



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Μελέτη της απόθεσης πούδρας σε κατεργασίες προσθετικής
κατασκευής με σύντηξη κλίνης πούδρας μέσω laser**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συγγραφέας
ΑΒΡΑΜΠΙΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων
Καθ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ -Χ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Μελέτη της απόθεσης πούδρας σε κατεργασίες προσθετικής
κατασκευής με σύντηξη κλίνης πούδρας μέσω laser**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΒΡΑΜΠΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Εξεταστική επιτροπή

Καθ. Γ.-Χ. Βοσνιάκος (Μηχ. Μηχ., ΕΜΠ, Επιβλέπων)
Καθ. Σ. Κουρκουλής (Εφαρμ. Μαθ. και Φυσ. Επιστημών, ΕΜΠ)
Ομοτ. Καθ. Δ. Μανωλάκος (Μηχ. Μηχ., ΕΜΠ, Συμβουλευτική Επιτροπή)
Καθ. Ν. Μιχαηλίδης (Μηχ. Μηχ., ΑΠΘ)
Αναπλ. Καθ. Π. Μπενάρδος (Μηχ. Μηχ., ΕΜΠ, Συμβουλευτική Επιτροπή)
Αναπλ. Καθ. Π. Σταυρόπουλος (Μηχ. Μηχ., Πανεπιστήμιο Πατρών)
Καθ. Κ. Χαριτίδης (Χημ. Μηχ., ΕΜΠ)

Αθήνα, Ιούλιος 2024

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει υποστηριχθεί οικονομικά από την τετραετή υποτροφία του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας (Ε.Λ.Κ.Ε.) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.).



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΙΔΙΚΟΣ ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ
ΚΟΝΔΥΛΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ**

Copyright © Avrampos Panagiotis, 2024.
All rights reserved.

Περίληψη

Σαράντα χρόνια μετά από την επινόηση της Προσθετικής Κατασκευής (ΠΚ), οι κατεργασίες Σύντηξης Κλίνης Πούδρας (ΣΚΠ) αποτελούν σημαντική κατηγορία των κατεργασιών ΠΚ, υποσχόμενες μεταλλικά τεμάχια υψηλής ποιότητας. Παρά την εκτενή έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί, οι συγκεκριμένες κατεργασίες δεν έχουν ακόμα πραγματοποιήσει το άλμα από τη φάση της παραγωγής πρωτοτύπων στην πλήρη βιομηχανοποίηση, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Αυτή η εργασία αποσκοπεί στο να συνεισφέρει γνώση στο κομμάτι της εναπόθεσης πούδρας, μιας και η ποιότητα του κρεβατιού σκόνης συνδέεται άμεσα με τις τελικές ιδιότητες του τεμαχίου.

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μία εισαγωγή στις κατεργασίες ΠΚ, εστιάζοντας στις κατεργασίες ΣΠ.

Το δεύτερο κεφάλαιο παρέχει μία λεπτομερή ανάλυση της σύνδεσης μεταξύ των παραμέτρων εναπόθεσης πούδρας αρχικά με την ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος και, εν συνεχεία, με τις μηχανικές ιδιότητες του κατασκευασμένου τεμαχίου. Γίνεται καταγραφή των παραμέτρων εναπόθεσης πούδρας και αλληλεπιδράσεων αυτών. Ορίζονται κριτήρια ποιότητας του κρεβατιού πούδρας και τρόποι προσδιορισμού/μέτρησης αυτών. Τέλος ορίζονται κριτήρια ποιότητας κατασκευασμένου τεμαχίου και γίνονται οι απαραίτητες συνδέσεις.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει έναν στατιστικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό και κατασκευή ενός συστήματος εναπόθεσης πούδρας (ΣΕΠ), μέσω της μεθόδου Analytic Hierarchy Process (AHP). Αρχικά συγκρίνονται μεταξύ τους οι διάφορες μέθοδοι εναπόθεσης πούδρας που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία, μέσω συγκεκριμένων κριτηρίων. Στη συνέχεια, ένα πρωτότυπο ΣΕΠ σχεδιάζεται και παρουσιάζεται αναλυτικά, ενώ παράλληλα γίνεται σύγκρισή του μέσω της ίδιας μεθόδου με ένα αντίστοιχο ΣΕΠ που συναντάται σε μηχανές ΣΠ του εμπορίου. Η σύγκριση απέδειξε την ανωτερότητα του προτεινόμενου σχεδιασμού.

Το τέταρτο κεφάλαιο εστιάζει στη μοντελοποίηση μίας συγκεκριμένης πούδρας μέσω και χρήση της Μεθόδου Διακριτών Στοιχείων (ΜΔΣ) για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση την εναπόθεσης πούδρας μέσω δονούμενης οδηγού λεπίδας (ΟΛ). Χρησιμοποιήθηκε αντιστοίχιση των παραμέτρων κατανομής μεγέθους κόκκου D_{90} , D_{50}

και D_{10} με τις παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Εν συνεχεία, τα μοντέλα επαφής αναλύθηκαν ως προς τη συμβατότητά τους με την συγκεκριμένη πούδρα μέσω υπολογισμού της παραμέτρου Tabor, και επιλέχθηκε το μοντέλο Hertz-Mindlin with JKR. Η ρεαλιστική ρεολογική συμπεριφορά του μοντέλου της πούδρας ελέγχθηκε μέσω ταυτόχρονης πειραματικού και προσομοιωτικού προσδιορισμού των γωνιών χιονοστιβάδας και πρανούς. Οι παράμετροι εναπόθεσης που εξετάστηκαν ήταν η ταχύτητα εναπόθεσης, η συχνότητα και το πλάτος κατακόρυφης δόνησης και η γωνία ελευθερίας της ΟΛ. Τα κριτήρια ποιότητας στρώσης που ορίστηκαν ήταν η απόκλιση του πάχους στρώσης από το θεωρητικό πάχος στρώσης (Layer Thickness Deviation-LTD), ο δείκτης κάλυψης επιφάνειας (Surface Coverage Ratio-SCR), η επιφανειακή τραχύτητα υπολογισμένη μέσω ρίζας μέσου τετραγώνου (S_q -RMS) και ο πραγματικός βαθμός συμπίεσης (True Packing Density-PD) της στρώσης. Έγινε σχεδιασμός πειραμάτων μέσω ανάλυσης Taguchi και συνακόλουθης ANOVA που απέδειξαν την θετική επίδραση της δόνησης στην ποιότητα του κρεβατιού πούδρας. Έγινε ανάλυση σταθμισμένου μέσου για τα κριτήρια LTD, SCR και S_q -RMS και απεδείχθη ότι η επιφανειακή λοξότητα (S_{sk}) και κύρτωση (S_{ku}) αποτελούν ισοδύναμα κριτήρια ποιότητας επιφανείας. Όσο χαμηλότερη η ταχύτητα εναπόθεσης, τόσο καλύτερη η ποιότητα στρώσης. Ο ΠΒΣ παρέμεινε σταθερός ανεξαρτήτων της αλλαγής επιπέδου των παραμέτρων εναπόθεσης.

Το πέμπτο κεφάλαιο χρησιμοποιεί το ίδιο μοντέλο πούδρας που ορίστηκε στο 4^ο κεφάλαιο για να εξετάσει μέσω προσομοιώσεων ΜΔΣ το κοσκίνισμα της πούδρας. Η εξέταση έγινε για την γραμμική περιοχή του κοσκινίσματος, δηλ. την περιοχή σταθερής ροής. Εξετάστηκαν ως παράμετροι κοσκινίσματος η συχνότητα και το πλάτος κατακόρυφης δόνησης του κόσκινου, η γωνία αντίστροφης στένωσης της οπής και η αρχική στάθμη της πούδρας. Ως κριτήρια ποιότητας εξετάστηκαν η παροχή μάζας, η μάζα κατά τη γραμμικότητα και η διάρκεια της γραμμικότητας. Μέσω ανάλυσης Taguchi και συνακόλουθης ANOVA ορίστηκαν οι συνδυασμοί παραμέτρων κοσκινίσματος που μεγιστοποιούν τα κριτήρια ποιότητας. Εξετάστηκε επίσης η επίδραση του σχήματος της οπής στα κριτήρια ποιότητας. Τέλος, εξετάστηκε η ποιότητα στρώσης που παράγεται μέσω ελεγχόμενου κοσκινίσματος. Αποδείχθηκε ότι το ελεγχόμενο κοσκίνισμα παράγει στρώματα έτοιμα για ΣΚΠ, με ποιότητα μεταξύ της ποιότητας αυτών που παράγονται από δονούμενη και μη δονούμενη ΟΛ.

Το έκτο κεφάλαιο πραγματεύεται μία καινοτόμα μέθοδο εναπόθεσης στρωμάτων πολλών υλικών με το σχέδιο του διπλού μετρητή περιγραμμάτων. Η μέθοδος ορίζεται μαθηματικά και το πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά μέσω κώδικα σε γλώσσα C. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σχηματικά. Η βιωσιμότητα του σχεδίου επικυρώνεται τόσο πειραματικά, όσο και μέσω προσομοίωσης ΜΔΣ.

Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα διατυπώνονται στο έβδομο κεφάλαιο.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	17
1.1	Προσθετική Κατασκευή	17
1.2	Προσθετική Κατασκευή με Σύντηξη Κλίνης Πούδρας	19
1.3	Πλαίσιο Διδακτορικής Διατριβής	21
1.3.1	Συμβολή της Διατριβής	22
1.4	Δομή της Διατριβής	25
2	Βιβλιογραφική Έρευνα	28
2.1	Κατεργασίες ΣΚΠ	28
2.2	Παράμετροι της διαδικασίας εναπόθεσης πούδρας	31
2.2.1	Υλικό Σκόνης	32
2.2.2	Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων (ΚΜΣ)	40
2.2.3	Σχήμα Σωματιδίων	43
2.2.4	Υλικό Επιστρωτήρα	48
2.2.5	Σχήμα επιστρωτήρα	50
2.2.6	Παράμετροι Διαδικασίας Επανεπίστρωσης και Ρύθμιση / Μοτίβο Διασποράς	54
2.2.7	Ονομαστικό, Αποτελεσματικό και Πραγματικό Πάχος Στρώσης	56
2.2.8	Περιβαλλοντικές Παράμετροι	59
2.3	Η Σημασία της Ρευστότητας της Σκόνης	63
2.4	Δείκτες Ποιότητας Στρώματος Πούδρας (ΔΠΣΠ)	66
2.4.1	Επιφανειακή Τραχύτητα (ΕΤ) και Κατανομή Επιφανειακής Τραχύτητας (ΚΕΤ)	67
2.4.2	Ποκνότητα Συσσώρευσης Σκόνης (ΠΣΣ) ή Βαθμός Συμπίεσης Στρώσης (ΒΣΣ)	68
2.4.3	Εμφάνιση Επιφανειακών Ελαττωμάτων (π.χ. Ρωγμές, Διαχωρισμοί, Κοιλότητες)	70
2.4.4	Ακρίβεια Επίτευξης του Επιθυμητού Πάχους Στρώματος	71
2.5	Μέθοδοι Μέτρησης των Δεικτών Ποιότητας Στρώματος Σκόνης (ΔΠΣΣ)	72
2.6	Δείκτες Ποιότητας Τελικού Τεμαχίου (ΔΠΤΤ)	79
2.6.1	Ποκνότητα/Ποσοστό πορώδους	80
2.6.2	Αντοχή διαρροής / αντοχή σε εφελκυσμό / επιμήκυνση κατά τη θραύση	82
2.6.3	Σκληρότητα	84
2.6.4	Επιφανειακή Τραχύτητα Τεμαχίου	85
2.6.5	Διαστασιακή Ακρίβεια	86
2.6.6	Εμφάνιση επιφανειακών ή εσωτερικών ελαττωμάτων	87
2.7	Συζήτηση	90

2.8	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	97
3	Σχεδιασμός Συστήματος Επανεπίστρωσης / Εναπόθεσης Πούδρας (ΣΕΠ).....	100
3.1	Μέθοδοι Εναπόθεσης.....	100
3.2	Ανάλυση Εναλλακτικών Μεθόδων Εναπόθεσης Πούδρας	103
3.3	Σύγκριση Μεθόδων Εναπόθεσης Πούδρας.....	105
3.4	Διαμόρφωση Προσαρμοσμένου Μηχανικού ΣΕΠ και Σύγκριση με το Υπάρχον Σημείο Αναφοράς.....	111
3.4.1	Αξιολόγηση ομάδας δοσομέτρησης/κοσκίνισης	113
3.4.2	Αξιολόγηση της ομάδας επανεπίστρωσης.....	121
3.5	Υλοποίηση του πρωτότυπου ΣΕΠ.....	126
3.5.1	Τελικός σχεδιασμός και προδιαγραφές.....	126
3.5.2	Περιγραφή κύκλου λειτουργίας ΣΕΠ.....	132
3.5.3	Εκτίμηση ακρίβειας	134
3.6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....	138
4	Προσομοιώσεις Εναπόθεσης Σκόνης.....	142
4.1	Ιδιότητες Υλικού Σκόνης.....	142
4.2	Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων	147
4.3	Υπολογισμός των Δυνάμεων Συνοχής.....	151
4.4	Γεωμετρία και Περιγραφή της Προσομοίωσης	173
4.5	Αξιολόγηση Επιφάνειας και Κριτήρια Ποιότητας	179
4.5.1	Απόκλιση Πάχους Στρώσης LTD και $|LTD|$ (μm).....	184
4.5.2	Λόγος Κάλυψης Επιφανείας SCR (%)	185
4.5.3	Μέση Τετραγωνική Επιφανειακή Τραχύτητα S_q -RMS (μm)	187
4.5.4	Πραγματική Πυκνότητα Συσσώρευσης PD (%)	193
4.6	Σχεδιασμός Taguchi για Εναπόθεση με Λεπίδα.....	194
4.7	Αποτελέσματα.....	198
4.7.1	Αποτελέσματα LTD	201
4.7.2	Αποτελέσματα SCR	204
4.7.3	Αποτελέσματα S_q -RMS.....	206
4.8	Συζήτηση	209
5	Προσομοιώσεις Κοσκινίσματος Σκόνης.....	223
5.1	Γεωμετρία και Περιγραφή της Προσομοίωσης	224
5.2	Προσδιορισμός της φάσης κοσκίνισης και κριτήρια ποιότητας.....	228
5.2.1	Παροχή μάζας σκόνης κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας Q (mg/sec).	228
5.2.2	Συνολική μάζα σκόνης που κοσκινίζεται κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας m (mg)	233
5.2.3	Λόγος Τελικού Μεγέθους Γραμμικότητας LESR ($D_{90}/A.S.$)	234
5.2.4	Διάρκεια Γραμμικότητας t_{lin} (sec).....	235

5.3	Σχεδιασμός Πειραμάτων Taguchi για Κοσκίνιση	235
5.4	Αποτελέσματα σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi	240
5.4.1	Αποτελέσματα Ολικής Μάζας στη Γραμμικότητα (m)	243
5.4.2	Αποτελέσματα Ροής Μάζας κατά τη Γραμμικότητα (Q).....	245
5.4.3	Αποτελέσματα Διάρκειας Γραμμικότητας (t_{lin})	247
5.4.4	Αποτελέσματα LESR	249
5.5	Αξιολόγηση Σχήματος Οπής	252
5.6	Ποιότητα Στρώσης μέσω Εναπόθεσης Κοσκίνισης	258
5.7	Διάρκεια Εναπόθεσης μέσω Κοσκίνισης.....	269
6	Εναπόθεση Στρωμάτων Πούδρας Πολλαπλών Υλικών	272
6.1	Γεωμετρικός Ορισμός του Προβλήματος.....	275
6.1.1	Βήμα 1: Δεδομένα Λογισμικού Τεμαχισμού	275
6.1.2	Βήμα 2: Αναγνώριση, Ορισμός και Αρίθμηση των Συνοριακών Καμπύλων	276
6.1.3	Βήμα 3: Δημιουργία Αριστερού και Δεξιού Μετώπου (Τμηματοποίηση κατά άξονα x)	283
6.2	Φυσική Υλοποίηση-Ανάπτυξη Ιδιοσυσκευής Δοκιμών	296
6.3	Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού – Προσομοίωση με την Προτεινόμενη Σχεδίαση	310
7	Επίλογος.....	332
7.1	Επιτεύγματα και Περιορισμοί.....	332
7.2	Μελλοντική Έρευνα.....	337
7.3	Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη διατριβή.....	339
8	Παράρτηματα	340
8.1	Παράρτημα Α: Κατάλογος υλικών του πρωτοτύπου ΣΕΠ (οι βίδες, τα παξιμάδια και οι ροδέλες δεν περιλαμβάνονται).....	340
8.2	Παράρτημα Β: Κώδικας Arduino TM UNO Ελέγχου του ΣΕΠ.....	343
8.3	Παράρτημα Γ: Υπολογισμός Σημείων Στρώματος Σκόνης	348
8.4	Παράρτημα Δ: Τμηματοποίηση επί Άξονα x / Υπολογισμός και ταξινόμηση σημείων τομής	351
8.5	Παράρτημα Ε: Τμηματοποίηση επί άξονα X / Ανάπτυξη μετώπων.....	369
9	Βιβλιογραφία.....	386

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΚΠ.	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2: ΣΤΑΔΙΑ ΤΟΥ GARTNER HYPER CYCLE ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΚΠ.	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΚΠ ΜΕ ΛΕΙΖΕΡ.	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΚΠ.	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: ΥΛΙΚΟ, ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΠΟΥ ΒΡΕΘΗΚΑΝ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΆΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΠ.	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΆΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΠ.	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΆΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΚΠ.	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΤΗΡΑ ΚΑΙ ΤΩΝ ΆΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΠ.	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΤΗΡΑ ΚΑΙ ΤΩΝ ΆΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΚΠ.	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.8: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΕΠΑΝΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΆΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΚΠ.	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.9: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΆΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΠ.	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.10: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΆΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΚΠ.	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.11: ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ.	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.12: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ ΠΟΥ ΒΡΕΘΗΚΑΝ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.13: ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ (ΔΠΣΣ) ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΕΛΙΚΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ (ΔΠΤΤ).	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.14: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΟΠΟΙΑ ΕΣΤΙΑΖΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.	94
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.15: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΓΙΑ ΝΑ ΚΑΤΑΛΗΞΟΥΝ ΣΕ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.	96
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.16: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΓΙΑ ΝΑ ΚΑΤΑΛΗΞΟΥΝ ΣΕ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.	96
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΡΙΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ.	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ CR1 ΈΩΣ CR7 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ.	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΡΙΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΔΟΣΟΜΕΤΡΗΤΗ ΣΚΟΝΗΣ/ΚΟΣΚΙΝΟΥ.	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ CR1 ΈΩΣ CR6 ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΟΜΑΔΑΣ ΔΟΣΟΜΕΤΡΗΤΗ/ΚΟΣΚΙΝΟΥ ΣΚΟΝΗΣ.	119

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5: ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΡΙΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΝΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ.	124
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ CR1 ΈΩΣ CR6 ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΝΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΜΕ ΣΚΟΝΗ.	124
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7: ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ ΣΕΠ (CW: ΔΕΞΙΟΣΤΡΟΦΑ, CCW: ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΡΟΦΑ).	130
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΕΠ ΑΝΑ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ.	133
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.9: ΕΥΡΟΣ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΕΠ.	134
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.10: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ISCAN M300 (ΦΑΚΟΙ V70).	135
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.11: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΓΙΑ ΣΑΡΩΜΕΝΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ (ΜΜ).	135
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.12: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΥΚΛΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕΠ.	136
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΓΗΘΗΚΕ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.	142
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΗΣ #9 ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ TAGUCHI L27).	145
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΑ ΧΡΟΝΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ.	146
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ TAVOR ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ.	166
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: Η ΣΧΕΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΚΟΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΠΟΥ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.	168
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΞΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ EDEM ΓΙΑ ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.	179
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: L27 ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΟΥ DOE TAGUCHI ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΚΟΝΗΣ ΜΕ ΛΕΙΠΙΔΑ. ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΝΤΑΙ ΕΠΙΣΗΣ.	199
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΝΑ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.	202
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΝΑ) ΓΙΑ ΤΟΝ ΛΟΓΟ ΚΑΛΥΨΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.	204
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΝΑ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ RMS ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ.	206
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΛΟΣΕΩΝ ΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ LTD ,SCR ΚΑΙ RMS. ...	209
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.12: L27 ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΟΥ DOE TAGUCHI ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΚΟΝΗΣ (ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ). ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑ ΑΥΞΟΥΣΑ ΤΙΜΗ SSK.	211
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.13: L27 ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΟΥ DOE TAGUCHI ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΚΟΝΗΣ (ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ). ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑ ΑΥΞΟΥΣΑ ΤΙΜΗ SKU.	213
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.14: ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΔΟΝΗΣΗ ΈΝΑΝΤΙ ΜΕ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ ΔΟΝΗΣΗΣ.	218
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.15: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΝΑ) ΓΙΑ ΤΗ ΛΟΞΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΚΟΝΗΣ.	220
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.16: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΝΑ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΥΡΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΚΟΝΗΣ.	221
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΛΈΓΜΑΤΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ.	238
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: L27 ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ TAGUCHI DOE ΓΙΑ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ ΣΚΟΝΗΣ, ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.	240
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΝΑ) ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΠΟΥ ΚΟΣΚΙΝΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ.	244
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΝΑ) ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ.	245

<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΒΑ) ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑΤΟΣ.</i>	247
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ LESR ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ.</i>	249
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: ΙΔΑΝΙΚΑ ΣΥΝΟΛΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΟΣΚΙΝΙΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ.</i>	252
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: ΕΝΕΡΓΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΟΣΚΙΝΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ.</i>	252
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΟΠΗΣ.</i>	255
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10: L27 ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΟΥ DOE TAGUCHI ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΚΟΝΗΣ ΜΕΣΩ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑΤΟΣ. ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΝΤΑΙ ΕΠΙΣΗΣ.</i>	259
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΒΑ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΚΥΡΤΩΣΗΣ (SKU) ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ.</i>	260
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΒΑ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΛΥΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΛΟΞΟΤΗΤΑΣ (JSSK) ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ.</i>	260
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΛΕΠΙΔΑΣ ΜΕ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ.</i>	263
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14: ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΚΟΣΚΙΝΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ- ΚΟΚΚΙΝΟ: ΧΕΙΡΟΤΕΡΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ, ΠΡΑΣΙΝΟ: ΚΑΛΥΤΕΡΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ.</i>	265
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΔΟΚΙΜΗ ΜΕ ΑΥΞΟΥΣΑ ΣΕΙΡΑ. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΧΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ.</i>	268
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑΤΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ #26.</i>	271
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ “SORTED INTERSECTIONS”</i>	291
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΑΖΑΣ, ΌΓΚΟΥ, ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΚΑΘΙΖΑΝΟΥΣΑΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΎψΗ ΚΥΒΟΕΙΔΟΥΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ ΣΚΟΝΗΣ.</i>	316
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΎψΟΥΣ ΚΥΒΟΕΙΔΟΥΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΠΟΛΥΎΛΙΚΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ.</i>	317
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΕΝΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΒΗΜΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.</i>	321
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΛΥΎΛΙΚΟΥ ΈΝΑΝΤΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΟΝΟΎΛΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΔΟΝΟΥΜΕΝΗΣ ΛΕΠΙΔΑΣ.</i>	328
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6: ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΠΟΛΥΎΛΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΣΕ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ 100:1.</i>	329

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 3.1: ΤΑ 7 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ 5 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ.	109
ΣΧΗΜΑ 3.2: ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ.	110
ΣΧΗΜΑ 3.3: ΚΟΙΝΟΣ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΠ.	115
ΣΧΗΜΑ 3.4: (Α) ΣΧΕΔΙΟ CAD ΤΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΧΟΑΝΗΣ-ΔΟΣΟΜΕΤΡΗΤΗ, (Β) ΣΧΕΔΙΟ CAD ΤΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SIEVER, (Γ) ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΧΟΑΝΗΣ-ΔΟΣΟΜΕΤΡΗΤΗ, (Δ) ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΔΟΣΟΜΕΤΡΗΤΗ, (Ε) ΈΚΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΚΟΣΚΙΝΟΥ, (ΣΤ) ΡΑΒΔΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΚΟΣΚΙΝΟΥ, (Ζ) ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΚΙΝΟΥ.	117
ΣΧΗΜΑ 3.5: (Α) ΤΑ 6 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΔΟΣΟΜΕΤΡΗΤΗ/ΚΟΣΚΙΝΟΥ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΣΕΠ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΕΠ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ, (Β) PVAl_i · PVCr_j ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΗΡ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΔΟΣΟΜΕΤΡΗΤΗ/ΚΟΣΚΙΝΟΥ (ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΗ ΠΡΟΒΟΛΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΠ ΑΝΑΦΟΡΑΣ, ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΠΡΟΒΟΛΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΣΕΠ).	121
ΣΧΗΜΑ 3.6: ΟΜΑΔΑ ΕΠΑΝΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΣΕΠ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ (1) ΚΑΙ ΤΟ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΛΕΠΙΔΑΣ (2).	122
ΣΧΗΜΑ 3.7: (Α) ΤΑ 6 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΕΠΑΝΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΣΕΠ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΕΠ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ, (Β) PVAl_i · PVCr_j ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΗΡ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΕΠΑΝΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ (ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΗ ΠΡΟΒΟΛΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΠ ΑΝΑΦΟΡΑΣ, ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΠΡΟΒΟΛΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΣΕΠ).	126
ΣΧΗΜΑ 3.8: ΜΟΝΤΕΛΟ CAD ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΛ/ΕΤΛ ΧΩΡΙΣ ΣΕΠ: (Α) ΟΡΑΤΗ ΚΕΦΑΛΗ ΛΕΙΖΕΡ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΛΕΙΖΕΡ, (Β) ΜΟΝΟ Η ΠΛΑΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΤΟΥ ΣΕΠ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ, (Γ) ΟΡΑΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.	128
ΣΧΗΜΑ 3.9: ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΣΤΗΛΗ: (Α) ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΣΧΕΔΙΟ CAD, (Β) ΜΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ, (Γ) ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ, (Δ) ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ, ΔΕΞΙΑ ΣΤΗΛΗ: ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ PRS: (Ε) ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΣΧΕΔΙΟ CAD, (ΣΤ) ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΡΟΥΛΕΜΑΝ-ΡΑΓΑ, (Ζ) ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΑΞΟΝΑ Χ, (Η) ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ ΟΔΗΓΟΥ ΚΟΧΛΙΑ-ΠΛΑΞΙΜΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΗ.	129
ΣΧΗΜΑ 3.10: ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΣΕΠ (Α) ΌΠΩΣ ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ, (Β) ΌΠΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΚΕ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΘΗΚΕ.	131
ΣΧΗΜΑ 3.11: ΒΑΘΜΙΑΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ: (Α) ΣΤΗΝ ΚΑΤΙΝΗ ΣΚΟΝΗΣ, (Β) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΣΑΡΩΣΗΣ.	135
ΣΧΗΜΑ 3.12: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.	137
ΣΧΗΜΑ 3.13: ΤΟ ΣΕΠ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ.	141
ΣΧΗΜΑ 4.1: ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ EDEM.	143
ΣΧΗΜΑ 4.2: (Α) ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ- (Β) ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ- (Γ) ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΦΑΙΡΑΣ- (Δ) ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.	148
ΣΧΗΜΑ 4.3: ΕΠΑΦΗ ΔΥΟ ΑΝΟΜΟΙΩΝ, ΑΝΙΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ, ΣΦΑΙΡΙΚΩΝ, ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ, ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΝΤΑΙ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΘΕ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ [192].	152
ΣΧΗΜΑ 4.4: (Α) ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ 4 ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΣΤΙΓΜΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΑΦΗΣ JKR ΓΙΑ ΣΥΝΕΚΤΙΚΕΣ, ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ (ΕΠΑΦΗ, ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ, ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ, ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ) [199]; (Β) ΟΠΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΥΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΕΠΑΦΗΣ [200].	158

