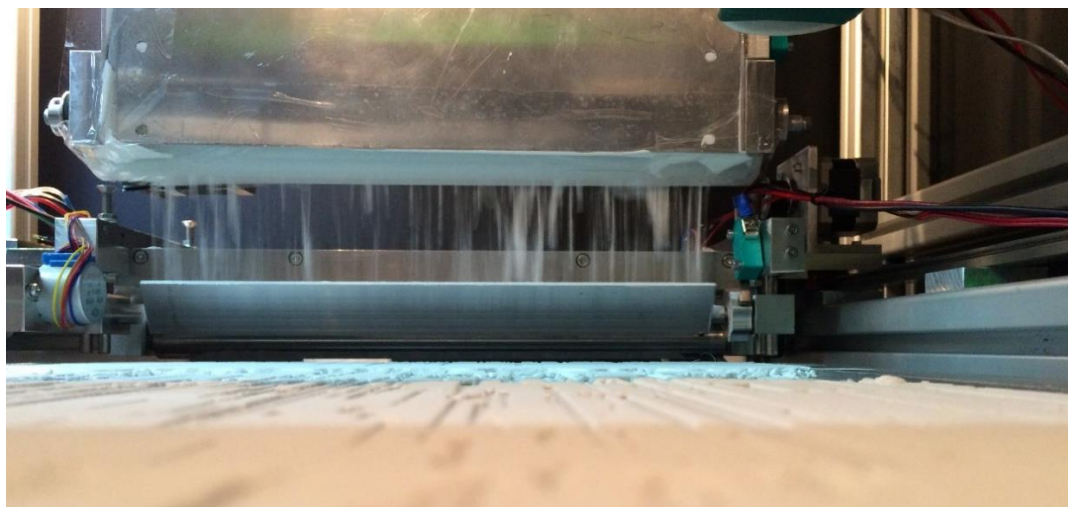
Εικόνα 30: Διάγραμμα βηματικών κινητήρων



Εικόνα 31: κύκλωμα διακοπών

5 Δοκιμή

Η δοκιμή του μηχανισμού πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας πλαστική σκόνη. Το αποτέλεσμα της δοκιμής ήταν ότι ο μηχανισμός λειτούργησε άψογα χωρίς λάθη.



Εικόνα 32: Ρίψη σκόνης

6 Συμπεράσματα

Ο σχεδιασμός του μηχανισμού έγινε σε δύο φάσεις, την προκαταρκτική και την φάση λεπτομερούς σχεδιασμού. Κατά την προκαταρκτική φάση της μελέτης είχαν δημιουργηθεί πολλά εναλλακτικά σχέδια. Όμως λόγω του μεγάλου αριθμού των εναλλακτικών σχεδίων ήταν απαραίτητη μια τεχνική για την αντικειμενική αξιολόγησή τους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε Analytic Hierarchy Process (AHP). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί πολλαπλά κριτήρια για την αξιολόγηση των εναλλακτικών σχεδίων.. Χωρίς την μέθοδο AHP ή άλλη ανάλογη μέθοδο η συστηματική και αντικειμενική αξιολόγηση των σχεδίων θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί.

Αν και η μέθοδος AHP αποκάλυψε ότι ο καλύτερος σχεδιασμός ήταν αυτό με δύο σταθερούς δοσομετρητές στις δύο πλευρές του χώρου εργασίας το τελικό σχέδιο ήταν ελαφρώς διαφορετικό λόγω των προαναφερθέντων λόγων (λειτουργικότητα, αποτελεσματικότητα και των δυνατοτήτων κατασκευής). Αντί δύο στατικούς δοσομετρητές στις δύο πλευρές της περιοχής εργασίας ένας μεγαλύτερος δοσομετρητής τοποθετήθηκε στη μία πλευρά αφήνοντας διαθέσιμο χώρο από την άλλη πλευρά για την πρόσβαση στο χώρο εργασίας. Τέλος, οι δύο λεπίδες στις δύο πλευρές του κυλίνδρου ενσωματώθηκαν στους δοσομετρητές μίας δόσης.

Η δοκιμές που μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης πραγματοποιήθηκαν με μεγάλη επιτυχία. Ο δοσομετρητής γέμιζε πλήρως από την σκόνη και αυτή με τη σειρά της έπεφτε ομοιόμορφα μέσα στον δοσομετρητή μίας δόσης πάνω στον κύλινδρο.