ΣΧΗΜΑ 4.5: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ Α-ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ.	163
ΣΧΗΜΑ 4.6: ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ TAVOR ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΑΚΡΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ.	164
ΣΧΗΜΑ 4.7: ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΓΙΑ 3 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΟΥ ΧΩΡΟΔΕΤΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΤΟΥ ΣΥΓΚΡΟΥΟΜΕΝΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ.	172
ΣΧΗΜΑ 4.8: ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ: (Α) ΑΝΟΙΧΤΟ ΓΚΡΙ- ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ; (Β) ΣΚΟΥΡΟ ΓΚΡΙ-ΛΕΠΙΔΑ (Γ) ΚΥΑΝΟ-ΔΕΞΙΑ ΠΛΑΚΑ ΟΡΙΟΥ- (Δ) ΜΠΛΕ-ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΠΛΑΚΑ ΟΡΙΟΥ- (Ε) ΜΑΤΖΕΝΤΑ-ΠΙΣΩ ΠΛΑΚΑ ΟΡΙΟΥ- (ΣΤ) ΡΟΖ- ΜΠΡΟΣΤΙΝΗ ΠΛΑΚΑ ΟΡΙΟΥ.	173
ΣΧΗΜΑ 4.9: ΗΜΙ-ΔΙΑΦΑΝΗΣ ΚΥΑΝΟΣ ΚΥΒΟΣ, Ο ΟΠΟΙΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΩΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΣΚΟΝΗΣ.	174
ΣΧΗΜΑ 4.10: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΚΟΝΗΣ- (ΜΕΣΗ) ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ- (ΔΕΞΙΑ) Ο ΛΟΦΟΣ ΈΧΕΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΕΙ- Η ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΕΙΝΑΙ ΕΤΟΙΜΗ ΝΑ ΞΕΚΙΝΗΣΕΙ.	175
ΣΧΗΜΑ 4.11: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ (OFFSET)- (ΔΕΞΙΑ) Ο ΑΞΟΝΑΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΥ ΜΠΛΕ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ.	177
ΣΧΗΜΑ 4.12: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ- (ΔΕΞΙΑ) Ο ΑΞΟΝΑΣ ΤΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΥ ΜΠΛΕ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ.	178
ΣΧΗΜΑ 4.13: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΟΔΗΓΟΥ ΛΕΠΙΔΑΣ- (ΔΕΞΙΑ) Ο ΑΞΟΝΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΥ ΜΠΛΕ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ.	178
ΣΧΗΜΑ 4.14: ΚΑΤΟΨΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ ΠΟΥ ΕΝΑΠΟΤΙΘΕΤΑΙ, ΜΕ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕΣΩ: (Α) ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΘΈΣΗ- (Β) ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ.	180
ΣΧΗΜΑ 4.15: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΘΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΑΝΩΤΕΡΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.	183
ΣΧΗΜΑ 4.16: ΜΕ ΜΑΥΡΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥΣ, ΑΚΑΛΥΠΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΌΠΟΥ ΤΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ ΟΡΑΤΟ, ΥΠΟΔΗΛΩΝΟΝΤΑΣ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΚΑΛΥΨΗΣ.	186
ΣΧΗΜΑ 4.17: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (ΔΕΞΙΑ) ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΡΙΖΑΣ (RMS) ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ [214].	187
ΣΧΗΜΑ 4.18: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΕΙΡΟΣΤΟΥ ΠΡΙΣΜΑΤΟΣ.	189
ΣΧΗΜΑ 4.19: (ΠΑΝΩ) S _a ; (ΜΕΣΗ) SSK; (ΚΑΤΩ) SKU [214].	192
ΣΧΗΜΑ 4.20: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΜΕ ΜΗ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΗ ΛΕΠΙΔΑ. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ 0,08 Μ/SEC, ΌΠΩΣ ΑΥΤΗ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΙΣ ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	196
ΣΧΗΜΑ 4.21: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΌΨΗ ΤΗΣ ΛΕΠΙΔΑΣ. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ.	198
ΣΧΗΜΑ 4.22: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΣΩΝ ΌΡΩΝ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΝΆΛΥΣΗΣ TAGUCHI ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ; (Α) LTD; (Β) SCR; (C) RMS; (D) PD.	200
ΣΧΗΜΑ 4.23: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SNR ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΝΆΛΥΣΗΣ TAGUCHI ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΚΟΝΗΣ; (Α) LTD; (Β) SCR; (C) RMS; (D) PD.	201
ΣΧΗΜΑ 4.24: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΕΣΟΥΣ ΌΡΟΥΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ; (Α) U _{TR-FVIB} ; (Β) U _{TR-AVIB} ; (C) U _{TR-θ_{REL}}	203
ΣΧΗΜΑ 4.25: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΕΣΟΥΣ ΌΡΟΥΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΚΑΛΥΨΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ; (Α) U _{TR-FVIB} ; (Β) U _{TR-AVIB} ; (C) U _{TR-θ_{REL}}	205
ΣΧΗΜΑ 4.26: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΕΣΟΥΣ ΌΡΟΥΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ RMS ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ; (Α) U _{TR-FVIB} ; (Β) U _{TR-AVIB} ; (C) U _{TR-θ_{REL}}	208

ΣΧΗΜΑ 4.27: ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΈΝΑΝΤΙ SSK.	215
ΣΧΗΜΑ 4.28: ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΈΝΑΝΤΙ SKU.	216
ΣΧΗΜΑ 4.29: ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΤΩΝ LTD, SCR ΚΑΙ RMS (ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ 0,35, 0,05 ΚΑΙ 0,60 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ) ΈΝΑΝΤΙ SSK.	217
ΣΧΗΜΑ 4.30: ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΤΩΝ LTD, SCR ΚΑΙ RMS (ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ 0,4, 0,2 ΚΑΙ 0,4 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ) ΈΝΑΝΤΙ ΤΟΥ SKU.	217
ΣΧΗΜΑ 4.31: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (Α) ΧΩΡΙΣ ΔΟΝΗΣΗ (ΚΑΤΟΨΗ)- (Β) ΜΕ ΔΟΝΗΣΗ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ TAGUCHI (ΚΑΤΟΨΗ)- (C) ΧΩΡΙΣ ΔΟΝΗΣΗ (ΠΛΑΓΙΑ ΌΨΗ)- (D) ΜΕ ΔΟΝΗΣΗ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ TAGUCHI (ΠΛΑΓΙΑ ΌΨΗ) (ΣΗΜΕΙΩΣΗ: MATZENTA: ΟΠΙΣΘΙΑ ΟΡΙΑΚΗ ΠΛΑΚΑ, ΡΟΖ; ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΟΡΙΑΚΗ ΠΛΑΚΑ).	219
ΣΧΗΜΑ 5.1: ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ.	224
ΣΧΗΜΑ 5.2: ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΣΚΟΝΗΣ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑΤΟΣ.	225
ΣΧΗΜΑ 5.3: ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΟΣΚΙΝΙΣΗΣ: (Α) ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΚΟΝΗΣ- (Β) ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΣΕ ΑΚΙΝΗΣΙΑ ΜΕ ΜΠΛΟΚΑΡΙΣΜΕΝΟ ΚΟΣΚΙΝΟ- (C) ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΡΑΓΕΑ- (D) ΑΡΧΙΚΟ «ΣΥΝΝΕΦΟ» ΣΚΟΝΗΣ- (Ε) ΦΡΑΓΜΕΝΕΣ ΟΠΕΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ- (F) ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ-ΔΟΝΗΣΗ ΚΟΣΚΙΝΟΥ- (G) ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΚΟΝΗΣ.	226
ΣΧΗΜΑ 5.4: ΡΥΘΜΙΣΗ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΕΑ - (ΔΕΞΙΑ) ΆΞΟΝΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ: ΜΠΛΕ ΔΙΑΝΥΣΜΑ.	227
ΣΧΗΜΑ 5.5: ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΝΗΣΗΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ- (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΚΙΝΟΥ- (ΔΕΞΙΑ) ΆΞΟΝΑΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ: ΜΠΛΕ ΔΙΑΝΥΣΜΑ.	228
ΣΧΗΜΑ 5.6: ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ. ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ #1 ΑΠΟ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ TAGUCHI ΓΙΑ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ.	229
ΣΧΗΜΑ 5.7: ΤΟ ΎΨΟΣ ΤΗΣ ΘΈΣΗΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΣΧΈΣΗ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΜΈΤΡΟ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΈΝΟ ΣΤΡΩΜΑ.	233
ΣΧΗΜΑ 5.8: ΤΟΜΗ ΤΩΝ ΚΟΣΚΙΝΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΓΩΝΙΑ ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ (Α) 1°, (Β) 4°, (C) 7°.	237
ΣΧΗΜΑ 5.9: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΛΈΓΜΑΤΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ: D-ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΥΡΜΑΤΟΣ Η ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ, W-ΠΛΑΤΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ, Ρ- ΒΉΜΑ ΠΛΈΓΜΑΤΟΣ.	238
ΣΧΗΜΑ 5.10: MEANS PLOTS OF THE FOUR QUALITY CRITERIA OF THE POWDER SIEVING TAGUCHI ANALYSIS.	241
ΣΧΗΜΑ 5.11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΛΟΓΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΘΟΡΥΒΟ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ TAGUCHI ΓΙΑ ΤΟ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ ΣΚΟΝΗΣ.	242
ΣΧΗΜΑ 5.12: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΕΣΟΥΣ ΟΡΟΥΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑΤΟΣ.	243
ΣΧΗΜΑ 5.13: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΜΈΣΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑΤΟΣ.	246
ΣΧΗΜΑ 5.14: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΈΣΟΥΣ ΟΡΟΥΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΚΟΣΚΙΝΙΣΗΣ.	249
ΣΧΗΜΑ 5.15: ΓΡΑΦΉΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΜΈΣ LESR: (Α) $F_{VIB-HBF}$; (Β) $F_{VIB-A_{VIB}}$.	250
ΣΧΗΜΑ 5.16: ΤΟΜΗ ΤΩΝ ΚΟΣΚΙΝΩΝ ΜΕ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ. ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΥ ΚΟΣΚΙΝΟΥ ΕΙΝΑΙ 100 ΜΜ. ΓΩΝΙΑ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗΣ ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ: (Α) 1°, (Β) 4°, (C) 7°.	254
ΣΧΗΜΑ 5.17: ΤΟΜΗ ΤΩΝ ΚΟΣΚΙΝΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ. ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΥ ΚΟΣΚΙΝΟΥ ΕΙΝΑΙ 100 ΜΜ. ΓΩΝΙΑ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗΣ ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ: (Α) 1°, (Β) 4°, (C) 7°.	254
ΣΧΗΜΑ 5.18: ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΜΕ: (Α) ΛΕΠΙΔΑ ΧΩΡΙΣ ΔΟΝΗΣΗ; (Β) ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΚΟΣΚΙΝΙΣΗ; (C) ΔΟΝΟΥΜΕΝΗ ΛΕΠΙΔΑ.	266

ΣΧΗΜΑ 6.1: ΤΥΠΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΛΙΚΩΝ; (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΣΤΡΩΜΑ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ (ΔΕΞΙΑ) ΣΤΡΩΜΑ ΤΡΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	276
ΣΧΗΜΑ 6.2: (Α) ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ; (Β)- (C) ΠΟΛΥΪΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΟΤΙΒΟΥ; (D) ΜΟΝΟΪΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΟΤΙΒΟΥ.....	280
ΣΧΗΜΑ 6.3: ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΥΝΟΡΩΝ.....	281
ΣΧΗΜΑ 6.4: ΕΙΔΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.....	282
ΣΧΗΜΑ 6.5: ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΡΙΘΜΗΣΗΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ.....	282
ΣΧΗΜΑ 6.6: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Χ-ΑΞΟΝΑ ΜΟΤΙΒΟΥ 2 ΥΛΙΚΩΝ: (Α)-(Κ): ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	286
ΣΧΗΜΑ 6.7: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Χ-ΑΞΟΝΑ ΜΟΤΙΒΟΥ 3 ΥΛΙΚΩΝ: (Α)-(Ο): ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	289
ΣΧΗΜΑ 6.8: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΘΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ C-ΓΛΩΣΣΑΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ D.....	290
ΣΧΗΜΑ 6.9: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΘΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ C-ΓΛΩΣΣΑΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ E.....	293
ΣΧΗΜΑ 6.10: ΤΥΠΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΡΗΤΗ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑΤΟΣ: (ΠΑΝΩ) ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΝΤΙΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ, (ΚΑΤΩ) ΟΔΗΓΙΕΣ ΟΡΘΗΣ ΧΡΗΣΗΣ.....	297
ΣΧΗΜΑ 6.11: ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΠΛΟΥ ΜΕΤΡΗΤΗ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑΤΟΣ. ΤΑ ΜΕΤΩΠΑ ΣΧΗΜΑΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕΣΩ ΣΩΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΛΕΠΙΔΩΝ. ΦΑΙΝΕΤΑΙ Η ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 6.6(A), 6.7(A).....	299
ΣΧΗΜΑ 6.12: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑ 3D CAD (SOLIDWORKS™) ΤΗΣ ΙΔΙΟΣΥΣΚΕΥΗΣ ΠΟΛΥΪΚΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ: (Α) CAD ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΌΨΗ, (Β) ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ; (C) ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΠΛΑΓΙΑ ΌΨΗ, (D) ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΌΨΗ.....	300
ΣΧΗΜΑ 6.13: ΣΦΑΛΜΑ ΛΟΓΩ ΠΑΧΟΥΣ ΛΕΠΙΔΩΝ ΣΤΗΝ ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Χ-ΑΞΟΝΑ.....	301
ΣΧΗΜΑ 6.14: ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Υ-ΑΞΟΝΑ: (Α) ΤΗΣ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 6.13, (Β) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΛΕΠΙΔΩΝ ΠΡΟΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΤΗΣ 5 ^{ης} ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗΣ (ΓΑΛΑΖΙΟ) ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 6.14(A), (C) ΚΑΤΟΨΗ ΤΗΣ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 6.14(B).....	303
ΣΧΗΜΑ 6.15: ΠΕΤΡΑΜΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΠΟΛΥΪΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΑΡΟΜΟΙΟΥ ΜΟΤΙΒΟΥ ΜΕ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 6.18. (A-B-C) ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΑ, (D-E-F) ΒΗΜΑ 1, (G-H-I) ΒΗΜΑ 2, (J-K-L) ΒΗΜΑ 3, (M-N-O) ΤΕΛΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ.....	307
ΣΧΗΜΑ 6.16: CIRCULAR PATTERN IDENTIFICATION VIA HOUGH CIRCLE TRANSFORM.....	309
ΣΧΗΜΑ 6.17: ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ ΤΟΜΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ 3D CAD (SOLIDWORKS™) ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΠΟΛΥΪΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΚΟΝΗΣ.....	311
ΣΧΗΜΑ 6.18: ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Χ-ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΙΚΟΥ ΜΟΤΙΒΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ: (Α) ΒΗΜΑ 1, (Β) ΒΗΜΑ 2, (C) ΒΗΜΑ 3 ΤΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	314
ΣΧΗΜΑ 6.19: ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΤΟΜΕΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΎΨΟΥΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥΪΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ: (Α) 100%, (Β) 87.5%, (C) 75%, (D) 62.5%, (E) 50%, (F) 37.5%, (G) 25%, (H) 12.5%.....	324
ΣΧΗΜΑ 6.20: ΚΑΤΟΨΗ ΚΑΙ ΠΛΑΓΙΑ ΌΨΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΪΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟ.....	327

1 Εισαγωγή

1.1 Προσθετική Κατασκευή

Ο όρος προσθετική κατασκευή περιέχει κάθε διαδικασία που βασίζεται στην ανάπτυξη ενός αντικειμένου μέσω σταδιακής προσθήκης υλικού, σε αντίθεση με τις κατεργασίες αποβολής υλικού. Συνήθως αυτό συμβαίνει προσθέτοντας υλικό στρώμα-στρώμα. Σύλληψη της μεθόδου έγινε από τον Δρ. Hideo Kodama [1], εφευρέτη της «μηχανής παραγωγής πρωτοτύπων», το 1981, μέσω συνδυασμού τρισδιάστατων τοπογραφικών χαρτών και τρισδιάστατης σάρωσης.

Το ISO/ASTM 52900 ορίζει 7 κύριες τεχνολογίες ΠΚ [2]:

1. Ψεκάσμος Συγκολλητικής Ουσίας (ΨΣΟ), η οποία παράγει τεμάχια μέσω επιλεκτικού ψεκάσμου ενός υγρού συγκολλητικού παράγοντα σε συγκεκριμένα σημεία ενός κρεβατιού πούδρας.
2. Εναπόθεση με Κατευθυνόμενη Ενεργειακή Δέσμη (ΕΚΕΔ), η οποία παράγει τεμάχια μέσω εξώθησης σκόνης ή σύρματος διαμέσου ακροφυσίου και τήξης του υλικού με μία συγκεντρωμένη ενεργειακή δέσμη, στο επιθυμητό σημείο.
3. Εξώθηση Υλικού (ΕΥ), η οποία παράγει τεμάχια με συνεχή, μέσω ακροφυσίου, εναπόθεση τήγματος νημάτων θερμοπλαστικού, το οποίο κρύνει και επαναστερεοποιείται.
4. Ψεκάσμος Υλικού (ΨΥ), η οποία παράγει τεμάχια μέσω επιλεκτικού ψεκάσμου υλικού σε υγρή μορφή και άμεσης φωτοσκλήρυνσης των σταγονιδίων μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας.
5. Σύντηξη Κλίνης Πούδρας (ΣΚΠ), η οποία παράγει τεμάχια μέσω επιλεκτικής συσσωμάτωσης ή τήξης σωματιδίων πούδρας που έχει εναποτεθεί σε τράπεζα κατασκευής.
6. Επαλληλία Φύλλων (ΕΦ), η οποία παράγει τεμάχια μέσω σώρευσης πολύ λεπτών φύλλων υλικού και συγκόλλησής τους.

7. Φωτοπολυμερισμός Ρητίνης (ΦΡ), η οποία παράγει τεμάχια μέσω επιλεκτικής έκθεσης υγρών φωτοπολυμερών ρητινών εντός ειδικού δοχείου σε υπεριώδη ακτινοβολία.

Αρχικά, το δυνατό σημείο των κατεργασιών ΠΚ ήταν η δυνατότητα να δημιουργούν τεμάχια που περιέχουν σύνθετες γεωμετρίες, όπως κλειστές κοιλότητες και προβόλους. Για αυτό το λόγο και η ΠΚ ελαχιστοποίησε τον αριθμό των τεμαχίων σε συναρμογές, μειώνοντας τις περιοχές υψηλού κινδύνου αστοχίας.

Η ΠΚ είναι πιο αποτελεσματική και λιγότερο κοστοβόρα αναφορικά με τη μεσαία παραγωγή, κυρίως λόγω της απουσίας κοπτικών εργαλείων.

Επιπλέον, η μεγάλη ποικιλία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, από σκόνη έως υγρό και στερεό, παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας λειτουργικά διαβαθμισμένων υλικών [3]. Είναι επίσης πιο αποδοτικές ως προς το χρόνο, καθώς μπορούν να αναπτύξουν σύνθετα εξαρτήματα απευθείας από ένα αρχείο 3D CAD με μία μόνο ρύθμιση της μηχανής, σε αντίθεση με τη συμβατική κατεργασία, όπου μπορεί να απαιτούνται πολλαπλές ρυθμίσεις και διάφοροι τρόποι συγκράτησης για την ανάπτυξη ενός τεμαχίου. Οι λιγότερες αλλαγές στη συγκράτηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυξάνουν επίσης τη διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου [4]. Τέλος, οι κατεργασίες ΠΚ παράγουν ελάχιστα απόβλητα, δεδομένου ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα υλικά είναι εύκολα ανακυκλώσιμα ή και άμεσα επαναχρησιμοποιήσιμα.

Παρά τη ραγδαία εξέλιξη που έχουν υποστεί οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζονται προκειμένου να μετατραπουν από μέσα ταχείας προτυποποίησης σε βιομηχανικές διαδικασίες κατασκευής υψηλής παραγωγής δεν έχουν ακόμη εξαλειφθεί. Η περιορισμένη ταχύτητα με την οποία κατασκευάζονται τα στρώματα, το υψηλό κόστος για την ανάπτυξη μεγάλων δομών και η υψηλή ενέργεια που απαιτείται για την τροφοδοσία των μηχανών AM κατά τη διάρκεια μεγάλων κύκλων παραγωγής, σε συνδυασμό με ζητήματα ποιότητας των εξαρτημάτων, όπως το φαινόμενο της σκάλας, το οποίο αποτελεί το σήμα κατατεθέν των ελαττωμάτων των εξαρτημάτων που παράγονται με AM, πρέπει ακόμη να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά. Ωστόσο, η άνοδος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η υβριδοποίηση της διαδικασίας με τις κατεργασίες αποβολής υλικού και ακόμη και η 4D εκτύπωση, δηλαδή η AM όπου τα αναπτυσσόμενα εξαρτήματα

μπορούν να προσαρμοστούν σε εξωτερικές παραμέτρους, όπως η πίεση, η υγρασία, η πίεση κ.λπ. προσφέρουν πολλές δυνατότητες [3].

1.2 Προσθετική Κατασκευή με Σύντηξη Κλίνης Πούδρας

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ΠΚ μέσω Σύντηξης Κλίνης Πούδρας (ΣΚΠ). Οι κατεργασίες ΣΠ περιλαμβάνουν [5]–[8]:

1. Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ (ΕΠΛ)
2. Επιλεκτική Τήξη με Λείζερ (ΕΤΛ)
3. Ευθεία Πυροσυσσωμάτωση Μετάλλου με Λείζερ (ΕΠΜΛ)
4. Επιλεκτική Θερμική Πυροσυσσωμάτωση (ΕΘΠ)
5. Τήξη μέσω Δέσμης Ηλεκτρονίων (ΤΔΗ)
6. Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση μέσω Φωτοαπορρόφησης Λείζερ (ΕΠΦΛ) ή Πυροσυσσωμάτωση Υψηλής-Ταχύτητας (ΠΥΤ)

Όλες αυτές οι κατεργασίες περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μιας ομοιόμορφης, ομοιογενούς στρώσης σκόνης με προκαθορισμένο πάχος. Στη συνέχεια, οι μόνες πτυχές της διαδικασίας που διαφέρουν είναι η μέθοδος παγίωσης των σωματιδίων και η πηγή ενέργειας.

Η ΕΠΛ λιώνει μερικώς τις σκόνες πολυμερών μέσω δέσμης λέιζερ CO₂, ενώ η ΕΤΛ/ΕΠΜΛ λιώνει πλήρως/μερικώς τις σκόνες μετάλλων, συνήθως χρησιμοποιώντας δέσμες λέιζερ Nd:YAG. Επιπλέον, οι ΕΤΛ/ΕΠΜΛ αναγκάζονται να δημιουργήσουν κενό στο θάλαμο κατασκευής και στη συνέχεια να τον γεμίσουν με αδρανές αέριο, προκειμένου να αποφευχθεί η οξείδωση της σκόνης, κάτι που δεν αποτελεί πρόβλημα με τις πολυμερείς σκόνες που χρησιμοποιούνται στην ΕΠΛ.

Η ΤΔΗ είναι παρόμοια με την ΕΤΛ, με μόνη διαφορά την πηγή ενέργειας (δέσμη ηλεκτρονίων αντί για δέσμη λέιζερ). Ομοίως, η ΕΘΠ είναι συγκρίσιμη με την ΕΠΛ, με τη διαφορά να είναι και πάλι η πηγή ενέργειας (θερμική κεφαλή εκτύπωσης αντί για δέσμη λέιζερ). Ωστόσο, οι θερμικές κεφαλές εκτύπωσης είναι φθηνότερες σε σύγκριση

με τις πηγές λέιζερ, επομένως η ΕΘΠ απαιτεί μικρότερο αρχικό προϋπολογισμό για να είναι έτοιμη να εκτυπώσει αντικείμενα.

Τα ΕΠΦΛ/ΠΥΤ συνδυάζουν τον ΨΣΟ με τη ΣΚΠ- αρχικά, μια κεφαλή εκτύπωσης inkjet εναποθέτει επιλεκτικά ένα υλικό που απορροφά την ακτινοβολία στην κλίνη σκόνης. Στη συνέχεια, μια υπέρυθρη λυχνία ακτινοβολεί ολόκληρη την επιφάνεια. Ο ΨΣΟ δεν ταξινομείται ως κατεργασία ΣΚΠ, δεδομένου ότι, παρά το γεγονός ότι περιλαμβάνει εναπόθεση σε κλίνη σκόνης, δεν περιλαμβάνει μερική ή ολική τήξη και επακόλουθη σύντηξη των σωματιδίων μέσω μιας πηγής ενέργειας.

Πίνακας 1.1: Κατηγοριοποίηση κατεργασιών ΣΚΠ.

Κατεργασία ΣΚΠ	Ακρωνύμιο	Πηγή Ισχύος	Υλικό	Βαθμός τήξης Κόκκου	Μέθοδος Συσσωμάτωσης	Εφευρέτης	Ημερομηνία Επινόησης
Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ	ΕΠΑ	Δέσμη λέιζερ	Πολυμερές	Μερικός	Επαναστερεοποίηση	Carl Deckard, University of Texas, USA [4]	1984
Επιλεκτική Τήξη με Λείζερ	ΕΤΑ	Δέσμη λέιζερ	Μέταλλο	Πλήρης	Επαναστερεοποίηση	Dieter Schwarze and Matthias Fockele, Fraunhofer Institute ILT, Aachen, Germany [9]	1995
Ευθεία Πυροσυσσωμάτωση Μετάλλου με Λείζερ	ΕΠΜΑ	Δέσμη λέιζερ	Μέταλλο	Μερικός	Επαναστερεοποίηση		
Επιλεκτική Θερμική Πυροσυσσωμάτωση	ΕΘΠ	Θερμική κεφαλή εκτύπωσης	Πολυμερές	Μερικός	Επαναστερεοποίηση	Frederik Tjellesen and Anders Hartmann, Blueprinter™, Denmark [10]	2011
Τήξη μέσω Δέσμης Ηλεκτρονίων	ΤΔΗ	Δέσμη ηλεκτρονίων	Μέταλλο	Πλήρης	Επαναστερεοποίηση	Arcam AB Corporation, Sweden [11]	1997
Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση μέσω Φωτοαπορρόφησης Λείζερ / Πυροσυσσωμάτωση Υψηλής-Ταχύτητας	ΕΠΦΛ/ΠΥΤ	Δέσμη λέιζερ	Si, ZrO ₂ , Cr, Cr ₂ O ₃	Μερικός	Επαναστερεοποίηση, με ταυτόχρονη χημική μετατροπή στερεών πρόδρομων ουσιών	Neil Hopkinson, Loughborough University, UK [12]	2003

Όλες οι διεργασίες ΣΚΠ εφαρμόζουν θέρμανση του υποστρώματος προκειμένου να προθερμανθεί η σκόνη και να μειωθούν οι παραμένουσες τάσεις και η παραμόρφωση/κάμψη του εξαρτήματος.

Ένα κοινό πλεονέκτημα των διεργασιών ΣΚΠ είναι ότι παρέχουν τη δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων δομών, όπως κλειστές κοιλότητες και προεξοχές, με ελάχιστη ή καθόλου κατασκευή στήριξης, καθώς τα προηγούμενα στρώματα σκόνης παρέχουν αρκετή στήριξη, εκτός εάν χρησιμοποιούνται υλικά πολύ υψηλής πυκνότητας.

Ο Πίνακας 1.1 συνοψίζει τις διαφορές μεταξύ των μεθόδων ΣΚΠ, καθώς και την ημερομηνία σύλληψης και τους εφευρέτες τους.

1.3 Πλαίσιο Διδακτορικής Διατριβής

Έχουν περάσει 40 χρόνια από την εφεύρεση της ΣΚΠ (ΕΠΛ, 1984) και, όπως κάθε νεοεμφανιζόμενη τεχνολογία, αρχικά διαφημίστηκε ως «επαναστατική». Ο κύκλος «Hype Cycle» της Gartner είναι ένα εργαλείο που αναπτύχθηκε για να ανιχνεύει αν μια τεχνολογία είναι αρκετά ώριμη ώστε να είναι αποτελεσματική για βιομηχανική χρήση ή όχι. Αποτελείται από 5 στάδια:

1. Αφορμή για καινοτομία: Μια τεχνολογική ανακάλυψη μόλις πρόσφατα έγινε γνωστή στο κοινό, ωστόσο δεν έχει ακόμη καμία πρακτική εφαρμογή.
2. Κορυφή των διογκωμένων προσδοκιών: Κάποιες επιτυχημένες μελέτες ενισχύουν τη διαφημιστική εκστρατεία, ενώ οι αποτυχίες μερικές φορές αποκρύπτονται.
3. Πυθμένας της απογοήτευσης: Η αργή πρόοδος κάνει την τεχνολογία να φαίνεται αποτυχημένη, με αποτέλεσμα να μειώνεται η χρηματοδότηση και το ενδιαφέρον των εταιρειών.
4. Κλίση του Διαφωτισμού: Η χρηματοδότηση αρχίζει να επιστρέφει.
5. Οροπέδιο παραγωγικότητας: Οι ρεαλιστικές προσδοκίες του κοινού δημιουργούν ένα υγιές περιβάλλον για ευρεία χρήση.

Ο Πίνακας 1.2 δείχνει την εξέλιξη της ωριμότητας των κατεργασιών ΣΚΠ.

Σήμερα, το 2024, οι κατεργασίες ΣΚΠ ωριμάζουν με ταχείς ρυθμούς, φτάνοντας στο στάδιο όπου αναπτύσσονται ρεαλιστικές βιομηχανικές εφαρμογές και εταιρείες όπως

η Siemens και η BMW επενδύουν σταθερά και αναπτύσσουν μεγάλα κέντρα ΠΚ [13]. Ως εκ τούτου, υπάρχουν ακόμη τομείς έρευνας για τη βελτιστοποίηση των κατεργασιών ΣΚΠ μέχρι να πραγματοποιήσουν τις δυνατότητές τους.

Πίνακας 1.2: Στάδια του Gartner Hype Cycle για τις κατεργασίες ΣΚΠ.

	Αφορμή για καινοτομία	Κορυφή των διογκωμένων προσδοκιών	Πυθμένας της απογοήτευσης	Κλίση του Διαφωτισμού	Οροπέδιο παραγωγικότητας
Ημερομηνία	1984-2010 (προσεγγιστικά)	2017	2018-2020 (προσεγγιστικά)	2020 (προσεγγιστικά)- σήμερα	(δεν έχει επιτευχθεί ακόμη, πλησιάζει γρήγορα)
Αναφορές	[4], [14]	[15]	[16]	[13]	[13]

1.3.1 Συμβολή της Διατριβής

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται σε μια συγκεκριμένη πτυχή των διεργασιών ΣΚΠ: την εναπόθεση σκόνης. Η εναπόθεση σκόνης είναι υψίστης σημασίας, δεδομένου ότι η ποιότητα της κλίνης πούδρας είναι μία από τις παραμέτρους που επηρεάζουν δραστικά την ποιότητα των τελικών προϊόντων όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, η αντοχή σε εφελκυσμό, η σκληρότητα, η ψαθυρότητα, η πυκνότητα κ.λπ. [8]

Πίνακας 1.3: Κατηγοριοποίηση παραμέτρων κατεργασίας ΣΚΠ με λέιζερ.

Παράμετροι κατεργασιών ΣΚΠ			
Σχετικοί με δέσμη λέιζερ	Σχετικοί με τρόπο σάρωσης	Σχετικοί με πούδρα	Σχετικοί με θερμοκρασία
Ισχύς δέσμης	Ταχύτητα σάρωσης	Κατανομή μεγέθους κόκκων	Θερμοκρασία κλίνης πούδρας (θερμαινόμενη τράπεζα)
Μήκος κύματος	Μοτίβο σάρωσης	Σχήμα σωματιδίων	Θερμοκρασία τροφοδότη πούδρας
Διάμετρος ίχνους	Απόσταση σάρωσης	Βαθμός συμπίεσης κλίνης πούδρας	Θερμοκρασιακή ομοιομορφία
Διάρκεια παλμού		Πάχος στρώσης	
Συχνότητα παλμού		Ιδιότητες υλικού	

Ο Πίνακας 1.3 παρουσιάζει μια κατηγοριοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας ΣΚΠ με λείζερ.

Οι διεργασίες PBF είναι εξαιρετικά πολύπλοκες και οι παράμετροι της διεργασίας αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, επηρεάζοντας το τελικό προϊόν με απροσδόκητους τρόπους. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην εναπόθεση σκόνης, δεδομένου ότι αποτελεί τη λιγότερο αναλυμένη κατηγορία παραμέτρων κατεργασίας στη βιβλιογραφία.

Το σημείο εκκίνησης αυτής της εργασίας (κεφάλαιο 2) ήταν η δημιουργία μιας βιβλιογραφικής ανασκόπησης της εναπόθεσης σκόνης για κατεργασίες ΣΚΠ, καθώς υπήρχε ένα αναγνωρισμένο κενό στη βιβλιογραφία. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που αναπτύχθηκε παρέχει μια συστηματική μέθοδο σύνδεσης των παραμέτρων της κατεργασίας που σχετίζονται με την εναπόθεση πούδρας με τα κριτήρια ποιότητας του στρώματος πούδρας και, τελικά, με τα κριτήρια ποιότητας του τελικού τεμαχίου. Αρχικά, προσδιορίστηκε κάθε παράμετρος που επηρεάζει τη διαδικασία εναπόθεσης σκόνης. Δεύτερον, καθορίστηκαν τα κριτήρια ποιότητας για το στρώμα πούδρας που δεν έχει πυροσυσσωματωθεί/λιωθεί, καθώς και οι τρόποι παρακολούθησης αυτών. Τέλος, προσδιορίστηκαν τα κριτήρια ποιότητας που χαρακτηρίζουν το τελικό τεμάχιο και τις μηχανικές του ιδιότητες. Η σχέση μεταξύ των παραμέτρων της διεργασίας, της ποιότητας του απλωμένου στρώματος σκόνης και της ποιότητας του τελικού τεμαχίου καθορίστηκε διαδοχικά. Με τον τρόπο αυτό εξετάστηκε το θέμα της επανεπίστρωσης στρώματος σκόνης και ξετυλίχθηκαν οι ασαφείς σχέσεις μεταξύ των πτυχών του, δημιουργώντας έναν οδηγό στον οποίο μπορούν να ανατρέχουν οι ερευνητές για κάθε ζήτημα που ενδεχομένως προκύπτει σχετικά με την εναπόθεση σκόνης.

Αυτή η ανασκόπηση αποτέλεσε τη βάση για το καινοτόμο έργο που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

Η διαδικασία εναπόθεσης πούδρας ξεκινά με το ίδιο το σύστημα εναπόθεσης/επανεπίστρωσης πούδρας (ΣΕΠ). Στο κεφάλαιο 3, χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (ΔΑΙ/Analytic Hierarchy Process-AHP) για τη σύγκριση διαφόρων μεθόδων εναπόθεσης σκόνης μεταξύ τους, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Αυτό παρείχε μια μετρήσιμη βάση που απέδειξε πώς η μηχανική εναπόθεση σκόνης είναι πράγματι ανώτερη από άλλες μεθόδους. Επιπλέον, σχεδιάστηκε ένα πρωτότυπο ΣΕΠ και η λειτουργικότητα και τα χαρακτηριστικά του συγκρίθηκαν με το

ΣΕΠ αναφοράς, και πάλι μέσω της ΑΗΡ. Δεν βρέθηκαν παρόμοιες εργασίες στη βιβλιογραφία όπου να εφαρμόστηκε μια συστηματική στατιστική μέθοδος για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός ΣΕΠ. Η ποιότητα του σχεδιασμένου ΣΕΠ όσον αφορά την επίτευξη στρωμάτων ικανοποιητικής επιφανειακής τραχύτητας και ακρίβειας του πάχους στρώματος αξιολογήθηκε μέσω τρισδιάστατης σάρωσης με λευκό φως των στρωμάτων σκόνης και εξαγωγής προφίλ στρώματος μέσω του νέφους σημείων που δημιουργήθηκε μέσω της σάρωσης. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε μια στιβαρή μέθοδος για την αξιολόγηση κάθε σχεδιασμού ΣΕΠ με βάση την απόδοσή του σε σχέση με το κοινό βιομηχανικό πρότυπο, η οποία είναι αρκετά ευέλικτη, δεδομένου ότι η βαθμολόγηση των κριτηρίων είναι υποκειμενική και μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τους στόχους και τις ανάγκες κάθε ερευνητή.

Στη συνέχεια, η εναπόθεση σκόνης μέσω μιας κάθετα δονούμενης οδηγού λεπίδας μοντελοποιήθηκε σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης ΜΔΣ (EDEM, της Altair) και προσομοιώθηκε για διάφορες τιμές της ταχύτητας επανεπίστρωσης, του πλάτους και της συχνότητας δόνησης και της γωνίας ελευθερίας της ΟΛ (κεφάλαιο 4). Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν μετά από σχεδιασμό πειραμάτων Taguchi προκειμένου να οργανωθεί συστηματικά και να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των δοκιμών. Το παραγόμενο στρώμα αξιολογήθηκε με βάση τα κριτήρια που καθορίστηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση μέσω του εξαγόμενου από το περιβάλλον προσομοίωσης αρχείου αποτελεσμάτων. Αποδείχθηκε ότι η λοξότητα (Ssk) και η κύρτωση (Sku) είναι ενδεικτικές της ποιότητας του στρώματος σκόνης, που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς σταθμισμένους μέσους όρους των προκαθορισμένων κριτηρίων ποιότητας. Αυτό επιτρέπει στους ερευνητές να αξιολογούν εύκολα την ποιότητα του στρώματος εξετάζοντας μόνο μία επιφανειακή παράμετρο αντί για πολλές παραμέτρους, μετατρέποντας ένα επίπονο έργο ταυτόχρονης βελτιστοποίησης σε ένα τετριμμένο έργο μονής βελτιστοποίησης. Επιπλέον, αποδείχθηκε η θετική επίδραση της δόνησης της ΟΛ, μια πτυχή που δεν είχε εξεταστεί στη βιβλιογραφία εξ όσων γνωρίζει ο συγγραφέας.

Η μέθοδος κοσκινίσματος της σκόνης μοντελοποιήθηκε επίσης στο ίδιο περιβάλλον ΜΔΣ και προσομοιώθηκε, επίσης χρησιμοποιώντας ένα σχεδιασμό πειραμάτων Taguchi για τους ίδιους λόγους (Κεφάλαιο 5). Οι παράμετροι της διαδικασίας κοσκινίσματος ήταν το πλάτος και η συχνότητα της κατακόρυφης ταλάντωσης του κόσκινου, η ποσότητα της φορτωμένης σκόνης και η γωνία κωνικότητας του

ανοίγματος του κόσκινου. Το κοσκίνισμα δεν έχει εξεταστεί στη βιβλιογραφία ως μέσο εναπόθεσης σκόνης ή ως μέσο φιλτραρίσματος συσσωματωμάτων και μεγαλύτερων σωματιδίων για την εξασφάλιση υψηλότερης ποιότητας κλίνης σκόνης. Στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε ότι, με την κατάλληλη βαθμονόμηση των προαναφερθέντων παραμέτρων κοσκινίσματος, είναι δυνατή ακόμη και η εναπόθεση στρώσεων σκόνης έτοιμων για ΣΚΠ σε ποιότητα συγκρίσιμη με εκείνη που απλώνεται με μη ταλαντευόμενη ΟΛ, γεγονός που θα αύξανε κατά πολύ την ταχύτητα εναπόθεσης σκόνης και θα μείωνε τον συνολικό χρόνο κατασκευής.

Το κίνητρο για το Κεφάλαιο 6 ήταν το κενό που εντοπίστηκε στις μεθόδους εναπόθεσης πολλαπλών υλικών, δηλαδή στις μεθόδους δημιουργίας μεμονωμένων στρώσεων που περιλαμβάνουν διάφορους τύπους σκόνης σε ένα στρώμα τύπου μωσαϊκού. Η έλλειψη αποτελεσματικών τρόπων καθορισμού των ορίων της σκόνης σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι λίγες μέθοδοι που υπάρχουν είναι κλειδωμένες με πατέντες ή βασίζονται σε ακροφύσια, οδηγούν είτε σε κακή ποιότητα επιφάνειας είτε σε πολύ αργή εναπόθεση. Προτάθηκε μια μέθοδος που βασίζεται σε ένα σύστημα διπλού μετρητή περιγράμματος. Πριν από τον σχεδιασμό του συστήματος, γράφτηκαν και δοκιμάστηκαν κώδικες G που εκτελούν την κατάτμηση της επιφάνειας πολλαπλών υλικών σε πολλές υπο-επιφάνειες ενός υλικού. Ο σχεδιασμός μίας ιδιοκατασκευής αξιολόγησε πειραματικά την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου, παρέχοντας καλή προσέγγιση των προκαθορισμένων καμπυλών ορίων και αποδεκτή ποιότητα στρώματος, ακόμη και με απόθεση με κόσκινο. Χρησιμοποιήθηκε μια προσομοίωση ΜΔΣ, αξιοποιώντας τις βελτιστοποιημένες ρυθμίσεις απλώματος με ΟΛ και κοσκινίσματος που καθορίστηκαν στα δύο προηγούμενα κεφάλαια. Αυτό απέδειξε τις δυνατότητες της μεθόδου, ανοίγοντας το δρόμο για την πραγματική εφαρμογή του συστήματος και τον πειραματικό έλεγχο.

1.4 Δομή της Διατριβής

Στην παράγραφο 1.3 παρατίθενται τα κίνητρα και το καινοτόμο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή, η παρούσα διατριβή χωρίζεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 1, παρέχεται μια σύντομη εισαγωγή σχετικά με την ΠΚ και συγκεκριμένα με τις διαδικασίες ΣΚΠ, καθώς και το πεδίο εφαρμογής, η συμβολή και τα προοδευτικά κίνητρα της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2, παρέχεται μια λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση που επικεντρώνεται στην εναπόθεση στρώματος σκόνης με στόχο τις διεργασίες ΣΚΠ. Η ανάλυση χωρίζεται στις παραμέτρους της διαδικασίας εναπόθεσης σκόνης, στα κριτήρια ποιότητας στρώματος σκόνης και στα κριτήρια ποιότητας τελικού τεμαχίου και συνδέει διαδοχικά αυτές τις τρεις κατηγορίες.

Στο κεφάλαιο 3 παρέχεται μια σύγκριση με βάση την ΑΗΡ των μεθόδων εναπόθεσης σκόνης που υπάρχουν. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πρωτότυπου ΣΕΠ και ο σχεδιασμός συγκρίνεται, και πάλι μέσω ΑΗΡ, με ένα κοινό, βιομηχανικά χρησιμοποιούμενο ΣΕΠ.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η εργασία που έχει γίνει σε προσομοιώσεις ΜΔΣ για την εναπόθεση σκόνης με ΟΛ. Οι προσομοιώσεις εξετάζουν έναν κατακόρυφα δονούμενο επιστρωτήρα με ΟΛ. Τα κριτήρια ποιότητας του επιφανειακού στρώματος ορίζονται μαθηματικά και υπολογίζονται αριθμητικά μέσω αρχείων που εξάγονται από την προσομοίωση. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων διασποράς παρουσιάζονται μέσω σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi και συνακόλουθης ANOVA.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η εργασία που έχει γίνει σε προσομοιώσεις ΜΔΣ για το κοσκίνισμα σκόνης. Οι προσομοιώσεις εξετάζουν ένα κατακόρυφα δονούμενο κόσκινο με διάφορα σχήματα οπής. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοσκινίσματος παρουσιάζονται μέσω σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi και της συνακόλουθης ANOVA. Στη συνέχεια, η διαδικασία κοσκινίσματος εξετάζεται ως μέθοδος εναπόθεσης σκόνης για την παραγωγή στρώσεων έτοιμων για ΣΚΠ μέσω των κριτηρίων ποιότητας στρώσεων που ορίζονται στο Κεφάλαιο 4. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε σύγκριση με την εναπόθεση με τη βοήθεια δονούμενης ΟΛ.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος για την εναπόθεση στρωμάτων σκόνης πολλαπλών υλικών με βάση τον σχεδιασμό διπλού μετρητή περιγράμματος. Ο διαχωρισμός του στρώματος σε πολλές μονοϋλικές υπο-επιφάνειες ορίζεται μαθηματικά και υπολογίζεται αριθμητικά. Η βιωσιμότητα του συστήματος διπλού

μετρητή περιγράμματος εξετάζεται μέσω πειραμάτων σε πειραματική ιδιοκατασκευή και μέσω προσομοιώσεων ΜΔΣ χρησιμοποιώντας τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους εναπόθεσης και κοσκινίσματος που ορίζονται στο Κεφάλαιο 4 και στο Κεφάλαιο 5 αντίστοιχα. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και αποδεικνύεται η βιωσιμότητα της μεθόδου.

Τέλος, το Κεφάλαιο 7 συνοψίζει τα επιτεύγματα, τα ευρήματα, τις ανακαλύψεις και τους περιορισμούς της εργασίας, διατυπώνοντας προτάσεις για βελτιώσεις και μελλοντικές εργασίες.

2 Βιβλιογραφική Έρευνα

Μία από τις πιο σημαντικές πτυχές των διεργασιών σύντηξης κλίνης πούδρας (ΣΚΠ) είναι η εναπόθεση του στρώματος σκόνης. Το στρώμα σκόνης πρέπει να εφαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλότητα και η ομοιογένειά του. Αυτό, με τη σειρά του, θα διασφαλίσει ότι δεν θα κληρονομηθούν στο τελικό τεμάχιο ασυνέχειες ή ελαττώματα των μη πυροσυσσωματωμένων στρωμάτων σκόνης, εσωτερικά ή επιφανειακά, τα οποία θα επηρεάσουν αρνητικά τις μηχανικές του ιδιότητες και τη διαστατική του ακρίβεια προκαλώντας δραστική υποβάθμιση της ποιότητας. Το παρόν κεφάλαιο [8] έχει ως στόχο να εξετάσει τις παραμέτρους της διαδικασίας επανεπίστρωσης σκόνης, που επηρεάζουν την ποιότητα των μη πυροσυσσωματωμένων στρώσεων σκόνης και, τελικά, την ποιότητα του τελικού τεμαχίου. Η ποιότητα του μη πυροσυσσωματωμένου στρώματος και η ποιότητα του τελικού τεμαχίου εξετάζονται μέσω ορισμένων δεικτών ποιότητας στρώματος πούδρας (ΔΠΣΠ) και δεικτών ποιότητας τελικού τεμαχίου (ΔΠΤΤ) αντίστοιχα. Η παρούσα εργασία προσδιορίζει και καταγράφει συστηματικά τις συνδέσεις μεταξύ των παραμέτρων της διεργασίας αφενός και των ΔΠΣΠ και ΔΠΤΤ αφετέρου. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι πολλαπλοί τρόποι και οι αντίστοιχες μέθοδοι που έχουν βρεθεί στη βιβλιογραφία με τους οποίους μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η ποιότητα του στρώματος πούδρας με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός. Τέλος, αποκαλύπτονται κενά στη βιβλιογραφία και γίνονται προτάσεις για μελλοντικές εργασίες στις οποίες πρέπει να δοθεί έμφαση.

2.1 Κατεργασίες ΣΚΠ

Στις κατεργασίες προσθετικής κατασκευής με κλίνη σκόνης, εναλλακτικά αποκαλούμενες κατεργασίες σύντηξης κλίνης πούδρας (ΣΚΠ), ένα τρισδιάστατο εξάρτημα κατασκευάζεται διαδοχικά, στρώμα προς στρώμα. Αρχικά, ένα λεπτό στρώμα σκόνης απλώνεται στην άνω επιφάνεια ενός εμβόλου κατασκευής που κινείται προς τα κάτω. Το πάχος αυτού του στρώματος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 30 και 150 μm . Στη συνέχεια, μια κατάλληλα ελεγχόμενη και συγκεντρωμένη ενεργειακή δέσμη,

π.χ. μια δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων, ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδρομή πλήρωσης χώρου για να πυροσυσσωματώσει ή να λιώσει τη σκόνη στις περιοχές που έχουν προκαθοριστεί από το λογισμικό τεμαχισμού. Έτσι στερεοποιείται τη σκόνη και δημιουργείται το συμπαγές υλικό του τελικού τεμαχίου. Εναλλακτικά, ένα ακροφύσιο διανέμει ένα συνδετικό υγρό (binder) πάνω στο στρώμα σκόνης που εναποτίθεται ακολουθώντας τη διαδρομή που ορίζει το λογισμικό κοπής. Στη συνέχεια, το έμβολο κατασκευής κινείται προς τα κάτω κατά ένα ύψος ίσο με το πάχος του στρώματος και ένα άλλο στρώμα σκόνης εφαρμόζεται πάνω στο προηγούμενο.

Πίνακας 2.1: Κατεργασίες ΣΚΠ.

Κατεργασία ΣΚΠ	Ακρωνύμιο	Πηγή Ισχύος	Υλικό	Βαθμός τήξης Κόκκου
Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λέιζερ	ΕΠΛ	Δέσμη λέιζερ	Πολυμερές	Μερικός
Επιλεκτική Τήξη με Λέιζερ	ΕΤΛ	Δέσμη λέιζερ	Μέταλλο	Πλήρης
Ευθεία Πυροσυσσωμάτωση Μετάλλου με Λέιζερ	ΕΠΜΛ	Δέσμη λέιζερ	Μέταλλο	Μερικός
Επιλεκτική Θερμική Πυροσυσσωμάτωση	ΕΘΠ	Θερμική κεφαλή εκτύπωσης	Πολυμερές	Μερικός
Τήξη μέσω Δέσμης Ηλεκτρονίων	ΤΔΗ	Δέσμη ηλεκτρονίων	Μέταλλο	Πλήρης
3-Dimensional Printing ή 3D Inkjet Powder ή Binder Jet Printing	3DP/ 3DIJP (BJP)	None (Κεφαλές εκτύπωσης Drop-on-Demand ή Continuous-Jet)	Οποιοδήποτε	Κανένας (υγρό συνδετικό υλικό)
Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση μέσω Φωτοαπορρόφησης Λέιζερ / Πυροσυσσωμάτωση Υψηλής-Ταχύτητας	ΕΠΦΛ/ΠΥΤ	Δέσμη λέιζερ	Si, ZrO ₂ , Cr, Cr ₂ O ₃	Μερικός, με ταυτόχρονη χημική μετατροπή στερεών πρόδρομων ουσιών.

Η μη πυροσυσσωματωμένη (ή μη λιωμένη) σκόνη λειτουργεί ως υλικό στήριξης και ακολουθείται η ίδια διαδικασία στερεοποίησης της σκόνης. Όταν ολοκληρωθεί η σάρωση κάθε στρώματος, το τελικό προϊόν απομακρύνεται από το θάλαμο σκόνης και

η μη λιωμένη σκόνη, γνωστή και ως «κείκ», απομακρύνεται μέσω τεχνικών αναρρόφησης.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι διαδικασιών ΣΚΠ. Η κατηγοριοποίηση βασίζεται στον τύπο της χρησιμοποιούμενης πηγής ενέργειας, στον τύπο σκόνης που χρησιμοποιείται και στο επίπεδο τήξης των κόκκων σκόνης που επιτυγχάνεται. Εάν οι κόκκοι της σκόνης λιώσουν πλήρως, η διαδικασία ονομάζεται «τήξη», ενώ, εάν λιώσουν μόνο εν μέρει και η τήξη γίνεται μέσω του φαινομένου «bottleneck», η διαδικασία ονομάζεται «πυροσυσσωμάτωση». Τέλος, εάν χρησιμοποιείται υγρό συνδετικό υλικό δεν υπάρχει πηγή ενέργειας και η σύντηξη συμβαίνει μέσω της στερεοποίησης του συνδετικού υλικού που δημιουργεί «γέφυρες» μεταξύ των σωματιδίων. Ως εκ τούτου, υπάρχουν επτά υποκατηγορίες κατεργασιών ΣΚΠ [17], [18], [19], [7], [20], [21], βλέπε *Πίνακα 2.1*.

Όσον αφορά τις κατεργασίες ΣΚΠ, η έρευνα επικεντρώνεται συνήθως στην αλληλεπίδραση της δέσμης λέιζερ με το υλικό σε σκόνη για την παραγωγή του τελικού εξαρτήματος. Είτε πειραματικά, είτε μέσω προσομοιώσεων, το αποτέλεσμα καταγράφεται και, στη συνέχεια, εφαρμόζεται κάποιο είδος ελέγχου στις παραμέτρους της δέσμης λέιζερ, στην ταχύτητα σάρωσης ή στο μοτίβο σάρωσης, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το αποτέλεσμα και να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου.

Ωστόσο, πολύ λιγότερη ερευνητική προσπάθεια έχει καταβληθεί για την ίδια την κλίση σκόνης. Το κοινό στοιχείο μεταξύ όλων των προαναφερθεισών υποκατηγοριών ΣΚΠ είναι η αναγκαιότητα εναπόθεσης ομοιόμορφων και ομοιογενών στρωμάτων σκόνης προκειμένου να κατασκευαστεί ένα τελικό τεμάχιο υψηλής ποιότητας. Η διαδικασία εναπόθεσης σκόνης δεν είναι εύκολο να κατανοηθεί πλήρως λόγω του υψηλού επιπέδου πολυπλοκότητάς της.

Αυτή η ανασκόπηση προσδιόρισε πέντε κύρια θέματα και τα αντίστοιχα επιμέρους θέματα που πρέπει να αναλυθούν προκειμένου να γίνει πλήρως κατανοητό το state-of-the-art στη διαδικασία διασποράς σκόνης, ως εξής:

1. Παράμετροι της διαδικασίας

1.1. Υλικό σκόνης

- 1.2. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (ΚΜΣ)
- 1.3. Σχήμα σωματιδίων (ανάλυση 2D-3D, κυκλικότητα, κυρτότητα, επιμήκυνση κ.λπ.)
- 1.4. Υλικό επιστρωτήρα
- 1.5. Σχήμα επιστρωτήρα
- 1.6. Στρατηγική επανεπίστρωσης (δηλ. παράμετροι διαδικασίας επανεπίστρωσης και διάταξη/πρότυπο διασποράς)
- 1.7. Ονομαστικό και πραγματικό πάχος στρώματος
- 1.8. Περιβαλλοντικές παράμετροι (θερμοκρασία, υγρασία κ.λπ.)
2. Η σημασία της ρευστότητας της σκόνης
3. Δείκτες ποιότητας στρώματος σκόνης (ΔΠΣΣ)
 - 3.1. Επιφανειακή τραχύτητα (ΕΤ) και κατανομή (ΚΕΤ)
 - 3.2. Βαθμός συμπίεσης στρώσης (ΒΣΣ) και κατανομή (ΚΒΣΣ)
 - 3.3. Εμφάνιση επιφανειακών ατελειών (π.χ. ρωγμές, διαχωρισμοί, κοιλότητες)
 - 3.4. Ακρίβεια επίτευξης του επιθυμητού πάχους στρώματος
4. Μέθοδοι μέτρησης των ΔΠΣΣ
5. Δείκτες ποιότητας τελικού τεμαχίου (ΔΠΤΤ)
 - 5.1. Πυκνότητα/ποσοστό πορώδους
 - 5.2. Αντοχή σε εφελκυσμό/ επιμήκυνση κατά τη θραύση
 - 5.3. Σκληρότητα
 - 5.4. Επιφανειακή τραχύτητα
 - 5.5. Διαστασιακή ακρίβεια
 - 5.6. Εμφάνιση επιφανειακών ή εσωτερικών ατελειών

Οι επόμενες ενότητες αποτελούν μια πραγματεία για καθένα από τα πέντε προαναφερθέντα κύρια θέματα.

2.2 Παράμετροι της διαδικασίας εναπόθεσης πούδρας

Οι κατεργασίες ΣΚΠ είναι πολύπλοκες, με την πολυπλοκότητα να έγκειται σε διάφορες πτυχές. Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες επικεντρώνονται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του υλικού και της πηγής ενέργειας που εκτελεί τη σύντηξη/ τήξη των σωματιδίων σκόνης. Σε πολλές εργασίες, το στρώμα σκόνης μοντελοποιείται ως ένα

συμπαγές υλικό με πυκνότητα ίση με τον σταθμισμένο μέσο όρο της πυκνότητας της πρώτης ύλης της σκόνης και του αέρα. Ωστόσο, η διαδικασία της επανεπίστρωσης/απόθεσης στρώματος πούδρας είναι υψίστης σημασίας, δεδομένου ότι η ποιότητα του στρώματος συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του τελικού τεμαχίου, οπότε μια τέτοια απλούστευση δεν είναι επαρκής για την προσομοίωση της πραγματικότητας. Στις επόμενες ενότητες, όχι μόνο καθορίζεται η σημασία κάθε παραμέτρου της ίδιας της κατεργασίας, αλλά και προσδιορίζονται οι διασυνδέσεις μεταξύ των παραμέτρων της κατεργασίας ανά ζεύγη και τεκμηριώνονται σε επιμέρους πίνακες με βάση τη βιβλιογραφία και τα συμπεράσματα των συγγραφέων. Κάθε ένας από αυτούς τους πίνακες (*Πίνακας 2.3* έως *Πίνακας 2.10*) ακολουθεί στο τέλος της ενότητας στην οποία εξετάζεται η αντίστοιχη παράμετρος κατεργασίας.

2.2.1 Υλικό Σκόνης

Αναμφισβήτητα μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους της διαδικασίας επανεπίστρωσης σε κλίνη σκόνης είναι το ίδιο το υλικό της σκόνης, καθώς καθορίζει τις εγγενείς ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του υλικού, όπως η πυκνότητα, η σκληρότητα και το μέτρο ελαστικότητας Young και το μέτρο διάτμησης των σωματιδίων της σκόνης, κ.λπ. Οι Tiwari et al. (2015) προσδιορίζουν 5 κατηγορίες υλικών κατάλληλων για την εκλεκτική πυροσυσσώματωση με λέιζερ (ΕΠΛ), η οποία είναι μία από τις επτά διεργασίες ΣΚΠ που αναφέρονται στον *Πίνακα 2.1*. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα πολυμερή, τα κεραμικά, τα μέταλλα, τα σύνθετα υλικά και τα βιοϋλικά [22]. Στον *Πίνακα 2.2* καταγράφονται ποια υλικά σκόνης, ΚΜΣ και σχήματα σωματιδίων συναντώνται σε διάφορες διεργασίες ΣΚΠ σε πολλές πρόσφατες εργασίες. Οι Singh et al. (2017) παρουσιάζουν τους κατασκευαστές εμπορικών μηχανών και τους προμηθευτές υλικών όλων των κατεργασιών ΣΚΠ που εμφανίζονται στον *Πίνακα 2.1* [23].

Πίνακας 2.2: Υλικό, κατανομή μεγέθους σωματιδίων και σχήμα σωματιδίων που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία.