Αναφορές

- [1] Wohlers Report, 2010. Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report. ISBN: 0-9754429-6-1.
- [2] Chua, C.K., Leong, K.F., Lim, C.S., 2010. Rapid Prototyping – Principles and Applications, 3rd ed. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- [3] Kruth, J.P., “Material in cress manufacturing by rapid prototyping techniques”, CIRP Annals, Vol. 40 No. 2, pp. 603-14
- [4] Kruth, J.P., Levy, G., Klocke, F., Childs, T.H.C., 2007. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. Ann. CIRP 56 (2), 730–759
- [5] Pham, D.T., Dotchev, K.D., Yusoff, W.A.Y., 2008. Deterioration of polyamide powder properties in the laser sintering process. Mech. Eng. Sci. 222, 2163–2176
- [6] Kruth, J.P., “Advances in physical and chemical machining”, Proceedings of the 7th International Conference on Production/Precision Engineering, Chiba, 1994, pp. K62-K76.
- [7] D.L. Bourell, H.L. Marcus, J.W. Barlow, J.J. Beaman, Selective laser sintering of metals and ceramics, Int. J. Powder Metall. 28 (1992) 369– 381
- [8] N.P. Karapatis. A Sub-Process Approach of Selective Laser Sintering. PhD thesis, EPFL, LGPP, Lausanne, Switzerland, 2001.
- [9] S. Kolosov, G. Vansteenkiste, N. Boudeau, J.C. Gelin, E. Boillat, “Homogeneity aspects in selective laser sintering (SLS)”, Journal of Materials Processing Technology 177 (2006) 348–351
- [10] J.M. Coulson, J.F. Richardson, Chemical Engineering Vol2: Particle Technology and Separation Processed, 4th edn, Pergamon Press, pp.1–54.
- [11] G. Matei, N. Claussen, H.H. Hausner, Influence of relative humidity on flow of metal and ceramic powders, Mod. Develop. Powder Metall. 8 (1973) 5 –11.
- [12] B. Van der Schueren and J.P. Kruth, “Powder deposition in selective metal powder sintering”, Rapid Prototyping Journal, Volume 1 Number 3 1995 pp. 23–31
- [13] Brackpool, J.L., “The effect of material characteristics on the compaction behaviour of metal powders”, in Hausner H.H. (Ed.), Modern Developments in Powder Metallurgy, Vol. 5, Plenum Press, New York, NY, 1971, pp. 423-35.
- [14] Shwe P. Soe, “Quantitative analysis on SLS part curling using EOS P700 machine”, Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 2433– 2442
- [15] A. Budding, T.H.J Vaneker, “New strategies for powder compaction in powder-based rapid prototyping techniques, Procedia CIRP 6 (2013) 528 – 533
- [16] Dietmar Drummer, Maximilian Drexler, Florian Kühnlein, “Effects on the density distribution of SLS-parts”, Physics Procedia 39 (2012) 500 – 508
- [17] Patrice Peyre*, Yann Rouchausse, Denis Defauchy, Gilles Régnier, “Experimental and numerical analysis of the selective laser sintering (SLS) of PA12 and PEKK semi-crystalline polymers”, Journal of Materials Processing Technology 225 (2015) 326–336
- [18] Peng Feng, Xinmiao Meng, Jian-Fei Chen, Lieping Ye, “Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders”, Construction and Building Materials 93 (2015) 486–497
- [19] Adrian G. Bailey, “The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating”, Journal of Electrostatics 45 (1998) 85-120
- [20] Kadonaga, M., Katoh T., and Takahashi T., "Study of non-uniform charging by charging roller with DC voltage", 1999, Journal of Imaging Science and Technology, vol. 43, no. 3, pp.274-279.
- [21] Ashok V. Kumar and Hongxin Zhang, “Electrophotographic powder deposition for freeform fabrication”