Πηγή	Υλικό	Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων	Σχήμα Σωματιδίων	Κατεργασία
Ferreto et al. (2021) [24]	Fe-Mn-Si alloy (M)	$d_{50}=29.7 \mu\text{m}$, $d_{\in}(10,50) \mu\text{m}$	Σφαιρικό (κυρίως)	ΕΤΛ

Rouzé l'Alzit et al. (2021) [25]	Cu-doped HAP (CER, BM)	$d < 5 \mu\text{m}$ (εκτ. Από πάχος στρώσης)	Μη-σφαιρικό (από φωτογραφία)	ΕΠΛ
Ullsperger et al. (2021) [26]	Al-Si alloys (M)	$d_{50}=35 \mu\text{m}$, ($d_{10}=16 \mu\text{m}$, $d_{90}=56 \mu\text{m}$)	Περίπου σφαιρικό	ΕΤΛ
Pramanik et al. (2021) [27]	Fe-Co alloys (M)	Gaussian, $d_{50}=38 \mu\text{m}$, $d \in (10,100) \mu\text{m}$	Σφαιρικό	ΕΤΛ
Soundarapandiyan et al. (2021) [28]	Ti6Al4V (M)	$d_{v,10}=45 \mu\text{m}$, $d_{v,50}=69 \mu\text{m}$, $d_{v,90}=105 \mu\text{m}$ (φρέσκια) $d_{r,10}=47 \mu\text{m}$, $d_{r,50}=71 \mu\text{m}$, $d_{r,90}=107 \mu\text{m}$ (ανακυκλωμένη)	Σφαιρικό με λίγους δορυφόρους, επιμήκη και ακανόνιστα σχήματα, καθώς και σωματίδια με ανοιχτούς πόρους	ΤΔΗ
Bae et al. (2020) [29]	Al ₂ O ₃ (alumina)/ Γυαλί (COM)	$d_{50, \text{Alumina}} \approx 1 \mu\text{m}$ $d_{50, \text{Γυαλί}} = 15 \mu\text{m}$, $d_{\text{max}, \text{Γυαλί}} = 50 \mu\text{m}$ (βέλτιστος λόγος ανάμιξης Γυαλί:Alumina= 70:30)	Ακανόνιστο, εξαιρετικά γωνιώδες (θραύσμα γυαλιού) Δεν αναφέρεται (Σκόνη Alumina)	ΕΠΛ
Xianglong et al. (2021) [30]	Ανοξειδωτος χάλυβας 316L (M)	$d_{10}=20\mu\text{m}$, $d_{50}=29\mu\text{m}$, $d_{90}=45\mu\text{m}$	Σφαιρικό (παράγεται μέσω ψεκασμού με αέριο)	ΕΤΛ
Sofia et al. (2018) [31]	Γυάλινα σφαιρίδια ασβεστόλιθου και σόδας (L-S) & κεραμική σκόνη (CP) (CER)	(6 διμορφικά μείγματα) Μέση διάμετρος Sauter $d_{i,1}$ και $d_{i,2}$ (σε μm) με ζεύγη: (27,160) (L-S), (86,184) (L-S), (27,184) (L-S), (48,184) (L-S), (22.5,104.2) (CP), (51,104.2) (CP)	Σφαιρικά (γυάλινα σφαιρίδια) & ακανόνιστα με αιχμηρές άκρες (κεραμικό υλικό)	ΕΠΛ
Sofia et al. (2018) [32]	Γυάλινα σφαιρίδια ασβεστόλιθου και σόδας (CER)	(d_{50} μεταξύ 16 και 184 μm)- Βέλτιστη αντοχή προϊόντος σε $d_{50}=48 \mu\text{m}$	Σφαιρικό	ΕΠΛ

Ziółkowski et al. (2021) [33]	Inconel 718 (M)	$d_{10}=19.62 \mu\text{m}$, $d_{50}=34.6 \mu\text{m}$, $d_{90}=55.23 \mu\text{m}$	Κυρίως σφαιρικό (λίγοι δορυφόροι και σωματίδια ακανόνιστου σχήματος)	ΕΤΛ
Gu et al. (2019) [34]	Poly- (ethylene terephthalate) (PET) (P)	$d_{f,10}=23 \mu\text{m}$, $d_{f,50}=46 \mu\text{m}$, $d_{f,90}=89 \mu\text{m}$ (φρέσκια) $d_{h-a,10}=25 \mu\text{m}$, $d_{h-a,50}=49 \mu\text{m}$, $d_{h-a,90}=93 \mu\text{m}$ (θερμική ωρίμανση)	Ακανόνιστη, «σαν πατάτες και καρότα» (παρόμοια για φρέσκια και θερμικά παλαιωμένη σκόνη)	ΕΠΛ
Tan et al. (2021) [35]	PA12 και υαλονήματα (COM)	$d_{50, PA12} \approx 50 \mu\text{m}$ $d_{\text{fibre}} = 8 \mu\text{m}$, $L_{\text{fibre}} \in [80, 120]$ μm	PA12: Πολύπλοκο, μη σφαιρικό Ίνες: Σφαιροκυλινδρικό σχήμα	ΕΠΛ

(**Σημείωση:** **P**=πολυμερή, **M**=μέταλλα, **CER**=κεραμικά, **COM**=σύνθετα υλικά, **BM**=βιοϋλικά).

Η αναλογία φρέσκιας/ανακυκλωμένης σκόνης που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία επηρεάζει επίσης τη σύνθεση της σκόνης, δεδομένου ότι η ανακυκλωμένη σκόνη έχει επηρεαστεί τόσο από τις μηχανικές αλληλεπιδράσεις κατά το στάδιο της εναπόθεσης, όσο και από τη θερμότητα κατά το στάδιο της εκτύπωσης και η συγκέντρωση κάθε συστατικού στα σωματίδια έχει αλλάξει (αυξημένο O, ελαφρώς μειωμένο Al, V) [36], [37]. Επιπλέον, η επαναχρησιμοποιημένη σκόνη έχει στενότερη ΚΜΣ (λιγότεροι δορυφόροι και λεπτόκοκκα, άρα και αυξημένο D_{10}) ([28], [38]), ελαφρώς μειωμένη σφαιρικότητα (αν και υπάρχουν μελέτες που το διαψεύδουν, π.χ. [28]) αλλά σημαντικά μικρότερη στρογγυλότητα (τα σωματίδια αποκτούν εξογκώματα από τις συγκρούσεις κατά τις προηγούμενες χρήσεις) και το μεγαλύτερο μέρος της υγρασίας έχει διαλυθεί από τη θερμότητα των προηγούμενων κύκλων, παράγοντες που αυξάνουν τη ρευστότητα.

Ωστόσο, η αξιολόγηση της επίδρασης της επαναχρησιμοποίησης της σκόνης υπερβαίνει τον σκοπό του παρόντος κεφαλαίου, δεδομένου ότι έχει αναφερθεί σε άλλες πηγές [36], [37]. Στα κράματα, η μεταβολή της συγκέντρωσης μπορεί να είναι αποτέλεσμα της εξάτμισης ενός μετάλλου κατά τη θέρμανση του σωματιδίου, η οποία

οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης του εν λόγω μετάλλου στη χρησιμοποιούμενη σκόνη. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις μεταξύ του υλικού της σκόνης και των άλλων παραμέτρων της διεργασίας εναπόθεσης σκόνης για κατεργασίες ΣΚΠ.

Πίνακας 2.3: Διασυνδέσεις μεταξύ του υλικού της σκόνης και των άλλων παραμέτρων της κατεργασίας για ΣΚΠ.

	1. Υλικό σκόνης
2. ΚΜΣ	<p>Πολυμερή: $d_{50}=50-90\mu\text{m}$ Μέταλλα: $d_{50}=20-100\mu\text{m}$ Κεραμικά: $d_{50}=40-60\mu\text{m}$ Σύνθετα: $d_{50,\text{matrix}}=(\text{same as in the matrix material's category})$ $d_{50,\text{reinforcement}}\leq 0.1 \cdot d_{50,\text{matrix}}$ $d_{50}\approx 20\mu\text{m}$ (μέση) Βιοϊλικά: $d_{50}\approx 20\mu\text{m}$ (μέση) [22], [29]</p>
3. Σχήμα σωματιδίων	<p>Πολυμερή: με στρογγυλεμένες άκρες Μέταλλα: Κυρίως σφαιρικά, λίγοι δορυφόροι και ακανόνιστοι Κεραμικά: άλλα ακανόνιστα και ιδιαίτερα γωνιώδη (π.χ., θραύσματα γυαλιού).</p>
4. Υλικό επιστρωτήρα	<p>Οποιοσδήποτε συνδυασμός είναι βιώσιμος. Μεταλλικοί επιστρωτήρες: ακατάλληλοι για σιδηρομαγνητικές σκόνες. Ομοίως, πρέπει να αποφεύγεται ο συνδυασμός υλικών επιστρώματος-σκόνης που μπορούν και τα δύο να φορτιστούν ηλεκτροστατικά.</p>
5. Σχήμα επιστρωτήρα	<p>Η σχέση αυτή δεν έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία.</p>
6. Στρατηγική επανεπίστρωσης	<p>Η σχέση αυτή δεν έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία.</p>
7. Πάχος στρώσης	<p>Η σύνδεση μπορεί να γίνει μέσω της σύνδεσης μεταξύ των πλαισίων 1-2 και 2-7 (Τυπική ΚΜΣ για κάθε υλικό και περιορισμοί πάχους στρώματος λόγω ΚΜΣ αντίστοιχα)</p>
8. Περιβαλλοντικές παράμετροι	<p>Διαφορετικά υλικά απαιτούν διαφορετικές συνθήκες προθέρμανσης και θαλάμου (π.χ. τα μέταλλα απαιτούν λιγότερη υγρασία και καθόλου οξυγόνο, για να αποφευχθεί η οξείδωση και η χημειορρόφηση). Τα πολυμερή φορτίζονται ηλεκτρικά λόγω τριβής και η συνοχή τους ↑ σε πολύ χαμηλή υγρασία ($RH < 20\%$).</p>

2.2.1.1 Πολυμερή

Τα πολυμερή χρησιμοποιούνται ευρέως στις διεργασίες ΕΠΛ και ΕΘΠ. Επιπλέον, ήταν από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην ΕΠΛ, καθώς το Nylon 11 (επίσης γνωστό ως Polyamide-PA 11) χρησιμοποιείται από το 1993 [22]. Το μέγεθος των

σωματιδίων (d_{50}) των πολυμερικών σκονών για τις κατεργασίες ΣΚΠ κυμαίνεται μεταξύ 50 και 90 μm [22]. Οι Kruth et al. (2009) παρέχουν δύο κατηγοριοποιήσεις των πολυμερών, η πρώτη με βάση τη δομή τους (θερμοπλαστικά -είτε (ημι)κρυσταλλικά είτε άμορφα- και θερμοσκληρυνόμενα) και η δεύτερη με βάση τις εφαρμογές τους [39]. Παρέχουν επίσης λεπτομέρειες σχετικά με τους κύριους μηχανισμούς σύνδεσης που συναντώνται στα πολυμερή κατά τη διάρκεια των ΕΠΛ και ΕΤΛ, χρησιμοποιώντας τεχνικές διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης (DSC-Differential Scanning Calorimetry) για να διαπιστωθεί πόσο κατάλληλα είναι για τις διαδικασίες ΣΚΠ. Ωστόσο, δεν εστιάζουν στις εγγενείς ιδιότητες που καθορίζουν την απλωσιμότητα και τη ρευστότητα κάθε υλικού σκόνης. Οι Bourell et al. (2017) προσδιορίζουν ως επί το πλείστον τα ημικρυσταλλικά πολυμερή, όπως το PA11, το PA12 και το πολυπροπυλένιο, ως κατάλληλα για ΣΚΠ, με εξαίρεση μερικά άμορφα, όπως το πολυστυρένιο. Επιπλέον, τονίζουν τη σημασία της ρευστότητας της σκόνης για την ποιότητα του τελικού τεμαχίου [40]. Οι Leigh et al. (2020) παρέχουν έναν πλήρη κατάλογο πολυμερών υλικών που χρησιμοποιούνται σε διεργασίες ΣΚΠ, με έμφαση στις μηχανικές ιδιότητες, τη μετεπεξεργασία, το φινίρισμα και τα πιθανά ελαττώματα των τελικών τεμαχίων [41]. Ωστόσο, δεν εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της σκόνης και η απλωσιμότητα της σκόνης επηρεάζουν τις ιδιότητες των τελικών εξαρτημάτων ή από ποιους παράγοντες εξαρτώνται.

2.2.1.2 Ceramics

Κεραμικά, όπως ασβεστόλιθος-νατριούχο γυαλί, φωσφορικό ασβέστιο, καρβίδιο του πυριτίου, πυρίτιο, ζirkονία και αλουμίνα χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες σε διεργασίες ΣΚΠ. Οι διεργασίες ΣΚΠ και η ΠΚ γενικά ήταν πραγματικά σημαντικές στην προσπάθεια ανάπτυξης κεραμικών εξαρτημάτων με αυθαίρετα πολύπλοκα σχήματα, καθώς το έργο αυτό έχει αποδειχθεί εξαιρετικά δύσκολο με άλλες μεθόδους κατασκευής [42]. Τα κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή εξαρτημάτων κινητήρα και πρόωσης σε αεροδιαστημικές, αυτοκινητιστικές και ενεργειακές εφαρμογές, είτε ως θερμομόνωση (θερμικά φράγματα επικάλυψης) είτε ως δομικά υλικά. Επίσης, χρησιμοποιούνται στην οδοντιατρική και ακόμη και σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως κυψέλες καυσίμου, ηλιακές κυψέλες και μικροτσίπ [43]. Ο λόγος που έχουν τόσο ευρύ φάσμα τομέων στους οποίους χρησιμοποιούνται

είναι η μηχανική αντοχή και σκληρότητα, η θερμική και χημική σταθερότητα καθώς και οι βιώσιμες θερμικές, οπτικές, ηλεκτρικές και μαγνητικές επιδόσεις τους [42].

Ωστόσο, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες τήξης καθιστούν πολύ δύσκολη την παραγωγή κεραμικών τεμαχίων με κατεργασίες ΣΚΠ, ιδίως με την αποκλειστική χρήση τεχνικών ΕΠΛ, ΕΤΛ ή ΤΔΗ, χωρίς ένα συνδετικό υλικό που τήκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία για τη δημιουργία γέφυρας μεταξύ των κεραμικών σωματιδίων. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι η πυκνότητα των κεραμικών τεμαχίων που κατασκευάζονται με PBF είναι αρκετά χαμηλή [44] (αντίστροφα, το πορώδες είναι υψηλό), εκτός εάν μετά το αρχικό στάδιο στερεοποίησης, κατά το οποίο συντίθεται ένα «πράσινο τεμάχιο», ακολουθεί κάποια διήθηση. Αυτοί οι παράγοντες, σε συνδυασμό με την υψηλή συρρίκνωση, λόγω της υψηλής θερμοκρασιακής διαβάθμισης, δείχνουν γιατί η 3DP (BJP) είναι πιο υποσχόμενη για την τρισδιάστατη εκτύπωση κεραμικών εξαρτημάτων [43]. Επιπλέον, τα κεραμικά (ιδίως γυάλινες ίνες ή γυάλινα σφαιρίδια) χρησιμοποιούνται ως μέρος σε σύνθετα μίγματα, με τα μέταλλα ή τα πολυμερή να αποτελούν το αντίπαλο δέος του σύνθετου μίγματος. Οι Chen et al. (2019) έχουν παράσχει μια καλή έκθεση σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η τρισδιάστατη εκτύπωση κεραμικών, για κάθε διαφορετική κατηγορία ΠΚ [42].

2.2.1.3 Μέταλλα

Τα μέταλλα και τα κράματά τους χρησιμοποιούνται ευρέως στις κατεργασίες ΣΚΠ, ιδίως στις ΕΤΛ και ΤΔΗ, καθώς μπορούν εύκολα να λιώσουν πλήρως και να βελτιώσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες κατά τη διαδικασία ψύξης-στερεοποίησης, ενώ ταυτόχρονα σχηματίζουν πυκνά εξαρτήματα χαμηλού πορώδους. Το γεγονός ότι ο ρυθμός ψύξης και το μοτίβο θέρμανσης-ψύξης που ακολουθείται μπορούν να καθορίσουν τη μικροδομή και να μεταβάλουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός μετάλλου όπως κρίνει ο κατασκευαστής για κάθε εφαρμογή καθιστά τα μέταλλα εξαιρετικά ευέλικτα υλικά γενικής χρήσης. Πιο συγκεκριμένα, η μικροδομή των κόκκων των μεταλλικών εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με ΣΚΠ εξαρτάται από τη βαθμίδα θερμοκρασίας και την ταχύτητα της στερεοποίησης διεπιφανείας [45]. Διάφορα μέταλλα έχουν χρησιμοποιηθεί σε διεργασίες ΣΚΠ, όπως κράματα αλουμινίου (π.χ. Al6063 και Al3003), κράματα τιτανίου (π.χ. Ti-6Al-4V), ανοξείδωτος χάλυβας, βολφράμιο κ.λπ. Η πρόκληση στην εναπόθεση στρώματος σκόνης για την επεξεργασία μετάλλων μέσω ΣΚΠ είναι να διασφαλιστεί ότι η κλίση σκόνης είναι υψηλής ποιότητας

και δεν προκαλεί ατέλειες, δεδομένου ότι οι μικρότερες ατέλειες μπορούν να επηρεάσουν δραστικά τον ρυθμό ψύξης ή την κλίση θερμοκρασίας, άρα και τη μικροδομή του τελικού τεμαχίου.

2.2.1.4 Σύνθετα

Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που σχηματίζονται με το συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών διαφορετικών ιδιοτήτων, χωρίς να διαλύονται ή να αναμειγνύονται μεταξύ τους. Οι Puttegowda et al. (2018) ορίζουν τα σύνθετα υλικά ως υλικές δομές που αποτελούνται από δύο υλικά τα οποία μπορούν να αναγνωριστούν μακροσκοπικά και βοηθούν το ένα το άλλο στη δημιουργία μιας ανώτερης δομής [46]. Τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί σχεδόν σε κάθε είδους βιομηχανία, με στόχο την εκμετάλλευση των ανώτερων ιδιοτήτων τους σε σχέση με τα κοινά υλικά, όπως τα μέταλλα, τα πολυμερή, τα κεραμικά κ.λπ. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται συνήθως από το υλικό της μήτρας (matrix), το οποίο πρέπει να είναι ομοιογενές και εντελώς συνεχές, και την ενίσχυση, η οποία πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη μέσα στη μήτρα προκειμένου να αναπτυχθεί το σύνθετο υλικό.

Οι βιομηχανίες πρέπει να είναι σε θέση να αναπτύσσουν εξαρτήματα από σύνθετα υλικά σε οποιοδήποτε σχήμα, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητά τους. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η ΠΚ, και ιδιαίτερα οι διεργασίες ΣΚΠ, αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο για την κατασκευή εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ήδη πολλές εργασίες προς αυτή την κατεύθυνση. Οι Shishkovsky et al. (2018) ανέπτυξαν λειτουργικά διαβαθμισμένες δομές σύνθετων υλικών νικελίου-TiC αυξάνοντας τη συγκέντρωση TiC στη μήτρα NiCrSiB [47]. Στην εργασία τους χρησιμοποιήθηκε ETL, τα σωματίδια σκόνης της μήτρας είχαν διασπορά μεγέθους 60-80 μm και τα σωματίδια TiC είχαν κυβικό σχήμα με πλευρά που κυμαίνονταν μεταξύ 40 και 60 nm. Οι Chueh et al. (2020) ανέπτυξαν ένα σύστημα και μια μέθοδο επανεπίστρωσης ακροφυσίου με τη βοήθεια υπερήχων για την εκτέλεση ΣΚΠ πολλαπλών υλικών από σύνθετα υλικά πολυμερούς-μετάλλου ή πολυμερούς-κεραμικού, χρησιμοποιώντας PA11 ως πολυμερές (μήτρα) και σκόνης Cu₁₀Sn (κράμα μετάλλου) ή Al₂O₃ (κεραμικό) και γυαλί σόδας-ασβέστου (κεραμικό) [48]. Η εξαιρετική εργασία τους συνδυάζει καινοτομία στον νέο τομέα της εναπόθεσης σκόνης πολλαπλών υλικών και της ΣΚΠ, η οποία αναμένεται να ανοίξει νέους ορίζοντες για την πρόσθετη κατασκευή και τον τομέα των σύνθετων υλικών. Οι Zhang et al. (2020)

ανέπτυξαν σύνθετα υλικά μετάλλου-γυαλιού με λειτουργική διαβάθμιση μέσω SLM πολλαπλών υλικών [49]. Οι Bae κ.ά. (2020) ανέπτυξαν ένα σύνθετο υλικό για ΣΚΠ συνδυάζοντας Al_2O_3 (κεραμική σκόνη με $d_{50} \approx 1 \mu m$) με μια γυάλινη σκόνη χαμηλού σημείου τήξης με $d_{50} = 15 \mu m$ και $d_{max} = 50 \mu m$ [29], η οποία συμφωνεί με την κατανομή μεγέθους σωματιδίων που προτείνεται από τους Tiwari et al. (2015) [22]. Τέλος, οι εργασίες για τα σύνθετα υλικά δεν περιορίζονται μόνο στο πειραματικό και θεωρητικό υπόβαθρο, καθώς οι Tan et al. (2021) αξιολόγησαν τον βαθμό συμπίεσης στρώσης ενός σύνθετου υλικού πολυμερούς (PA12)/υαλοϊνών όπου οι ίνες είχαν σχήμα σφαιροκυλίνδρου (επιμήκεις, σφαιρικοί τελικοί κύλινδροι). Μελέτησαν τη γωνία πρηνούς πειραματικά και μέσω προσομοίωσης ΜΔΣ για τη βαθμονόμηση των εισόδων της προσομοίωσης, και στη συνέχεια έτρεξαν προσομοιώσεις εναπόθεσης στρώματος σκόνης μέσω κυλινδρικού επιστρωτήρα, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ΜΔΣ [35].

2.2.1.5 Βιοϋλικά

Τα βιοϋλικά είναι μια ειδική κατηγορία υλικών. Παρά το γεγονός ότι αποτελούνται από υλικά που μπορούν να ταξινομηθούν στις τέσσερις προαναφερθείσες κατηγορίες, υπάρχει η σαφής διαφορά μεταξύ της λειτουργικότητάς τους. Τα βιοϋλικά ονομάζονται «βιολογικά» επειδή παρέχουν χαρακτηριστικά όπως μηχανική αντοχή, ελαφρότητα, πορώδες κ.λπ. που τους επιτρέπουν να χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εξαρτημάτων που μπορούν να εμφυτευθούν σε ζωντανούς οργανισμούς για να διευκολύνουν κάποια βιολογική διαδικασία. Σύμφωνα με τον Kam Leong, «ένα βιοϋλικό ορίζεται πλέον ως μια ουσία που έχει κατασκευαστεί ώστε να λάβει μια μορφή η οποία, μόνη της ή ως μέρος ενός σύνθετου συστήματος, χρησιμοποιείται για να κατευθύνει, μέσω του ελέγχου των αλληλεπιδράσεων με τα συστατικά των ζωντανών συστημάτων, την πορεία οποιασδήποτε θεραπευτικής ή διαγνωστικής διαδικασίας» (Kam Leong, Biomaterials, 2021) [50]. Τα βιοϋλικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη εμφυτευμάτων ή ιατρικών συσκευών για την ενίσχυση ή την αποκατάσταση ορισμένων βλαβών που προκαλούνται στους ιστούς ενός ζωντανού σώματος, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα ζωής και παρατείνοντας το προσδόκιμο ζωής [51]. Οι Hudecki et al. (2019) προσφέρουν μια εκτενή ανασκόπηση των κατηγοριών στις οποίες μπορούν να ταξινομηθούν τα βιοϋλικά, παρουσιάζοντας διάφορα παραδείγματα μετάλλων/κραμάτων, βιοπολυμερών, κεραμικών και βιοσύνθετων υλικών. Παρουσιάζουν επίσης τις βασικές ιδιότητες που πρέπει να έχει

ένα υλικό για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιοϋλικό [51]. Οι Nouri et al. (2021) παρέχουν μια ανασκόπηση της προσθετικής κατασκευής βιοϋλικών που παραλαμβάνουν φορτία. Επισημαίνουν ότι, στον τομέα των βιοϋλικών, η ΕΠΛ επικεντρώνεται στην επεξεργασία πολυμερών, κεραμικών και των σύνθετων υλικών τους, ενώ η ΕΤΛ και η ΕΠΜΛ χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάπτυξη εξαρτημάτων από μέταλλα και κράματα αυτών [52]. Οι Barui et al. (2019) εξετάζουν τη χρήση της BJP για την κατασκευή εξαρτημάτων από βιοϋλικά, εστιάζοντας στο Ti-6Al-4V [21]. Οι Bose et al. (2018) και Harun et al. (2018) παρέχουν ανεκτίμητες λεπτομερείς πληροφορίες για κάθε πτυχή της προσθετικής κατασκευής βιοϋλικών, από την απαιτούμενη κατανομή μεγέθους σκόνης, το μέσο μέγεθος σωματιδίων και το βέλτιστο υλικό για κάθε διαφορετική διαδικασία ΠΚ, έως τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων που αναπτύσσονται [53], [54].

Τα βιοϋλικά αναφέρονται εδώ για λόγους πληρότητας και σαφήνειας- ωστόσο, μια πιο λεπτομερής επισκόπηση υπερβαίνει τον σκοπό της παρούσας ανασκόπησης.

2.2.2 Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων (ΚΜΣ)

Οι Dobson et al. (2021) επισημαίνουν ότι το ποσοστό των λεπτόκοκκων σωματιδίων μέσα στη σκόνη επηρεάζει άμεσα τη ρευστότητά της. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ένα κατώτατο όριο ποσοστού λεπτόκοκκων σωματιδίων, πάνω από το οποίο η σκόνη δεν είναι πλέον εφικτό να απλωθεί μέσω μιας ΟΛ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των σωματιδίων και των δυνάμεων πρόσφυσης μεταξύ των σωματιδίων και του επιστρωτήρα. Οι δυνάμεις Van der Waals υπερνικούν την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων, εμποδίζοντας τη σκόνη να σχηματίσει ένα ομοιογενές, ομοιόμορφο στρώμα πάνω στο υπόστρωμα. Οι Dobson et al. (2021) παρατήρησαν ότι η σκόνη ανοξειδωτού χάλυβα 17-4 PH με περίπου 30% του όγκου της σκόνης να έχει διάμετρο σωματιδίων <15 μm απλώθηκε με επιτυχία. Ωστόσο, όταν το ποσοστό αυτό αυξήθηκε στο 55% ήταν αδύνατο να απλωθεί ένα αποδεκτό για ΣΚΠΙ-ΕΤΛ στρώμα [55].

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της ΚΜΣ στη ρευστότητα και την απλωσιμότητα της σκόνης, είναι απαραίτητο να χωριστεί σε ορισμένες παραμέτρους. Μια ΚΜΣ μπορεί να είναι μονοτροπική, διτροπική ή ακόμη και πολυτροπική, πράγμα

που σημαίνει ότι το διάγραμμα της συνάρτησης κατανομής όγκου έχει μία, δύο ή πολλές κορυφές. Έχει διαπιστωθεί ότι μια διμορφική ΚΜΣ επηρεάζει θετικά την πυκνότητα συσσώρευσης του στρώματος, καθώς τα λεπτόκοκκα σωματίδια συγκεντρώνονται στα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων σωματιδίων, μειώνοντας ουσιαστικά τα μεγάλα κενά και μειώνοντας δραστικά το πορώδες του στρώματος. Οι Kararatis et al. (2002) [56] και Spierings et al. (2009) [57] καθόρισαν ορισμένες σχέσεις μεταξύ του μεγέθους των λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων σωματιδίων και του πραγματικού πάχους του στρώματος που πρέπει να ισχύουν προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η αυξημένη ποσότητα λεπτόκοκκων σωματιδίων δεν θα έχει αρνητικές επιπτώσεις στη ρευστότητα και, συνακόλουθα, αρνητικές επιπτώσεις στην τραχύτητα της επιφάνειας του στρώματος και στον βαθμό συμπίεσης της στρώσης. Πιο συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις που έχουν θέσει είναι οι ακόλουθες (εξισώσεις (2.1) έως (2.3)):

$$t_{eff} > D_{90}, \text{ τυπικά, } \frac{t_{eff}}{D_{90}} \approx 1.5 \quad (2.1)$$

$$\frac{D_{50}}{D_{10}} \in [1.4, 2.5], \text{ με } D_{10} \geq 5 \mu m \quad (2.2)$$

$$\frac{D_{90}}{D_{10}} \in [2, 5], \text{ τυπικά } \frac{D_{90}}{D_{10}} \approx 5 \quad (2.3)$$

Οι απαιτήσεις αυτές ορίζουν μία εύλογα στενή ΚΜΣ για μονοτροπικές σκόνες, πράγμα που σημαίνει ότι, γενικά, οι στενές ΚΜΣ προάγουν την καλή ροή. Αυτό δεν σημαίνει ότι οι διμορφικές σκόνες ή οι σκόνες με πλατύτερες ΚΜΣ δεν μπορούν να ρέουν αρκετά καλά ώστε να σχηματίσουν ένα ομοιόμορφο και ομοιογενές στρώμα, σημαίνει απλώς ότι πρέπει να εφαρμοστεί κάποια αντιστάθμιση, επειδή υστερούν σε ρευστότητα λόγω των δυνάμεων συνοχής που εισάγουν τα λεπτόκοκκα σωματίδια, αφού λειτουργούν ως δορυφόροι για τα χονδρόκοκκα, μειώνοντας την κινητικότητα των κόκκων. Για τις διτροπικές σκόνες, οι απαιτήσεις παίρνουν τη μορφή που παρουσιάζεται στις εξισώσεις (2.4) έως (2.6), ενώ κάθε μία από τις δύο ξεχωριστές ΚΜΣ πρέπει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των μονοτροπικών σκονών:

$$t_{eff} > D_{90,coarse}, \text{ τυπικά: } \frac{t_{eff}}{D_{90,coarse}} \approx 1.5 \quad (2.4)$$

$$\frac{D_{50,coarse}}{D_{50,fine}} \geq 10, \text{ με } D_{10,fine} \geq 5 \mu\text{m} \quad (2.5)$$

$$\frac{m_{coarse}}{m_{fine}} \approx \frac{7}{3} \quad (2.6)$$

Πίνακας 2.4: Διασυνδέσεις μεταξύ της κατανομής μεγέθους σωματιδίων και των άλλων παραμέτρων κατεργασίας για ΣΚΠ.

	2. ΚΜΣ
1. Υλικό σκόνης	Βλέπε <u>Πίνακα 2.3.</u>
3. Σχήμα σωματιδίων	Σφαιρικότητα↑ ⇒ Ρευστότητα↑. Όσο μικρότερα είναι τα σωματίδια, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να είναι λιγότερο σφαιρικά [58].
4. Υλικό επιστρωτήρα	Τα μικρότερα σωματίδια και οι ΚΜΣ με μικρότερη τιμή D₁₀ θα πρέπει να απλώνονται με επιστρωτήρες που κατασκευάζονται από υλικά με μικρότερη επιφανειακή ενέργεια , ώστε να ελαχιστοποιούνται οι δυνάμεις πρόσφυσης και η κολλητικότητα. Πολυμερή>κεραμικά>μέταλλα είναι η σειρά από το πιο ευνοϊκό προς το λιγότερο ευνοϊκό υλικό επιστρωτήρα.
5. Σχήμα επιστρωτήρα	Οι σκόνες με στενή ΚΜΣ παρουσιάζουν καλύτερη ρευστότητα, αλλά τα σωματίδια με πλατύτερη ΚΜΣ (χαμηλότερο d ₁₀ , ίδιο d ₉₀) ή οι διτροπικές σκόνες μπορούν να προσφέρουν καλύτερο βαθμό συμπίεσης στρώσης, εφόσον είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες. Οι ευρύτερες ΚΜΣ και οι διτροπικές σκόνες είναι πιο συνεκτικές , οπότε προτιμώνται επιστρωτήρες υψηλότερης δύναμης συμπίεσης (λεπίδα στρογγυλεμένης ακμής> κύλινδρος> κάθετη λεπίδα).
6. Στρατηγική επανεπίστρωσης	Οι σκόνες με πλατύτερη ΚΜΣ είναι πιο επιρρεπείς σε διαχωρισμό κατά την επανεπίστρωση. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται κόσκινο για την ανανέωση της σκόνης μπροστά από τον επιστρωτήρα. Ο συνδυασμός λεπίδας/κύλινδρου/κόσκινου προσφέρει βέλτιστο βαθμό συμπίεσης στρώσης και ομοιομορφία τραχύτητας κατά μήκος της κλίνης σκόνης [59].
7. Πάχος στρώσης	$t_{eff} > \Delta H = t_{nom}$ $t_{act} \neq t_{nom}$ (Για να καθοριστεί το t_{act} , πρέπει να βρεθεί η μέση γραμμή, με βάση την τραχύτητα) $t_{eff} \geq d_{max}$ $\left(\frac{t_{eff}}{D_{90}} \right) \cong 1.5$ [57].
8. Περιβαλλοντικές παράμετροι	Απορρόφηση υγρασίας $\xrightarrow{\text{Διόγκωση σωματιδίων}}$ Μέγεθος↑⇒Αναγκαιότητα για το t _{nom} στο ↑ Παρόμοια για την προσρόφηση, κατά την οποία η διάμετρος των σωματιδίων ουσιαστικά ↑, λόγω της επιφανειακής προσκόλλησης των μορίων του νερού.

Επιπλέον, οι σκόνες με πλατύτερη ΚΜΣ είναι πιο επιρρεπείς στην ανάπτυξη συσσωματωμάτων και συστάδων, προκαλώντας κενά στην κλίση σκόνης, ή ακόμη και γραμμές που προκαλούνται από το σύρσιμο του συσσωματώματος από τον επιστρωτήρα. Οι Weaver et al. (2021) προτείνουν ότι, παρόλο που είναι γνωστό ότι ένα μικρότερο μέγεθος σωματιδίων αυξάνει τις δυνάμεις πρόσφυσης και συνοχής, μειώνοντας τη ρευστότητα και υποβαθμίζοντας την ποιότητα του στρώματος σκόνης όσον αφορά τον βαθμό συμπίεσης στρώσης και την τραχύτητα, προκειμένου να γίνουν συνδέσεις μεταξύ της ποιότητας του τελικού τεμαχίου και της ΚΜΣ είναι απαραίτητο να ελέγχεται αυστηρότερα η μορφολογία, το σχήμα και η χημεία. Προτείνουν ότι θα ήταν πολύτιμο να δημιουργηθούν διαφορετικά δείγματα ΚΜΣ από την ίδια παρτίδα σκόνης πριν από την εκτέλεση συγκριτικών πειραμάτων και να διασφαλιστεί ότι τα στρώματα σκόνης που θα δημιουργηθούν είναι πανομοιότυπα όσον αφορά τους δείκτες ποιότητας του στρώματος σκόνης [60]. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις μεταξύ της κατανομής μεγέθους σωματιδίων και των άλλων παραμέτρων κατεργασίας της εναπόθεσης σκόνης για διεργασίες ΣΚΠ.

2.2.3 Σχήμα Σωματιδίων

Το σχήμα των σωματιδίων επηρεάζει τη ρευστότητα της σκόνης. Έχει αποδειχθεί ότι η υψηλότερη σφαιρικότητα και στρογγυλότητα προάγουν την καλή ροή της σκόνης λόγω της μικρότερης αλληλεπίδρασης των σωματιδίων και της φυσικής ικανότητας της σφαίρας να κυλιέται ομαλά, προκαλώντας λιγότερες απρόβλεπτες συγκρούσεις σε σύγκριση με τα σωματίδια ακανόνιστου σχήματος [61]. Επίσης, τα σωματίδια ακανόνιστου σχήματος είναι πιο επιρρεπή στην προσρόφηση, πράγμα που σημαίνει ότι η αύξηση της σχετικής υγρασίας θα κάνει τέτοιες σκόνες πιο συνεκτικές σε σύγκριση με σκόνες με σχεδόν σφαιρικά σωματίδια.

Η σφαιρικότητα (Ψ) υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.7):

$$\Psi = \frac{S_n}{S} = \frac{\sqrt[3]{36\pi V^2}}{S} \quad (2.7)$$

Όπου S_n είναι η ονομαστική επιφάνεια, δηλαδή η επιφάνεια μιας σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με το εξεταζόμενο σωματίδιο, και S , V είναι η πραγματική επιφάνεια και ο

όγκος του σωματιδίου αντίστοιχα. Το δισδιάστατο ισοδύναμο της σφαιρικότητας είναι η κυκλικότητα (C), η οποία ορίζεται όπως στην εξίσωση (2.8):

$$C = \frac{4\pi S}{P^2} \quad (2.8)$$

Όπου S είναι η επιφάνεια και P είναι η περίμετρος του δισδιάστατου ίχνους του σωματιδίου. Τόσο η σφαιρικότητα όσο και η κυκλικότητα κυμαίνονται από 1, για σφαιρικά/κυκλικά σχήματα, έως 0, για επιμήκη σχήματα.

Ενώ η σφαιρικότητα είναι ένας καλός δείκτης για το πόσο κοντά πλησιάζει η επιφάνεια ενός τρισδιάστατου σωματιδίου στην επιφανειακή σφαίρα του ίδιου όγκου, δεν αρκεί για να εκτιμηθεί πόσο κοντά πλησιάζει και το σχήμα του σωματιδίου στο σχήμα μιας σφαίρας. Για το λόγο αυτό, ορίζεται η στρογγυλότητα (R). Η δισδιάστατη στρογγυλότητα (R) ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ακτίνας καμπυλότητας των γωνιών της σιλουέτας του αντικειμένου προς την ακτίνα του μέγιστου εγγεγραμμένου κύκλου, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.9)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n \cdot r_{max}} \quad (2.9)$$

Όπου n είναι ο αριθμός των γωνιών του μέγιστου δισδιάστατου ίχνους του σωματιδίου και r_{max} είναι η ακτίνα του μέγιστου εγγεγραμμένου κύκλου. Ωστόσο, η στρογγυλότητα είναι μια τρισδιάστατη ιδιότητα και μπορεί να υπολογιστεί με τον ορισμό του προσανατολισμένου οριοθετημένου κουτιού και του ελλειψοειδούς αναφοράς του μέσω ανάλυσης κύριων συνιστωσών. Στη συνέχεια, η τρισδιάστατη στρογγυλότητα μπορεί να υπολογιστεί όπως στην εξίσωση (2.10):

$$R = \frac{V}{S^3 \sqrt{abc}} \quad (2.10)$$

Όπου a , b , c τα μήκη των κύριων αξόνων του ελλειψοειδούς αναφοράς, V και S ο όγκος και η επιφάνεια του σωματιδίου αντίστοιχα. Οι Cruz-Matías et al. (2019) επινόησαν επίσης μια μέθοδο για τον υπολογισμό της τρισδιάστατης στρογγυλότητας μέσω της μοντελοποίησης ακραίων κορυφών του σωματιδίου, μέθοδος που εξοικονομεί υπολογιστικό χρόνο και έχει την ίδια ακρίβεια με την προαναφερθείσα μέθοδο [62].

Η σφαιρικότητα και η στρογγυλότητα αρκούν για να καθορίσουν τη συνάφεια του σχήματος του σωματιδίου με το βέλτιστο, τέλειο σφαιρικό σχήμα. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι, στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν τον όρο «σφαιρικότητα» αφηρημένα για να περιγράψουν τόσο το πόσο σφαιρικό είναι ένα σωματίδιο από άποψη όγκου όσο και το πόσο λείο και στρογγυλό είναι ένα σωματίδιο, γεγονός που προκαλεί παρερμηνείες των ευρημάτων και των συμπερασμάτων των συγγραφέων. Αυτό θα πρέπει να αντιμετωπιστεί και να ακολουθηθεί μια κοινά αποδεκτή ορολογία, ώστε τα ευρήματα να παρουσιάζονται με ενιαίο τρόπο.

Είναι αναμφίβολα ευκολότερο να αναπτυχθούν μοντέλα ΜΔΣ για την προσομοίωση της εναπόθεσης σκόνης με βάση σφαιρικά σωματίδια. Ωστόσο, αυτή η απλούστευση δεν οδηγεί πάντοτε σε ρεαλιστικά αποτελέσματα, καθώς οι σκόνες περιλαμβάνουν μερικές φορές ακανόνιστα σχήματα ή είναι ακόμη πιθανό τα σωματίδια ορισμένων υλικών να έχουν σκόπιμα εναλλακτικό σχήμα (π.χ. σφαιροκυλινδρικές ίνες γυαλιού [35]). Η πιο συνηθισμένη μέθοδος μοντελοποίησης σωματιδίων ακανόνιστου σχήματος είναι να συνδυάζεται ένας αριθμός σφαιρών μεταξύ τους καθορίζοντας τις συντεταγμένες των κέντρων τους και τις αποστάσεις μεταξύ των κέντρων τους, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο σωματίδιο [35]. Σε πολλές εργασίες αυτή ήταν μια μέθοδος για τη δημιουργία σωματιδίων με ιδιαίτερα γωνιώδη σχήματα. Το ζητούμενο τέτοιων μελετών είναι να προσεγγιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο το πραγματικό σχήμα των σωματιδίων, ώστε να μοιάζει με την πραγματική σκόνη.

Οι Nasato et al. (2020) χρησιμοποίησαν υπολογιστική τομογραφία ακτίνων X (3D) και απεικόνιση SEM (2D) για να αποκτήσουν τα δεδομένα σχήματος των σωματιδίων και στη συνέχεια τα αναπαρήγαγαν με μοντέλα πολλαπλών σφαιρών [63]. Ωστόσο, η επιλογή τους να χρησιμοποιήσουν 2D ίχνη σωματιδίων που αποκτήθηκαν μέσω SEM προκειμένου να δημιουργήσουν ένα 3D μοντέλο σωματιδίων είναι αμφιλεγόμενη, καθώς η ανακατασκευή ενός 3D αντικείμενου με βάση 2D δεδομένα προκαλεί ανεπιθύμητη αβεβαιότητα στις προσομοιώσεις και ενδέχεται να προκαλέσει μη ρεαλιστικά αποτελέσματα [40]. Υπάρχουν επίσης μελέτες που βελτιστοποιούν αυτή τη διαδικασία καταφέροντας να επιτύχουν αποδεκτή ομοιότητα των μοντέλων σωματιδίων σκόνης με τα πραγματικά σωματίδια χρησιμοποιώντας ένα ελάχιστο αριθμό σφαιρών [63], οι οποίες δεν έχουν απαραίτητα μόνο σημεία επαφής μεταξύ τους, αλλά μπορεί να επικαλύπτονται για να δημιουργήσουν ένα σύνθετο σχήμα με την

ελάχιστη ποσότητα σφαιρών [64]. Αυτό είναι απίστευτα σημαντικό, καθώς, παρόλο που είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός σφαιρών για να συνδυαστούν μεταξύ τους και να αναπτυχθεί το μοντέλο του πραγματικού σωματιδίου με υψηλή διαστατική ακρίβεια, όσο περισσότερες είναι οι σφαίρες, τόσο μεγαλύτερο είναι το υπολογιστικό κόστος, άρα και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

Έχει αποδειχθεί ότι η επαναχρησιμοποίηση της σκόνης επηρεάζει τόσο την ΚΜΣ όσο και το σχήμα των σωματιδίων. Οι Soundarapandiyan et al. (2021) έδειξαν μέσω ανάλυσης SEM και εισάγοντας ορισμένα κριτήρια για την κατηγοριοποίηση ενός 2D ίχνους ενός σωματιδίου ως σφαιρικό, δορυφορικό, ακανόνιστο ή λεπτόκοκκο, ότι η ανακυκλωμένη σκόνη έχει βελτιωμένη σφαιρικότητα, καλύτερη ρευστότητα (λόγω λιγότερων δορυφόρων και λεπτόκοκκων σωματιδίων) και καλύτερο βαθμό συμπίεσης στρώσης (λιγότερη συνοχή συνολικά, δεδομένου ότι η σφαιρικότητα ήταν υψηλότερη και τα λεπτόκοκκα / δορυφόροι ήταν λιγότεροι) [28]. Ωστόσο, η περιεκτικότητα των σωματιδίων σε οξυγόνο αυξήθηκε επίσης κατά 25% μεταξύ της παρθένας και της 10 φορές ανακυκλωμένης σκόνης Ti6Al4V. Ωστόσο, είναι πιθανό ότι, στην επαναχρησιμοποιημένη σκόνη, η σφαιρικότητα αυξήθηκε ελαφρώς, αλλά η στρογγυλότητα των σωματιδίων μειώθηκε σημαντικά, όπως αναφέρουν οι Ghods et al. (2020) [38]. Σε γενικές γραμμές, κατά την επαναχρησιμοποίηση της σκόνης, τα σωματίδια τείνουν να συγκρούονται μεταξύ τους, με το υπόστρωμα και τον επιστρωτήρα, χάνοντας τη στρογγυλότητά και την ομαλότητά τους. Ωστόσο, η σφαιρικότητα δεν επηρεάζεται γενικά σε μεγάλο βαθμό.

Οι Sutton et al. (2017) παρέχουν μια ανασκόπηση των τεχνικών χαρακτηρισμού σκόνης που χρησιμοποιούνται συνήθως στην ΠΚ, καθώς και μια ανασκόπηση των παραγόντων σχήματος 2D (κυκλικότητα, επιμήκυνση, λόγος διαστάσεων, διασπορά, στρογγυλότητα, επιπεδότητα, λόγος περιμέτρου προς επιφάνεια) που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό του σχήματος των σωματιδίων και των μεθόδων κατασκευής που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σκόνης για ΠΚ (νερό/αέριο/πλάσμα/φυγοκεντρικός ψεκασμός, PREP) [61].

Τέλος, τα λιγότερο σφαιρικά σωματίδια σκόνης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις μεταβολές του πάχους του στρώματος, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του στρώματος σκόνης [58]. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι

διασυνδέσεις μεταξύ του σχήματος των σωματιδίων και των άλλων παραμέτρων κατεργασίας της εναπόθεσης σκόνης για κατεργασίες ΣΚΠ.

Πίνακας 2.5: Διασυνδέσεις μεταξύ του σχήματος των σωματιδίων και των άλλων παραμέτρων της κατεργασίας για τη ΣΚΠ.

3. Σχήμα σωματιδίων	
1. Υλικό πούδρας	Βλέπε <u>Πίνακα 2.3.</u>
2. ΚΜΣ	Βλέπε <u>Πίνακα 2.4.</u>
4. Υλικό επιστρωτήρα	Οι σκληρότεροι επιστρωτήρες (λεπίδες ή κύλινδροι) προτιμώνται για λιγότερο σφαιρικά σωματίδια, καθώς οι υψηλότερες δυνάμεις συμπίεσης είναι απαραίτητες για να ξεπεραστεί η συνοχή της σκόνης. Σημαντική η επιλογή αντικολλητικών υλικών για τους επιστρωτήρες.
5. Σχήμα επιστρωτήρα	Οι σκληρότεροι επιστρωτήρες (λεπίδες, στρογγυλεμένες λεπίδες ή κύλινδροι) προτιμώνται για λιγότερο σφαιρικά σωματίδια, καθώς οι υψηλότερες δυνάμεις συμπίεσης είναι απαραίτητες για να ξεπεραστεί η συνοχή της σκόνης.
6. Στρατηγική επανεπίστρωσης	Σφαιρικότητα↓ \Rightarrow Συνοχή της σκόνης $\uparrow \Rightarrow$ Η ελεγχόμενη διέγερση με υπερήχους ή μικροδονήσεις πρέπει να εφαρμόζεται στον επιστρωτήρα για την καλύτερη συμπύκνωση των σωματιδίων ακανόνιστου σχήματος , ώστε να προάγεται η καλύτερη χωρική διάταξη.
7. Πάχος στρώσης	Η μέση διάμετρος των σωματιδίων δεν είναι αρκετή για τον καθορισμό του ελάχιστου t_{act} για σωματίδια ακανόνιστου σχήματος . Πρέπει να μετρηθεί το μεγαλύτερο μήκος των σωματιδίων μεγέθους D_{90} , δεδομένου ότι μπορεί να προσανατολιστούν στο διάκενο μεταξύ του επιστρωτήρα και του υποστρώματος και να το μπλοκάρουν, ή να παρασυρθούν και να δημιουργήσουν ατέλειες, ή απλώς να μειώσουν τη ρευστότητα και την ομοιόμορφη κατανομή της ροής και των δυνάμεων συμπίεσης/διάτμησης.
8. Περιβαλλοντικές παράμετροι	$\text{Σφαιρικότητα} \downarrow \xrightleftharpoons{RH=ct} \text{Προσρόφηση} \uparrow \Rightarrow$ <p style="text-align: center;">Συνοχή σκόνης $\uparrow \Rightarrow$ Ποιότητα στρώματος \downarrow</p> <p>Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν λιγότερο σφαιρικά σωματίδια της ίδιας σκόνης, η RH πρέπει να μειωθεί προκειμένου να διατηρηθεί η συνοχή στο ίδιο επίπεδο (ή να αυξηθεί η θερμοκρασία για να επιτευχθεί αντιστάθμιση της προσρόφησης μέσω της εκρόφησης)</p>

2.2.4 Υλικό Επιστρωτήρα

Οι Shamsdini et al. (2021) εξέτασαν την επίδραση της χρήσης λεπίδων επανεπίστρωσης από διαφορετικά υλικά, μία υψηλής σκληρότητας, κατασκευασμένη από κεραμικό υλικό (ZrO_2) και μία πιο μαλακή, κατασκευασμένη από βούρτσα ανθρακονημάτων. Απέδειξαν ότι, παρόλο που η απόδοση και η αντοχή σε εφελκυσμό των δοκιμίων από βούρτσα (LPBF-Brush) και αυτών από κεραμικό υλικό επανεπίστρωσης (LPBF-Ceramic) είναι σχεδόν ίδιες, τα δείγματα LPBF-Brush υστερούν σοβαρά σε ολκιμότητα και σκλήρυνση λόγω παραμόρφωσης [65]. Και τα δύο δείγματα είναι σχεδόν πλήρως πυκνά κάτω από τα ανώτερα 2-3 mm. Προτείνεται ότι ο σκληρός επιστρωτήρας μπορεί να είναι σε θέση να ασκήσει μεγαλύτερη πίεση προκειμένου να αυξήσει το βαθμό συμπίεσης στρώσης, αλλά ο μαλακός επιστρωτήρας εφαρμόζει τη σκόνη πιο απαλά, επιτρέποντας την κίνηση των λεπτότερων σωματιδίων [65]. Ωστόσο, η πρόταση αυτή χρειάζεται επικύρωση μέσω προσομοιώσεων και πειραμάτων. Επιπλέον, τα δείγματα LPBF-Brush παρουσιάζουν την εμφάνιση μικροκενών που περικλείουν τη μη λιωμένη σκόνη, οδηγώντας σε υψηλότερο μαρτενσιτικό κλάσμα και χαμηλότερο ωστενιτικό κλάσμα, με τις ωστενιτικές περιοχές να μην είναι συνεχείς, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την ολκιμότητα. Ωστόσο, η αιτία της εμφάνισης των μικροκοιλοτήτων δεν εξηγείται στο άρθρο [65]. Οι Daña et al. (2019) εξέτασαν την επίδραση των διαφορετικών υλικών επιστρωτήρα με βάση την ενδοτικότητα τους στη διαστατική ακρίβεια του τελικού τεμαχίου, βασιζόμενοι στο γεγονός ότι, όσο πιο σκληρό είναι το υλικό της λεπίδας, τόσο περισσότερους κραδασμούς προκαλεί στο τεμάχιο που κατασκευάζεται, εάν συγκρουστεί τυχαία με κάποια στερεοποιημένη προεξοχή του προηγούμενου στρώματος. Ένας σκληρότερος επιστρωτήρας προκαλεί δονήσεις και δημιουργεί ένα μικροσκοπικό κενό αμφίπλευρα της στερεοποιημένης προεξοχής. Αυτό δημιουργεί μια ανομοιομορφία του νέου στρώματος σκόνης, που οδηγεί σε διαστασιακές ανακρίβειες του τελικού τεμαχίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτή η σύγκρουση μπορεί ακόμη και να παραμορφώσει ή να μετακινήσει ελαφρώς το στερεοποιημένο τεμάχιο, οδηγώντας σε ακατάλληλη σχετική θέση των στρώσεων, η οποία οδηγεί και πάλι σε διαστασιακές ανακρίβειες. Αντίθετα, οι πιο εύκαμπτες λεπίδες επανεπίστρωσης ελαχιστοποιούν ή και εξαλείφουν αυτή τη δόνηση, εξασφαλίζοντας τη διαστασιακή ακρίβεια του τελικού τεμαχίου [66].

Ο Wohlfart (2020) έχει κάνει ορισμένες σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με το υλικό του επιστρωτήρα (οδηγοί λεπίδες) και τότε πρέπει να προτιμάται ένας σκληρός (από ταχυχάλυβα ή κεραμικό υλικό) και τότε ένας μαλακός (ίνες άνθρακα, πυρίτιο ή καουτσούκ νιτριλίου βουταδιενίου-NBR) επιστρωτήρας [67]. Οι σκληρότεροι επιστρωτήρες παρέχουν υψηλότερη συμπίεση της σκόνης, καθώς και μεγαλύτερη επαναληψιμότητα και συνέπεια όσον αφορά το πάχος του στρώματος σκόνης. Μπορούν επίσης να απομακρύνουν τα πιτσιλίσματα (spatter) από την κλίνη σκόνης, «καθαρίζοντας» αποτελεσματικά τη επιμολυσμένη περιοχή και αποτρέποντας τις επιφανειακές ατέλειες του στρώματος. Παρουσιάζουν ανώτερη αντοχή στη φθορά, είναι ακριβότεροι, αλλά διαρκούν περισσότερο από τους μαλακότερους επιστρωτήρες. Ωστόσο, λόγω της ακαμψίας τους, εάν το προηγούμενο στρώμα έχει σχηματίσει τυχόν προεξοχές κατά τη στερεοποίησή του, η επαφή με τη λεπίδα είτε θα καταστρέψει τον επιστρωτήρα, είτε θα μετακινήσει ελαφρώς το τεμάχιο, προκαλώντας ανακρίβειες διαστάσεων [67], [68].

Επίσης, λόγω των υψηλών δυνάμεων τριβής, είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί σκληρός επιστρωτήρας όταν κατασκευάζονται εξαρτήματα με μεγάλο λόγο διαστάσεων (aspect ratio), καθώς αυτό θα μπορούσε να λυγίσει το εξάρτημα και να προκαλέσει διαστασιακές ανακρίβειες. Το ζήτημα αυτό θα μπορούσε να επιλυθεί εν μέρει μέσω της επιλογής του κατάλληλου προσανατολισμού του τεμαχίου για την κατασκευή. Επίσης, στην περίπτωση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού σε σκόνη, ένας σκληρός επιστρωτήρας μπορεί να είναι μόνο κεραμικός, αφού ο χάλυβας θα ανάγκαζε τα σωματίδια να κολλήσουν στη λεπίδα.

Από την άλλη πλευρά, το κύριο πλεονέκτημα ενός μαλακού επιστρωτήρα είναι το γεγονός ότι μπορεί να κατασκευάσει ευκολότερα εύθραυστες γεωμετρίες και εξαρτήματα με μεγάλο λόγο διαστάσεων, καθώς οι δυνάμεις τριβής είναι πολύ μικρότερες λόγω της ενδοτικότητας και υπάρχει μικρότερος κίνδυνος να σπάσει το εξάρτημα ή η λεπίδα. Επίσης, είναι λιγότερο πιθανό να δημιουργηθούν δονήσεις που θα μεταφερθούν στο στρώμα σκόνης με τη μορφή κυμάτωσης, λόγω των δυνάμεων τριβής. Τέλος, δεν θα σπάσει ή δεν θα δημιουργήσει διαστασιακές ανακρίβειες σε περίπτωση σύγκρουσης με μια στερεοποιημένη προεξοχή του προηγούμενου στρώματος, χάρη στην ενδοτικότητά του [67].

Πίνακας 2.6: Διασυνδέσεις μεταξύ του υλικού επιστρωτήρα και των άλλων παραμέτρων της κατεργασίας για ΣΚΠ.

4. Υλικό επιστρωτήρα	
1. Υλικό πούδρας	Βλέπε <u>Πίνακα 2.3.</u>
2. ΚΜΣ	Βλέπε <u>Πίνακα 2.4.</u>
3. Σχήμα σωματιδίων	Βλέπε <u>Πίνακα 2.5.</u>
5. Σχήμα επιστρωτήρα	Κύλινδροι: Ανοξείδωτος χάλυβας 316L. Οδηγοί Λεπίδες: Ανοξείδωτος χάλυβας, κεραμικά ή συμβατά πολυμερή
6. Στρατηγική επανεπίστρωσης	Χρήσιμο για την εξέταση της ταχύτητας εναπόθεσης υλικού για διάφορα σχήματα επιστρωτήρα και μοτίβα. Από όσο γνωρίζουν οι συγγραφείς, δεν υπάρχει τέτοια εργασία.
7. Πάχος στρώσης	Σκληρότεροι επιστρωτήρες \Rightarrow συμπίεση $\xrightarrow{\text{τριβή}\uparrow}$ ανεπιθύμητες δονήσεις στο στρώμα σκόνης και επιφανειακές ατέλειες, η επίδραση των οποίων είναι πιο επιζήμια όσο μικρότερο είναι το t_{act} .
8. Περιβαλλοντικές παράμετροι	Θερμοκρασία $\uparrow \xrightarrow{\text{θερμική διαστολή}}$ Οι μεταλλικοί (χαλύβδινοι ή αλουμινένιοι) και οι πολυμερείς επιστρωτήρες διαστέλλονται περισσότερο από τους κεραμικούς, γεγονός που επηρεάζει την ακρίβεια επίτευξης του t_{act} που έχει προκαθοριστεί από τον λογισμικό τεμαχισμού (κατόπιν αντιστάθμισης). Υγρασία $\uparrow \xrightarrow{\text{προσρόφηση}}$ Συνοχή σκόνης $\uparrow \Rightarrow$ Προτιμητέοι επιστρωτήρες από υλικά με χαμηλότερη επιφανειακή ενέργεια για να ελαχιστοποιηθεί η πρόσφυση της σκόνης στον επιστρωτήρα (πολυμερή > κεραμικά > μέταλλα κατά σειρά από τα περισσότερο προς τα λιγότερο προτιμώμενα) [69].

Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις μεταξύ του υλικού επιστρωτήρα και των άλλων παραμέτρων της κατεργασίας εναπόθεσης σκόνης για διεργασίες ΣΚΠ.

2.2.5 Σχήμα επιστρωτήρα

Οι Haeri et al. (2017) απέδειξαν με προσομοιώσεις ΜΔΣ ότι, υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας (ταχύτητα πρόωσης του επιστρωτήρα, πάχος στρώματος) και για την ίδια σκόνη, ένας αντιωρολογιακά περιστρεφόμενος κύλινδρος υπερτερεί έναντι μιας οδηγού λεπίδας, λόγω της «ανεπαρκούς επαφής μιας λεπίδας με την κλίνη, η οποία προκαλεί σύρσιμο των σωματιδίων και υποβαθμίζει την ποιότητα της κλίνης» (Haeri et al., 2017) [70]. Οι Zhang κ.ά. (2020) εξέτασαν τον αντιωρολογιακά περιστρεφόμενο

κύλινδρο ως μέσο εναπόθεσης σκόνης και συμπέραναν ότι, καθώς αυξάνεται η διάμετρος του κυλίνδρου, αυξάνεται η ζώνη συμπίεσης της σκόνης, άρα αυξάνεται ο βαθμός συμπίεσης του στρώματος [71]. Ωστόσο, αυτό ισχύει μόνο μέχρι ενός ορισμένου ορίου, διότι, εάν η δύναμη συμπίεσης γίνει πολύ ισχυρή και το πάχος του στρώματος δεν αυξηθεί ώστε να διανεμηθεί αυτή η αυξημένη δύναμη σε μεγαλύτερο όγκο, τότε το στρώμα σκόνης σπάει και ολόκληρα κομμάτια κρούστας παρασύρονται κατά μήκος της επιφάνειας από τον κύλινδρο, καταστρέφοντας το στρώμα. Οι Budding et al. (2013) απέδειξαν ότι, για την υπό εξέταση σκόνη και τα εξεταζόμενα μοτίβα εναπόθεσης, η βέλτιστη ρύθμιση ήταν ένας αντιωρολογιακά περιστρεφόμενος κύλινδρος διαμέτρου 22 mm (η εναλλακτική λύση ήταν διάμετρος 12 mm) [72]. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί, ότι οι κεκλιμένοι επιστρωτήρες ασκούν μεγαλύτερη συμπιεστική δύναμη στο εφαρμοζόμενο στρώμα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο βαθμό συμπίεσης, αλλά μόνο εάν η εναπόθεση παραμένει ομαλή και χωρίς φαινόμενα έκρηξης ή εμπλοκής σωματιδίων [73].

Ο Haeri (2017) εξέτασε διαφορετικά σχήματα προφίλ για κατακόρυφους επιστρωτήρες τύπου λεπίδας και πώς το προφίλ επηρεάζει το αποτέλεσμα του στρώματος σκόνης που εναποτίθεται. Χρησιμοποίησε αρχικά προσομοιώσεις ΜΔΣ με ραβδόμορφα σωματίδια διαμέτρου 10^{-4} m (D_{sph}) και για τον ορισμό του προφίλ της λεπίδας χρησιμοποιήθηκε ένα υπερελλειπτικό προφίλ (βλ. εξίσωση (2.11), ο επιστρωτήρας κινείται κατά μήκος του άξονα y).

$$\left| \frac{y}{a_s} \right|^{n_s} + \left| \frac{z}{b_s} \right|^{n_s} = 1 \quad (2.11)$$

Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, για κατακόρυφη λεπίδα (μηδενική κλίση) και διάκενο μεταξύ της ΟΛ και του υποστρώματος ίσο με $5D_{sph}$, για να εξασφαλιστεί ομοιογενές προφίλ ταχύτητας της ροής, οι βέλτιστες παράμετροι ήταν $n_s=5,0$, $a_s=100D_{sph}$, $b_s=10D_{sph}$. Για αυτές τις τιμές, το αποτέλεσμα της επανεπίστρωσης συγκρίθηκε με το αποτέλεσμα της εναπόθεσης με αντίρροπα περιστρεφόμενο κύλινδρο με την ίδια ταχύτητα πρόωσης και το ίδιο διάκενο. Για αυτές τις προσομοιώσεις ΜΔΣ χρησιμοποιήθηκαν ρεαλιστικά μοντέλα σωματιδίων πολλαπλών σφαιρών. Παρόλο που παρατηρείται η ίδια τάση (η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης μειώνει το βαθμό συμπίεσης και αυξάνει την επιφανειακή τραχύτητα του στρώματος που εναποτίθεται), η επιφανειακή τραχύτητα που επιτυγχάνεται με τη βελτιστοποιημένη λεπίδα είναι

μικρότερη από εκείνη που επιτυγχάνεται με τον αντίρροπα περιστρεφόμενο κύλινδρο και ο βαθμός συμπίεσης που επιτυγχάνεται μέσω της λεπίδας είναι υψηλότερος από εκείνον που επιτυγχάνεται μέσω του κυλίνδρου, με μια εξαίρεση για πολύ χαμηλές ταχύτητες πρόωσης. Επιπλέον, επιτευχθείς με τη λεπίδα βαθμός συμπίεσης επηρεάζεται πολύ λιγότερο από την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης από ό,τι ο επιτευχθείς με τον κύλινδρο, γεγονός που μπορεί να είναι αποτέλεσμα του φαινομένου έκρηξης σωματιδίων, το οποίο εντείνεται για έναν αντίρροπα περιστρεφόμενο κύλινδρο σε υψηλές ταχύτητες και μειώνει τη θετική επίδραση της υψηλής δύναμης συμπίεσης. Η λεπίδα με το υπερελλειπτικό προφίλ είναι παρόμοια περίπτωση με τη στρογγυλεμένη λεπίδα, πράγμα που σημαίνει ότι -αντίθετα με τον αντίρροπα περιστρεφόμενο κύλινδρο- παρά την υψηλή συμπιεστική δύναμη που ασκεί στο στρώμα, προκαλεί μηδενική σύγκρουση κίνησης σωματιδίων στην περιοχή συμπίεσης, οπότε είναι απρόσβλητο από το φαινόμενο της έκρηξης σωματιδίων [64], [73].

Οι Wang et al. (2021) [73] εξέτασαν διάφορα σχήματα επιστρωτήρων χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις ΜΔΣ. Πιο συγκεκριμένα, εξέτασαν την έμπροσθεν κεκλιμένη λεπίδα, την οπισθίως κεκλιμένη λεπίδα, την κατακόρυφη λεπίδα, την πλατιά λεπίδα, τον αντίρροπα περιστρεφόμενο κύλινδρο και τη στρογγυλεμένη λεπίδα. Κατέληξαν σε ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα:

1. Όσον αφορά τον όγκο των εναποτιθέμενων σωματιδίων, η σειρά από τον υψηλότερο (βέλτιστη τιμή) προς το χαμηλότερο είναι στρογγυλεμένη λεπίδα > κεκλιμένη λεπίδα > κύλινδρος, αλλά για μεγαλύτερο ονομαστικό πάχος μπορεί να είναι κύλινδρος > κεκλιμένη λεπίδα.
2. Όσον αφορά τη μετάδοση δυνάμεων επαφής στο υποκείμενο μέρος, η σειρά από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη είναι στρογγυλεμένη λεπίδα > κύλινδρος > κεκλιμένη λεπίδα > κάθετη λεπίδα. Ας σημειωθεί ότι, αφενός οι υψηλές δυνάμεις επαφής στη ζώνη συμπίεσης προάγουν τον υψηλότερο βαθμό συμπίεσης και, αφετέρου, μεταφέρουν υψηλότερες δυνάμεις στο υπό κατασκευή τεμάχιο μέσω τριβής, αυξάνοντας τον κίνδυνο παραμόρφωσης ή ελαφριάς μετακίνησής του, προκαλώντας διαστασιακά σφάλματα. Γίνεται σαφές ότι πρέπει να βρεθεί μία χρυσή τομή για να εξασφαλιστεί υψηλός βαθμός συμπίεσης και να αποφευχθούν τυχόν κίνδυνοι για ελαττώματα του τελικού τεμαχίου.

3. Με βάση το πόσο επηρεάζονται από το φαινόμενο της έκρηξης σωματιδίων, η σειρά από το πιο επηρεασμένο προς το λιγότερο επηρεασμένο (βέλτιστο) είναι κύλινδρος > κεκλιμένη λεπίδα > κάθετη λεπίδα > στρογγυλεμένη λεπίδα.
4. Το σύστημα με στρογγυλεμένες λεπίδες έχει τον μικρότερο διαχωρισμό μεγέθους σωματιδίων και το σύστημα με κυλίνδρους έχει τον μεγαλύτερο. Ο διαχωρισμός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό ανάμιξης των σωματιδίων στον σωρό σκόνης κατά την επανεπίστρωση, ο οποίος προωθείται από την αντίθετη περιστροφή του κυλίνδρου.

Πίνακας 2.7: Διασυνδέσεις μεταξύ του σχήματος του επιστρωτήρα και των άλλων παραμέτρων της διεργασίας για τη ΣΚΠ.

5. Σχήμα επιστρωτήρα	
1. Υλικό πούδρας	Βλέπε <u>Πίνακα 2.3</u> .
2. ΚΜΣ	Βλέπε <u>Πίνακα 2.4</u> .
3. Σχήμα σωματιδίων	Βλέπε <u>Πίνακα 2.5</u> .
4. Υλικό επιστρωτήρα	Βλέπε <u>Πίνακα 2.6</u> .
6. Στρατηγική επανεπίστρωσης	<p>Μοτίβα:</p> <p>Οδηγός λεπίδα (ΟΛ, μόνη, διάφορα σχήματα προφίλ και γωνίες κλίσης)</p> <p>Κύλινδρος (Κ, μόνος, Ωρολογιακή (Ω) ή Αντιωρολογιακή (ΑΩ) περιστροφή ή ΑΩ και Ω σε επαναφορά)</p> <p>ΟΛ&Κ (Ω ή ΑΩ)</p> <p>Πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί ταχύτητας πρόωσης και περιστροφής</p>
7. Πάχος στρώσης	<p>Διάμετρος κυλίνδρου $\uparrow \Rightarrow$ Συμπύεση στρώματος \uparrow έως ένα ορισμένο όριο θραύσης για κάθε πάχος στρώματος (για κάθε t_{eff}, υπάρχει ένα $D_{r,max}$). Ενδεχομένως μια παρόμοια σχέση ισχύει για μια κεκλιμένη λεπίδα, δεδομένου ότι η κλίση εφαρμόζει συμπύεση (μέγιστη κλίση για το πάχος στρώματος).</p>
8. Περιβαλλοντικές παράμετροι	<p>Τόσο για υψηλές (π.χ. κύλινδρος) όσο και για χαμηλές δυνάμεις συμπύεσης (π.χ. λεπίδα), μια πολύ υψηλή ή πολύ χαμηλή σχετική υγρασία επηρεάζει αρνητικά τη ρευστότητα και τη συμπιεστότητα της σκόνης. Βέλτιστη σχετική υγρασία γύρω στο 45%. Η θερμοκρασία δεν έχει αξιολογηθεί στη βιβλιογραφία.</p>

Στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις μεταξύ του σχήματος του επιστρωτήρα και των άλλων παραμέτρων της διεργασίας εναπόθεσης σκόνης για κατεργασίες ΣΚΠ.

2.2.6 Παράμετροι Διαδικασίας Επανεπίστρωσης και Ρύθμιση / Μοτίβο Διασποράς

Οι παράμετροι της διαδικασίας επανεπίστρωσης εδώ αναφέρονται αυστηρά στη ρύθμιση του συστήματος εναπόθεσης σκόνης. Οι κύριες παράμετροι είναι η ταχύτητα πρόωσης του επιστρωτήρα (σημαντική ανεξαρτήτως του σχήματος του επιστρωτήρα και των γενικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών), η γωνιακή ταχύτητα του επιστρωτήρα (στην περίπτωση κυλίνδρου), η κατεύθυνση περιστροφής του επιστρωτήρα (δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα, και πάλι στην περίπτωση κυλίνδρου) και η γωνία κλίσης της οδηγού λεπίδας.

Με βάση τη ρύθμιση του συστήματος εναπόθεσης πούδρας (ΣΕΠ) κάθε μηχανήματος, υπάρχουν ποικίλα διαφορετικά μοτίβα εναπόθεσης, όρος που συναντάται επίσης σε πολλές εργασίες ως «στρατηγικές επανεπίστρωσης». Οι πιο συνηθισμένες στρατηγικές παρατίθενται εδώ. Υπάρχουν περισσότερες στρατηγικές που μπορούν να επινοηθούν, στηριζόμενες σε επιστρωτήρες διαφορετικών σχημάτων (όπως η στρογγυλεμένη λεπίδα [73], η οποία δοκιμάστηκε και αποδείχθηκε ότι υπερτερεί του κυλίνδρου σε προσομοιώσεις ΜΔΣ), αλλά δεν έχει βρεθεί καμία πειραματική εργασία που να τις θέτει πραγματικά σε δοκιμή για να επαληθεύσει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

1. Αντίθετα-περιστρεφόμενος κύλινδρος (ΑΩ) (Με ή χωρίς κόσκινο [59])
2. Εμπρόσθια περιστρεφόμενος κύλινδρος (Ω) (Με ή χωρίς κόσκινο [59])
3. Οδηγός λεπίδα (ΟΛ) (Με ή χωρίς κόσκινο [59])
4. Οδηγός λεπίδα (ΟΛ) και ΑΩ κύλινδρος (Με ή χωρίς κόσκινο [59])
5. Οδηγός λεπίδα (ΟΛ) και Ω κύλινδρος (Με ή χωρίς κόσκινο [59])
6. Οδηγός λεπίδα (ΟΛ) και ΑΩ κύλινδρος στην εμπρόσθια κίνηση του ΣΕΠ, κατόπιν μικροσκοπική θετική κίνηση του άξονα z από το έμβολο κατασκευής και ΑΩ κίνηση του κυλίνδρου στην επιστροφή του ΣΕΠ στην αρχική θέση (Η ΑΩ λειτουργεί ως εμπρόσθια περιστροφή όταν το ΣΕΠ κινείται από τα δεξιά προς τα αριστερά του τραπεζιού, κατά την επαναφορά)

Εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς, μέχρι σήμερα δεν έχει γραφτεί συγκεντρωτική, συγκριτική μελέτη όλων των πιθανών στρατηγικών επανεπίστρωσης, ώστε να

προσδιοριστεί ποια από αυτές παρέχει καλύτερα αποτελέσματα και σε ποιες συνθήκες (όσον αφορά τις παραμέτρους της διεργασίας 2.2.1 έως 2.2.8).

Οι Budding et al. (2013) εξέτασαν πειραματικά διαφορετικές διατάξεις εναπόθεσης σκόνης. Συγκεκριμένα, εξέτασαν την εναπόθεση μέσω μιας ΟΛ, ενός κυλίνδρου που περιστρέφεται αντίθετα, ενός κυλίνδρου που περιστρέφεται προς τα εμπρός και ενός συνδυασμού μιας ΟΛ που ακολουθείται από έναν κύλινδρο που περιστρέφεται προς τα εμπρός [72]. Απέδειξαν ότι η στρατηγική του κυλίνδρου με εμπρόσθια περιστροφή οδηγεί σχεδόν πάντα σε διαχωρισμό της επιφάνειας του στρώματος, καταστρέφοντας το στρώμα, λόγω των πολύ υψηλών δυνάμεων συμπίεσης. Είναι δυνατόν να λειτουργήσει μόνο για περαιτέρω συμπίεση του ήδη εναποτιθέμενου στρώματος σκόνης (βλέπε στρατηγική #6) και σε πολύ χαμηλές ταχύτητες πρόωσης.

Πίνακας 2.8: Διασυνδέσεις μεταξύ της στρατηγικής επανεπίστρωσης και των άλλων παραμέτρων για την ΣΚΠ.

	6. Στρατηγική επανεπίστρωσης
1. Υλικό πούδρας	Βλέπε <u>Πίνακα 2.3</u> .
2. ΚΜΣ	Βλέπε <u>Πίνακα 2.4</u> .
3. Σχήμα σωματιδίων	Βλέπε <u>Πίνακα 2.5</u> .
4. Υλικό επιστρωτήρα	Βλέπε <u>Πίνακα 2.6</u> .
5. Σχήμα επιστρωτήρα	Βλέπε <u>Πίνακα 2.7</u> .
7. Πάχος στρώσης	Τα μοτίβα εναπόθεσης μπορούν να ενσωματώσουν χειρισμό του πάχους : π.χ., αριστερόστροφος κύλινδρος ή λεπίδα σε ($t_{act}+dt$), στη συνέχεια, σε αντίστροφη κίνηση, αριστερόστροφος κύλινδρος συμπίεσης, σε πάχος t_{act} . Η ταχύτητα πρόωσης και το t_{act} αντισταθμίζουν το ένα το άλλο όσον αφορά το βαθμό συμπίεσης (εάν το $t_{act}\downarrow$, το u_{trans} πρέπει επίσης να \downarrow για να επιτευχθεί η ίδια ποιότητα στρώματος).
8. Περιβαλλοντικές παράμετροι	Υγρασία $\uparrow \xrightarrow{\text{προσρόφηση}} \text{Συνοχή σκόνης} \uparrow \Rightarrow$ Η ταχύτητα πρόωσης πρέπει \downarrow ώστε να επιτυγχάνεται αντιστάθμιση και να διατηρείται την ποιότητα του στρώματος.

Οι Zhang et al. (2020) ανέπτυξαν μια προσομοίωση ΜΔΣ για να εξετάσουν τη δυναμική και τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται από έναν κύλινδρο που περιστρέφεται αντίθετα. Εξέτασαν την επίδραση σε παράγοντες όπως η διάμετρος του κυλίνδρου, η ταχύτητα πρόωσης και κύλισης του κυλίνδρου και το ονομαστικό πάχος

του στρώματος [71]. Διαπίστωσαν ότι η ταχύτητα πρόωσης είναι ο σημαντικότερος παράγοντας, καθώς, αν αυξηθεί πέραν ενός ορίου, δεν είναι δυνατόν το στρώμα σκόνης να διατηρήσει χαμηλή επιφανειακή τραχύτητα και ικανοποιητικό βαθμό συμπίεσης. Ανάλογα με το φαινόμενο της έκρηξης των σωματιδίων, που προκαλείται από τη σύγκρουση της κίνησης των σωματιδίων μεταξύ του επιστρωτήρα και του υποστρώματος, η αυξημένη ταχύτητα πρόωσης, ειδικά στην περίπτωση ενός αντίθετα περιστρεφόμενου κυλίνδρου, προκαλεί εξαιρετικά ανομοιογενή επιφάνεια, σε σημείο που ακόμη και το λαμβανόμενο πάχος στρώματος να είναι πολύ διαφορετικό σε σύγκριση με το αναμενόμενο πραγματικό πάχος στρώματος [73].

Στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις μεταξύ της στρατηγικής επανεπίστρωσης και των άλλων παραμέτρων της διεργασίας εναπόθεσης σκόνης για κατεργασίες ΣΚΠ.

2.2.7 Ονομαστικό, Αποτελεσματικό και Πραγματικό Πάχος Στρώσης

Όταν το πρώτο στρώμα πούδρας σε μια διαδικασία ΣΚΠ εναποτίθεται πάνω στο έμβολο κατασκευής που κινείται προς τα κάτω, το αναμενόμενο πάχος στρώματος είναι ίσο με την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της άνω επιφάνειας του εμβόλου και της επιφάνειας που ορίζεται από την κατώτερη ακμή του επιστρωτήρα καθώς κινείται κατά μήκος του άξονα x (γενέτειρα ενός κυλίνδρου ή κάτω ακμή μιας οδηγού λεπίδας), η οποία θα αναφέρεται στο εξής ως «άνω επιφάνεια του στρώματος πούδρας». Το δεύτερο στρώμα θα εναποτεθεί πάνω στο πρώτο στρώμα πούδρας, αφού το έμβολο κινηθεί προς τα κάτω κατά ΔΗ. ΔΗ είναι το ονομαστικό / θεωρητικό πάχος στρώματος (t_{nom}), και είναι ίσο με την προς τα κάτω μετατόπιση του εμβόλου κατασκευής μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων πούδρας. Ωστόσο, η πούδρα έχει ορισμένα συγκεκριμένα ρεολογικά χαρακτηριστικά που, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία και την κίνηση του επιστρωτήρα, καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο η πούδρα θα απλωθεί στο υπόστρωμα, είτε πρόκειται για την επιφάνεια του εμβόλου είτε για το προηγούμενο στρώμα πούδρας. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τα φαινόμενα τριβής-κίνησης μεταξύ των σωματιδίων της σκόνης και του υποστρώματος, η άνω επιφάνεια του στρώματος σκόνης δεν είναι ένα απόλυτα ομαλό, οριζόντιο επίπεδο, αλλά έχει κάποια τραχύτητα, και ανάλογα με τις παραμέτρους εναπόθεσης και τα χαρακτηριστικά της σκόνης,

μπορεί ακόμη και να παρουσιάζει κάποιες ασυνέχειες, όπως κρατήρες, κορυφές και κυματισμούς [71].

Αφού ολοκληρωθεί η πυροσυσσωμάτωση/ τήξη του n -οστού στρώματος, το έμβολο χαμηλώνει κατά το ονομαστικό πάχος, προκειμένου ο επιστρωτήρας να απλώσει το $(n+1)$ -οστό στρώμα σκόνης. Ωστόσο, όταν τα σωματίδια του προηγούμενου στρώματος λιώνουν, το λιωμένο υλικό γεμίζει τα κενά μεταξύ των σωματιδίων, μειώνοντας το πορώδες του στρώματος. Είναι ακόμη πιθανό να εμφανιστούν φαινόμενα διήθησης, όπου το λιωμένο υλικό διεισδύει σε κάποιο βαθμό στη γειτονική μη πυροσυσσωματωμένη σκόνη. Επίσης, κατά τη διάρκεια της παγίωσης του λιωμένου υλικού, παρουσιάζεται κάποια περαιτέρω συρρίκνωση. Τα φαινόμενα αυτά κάνουν την άνω επιφάνεια του νιοστού στρώματος σκόνης να είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με το σημείο όπου βρισκόταν πριν από τη διαδικασία τήξης/συσσωμάτωσης. Το ύψος του στρώματος που μετράται μεταξύ της άνω επιφάνειας του n -οστού στρώματος σκόνης μετά τη συρρίκνωση και της άνω επιφάνειας του $(n+1)$ -οστού στρώματος σκόνης πριν από τη συρρίκνωση ονομάζεται αποτελεσματικό πάχος στρώματος (t_{eff}). Οι Jacob et al. (2018) απέδωσαν τη διαφορά μεταξύ του αποτελεσματικού και του ονομαστικού πάχους στρώματος στη συρρίκνωση τήξης και παγίωσης του στρώματος [74]. Όρισαν τις εξισώσεις που υπολογίζουν το αποτελεσματικό πάχος στρώματος, ως εξής

$$t_{eff,n+1} = t_{eff,n} + (t_{shrink,n} - t_{shrink,n-1}) \quad (2.12)$$

$$t_{shrink,n} = t_{eff,n} \cdot (1 - \varphi_n) \quad (2.13)$$

Όπου φ_n ο βαθμός συμπίεσης (πυκνότητα πλήρωσης) της νιοστής στρώσης.

Για να διασφαλιστεί ότι όλα τα στρώματα έχουν σκόνη ίδιας ΚΜΣ, είναι απαραίτητο να ισχύει ότι

$$d_{90} < t_{act,min} = t_{nom} \quad (2.14)$$

Για κάθε στρώμα, από το πρώτο έως το τελευταίο που εναποτίθεται, το μέγιστο μέγεθος των σωματιδίων πρέπει να είναι περίπου μικρότερο από το πραγματικό πάχος του στρώματος, διαφορετικά τα μεγαλύτερα σωματίδια θα παρασυρθούν από τον επιστρωτήρα κατά μήκος του υποστρώματος, δημιουργώντας αυλακώσεις στο νέο

στρώμα σκόνης που εναποτίθεται, όπως αναφέρουν οι Utela et al. (2008) στην ανασκόπησή τους για το 3DP [19], [75]. Ακόμη και αν δεν προκαλέσουν αυλακώσεις, αν τα μεγαλύτερα σωματίδια παρασυρθούν, τότε το στρώμα θα αποτελείται μόνο από λεπτότερα σωματίδια, πράγμα που σημαίνει ότι η ΚΜΣ της αποτιθέμενης σκόνης θα είναι διαφορετική από την πραγματική ΚΜΣ της σκόνης, εισάγοντας σφάλμα μεταξύ των στρωμάτων. Ωστόσο, η ίδια αρχή πρέπει να εφαρμόζεται στα στρώματα σκόνης που εναποτίθενται για κάθε διαδικασία ΣΚΠ.

Πίνακας 2.9: Διασυνδέσεις μεταξύ του πάχους στρώματος και των άλλων παραμέτρων διεργασίας για ΣΚΠ.

	7. Πάχος στρώσης
1. Υλικό πούδρας	Βλέπε <u>Πίνακα 2.3.</u>
2. ΚΜΣ	Βλέπε <u>Πίνακα 2.4.</u>
3. Σχήμα σωματιδίων	Βλέπε <u>Πίνακα 2.5.</u>
4. Υλικό επιστρωτήρα	Βλέπε <u>Πίνακα 2.6.</u>
5. Σχήμα επιστρωτήρα	Βλέπε <u>Πίνακα 2.7.</u>
6. Στρατηγική επανεπίστρωσης	Βλέπε <u>Πίνακα 2.8.</u>
8. Περιβαλλοντικές παράμετροι	$\text{Υγρασία} \uparrow \xrightarrow{\text{προσρόφηση}} \text{Συνοχή σκόνης} \uparrow \Rightarrow \text{Ποιότητα στρώματος} \downarrow$ <p>για το ίδιο πάχος στρώματος. Το πάχος στρώματος πρέπει να \uparrow για να διατηρηθούν τα ίδια επίπεδα ποιότητας στρώματος</p>

Οι Shamsdini et al. (2020) εξέτασαν την επίδραση της αύξησης του (ονομαστικού) πάχους στρώματος από 40 μm σε 50 μm προκειμένου να αυξηθεί ο ρυθμός παραγωγής με μείωση του χρόνου ανά τεμάχιο. Απέδειξαν ότι, για μικρές αυξήσεις του πάχους στρώματος, παρόλο που μια τέτοια αλλαγή μπορεί να επηρεάσει τη μικροδομή, είναι δυνατόν να επιτευχθούν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες (σχεδόν ίδια αντοχή σε εφελκυσμό και επιμήκυνση κατά τη θραύση και ελαφρώς χαμηλότερη σκληρότητα για τα δείγματα που κατασκευάστηκαν με μεγαλύτερο πάχος στρώματος). Αυτό είναι εφικτό ακόμη και με τη χρήση των ίδιων παραμέτρων κατεργασίας που σχετίζονται με την ισχύ/το λέιζερ (ταχύτητα σάρωσης λέιζερ, ισχύς λέιζερ, απόσταση μεταξύ διαδοχικών πάσων), εάν επιλεγούν προσεκτικά [76].

Στον Πίνακα 2.9 παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις μεταξύ του πάχους στρώματος και των άλλων παραμέτρων διεργασίας της εναπόθεσης σκόνης για κατεργασίες ΣΚΠ.

2.2.8 Περιβαλλοντικές Παράμετροι

Μια πτυχή που δεν έχει διερευνηθεί από πολλούς ερευνητές είναι η επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων στα ρεολογικά χαρακτηριστικά της σκόνης και στη διαδικασία εναπόθεσης της σκόνης γενικότερα. Ενώ έχει αποδειχθεί ότι η θερμοκρασία του θαλάμου και της πλάκας κατασκευής και η υγρασία παίζουν σημαντικό ρόλο στη θερμική διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης ή της τήξης και στερεοποίησης της σκόνης, λίγοι έχουν εξετάσει πώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν τη διαδικασία διασποράς της σκόνης και ποια είναι η σχέση μεταξύ αυτών και των υπόλοιπων παραμέτρων της διαδικασίας.