- [22] S. Yang, J.R.G. Evans, "Metering and dispensing of powder; the quest for new solid *freeforming techniques*", Powder Technology 178 (2007) 56–72
- [23] J.B. Knight, C.G. Fandrich, C.N. Lau, H.M. Jaeger, S.R. Nagel, Density relation in a vibrated granular material, Phys. Rev., E Stat. Phys. Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Topics 51 (1995) 3957–3963.
- [24] G.C. Barker, A. Mehta, Transient phenomena, self-diffusion and orientational effects in vibrated powders, Phys. Rev., E Stat. Phys. Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Topics 47 (1993) 184–188.
- [25] K.H. Staffa, J. Jahn, N. Claussen, Flowability of powders under the influence of vibrations, Powder Metall. Int. 9 (1977) 20–23.
- [26] ASTM Designation B213-83 Standard Test Method for Flow Rate of Metal Powders, American society for Testing and Materials, 1983.
- [27] S. Matsusaka, K. Yamamoto, H. Masuda, Micro-feeding of a fine powder using a vibrating capillary tube, Adv. Powder Technol. 7 (1996) 141–151.
- [28] S. Matsusaka, M. Urakawa, H. Masuda, Micro-feeding of fine powders using a capillary tube with ultrasonic vibration, Adv. Powder Technol. 6 (1995) 283–293.
- [29] M. Saito, O. Kimura, N. Yoda, A quantitative powder supply method using ultrasonic vibration, J. Jpn. Acoust. Soc. 45 (1989) 38–43.
- [30] Y. Yang, X. Li, Experimental and analytical study of ultrasonic micro powder feeding, J. Phys., D, Appl. Phys. 36 (2003) 1349–1354.
- [31] Shoufeng Yang, Julian R.G. Evans "Flow rate of metal powders at reduced and elevated air pressure", Powder Technology 154 (2005) 95 – 98
- [32] Y.Q. Wu, K.L. Choy, Surf. Coat. Tech. 180–181 (2004) 436–440.
- [33] Yiquan Wu, Jing Dub, Kwang-Leong Choy, Larry L. Hench," Fabrication of titanium dioxide ceramics by laser sintering green layers prepared via aerosol assisted spray deposition", Materials Science and Engineering A 454–455 (2007) 148–155
- [34] Wang Z., Zhang A., Shang X., "3-D Design and Numerical Simulation of Two-Phase Flow in the Laser Rapid Prototyping Coaxial Powder Delivery System", Tsinghua Science And Technology, ISSN401007-02144034/3840pp200-205, Volume 14, Number S1, June 2009
- [35] Shang X F. Research on metal powder laser shaping [Ph.D. Dissertation]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [36] Shang X F, Liu W J, Wang T R, et al. Scanning mode of the metal powder laser shaping. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(7): 99-102.
- [37] Shang X F, Liu W J, Wang T R. Laser engineered net shaping technology. Journal of Shanghai University, 2004, 8: 26-29. (in Chinese)
- [38] Mazumder J, Dutta D, Kikuchi N, et al. Closed loop direct metal deposition: Art to part. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34: 397-414.
- [39] L. Costa, D. Rajput, K. Lansford, W Yue, A. Terekhov and W. Hofmeister, "The tower nozzle solid freeform fabrication technique", Rapid Prototyping Journal 16/4 (2010) 295–301
- [40] H. J. Herrman, "Simulation of Granular Media", Physica A 191 (1992) 263-276
- [41] O. Lyckfeldt O, Swerea, "Powder rheology of steel powders for additive manufacturing"
- [42] Dietmar Schulze, "Flow Properties of Powders and Bulk Solids", Ostfalia University of Applied Sciences, Wolfenbüttel, Germany
- [43] R.M. Nedderman, "Statics and Kinematics of Granular Materials", Cambridge University Press 1992, ISBN-10 0-521-40435-5
- [44] Kwade, A.; Schulze, D; Schwedes, J.: Determination of the stress ratio in uniaxialcompression tests, Powder Handling & Processing 6 (1994) 1, pp. 199–203

- [45] Phadke, M.S., 1989. Quality Engineering using Robust Design, 1st Ed., New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- [46] Saaty, T.L. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures, Journal of Mathematical Psychology, 15: 57-68.
- [47] Saaty, T.L. (1994). Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the AHP. RWS Publications, Pittsburgh, PA, U.S.A.
- [48] Saaty, T.L., "The Analytic Hierarchy Process", New York: McGraw Hill. International, Pittsburgh: RWS Publications (1980).
- [49] Dimitris Mourtzis, Michalis Doukas, Foivos Psarommatis, "A toolbox for the design, planning and operation of manufacturing networks in a mass customisation environment", Journal of Manufacturing Systems Volume 36, July 2015, Pages 274–286