Όσον αφορά την υγρασία, η σχετική υγρασία δείχνει πόση ποσότητα νερού σε μορφή ατμών υπάρχει στην ατμόσφαιρα ή, στην προκειμένη περίπτωση, σε έναν κλειστό θάλαμο. Τα μόρια νερού που εξατμίζονται μπορεί να έρθουν σε επαφή με τα σωματίδια σκόνης. Εάν συμβεί αυτό, ανάλογα με τις υγροσκοπικές ιδιότητες του υλικού, τα μόρια νερού μπορούν να απορροφηθούν ή να προσροφηθούν από το σωματίδιο, γεγονός που επηρεάζει δραστικά τα μηχανικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά του. Όπως αναφέρθηκε, η υγρασία μπορεί να επηρεάσει τα σωματίδια με δύο τρόπους, μέσω απορρόφησης ή προσρόφησης. Κατά την πρώτη, το σωματίδιο απορροφά τα μόρια του νερού, «μουλιάζει» από αυτά, με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη συγκέντρωση μορίων νερού σε όλο τον όγκο του σωματιδίου. Αντίθετα, κατά τη δεύτερη περίπτωση, τα μόρια νερού προσκολλώνται στην εξωτερική επιφάνεια του σωματιδίου, το περιβάλλουν αντί να διεισδύουν στο εσωτερικό του όγκου του. Όσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία (RH) του θαλάμου, τόσο περισσότερα μόρια νερού θα απορροφηθούν και θα προσροφηθούν από τα σωματίδια σκόνης.

Ο συντελεστής απορρόφησης νερού εξαρτάται κυρίως από το υλικό. Άλλα υλικά (που ονομάζονται «υγροσκοπικά», όπως τα πολυμερή όπως το PA6, ένας τύπος νάιλον) μπορούν να απορροφήσουν μεγαλύτερες ποσότητες υγρασίας και άλλα, όπως τα περισσότερα μέταλλα, μικρότερες. Η απορρόφηση υγρασίας συνδέεται άμεσα με το πορώδες των σωματιδίων της σκόνης. Όσο περισσότερους πόρους έχει ένα σωματίδιο, τόσο περισσότερα μόρια νερού θα παγιδευτούν σε αυτούς. Οι Strømme et al. (2000)

απέδειξαν ότι τα πορώδη γυάλινα σωματίδια έχουν τόσο υψηλότερο ποσοστό απορρόφησης όσο και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σύγκριση με τα στερεά γυάλινα σφαιρίδια παρά το γεγονός ότι είναι από το ίδιο υλικό, χάρη στο υψηλότερο πορώδες που είχαν σε όλο τον όγκο τους [77]. Τα σωματίδια σκόνης απορροφούν την υγρασία τόσο με τριχοειδή απορρόφηση όσο και με διόγκωση. Ο τριχοειδής εμποτισμός συμβαίνει σχεδόν ακαριαία, αλλά η διόγκωση είναι μια διαδικασία που απαιτεί κάποιο χρόνο [78].

Η διόγκωση των σωματιδίων, η οποία προκαλείται από την απορρόφηση υγρασίας, αυξάνει το μέγεθός τους και μεταβάλλει ελαφρώς το σχήμα τους. Αυτό καθιστά προφανές ότι, στην περίπτωση σκόνης με υψηλή απορροφητικότητα υγρασίας, είναι απαραίτητο να διατηρείται η RH σε χαμηλά επίπεδα, διότι η κατανομή μεγέθους μπορεί να μεταβληθεί εάν τα σωματίδια απορροφήσουν αρκετή υγρασία. Από την άλλη πλευρά, η προσρόφηση νερού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους εκτός από το υλικό. Μία από αυτές είναι η θερμοκρασία. Ο συντελεστής προσρόφησης είναι αντιστρόφως ανάλογος της θερμοκρασίας, που σημαίνει ότι, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ποσότητα των μορίων νερού που θα προσροφηθεί από ένα σωματίδιο σκόνης. Αυτό εξηγείται καθώς πρόκειται για μια εξώθερμη διαδικασία. Ωστόσο, αυτό ισχύει μόνο για τη φυσική προσρόφηση, η οποία είναι η μόνη περίπτωση προσρόφησης που μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διαδικασία εναπόθεσης σκόνης, δεδομένου ότι η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή για να προκαλέσει χημειοπροσρόφηση μεταξύ οξυγόνου και μεταλλικών σκονών (η οποία μπορεί να συμβεί κατά το στάδιο της θερμικής επεξεργασίας των κατεργασιών ΣΚΠ). Επιπλέον, όσο λιγότερο σφαιρικό είναι ένα σωματίδιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξωτερική του επιφάνεια, πράγμα που σημαίνει ότι είναι πιο επιρρεπές στην προσρόφηση πολλών μορίων υδρατμών. Το ίδιο ισχύει και αν τα σωματίδια έχουν υψηλό πορώδες, καθώς δημιουργούνται κοιλότητες όπου τα μόρια νερού μπορούν να προσκολληθούν στο σωματίδιο. Επιπλέον, εάν μια σκόνη έχει πολύ λεπτά σωματίδια ή πολλούς δορυφόρους, αυτό σημαίνει ότι το κλάσμα επιφάνειας/όγκου αυξάνεται δραστικά για δεδομένη ποσότητα (μάζα) σκόνης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι λεπτόκοκκες σκόνες επηρεάζονται περισσότερο από την προσρόφηση.

Οι Lefebvre et al. (2019) απέδειξαν ότι η προσρόφηση συμβαίνει γρήγορα και επηρεάζει τη ρευστότητα της σκόνης υπό χαμηλές τάσεις ροής (όπως αυτές που παρατηρούνται με έναν επιστρωτήρα με σχήμα λεπίδας), αλλά δεν υπάρχει σημαντική

επίδραση στη ρευστότητα υπό υψηλές δυνάμεις συμπίεσης (όπως όταν χρησιμοποιείται ένας κυλινδρικός επιστρωτήρας) [79], πιθανώς επειδή οι υψηλές δυνάμεις συμπίεσης υπερκαλύπτουν τις τριχοειδείς δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των υγρών διασωματιδιακών δεσμών που δημιουργούνται από τα μόρια νερού που προσροφώνται από τα σωματίδια [80]. Ωστόσο, δεδομένου ότι η πρώτη ύλη σε μορφή σκόνης αποθηκεύεται αρχικά σε σιλό ή σε έμβολο αποθήκευσης, μπορεί να δημιουργήσει πολλούς υγρούς δεσμούς και να δημιουργήσει συσσωματώματα τα οποία είτε πρέπει να αποξηρανθούν ή τουλάχιστον να κοσκινιστούν πριν από την επανεπίστρωση, είτε πρέπει να σπάσουν μέσω του συστήματος εναπόθεσης, το οποίο αντιμετωπίζει πολλές δυσκολίες. Η επαναχρησιμοποιημένη σκόνη είναι ακόμη πιο επιρρεπής στην προσρόφηση σε σύγκριση με την παρθένα σκόνη, επειδή κατά τη διάρκεια των κύκλων εργασίας η σφαιρικότητα των σωματιδίων μειώνεται και δημιουργούνται περισσότεροι δορυφόροι και λεπτά σωματίδια, αυξάνοντας τη συνολική αναλογία επιφάνειας προς όγκο της σκόνης. Επιπλέον, οι Rescaglio et al. (2017) απέδειξαν ότι είναι πιο δύσκολο για μια σκόνη να επιτύχει την επιθυμητή πυκνότητα πλήρωσης μέσω συμπίεσης όταν η σχετική υγρασία είναι είτε πολύ υψηλή, λόγω των υγρών δεσμών και της τριχοειδούς έλξης, είτε πολύ χαμηλή, επειδή τα ηλεκτροστατικά φορτία κυριαρχούν και αυξάνουν τη συνοχή της σκόνης [81]. Ως εκ τούτου, οι ακραίες τιμές της σχετικής υγρασίας μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη ρευστότητα της σκόνης τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές δυνάμεις συμπίεσης.

Τέλος, όσον αφορά τη θερμοκρασία, έχει αποδειχθεί ότι η συνοχή των κόνεων επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Παρόλο που υπάρχει πληθώρα άρθρων που εξετάζουν τη ρευστότητα μιας σκόνης, οι δοκιμές εκτελούνται κυρίως σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, παρόλο που είναι κοινή γνώση στον τομέα της ΠΚ ότι το έμβολο κατασκευής και ο θάλαμος προθερμαίνονται, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι παραμένουσες τάσεις και ο σχηματισμός ρωγμών και να επιτευχθεί ένα πυκνότερο τελικό τεμάχιο με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες [82], [83], [84] [85].

Ωστόσο, ορισμένες εργασίες δείχνουν ότι η προθέρμανση μπορεί επίσης να έχει αρνητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη μηχανική αντοχή και τη σκληρότητα [86], επομένως είναι σημαντικό να επιλέγεται προσεκτικά η μέθοδος προθέρμανσης και το εύρος θερμοκρασίας τόσο του θαλάμου όσο και της πλάκας κατασκευής. Η θερμοκρασία προθέρμανσης επιλέγεται με βάση τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης για τις σκόνης πολυμερών (υπολογίζεται μέσω διαφορικής θερμιδομετρίας

σάρωσης-DSC) και το σημείο τήξης για τα κράματα και τις μεταλλικές σκόνες. Πιο συγκεκριμένα, η προθέρμανση των πολυμερών γίνεται σε θερμοκρασία ελαφρώς χαμηλότερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης [87], ενώ η θερμοκρασία προθέρμανσης για τα μέταλλα και τα κράματα συνήθως βρίσκεται περίπου στο ένα τέταρτο έως το ήμισυ της θερμοκρασίας τήξης [84], [82], [86], αν και έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασίες προθέρμανσης ακόμη και στο ένα δέκατο της θερμοκρασίας τήξης (π.χ. για Ti-6Al-4V) [84].

Ειδικά σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, πολλοί ερευνητές έχουν αποδείξει ότι η διαφορά σε σχέση με τη θερμοκρασία αποθήκευσης συνέβαλε σε αλλαγή της ρευστότητας της σκόνης, η οποία αποδίδεται κυρίως στη διαφορά στη συνοχή της σκόνης [88]. Ωστόσο, δεν κατέστη δυνατό να διαπιστωθεί μια μονοσήμαντη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και των ρεολογικών ιδιοτήτων της σκόνης, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι και άλλες παράμετροι, όπως το υλικό της σκόνης και το είδος της δοκιμαστικής και πειραματικής συσκευής που χρησιμοποιείται για τη λήψη των μετρήσεων, επηρεάζουν τα αποτελέσματα [88].

Πίνακας 2.10: Διασυνδέσεις μεταξύ των περιβαλλοντικών παραμέτρων και των άλλων παραμέτρων της διεργασίας για τη ΣΚΠ.

	8. Περιβαλλοντικές παράμετροι
1. Υλικό πούδρας	Βλέπε <u>Πίνακα 2.3.</u>
2. ΚΜΣ	Βλέπε <u>Πίνακα 2.4.</u>
3. Σχήμα σωματιδίων	Βλέπε <u>Πίνακα 2.5.</u>
4. Υλικό επιστρωτήρα	Βλέπε <u>Πίνακα 2.6.</u>
5. Σχήμα επιστρωτήρα	Βλέπε <u>Πίνακα 2.7.</u>
6. Στρατηγική επανεπίστρωσης	Βλέπε <u>Πίνακα 2.8.</u>
7. Πάχος στρώσης	Βλέπε <u>Πίνακα 2.9.</u>

Η αξιολόγηση της ρευστότητας της σκόνης έχει πραγματοποιηθεί με διάφορες πειραματικές μεθόδους και προσομοιώσεις. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά τα πειράματα και τις προσομοιώσεις αξιολογούν την απλωσιμότητα και τις ρεολογικές ιδιότητες της σκόνης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ αυτό δεν συμβαίνει στις κατεργασίες ΣΚΠ. Είναι υψίστης σημασίας να αναπτυχθούν πειράματα και

προσομοιώσεις ΜΔΣ που θα λαμβάνουν υπόψη τη θερμοκρασία προθέρμανσης της κατεργασίας και τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει την κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός στρώματος σκόνης, προκειμένου να προβλεφθεί με ακρίβεια το αποτέλεσμα της διεργασίας εναπόθεσης της σκόνης. Οι εργασίες των Ruggi et al. (2020) και van der Eynde et al. (2017) είναι χρήσιμες προς αυτή την κατεύθυνση [88], [89]. Ο πρώτος χρησιμοποίησε μια ειδικά κατασκευασμένη συσκευή για τη μέτρηση της ρευστότητας της σκόνης σε υψηλές θερμοκρασίες και απέδειξε ότι η χρήση του κοκκομετρικού αριθμού Bond είναι πιο χαρακτηριστική για το πόσο καλά ρέει μια σκόνη κατά την εναπόθεση στρώματος σκόνης για κατεργασίες ΣΚΠ σε σύγκριση με δοκιμές που σχετίζονται με τη συμπύκνωση, όπως η δοκιμή διάτμησης Jenike [88]. Ο δεύτερος επέκτεινε μια προσαρμοσμένη διάταξη διασκορπιστή σκόνης με βάση λεπίδες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας με κεραμικές θερμάστρες υπερύθρων σε συνδυασμό με βρόχο ελέγχου PID για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας κλίνης σκόνης. Η συσκευή τους μπορεί να μετρήσει την πυκνότητα πλήρωσης μέσω της μέτρησης του βάρους του στρώματος σκόνης και της διαίρεσης με το πάχος του στρώματος και να κάνει τη σύνδεση με τη θερμοκρασία, καθιστώντας την πολύ χρήσιμη πειραματική διάταξη για την άντληση δεδομένων σχετικά με τη διαδικασία [89].

Στον Πίνακα 2.10 παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις μεταξύ των περιβαλλοντικών παραμέτρων και των άλλων παραμέτρων της διεργασίας εναπόθεσης σκόνης για τις κατεργασίες ΣΚΠ.

2.3 Η Σημασία της Ρευστότητας της Σκόνης

Η ρευστότητα της σκόνης, δηλαδή το πόσο εύκολα ρέει μια σκόνη, συμπεριφερόμενη ως ρευστό, χρησιμεύει ως συνδετικός κρίκος μεταξύ των παραμέτρων της διεργασίας (Παράγραφοι 2.2.1 έως 2.2.8) και των δεικτών ποιότητας του στρώματος σκόνης (Παράγραφοι 2.4.1 έως 2.4.4). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ρευστότητα της σκόνης επηρεάζει άμεσα την απλωσιμότητα της σκόνης. Ωστόσο, «η ρευστότητα δεν είναι μια εγγενής ιδιότητα του υλικού» (Budding et al., 2013) [72]. Η ρευστότητα είναι μάλλον, το αποτέλεσμα διαφόρων γεωμετρικών και φυσικών ιδιοτήτων της εξεταζόμενης σκόνης και των σωματιδίων της, σε συνδυασμό με περιβαλλοντικές παραμέτρους και ακόμη και τη μέθοδο μέτρησης [79].

Στη βιβλιογραφία ορίζονται «εξωτερικές μεταβλητές» που επηρεάζουν τον τρόπο συμπεριφοράς μιας σκόνης. Αυτές είναι η παγίωση, ο αερισμός, ο ρυθμός ροής (διάτμησης), η υγρασία, το ηλεκτροστατικό φορτίο και ο χρόνος αποθήκευσης [80]. Στην περίπτωση της εναπόθεσης στρώματος σκόνης για ΣΚΠ, οι μεταβλητές που εμπλέκονται είναι ο ρυθμός ροής, η υγρασία, ο χρόνος αποθήκευσης και, σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. πολυμερικές σκόνες), το ηλεκτροστατικό φορτίο.

Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, το σχήμα των σωματιδίων και το υλικό της σκόνης επηρεάζουν άμεσα τη ρευστότητα της σκόνης. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι «για σκόνες στενής κατανομής μεγέθους σωματιδίων όσο πιο σφαιρικά και μεγαλύτερα είναι τα σωματίδια, τόσο καλύτερη είναι η συμπεριφορά ροής τους» (Grossin et al., σελίδα 4, 2021 [90]). Επιπλέον, το υλικό είναι επίσης καθοριστικής σημασίας, καθώς, στην περίπτωση των πολυμερών, τα σωματίδια αποκτούν κάποιο τριβοηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επανεπίστρωσης, το οποίο επηρεάζει τη ρευστότητα [91], [79], [81]. Οι Hesse et al. (2019) ανέπτυξαν μια μέθοδο για τη μέτρηση της δημιουργίας ηλεκτροστατικού ρεύματος στα σωματίδια πολυμερούς σκόνης κατά τη διάρκεια της επάλειψης για ΕΠΛ, αποδεικνύοντας ότι το φορτίο ενισχύεται σημαντικά για παλαιωμένο υλικό σκόνης, γεγονός που ενδεχομένως επηρεάζει τη ρευστότητα των μειγμάτων σκόνης με υψηλή αναλογία επαναχρησιμοποιούμενης σκόνης [91]. Αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση των μετάλλων, καθώς το τριβοηλεκτρικό φορτίο μειώνεται γρήγορα λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού. Οι Rescaglio et al. (2017) απέδειξαν μέσω πειραμάτων σε περιστρεφόμενο τύμπανο ότι η αύξηση της συνοχής της σκόνης που προκαλείται από την επίδραση των στατικών φορτίων είναι κυρίαρχη σε χαμηλή περιεκτικότητα σε σχετική υγρασία (κάτω από 20%), ενώ η αύξηση της συνοχής που προκαλείται από υγρούς δεσμούς λόγω προσρόφησης εμφανίζεται σε RH άνω του 50%. Ο συνδυασμός της τριβοφόρτισης και των τριχοειδών δυνάμεων συμβάλλει στην ύπαρξη ελάχιστης συνοχής της σκόνης για τιμές RH περίπου ίσες με 45% [81].

Ο τρόπος με τον οποίο οι περιβαλλοντικές παράμετροι (θερμοκρασία, πίεση και υγρασία) επηρεάζουν τη ρευστότητα της σκόνης εξετάστηκε στην ενότητα 2.2.8. Για τις λεπτόκοκκες σκόνες, το μικρό μέγεθος των σωματιδίων σημαίνει ότι η ρευστότητα της σκόνης επηρεάζεται ήδη από τις δυνάμεις van der Waals, οι οποίες δεν είναι πλέον αμελητέες σε σύγκριση με τις βαρυτικές δυνάμεις. Εάν το γεγονός αυτό συνδυαστεί με τους υγρούς τριχοειδείς δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων που δημιουργούνται από τα

προσροφημένα μόρια νερού, είναι προφανές ότι η ρευστότητα μειώνεται ακόμη περισσότερο.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τη μορφή πειραμάτων και συσκευών που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της ρευστότητας μιας σκόνης. Οι Kulkarni et al. (2010) παρέχουν μια ανασκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ρευστότητας μιας σκόνης, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών ροής Hall, των τεχνικών μέτρησης ροής με βάση την πυκνότητα, της λειτουργίας ροής-δοκιμαστή διάτμησης και της γωνίας τριβής τοιχώματος [92]. Πολλοί ερευνητές που έχουν εκτελέσει προσομοιώσεις ΜΔΣ της διαδικασίας εναπόθεσης σκόνης για διάφορους διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων της διαδικασίας έχουν χρησιμοποιήσει δοκιμές μέτρησης της ρευστότητας για να διασφαλίσουν ότι οι ρυθμίσεις ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο της σκόνης τους (ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας Young, ο συντελεστής τριβής κύλισης και στατικής τριβής κ.λπ.) ορίζουν μια σκόνη που συμπεριφέρεται ακριβώς όπως η πραγματική από άποψη ρευστότητας. Ο πιο συνηθισμένος συνδυασμός είναι η γωνία χιονοστιβάδας και η γωνία πρανούς. Η γωνία χιονοστιβάδας μετράται όταν η σκόνη τοποθετείται εντός κυλίνδρου που περιστρέφεται περί του άξονα συμμετρίας του, αναγκάζοντας τη σκόνη να σχηματίσει γωνία με το οριζόντιο επίπεδο καθώς ανατρέπεται από την κίνηση του κυλίνδρου. Το προφίλ της σκόνης ενώ ο κύλινδρος κυλιέται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και η γωνία χιονοστιβάδας εξαρτώνται από τη συνεκτικότητα και τη ρευστότητα της σκόνης.

Η γωνία πρανούς είναι η γωνία που σχηματίζεται όταν μια δέσμη σκόνης προσπίπτει σε μια επίπεδη, οριζόντια επιφάνεια. Το πείραμα της γωνίας χιονοστιβάδας είναι η «δυναμική» δοκιμή ροής, ενώ το πείραμα της γωνίας πρανούς ονομάζεται «στατική» δοκιμή ροής. Ο συνδυασμός αυτών των δύο και η ακριβής σύγκρισή τους με μια προσομοίωση που αναδημιουργεί αυτά τα πειράματα είναι αρκετή για να διασφαλιστεί ότι ένα μοντέλο πούδρας μοιάζει πολύ με την πραγματική πούδρα [71]. Οι συγγραφείς εκτιμούν ότι αυτό είναι αρκετό, δεδομένου ότι το πείραμα γωνίας χιονοστιβάδας υποβάλλει τη σκόνη τόσο στις βαρυτικές δυνάμεις, όσο και στις δυνάμεις συνοχής και διάτμησης που προκαλούνται από το τοίχωμα του κυλίνδρου μέχρι να επιτευχθεί μια δυναμική κατάσταση ισορροπίας (εάν είναι δυνατόν), ενώ το πείραμα γωνίας πρανούς εξετάζει μόνο τη συνοχή της σκόνης σε σχέση με τις βαρυτικές δυνάμεις, αφήνοντας τη σκόνη να φτάσει σε μια στατική κατάσταση ισορροπίας. Ο συνδυασμός

αναδημιουργεί πλήρως κάθε είδος δύναμης και κίνησης στην οποία μπορεί δυνητικά να υποβληθεί η σκόνη.

Ωστόσο, προκειμένου η προσομοίωση ΜΔΣ να προσομοιάζει επαρκώς την πραγματικότητα, είναι σημαντικό να καθοριστούν οι συντελεστές στατικής τριβής και τριβής κύλισης μεταξύ των σωματιδίων και του υποστρώματος, καθώς και μεταξύ των σωματιδίων και του επιστρωτήρα και μεταξύ των ίδιων των σωματιδίων. Οι Escano et al. (2018) ανέπτυξαν μια μέθοδο μέτρησης της δυναμικής γωνίας πρηνούς όχι κατά τη διάρκεια ενός πειράματος ρίψης σκόνης σε μια επίπεδη επιφάνεια, αλλά αντίθετα κατά τη διάρκεια της ίδιας της εναπόθεσης της σκόνης, χρησιμοποιώντας απεικόνιση ακτίνων X υψηλής ταχύτητας. Αυτό είναι πιο ακριβές σε σύγκριση με το κοινό πείραμα γωνίας πρηνούς, καθώς δείχνει πώς η γωνία πρηνούς εξελίσσεται δυναμικά και πώς την επηρεάζουν οι παράμετροι εναπόθεσης. Εξέτασαν επίσης τη δυναμική των συσσωματωμάτων σκόνης, τα οποία επηρεάζουν σοβαρά την ποιότητα της επιφάνειας, τόσο από άποψη επιφανειακής τραχύτητας όσο και από άποψη ατελειών στρώματος. Επιπλέον, εξέτασαν τη δυναμική μεμονωμένων σωματιδίων, μετρώντας εξ ορισμού τον κινητικό συντελεστή τριβής μεταξύ των σωματιδίων και διαφορετικών υλικών υποστρώματος. Ωστόσο, θα μπορούσαν με παρόμοιο τρόπο να μετρήσουν τον συντελεστή τριβής μεταξύ των σωματιδίων, τοποθετώντας ένα δεύτερο στρώμα πάνω από το προηγούμενο και χρησιμοποιώντας μια παρόμοια, προσαρμοσμένη για τραχιά επιφάνεια υποστρώματος, μέθοδο [93].

2.4 Δείκτες Ποιότητας Στρώματος Πούδρας (ΔΠΣΠ)

Σε διάφορες μελέτες, η ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος σκόνης αξιολογείται με τη μέτρηση του επιπέδου συμπύκνωσης της σκόνης στο στρώμα (σε πολλές εργασίες ονομάζεται επίσης πυκνότητα πλήρωσης σκόνης), της επιφανειακής τραχύτητας του στρώματος, της εμφάνισης επιφανειακών ατελειών (π.χ. ρωγμές, διαχωρισμοί και κοιλότητες) στο εναποτιθέμενο στρώμα και της ακρίβειας επίτευξης του επιθυμητού πάχους στρώματος, δεδομένου ότι το ονομαστικό πάχος στρώματος, το οποίο ισούται με την προς τα κάτω μετατόπιση του εμβόλου κατασκευής, δεν είναι ίσο με το πραγματικό πάχος στρώματος. Ένα ομοιόμορφο και ομοιογενές στρώμα σκόνης πρέπει να έχει ομοιόμορφη πυκνότητα πλήρωσης σκόνης σε όλη την επιφάνειά του, διατηρώντας παράλληλα σχετικά μικρή επιφανειακή τραχύτητα και μικρό σφάλμα

μεταξύ πραγματικού και ονομαστικού (θεωρητικού) πάχους στρώματος. Στον Πίνακα 2.11 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι παράμετροι της διεργασίας (Παράγραφοι 2.2.1 έως 2.2.8) επηρεάζουν τους δείκτες ποιότητας του στρώματος σκόνης.

2.4.1 Επιφανειακή Τραχύτητα (ET) και Κατανομή Επιφανειακής Τραχύτητας (KET)

Η επιφανειακή τραχύτητα του εναποτιθέμενου στρώματος μη πυροσυσσωματωμένης/μη λιωμένης σκόνης είναι ο πιο αξιόπιστος δείκτης ποιότητας και ο ευκολότερος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του αποτελέσματος της διαδικασίας εναπόθεσης σκόνης.

Η επιφανειακή τραχύτητα του αποτιθέμενου στρώματος σκόνης πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν χαμηλότερη, δεδομένου ότι μια αυξημένη τιμή τραχύτητας σημαίνει ότι η δέσμη λείζερ/ηλεκτρονίων θα προσκρούσει στο στρώμα σε διαφορετικό ύψος, επηρεάζοντας ελαφρώς την εστίαση και τη μεταφορά ενέργειας στο στρώμα. Ακόμη και αν η αλλαγή της εστίασης είναι αμελητέα και δεν έχει καμία επίδραση στα θερμικά φαινόμενα, αν η τραχύτητα είναι μεγάλη, αυτό θα μεταφραστεί σε μεγάλη τραχύτητα του παγιωμένου στρώματος. Μεγάλες τιμές επιφανειακής τραχύτητας σε διαδοχικά στρώματα σκόνης σημαίνουν ότι η τραχύτητα των ενοποιημένων στρωμάτων θα συσσωρευτεί και θα λάβει τη μορφή σφάλματος στην κατακόρυφη διάσταση του τεμαχίου, καταλήγοντας σε διαστασιακές ανακρίβειες (χειρότερο σενάριο) ή σε κακή ποιότητα επιφάνειας (καλύτερο σενάριο).

Σε διάφορες βιβλιογραφικές πηγές έχει αποδειχθεί ότι, όχι μόνο η επιφανειακή τραχύτητα του στρώματος σκόνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της πυκνότητας συσσώρευσης σκόνης, δεδομένου ότι οι δύο ιδιότητες επιδεικνύουν συσχέτιση, αλλά και ότι συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του τελικού τεμαχίου. Γενικά, η επιφανειακή τραχύτητα αυξάνεται με την αύξηση της συνεκτικότητας της σκόνης [94]. Παρόλο που οι Meier et al. (2018) απέδειξαν αυτό μόνο για την περίπτωση ενός επιστρωτήρα με λεπίδα, είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι η μείωση της ρευστότητας της σκόνης λόγω της αύξησης των δυνάμεων συνοχής θα είχε αρνητικό αντίκτυπο στην επιφανειακή τραχύτητα ανεξάρτητα από τον τύπο του επιστρωτήρα.

Έχει επίσης αποδειχθεί ότι, μια εύκαμπτη οδηγός λεπίδα προάγει χαμηλότερα επίπεδα ET σε σύγκριση με τις σκληρές, άκαμπτες, οι οποίες αυξάνουν τη μεταφορά

ανεπιθύμητων δονήσεων, που οφείλονται σε φαινόμενα τριβής, στο στρώμα σκόνης που εναποτίθεται [95], [96], [67].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, τα περισσότερα από τα ερευνητικά άρθρα μέχρι στιγμής, εκτελούν πειράματα ή προσομοιώσεις της εναπόθεσης σκόνης στη στερεά και επίπεδη άνω επιφάνεια του εμβόλου κατασκευής. Στη συνέχεια μετρούν τους δείκτες ποιότητας του στρώματος σκόνης. Αυτή η μέθοδος σημαίνει ότι αξιολογούν μόνο το πρώτο στρώμα που εναποτίθεται κατά τη διαδικασία εναπόθεσης σκόνης σε μια διαδικασία κατασκευής ΣΚΠ, ενώ, ο κανόνας είναι ότι κάθε άλλη σκόνη εναποτίθεται πάνω στο προηγούμενο στρώμα, το οποίο είναι μια μήτρα παγιωμένης μέσω σύντηξης και μη σύντηξης σκόνης. Η επιφάνεια πάνω στην οποία εναποτίθεται η σκόνη είναι μια κρίσιμη παράμετρος και, προκειμένου να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα που θα ισχύουν σε όλη τη διαδικασία τρισδιάστατης κατασκευής του εξαρτήματος, είναι σημαντικό να τη λάβουμε υπόψη. Οι Xiang et al. (2021) απέδειξαν πόσο σημαντικό είναι για την ομοιογενή και ομοιόμορφη διασπορά της σκόνης το υπόστρωμα να έχει επαρκές πάχος στρώματος. Έδειξαν ότι, όταν η επιφανειακή τραχύτητα του υποστρώματος αυξήθηκε από 0 έως 9 μm , η πυκνότητα συσσώρευσης σκόνης του στρώματος αυξήθηκε με εκθετική τάση, αλλά όταν αυξήθηκε από 9 έως 12 μm , αυτή παρέμεινε ανεπηρέαστη. Από την άλλη πλευρά, όταν η ET του υποστρώματος αυξήθηκε από 0 έως 6 μm , η επιφανειακή τραχύτητα του εφαρμοζόμενου στρώματος σκόνης αυξήθηκε γραμμικά και όταν αυξήθηκε ακόμη περισσότερο, από 6 έως 12 μm , η ET του στρώματος σκόνης αυξήθηκε γραμμικά αλλά με σημαντικά χαμηλότερο (σχεδόν αμελητέο) ρυθμό [97].

Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ένα σημείο στο οποίο τα στρώματα σκόνης που εναποτίθενται αυξάνουν οριακά την επιφανειακή τραχύτητα (ή και καθόλου), ενώ η πυκνότητα συσσώρευσης σκόνης τους είναι βέλτιστη. Η τιμή αυτή στην παρούσα εργασία είναι περίπου στα 9 μm ET.

2.4.2 Πυκνότητα Συσσώρευσης Σκόνης (ΠΣΣ) ή Βαθμός Συμπίεσης Στρώσης (ΒΣΣ)

Έχει αποδειχθεί ότι η πυκνότητα συσσώρευσης (φ) του στρώματος σκόνης επηρεάζει άμεσα την πυκνότητα και το τελικό τεμάχιο, καθώς επηρεάζει το πορώδες του. Εάν ο βαθμός συμπίεσης της σκόνης ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό μεταξύ σημείων της κλίνης

σκόνης με διαφορετικές συντεταγμένες, τότε η πυκνότητα του τελικού τεμαχίου δεν θα είναι ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο του, γεγονός που μπορεί να καταστήσει το τεμάχιο άχρηστο, ανάλογα με την εφαρμογή του.

Έρευνες έχουν δείξει ότι, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ΠΣΣ ενός στρώματος, έχουν χρησιμοποιηθεί διμορφικά ή πολυμορφικά μίγματα σκόνης. Σε αυτή την περίπτωση, τα μικρότερα σωματίδια γεμίζουν τα ενδιάμεσα κενά που αναπτύσσονται μεταξύ των μεγαλύτερων σωματιδίων. Έχει αποδειχθεί ότι η μέγιστη ΠΣΣ επιτυγχάνεται με αναλογία μεγέθους άνω του 1:10 (χοντρόκοκκα: λεπτόκοκκα σωματίδια) και αναλογία βάρους 7:3 (χοντρόκοκκα: λεπτόκοκκα σωματίδια) [90].

Οι Shanjani et al. (2008) [98] εξέτασαν τη φυσική πίσω από την εξάπλωση της σκόνης με έναν αντίθετα περιστρεφόμενο κύλινδρο. Απέδειξαν ότι, όσο μικρότερο είναι το πάχος του συμπιεσμένου στρώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η σχετική πυκνότητά του, άρα και το επίπεδο συμπίεσης της σκόνης. Ωστόσο, η συμπίκνωση στρώματος εξαρτάται επίσης από τη συσσώρευση σκόνης μπροστά από τον κύλινδρο. Όσο μεγαλύτερη είναι η ζώνη συμπίκνωσης, τόσο περισσότερο συμπακνώνεται το στρώμα σκόνης. Ωστόσο, ανεξάρτητα από το είδος του επιστρωτήρα, η πυκνότητα συσκευασίας μειώνεται με την απόσταση διαδρομής του επιστρωτήρα. Αυτό προκαλείται από μια εξελισσόμενη κατανομή διαμέτρου σωματιδίων, που προκύπτει από την επιλεκτική εναπόθεση λεπτόκοκκων, γεμίζοντας το κενό σωματιδίων, φαινόμενο γνωστό ως διαχωρισμός [96], [99].

Οι Jacob et al. (2018) διαπίστωσαν ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ του πραγματικού πάχους στρώματος και της πυκνότητας συσσώρευσης σκόνης (ΠΣΣ), δηλώνοντας ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η ΠΣ του στρώματος σκόνης, τόσο μικρότερη είναι η διαφορά μεταξύ του ονομαστικού και του πραγματικού πάχους στρώματος και αντίστροφα [74].

Επιπλέον, έχει αποδειχθεί από τους Penny et al. (2021) ότι, για υψηλές τιμές του κανονικοποιημένου πάχους στρώματος ($t_{norm}=t_{eff}/D_{50}$), η ΠΣΣ φ ακολουθεί μια Εξίσωση της μορφής:

$$\varphi = \alpha(1 - e^{-\beta t_{norm}}) \quad (2.15)$$

Όπου α και β είναι ελεύθερες παράμετροι, ανάλογα με το υλικό και τα χαρακτηριστικά της σκόνης. Για τα σχεδόν σφαιρικά σωματίδια Ti-6Al-4V 15-45 μm ($D_{10}=23.4$, $D_{50}=31.5$ και $D_{90}=43.4\mu\text{m}$), τα α και β είναι ίσα με 0.5 και 0.3 αντίστοιχα. Η αύξηση

του κανονικοποιημένου πάχους στρώματος προκαλεί αύξηση της πυκνότητας συσκευασίας σύμφωνα με τον προαναφερθέντα τύπο [96]. Μεταξύ των α και β , το πρώτο αντιπροσωπεύει την ΠΣΣ ενός θεωρητικού στρώματος άπειρου μεγέθους, ενώ το δεύτερο σχετίζεται καθαρά με τη ροή.

2.4.3 Εμφάνιση Επιφανειακών Ελαττωμάτων (π.χ. Ρωγμές, Διαχωρισμοί, Κοιλότητες)

Η τραχύτητα της επιφάνειας του στρώματος είναι ένα καλό μέσο για την ανίχνευση ελαττωμάτων του στρώματος σκόνης, όπως ρωγμές, κυματισμός ή συγκέντρωση συσσωματωμάτων. Τα ελαττώματα στρώματος όπως τα προαναφερθέντα πρέπει να ανιχνεύονται και να εξαλείφονται, καθώς το σφάλμα που δημιουργούν κληρονομείται στα επόμενα στρώματα και μπορεί να δράσει ακόμη και προσθετικά, μέσω της συσσώρευσης διαδοχικών ελαττωμάτων στρώματος, με αποτέλεσμα την κακή τραχύτητα της επιφάνειας του τελικού τεμαχίου ή ακόμη και τη διαστασιακή ανακρίβεια. Οι Wycisk et al. (2014) προτείνουν ότι τα ελαττώματα επιφάνειας και συγκόλλησης στα μεσαία στρώματα αυξάνουν την πιθανότητα έναρξης ρωγμών [100]. Τα ελαττώματα συγκόλλησης στα μεσαία στρώματα μπορεί να προκληθούν από ένα τυχαίο επιφανειακό ελάττωμα, όπως μια κοιλότητα ή μια κορυφή υψηλής τραχύτητας του στρώματος της μη λιωμένης σκόνης. Αυτό θα προκαλούσε τοπική αύξηση του πραγματικού πάχους της επόμενης στρώσης, που ενδεχομένως θα οδηγούσε στη δημιουργία ενός πόρου.

Τις περισσότερες φορές, οι επιφανειακές ατέλειες προκαλούνται από συσσωματώματα σκόνης, δηλαδή συστάδες σωματιδίων, που συνήθως αποτελούνται από έναν πυρήνα μεγαλύτερων σωματιδίων που συνενώνονται μέσω δυνάμεων συνοχής με πολλά μικρότερα (λεπτόκοκκα σωματίδια). Αυτές οι συσσωματώσεις εμφανίζονται ευκολότερα όταν το ποσοστό των λεπτόκοκκων στο δείγμα σκόνης γίνεται υψηλότερο ή όταν η ΚΜΣ γίνεται μικρότερη («μετακινείται» προς τα αριστερά του διαγράμματος κατανομής). Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες προθέρμανσης, κοντά στην υαλώδη μετάβαση για τα πολυμερή (ΕΠΑ) ή την τήξη για τα μέταλλα (ΕΤΑ) και η αυξημένη σχετική υγρασία (RH) είναι παράγοντες που αυξάνουν επίσης τη συνοχή της σκόνης. Αυτές οι συσσωματώσεις μπορεί να παρασυσρθούν κατά μήκος του υποστρώματος μέσω του επιστρωτήρα, δημιουργώντας αυλακώσεις, ή να προκαλέσουν την «εμπλοκή» της εναπόθεσης σκόνης «μπλοκάροντας» το διάκενο μεταξύ του

επιστρωτήρα και του υποστρώματος, προκαλώντας κενές περιοχές στο νέο στρώμα, καθιστώντας το ακατάλληλο για τη συνέχιση της διαδικασίας ΣΚΠ [101], [102].

2.4.4 Ακρίβεια Επίτευξης του Επιθυμητού Πάχους Στρώματος

Στις κατεργασίες ΣΚΠ, το πραγματικό πάχος του στρώματος μετά την πυροσυσσώματωση/ τήξη είναι ελαφρώς μικρότερο σε σύγκριση με το πάχος του στρώματος σκόνης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της απογύμνωσης, της μερικής εξάτμισης/ υποαερισμού που συμβαίνει στη λίμνη τήγματος, της διασποράς και της διείσδυσης της υγρής φάσης του λιωμένου υλικού μέσω των πόρων και των κοιλοτήτων μεταξύ των σωματιδίων προς τα κατώτερα στρώματα του τεμαχίου. Αυτή η διαφορά είναι λιγότερο σημαντική στην ΕΠΛ, λόγω της μερικής, λιγότερο βίαιης τήξης, και πιο εμφανής στην ΕΤΛ/ΤΔΗ. Η διαφορά μεταξύ πραγματικού και ονομαστικού πάχους στρώματος και η σύνδεσή της με την πυκνότητα συσσώρευσης στρώματος καλύφθηκε στην ενότητα 2.2.7 [74]. Το γεγονός αυτό καθιστά επιτακτική την ανάγκη ελέγχου ή/και αντιστάθμισης του πάχους στρώματος για την επίτευξη υψηλής διαστασιακής ακρίβειας του τελικού τεμαχίου. Πιο συγκεκριμένα, εάν το λογισμικό τεμαχισμού δημιουργεί οριζόντιες τομές (πάχους t_f) του τελικού τεμαχίου, το σύστημα επανεπίστρωσης θα πρέπει να εφαρμόσει στρώματα σκόνης πάχους $t_p > t_f$ προκειμένου να επιτευχθεί αποδεκτή ακρίβεια διαστάσεων. Ως εκ τούτου, πρέπει να υπολογιστεί η σχέση $t_p = a \cdot t_f$, όπου $a > 1$. Ωστόσο, ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων, την πιθανή ύπαρξη προεξοχών και λεπτών τοιχωμάτων και, γενικά, με τη διακύμανση της καμπύλης πλήρωσης χώρου σάρωσης που χρησιμοποιεί η δέσμη ισχύος για την τήξη/συσσώματωση της σκόνης, ο αριθμός αυτός μπορεί να χρειαστεί να μεταβάλλεται από στρώση σε στρώση.

Επιπλέον, με βάση τη μέθοδο επανεπίστρωσης με πούδρα, το αναμενόμενο θεωρητικό (επίσης γνωστό ως ονομαστικό) πάχος στρώματος πούδρας μπορεί να διαφέρει ελαφρώς από το πραγματικό πάχος στρώματος πούδρας, κυρίως λόγω της δυναμικής της πούδρας σε περιπτώσεις όπου ένας κύλινδρος ή μια λεπίδα εκτελεί πολύ γρήγορη εξάπλωση στρώματος, εάν εμφανιστεί το φαινόμενο έκρηξης σωματιδίων, λόγω της σύγκρουσης της κίνησης των σωματιδίων στην περιοχή συμπίεσης (μεταξύ επιστρωτήρα και υποστρώματος) [73]. Έτσι, η επί τόπου παρακολούθηση του πραγματικού πάχους στρώματος σκόνης είναι απαραίτητη για την εφαρμογή της

σωστής ποσότητας αντιστάθμισης, ώστε το πάχος στρώματος του τελικού τεμαχίου να είναι ακριβώς όπως έχει σχεδιαστεί και όχι μικρότερο.

Έγινε σαφές ότι οι διαφορές μεταξύ του ονομαστικού, του πραγματικού και του πραγματικού πάχους στρώματος πούδρας και η σύνδεσή τους με το πάχος του παγιωμένου στρώματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία τεμαχισμού του τεμαχίου, δεδομένου ότι το πάχος των τεμαχίων του τελικού τεμαχίου που παράγει το λογισμικό τεμαχισμού ενδέχεται να μην είναι ίσο με την απαραίτητη κατακόρυφη μετατόπιση του εμβόλου κατασκευής, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε σοβαρές διαστασιακές ανακρίβειες.

2.5 Μέθοδοι Μέτρησης των Δεικτών Ποιότητας Στρώματος Σκόνης (ΔΠΣΣ)

Η ομαλότητα και η ομοιογένεια του στρώματος συνήθως εκτιμώνται με τη μέτρηση των ιδιοτήτων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό συμβαίνει κυρίως μέσω οπτικών μεθόδων, δεδομένου ότι είναι μη επεμβατικές και δεν καταστρέφουν το εφαρμοζόμενο στρώμα, επιτρέποντας τη συνέχιση της διαδικασίας κατασκευής και την ανίχνευση της σύνδεσης αυτών με την ποιότητα του τελικού τεμαχίου.

Οι Pasalopoulos et al. (2021) χρησιμοποίησαν τρισδιάστατη σάρωση λευκού φωτός προκειμένου να αποκτήσουν μια απεικόνιση του στρώματος σκόνης ως νέφος σημείων σε 3 διαστάσεις. Στη συνέχεια, υπολόγισαν την επιφανειακή τραχύτητα κατά μήκος των κατακόρυφων επιπέδων τομής της επιφάνειας και το πάχος του στρώματος, ως την κατακόρυφη μέση απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σαρωμένων στρωμάτων. Το έμβολο κατασκευής έχει ενσωματωμένους αισθητήρες βάρους σε διάφορες θέσεις, δημιουργώντας μια κατανομή βάρους σκόνης. Ο συνδυασμός αυτού με έναν αριθμητικό υπολογισμό του όγκου μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων καθιστά δυνατή την απόκτηση μιας κατανομής πυκνότητας συσώρευσης σκόνης στην επιφάνεια της κλίνης σκόνης [103]. Ομοίως, πολλοί άλλοι ερευνητές έχουν βασιστεί στη μετρολογία υψηλής ακρίβειας που στηρίζεται σε τεχνικές δομημένου φωτός και προφίλτρομετρίας προβολής κροσσών ([104], [105], [87]–[90]) όπως ακριβώς και στο [103]. Οι διαφορές μεταξύ αυτών των εργασιών έγκεινται στον τρόπο (μαθηματικά μοντέλα, στατιστική ανάλυση κ.λπ.) με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα αποκτηθέντα δεδομένα για τον υπολογισμό των δεικτών ποιότητας του στρώματος σκόνης.

Οι Lin et al. (2019) υπολόγισαν την επιφανειακή τραχύτητα του στρώματος σκόνης οπτικά, φωτογραφίζοντας το στρώμα και εφαρμόζοντας στη συνέχεια φίλτρα κλίμακας του γκρι στην εικόνα που ελήφθη. Η εικόνα με κλίμακα του γκρι στη συνέχεια δυαδικοποιήθηκε με κατάλληλη επιλογή μιας τιμής κατωφλίου και η κατανομή των ασπρόμαυρων εικονοστοιχείων συγκρίθηκε με μια δυαδική εικόνα ενός «ιδανικού στρώματος», για να εκτιμηθεί η ποιότητα του στρώματος [106]. Οι Beitz et al. (2019) εφάρμοσαν μια παρεμβατική μέθοδο στην οποία ένα δείγμα λαμβανόταν από μια διάταξη εισαγωγής από μια πειραματική διάταξη που βασιζόταν σε εργαστηριακή ζυγαριά. Το δείγμα εξετάστηκε με μεθόδους μικροτομογραφίας ακτίνων X και μικροσκοπίας σάρωσης με λέιζερ για την απεικόνιση της επιφάνειας και την εξαγωγή δεδομένων τραχύτητας [107]. Οι Ali et al. (2018) πρότειναν μια μεθοδολογία μέτρησης της πυκνότητας συσσώρευσης των στρωμάτων που εναποτίθενται σε ΕΠΛ. Χρησιμοποίησαν μια πιπέτα για την εφαρμογή σταγονιδίων πολυμερούς που σκληραίνεται με υπεριώδη ακτινοβολία πάνω στο υπό εξέταση στρώμα. Το υγρό διαπέρασε το μη πυροσυσσωματωμένο στρώμα και στη συνέχεια, εκπέμφθηκε υπεριώδες φως για να στερεοποιηθεί, λαμβάνοντας δείγμα από τα απορροφημένα σωματίδια σκόνης. Τα δείγματα σαρώθηκαν με νανο-CT και μετρήθηκε η πυκνότητα συσσώρευσης [99]. Οι Jacob et al. (2016) εκτύπωσαν με ΕΠΛ κλειστά κυλινδρικά δοχεία, προκειμένου να απομονώσουν δείγματα σκόνης από την κλίση σκόνης. Η πυκνότητα συσσώρευσης μετρήθηκε ως κλάσμα της σταθμισμένης παγιδευμένης σκόνης προς τον εσωτερικό όγκο του κοίλου κυλίνδρου [108].

Ομοίως, οι Choi et al. (2017) αξιολόγησαν την πυκνότητα του στρώματος σκόνης κατασκευάζοντας μέσω ΕΤΛ ένα κυβικό δοχείο με εσωτερικό όγκο 1000 mm^3 και εσωτερικές διαστάσεις $(10 \times 10 \times 10) \text{ mm}^3$. Αυτό το δοχείο αποθήκευσε μια ποσότητα μη λιωμένης σκόνης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής. Το βάρος της σκόνης διαιρούμενο με τον εσωτερικό όγκο του δοχείου έδωσε την πυκνότητα συσσώρευσης της σκόνης [109]. Οι Lhuissier et al. (2020) ανέπτυξαν έναν ειδικά σχεδιασμένο θάλαμο δόμησης με περιστρεφόμενη οδηγό λεπίδα και μια εμβολοειδή κυλινδρική πλάκα δόμησης προκειμένου να απομονώσουν ένα δείγμα του στρώματος της σκόνης. Στη συνέχεια, χρησιμοποίησαν τρισδιάστατη μικροτομογραφία ακτίνων X προκειμένου να αξιολογήσουν το δείγμα τόσο πριν όσο και μετά τη σύντηξη της σκόνης [110]. Οι Le et al. (2021) ανέπτυξαν μια μέθοδο που ονομάζεται «τεχνολογία σαρωτή κλίσης σκόνης». Παρέχει εικόνες ανάλυσης σε επίπεδο σωματιδίων ολόκληρου

του στρώματος σκόνης κατά την επανεπίστρωση. Χρησιμοποιείται μια ειδικά κατασκευασμένη πλατφόρμα, η οποία αποτελείται από έναν εναλλάξιμο επιστρωτήρα, έναν αισθητήρα εικόνας επαφής (contact image sensor -CIS) και το υπόστρωμα το οποίο μπορεί να προσαρμόσει το ύψος του ώστε να παρέχει βέλτιστη εστίαση στον CIS. Το σύστημα μπορεί να εξάγει με ακρίβεια τα προφίλ του στρώματος με μικρές μεταβολές της εστίασης του CIS, μεταφράζοντας την θάμπωση σε τιμές ύψους στον άξονα z μέσω ανάλυσης εικόνας [84].

Έχουν επίσης προταθεί πιο καινοτόμες τεχνικές, όπως η χωρική χαρτογράφηση του στρώματος σκόνης μέσω απεικόνισης ακτίνων-X διέλευσης που επαληθεύτηκε με προσομοίωση ΜΔΣ (Μεθόδου Διακριτών Στοιχείων) και πειράματα [96] και μια ψηφιακή προσέγγιση με βάση τον χαρακτηρισμό εικονοστοιχείων που βασίζεται στη χωρική διακριτοποίηση του χώρου εργασίας [111] για τη μέτρηση της ΠΣΣ, της ΕΤ και τον εντοπισμό ατελειών πόρων, αλλά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως μέχρι στιγμής, παρόλο που τα αποτελέσματα φαίνονται πολλά υποσχόμενα.

Ο Πίνακας 2.12 ταξινομεί και συγκρίνει τις προαναφερθείσες εργασίες που επικεντρώθηκαν σε μεθόδους αξιολόγησης της ποιότητας του στρώματος σκόνης, παρουσιάζοντας ποιους δείκτες ποιότητας του στρώματος σκόνης μπορούν να παρακολουθήσουν οι προτεινόμενες μέθοδοι και αν είναι καταστροφικές ή όχι. Επιπλέον, εξετάζεται αν, στην περίπτωση των μη καταστροφικών μεθόδων, αυτές προκαλούν κάποια καθυστέρηση στη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης προκειμένου να αποκτηθούν και να επεξεργαστούν τα δεδομένα ή όχι. Ο Πίνακας 2.12 αποκαλύπτει τα δυνατά σημεία και τα μειονεκτήματα κάθε μεθόδου.

Πίνακας 2.11: Σύνδεση μεταξύ παραμέτρων διεργασίας και δεικτών ποιότητας στρώματος σκόνης.

Παράμετροι διεργασίας / Δείκτες ποιότητας στρώματος σκόνης	Επιφανειακή Τραχύτητα (ΕΤ) και Κατανομή Επιφανειακής Τραχύτητας (ΚΕΤ)	Πυκνότητα Συσσώρευσης Σκόνης (ΠΣΣ) ή Βαθμός Συμπύεσης Στρώσης (ΒΣΣ)	Εμφάνιση Επιφανειακών Ελαττωμάτων (π.χ. Ρωγμές, Διαχωρισμοί, Κοιλότητες)	Ακρίβεια Επίτευξης του Επιθυμητού Πάχους Στρώματος
Υλικό Σκόνης	Οι διαφορές στην ΕΤ που επιτυγχάνουν τα διάφορα υλικά εξαρτώνται από τους συντελεστές τριβής (στατικής και κύλισης) μεταξύ των σωματιδίων και	Το ίδιο όπως στη σύνδεση Υλικού σκόνης-ΕΤ. Διαφορετικά, οι διαφορές στο σχήμα των σωματιδίων μεταξύ των υλικών μπορούν να επηρεάσουν την ΠΣΣ	Οι σκόνες πολυμερών είναι πιο επιρρεπείς στην ανάπτυξη επιφανειακών ατελειών στα στρώματα λόγω:	Εξαρτάται από το συντελεστή συνοχής της σκόνης (ανάλογα με το υλικό) και την ΠΣΣ. Δεν έχει βρεθεί τέτοια έρευνα, εξ όσων

	του επιστρωτήρα, του υποστρώματος και της πρόσφυσης στο υπόστρωμα και τον επιστρωτήρα (δεδομένου ότι όλες οι άλλες παράμετροι της διεργασίας παραμένουν ίδιες μεταξύ των πειραμάτων) [94], [112].	(σφαιρικότητα $\uparrow \Rightarrow$ ΠΣΣ \uparrow)	1) Προσκόλλησης στον επιστρωτήρα 2) Αυξημένης συνοχής λόγω τριβοφόρτισης 3) Υψηλότερης απορροφητικότητας και προσροφητικότητας νερού (λόγω χαμηλότερης σφαιρικότητας)	γνωρίζουν οι συγγραφείς.
Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων (ΚΜΣ)	Μία ευρύτερη ΚΜΣ (με χαμηλότερο D_{10}) \Rightarrow ET \uparrow , επειδή Πολύ μικρά μεγέθη \Rightarrow συνοχή $\uparrow \Rightarrow$ ρευστότητα $\downarrow \Rightarrow$ ET \uparrow [94]. Μία ευρύτερη ΚΜΣ (με το ίδιο D_{10}) \Rightarrow ET \downarrow , επειδή Μεγαλύτερα μεγέθη \Rightarrow συνοχή $\downarrow \Rightarrow$ ρευστότητα $\uparrow \Rightarrow$ ET \downarrow	Μία ευρύτερη ΚΜΣ (με μικρότερο D_{10}) \Rightarrow ΒΣΣ \uparrow , καθώς τα λεπτά σωματίδια γεμίζουν τις κοιλότητες μεταξύ των μεγαλύτερων, δημιουργώντας ένα πυκνότερο στρώμα (υπό την προϋπόθεση ότι η ρευστότητα της σκόνης εξασφαλίζεται από τους περιορισμούς της παρ. 2.2.2 [56]) Οι διμορφικές ΚΜΣ αυξάνουν επίσης την ΠΣΣ (λόγος μεγέθους μεγάλης/μικρής κορυφής της ΚΜΣ ~7-10) [94].	Μία ευρύτερη ΚΜΣ (με χαμηλότερο D_{10}) \Rightarrow περισσότερες επιφανειακές ατέλειες, επειδή Πολύ μικρά μεγέθη \Rightarrow συνοχή $\uparrow \Rightarrow$ ρευστότητα \downarrow	Ευρύτερη ΚΜΣ (με μικρότερο D_{10}) \Rightarrow ΠΣΣ $\uparrow \Rightarrow$ ($t_{\text{eff}} - t_{\text{nom}}$) $\downarrow \Rightarrow$ Ακρίβεια επίτευξης του πάχους στρώματος \uparrow (ET επίσης \uparrow , αλλά η θετική επιρροή της ΠΣΣ υπερτερεί της αρνητικής επιρροής του ET στην ακρίβεια)
Σχήμα Σωματιδίων	Σφαιρικότητα $\downarrow \Rightarrow$ Δυνάμεις συνοχής \uparrow λόγω σύμπλεξης, προσροφητικότητας κ.λπ. \Rightarrow ET \uparrow	Σφαιρικότητα $\uparrow \Rightarrow$ ΠΣΣ \uparrow , λόγω μικρότερης τριβής μεταξύ των σωματιδίων και μεγαλύτερης κινητικότητας.	Σφαιρικότητα $\uparrow \Rightarrow$ Μικρότερη τάση σχηματισμού συσσωματωμάτων λόγω μικρότερου λόγου επιφάνειας/όγκου, που σημαίνει μικρότερη προσροφητικότητα και λιγότερες δυνάμεις σύμπλεξης \Rightarrow Δυνατότητα επιφανειακών ατελειών \downarrow	Σφαιρικότητα \downarrow $\xrightarrow{\text{ET}\uparrow, \text{ΠΣΣ}\uparrow}$ ($t_{\text{eff}} - t_{\text{nom}}$) $\uparrow \Rightarrow$ επαναληψιμότητα και ακρίβεια διαστάσεων \downarrow
Υλικό Επιστρωτήρα	Πιο σκληρός επιστρωτήρας \Rightarrow Ο διαχωρισμός είναι πιο έντονος λόγω της ακαμψίας \Rightarrow ET \uparrow	Πιο σκληρός επιστρωτήρας \Rightarrow ΠΣΣ \uparrow	Πιο σκληρός επιστρωτήρας \Rightarrow Η κυμάτωση είναι πιο συχνή (ανεξέλεγκτες δονήσεις)	Harder recoater \Rightarrow Μεγαλύτερη ακρίβεια του επιθυμητού πάχους στρώματος \Rightarrow Υψηλότερη επαναληψιμότητα και ακρίβεια διαστάσεων του τελικού τεμαχίου

<p>Σχήμα επιστρωτήρα</p>	<p>Η στρογγυλεμένη λεπίδα παρέχει βέλτιστη ποιότητα (ελάχιστο SR), λόγω της μηδενικής πιθανότητας φαινομένου έκρηξης και της μεγάλης ζώνης συμπίεσης της σκόνης, συνδυασμό που δεν παρέχουν ούτε η λεπίδα / κεκλιμένη λεπίδα ούτε ο κύλινδρος [73].</p>	<p>Ο επιστρωτήρας με κύλινδρο υπερτερεί έναντι του επιστρωτήρα με λεπίδα, εάν κάθε άλλη παράμετρος της διαδικασίας επανεπίστρωσης παραμένει ίδια μεταξύ των 2 πειραμάτων. Ωστόσο, η στρογγυλεμένη λεπίδα υπερτερεί και των δύο [73].</p>	<p>Κύλινδρος: Διαχωρισμός κομματιών που μοιάζουν με κρούστα, εάν το ελάχιστο πάχος στρώματος ελαττωθεί πέραν του ορίου για τη συγκεκριμένη διάμετρο κυλίνδρου. Φαινόμενο έκρηξης σωματιδίων για μικρές τιμές t_{nom} [73].</p> <p>Λεπίδα: Κυματισμός εάν παρεμβάλλονται ανεξέλεγκτες δονήσεις του επιστρωτήρα.</p> <p>Και οι δύο: Γραμμές εάν σύρονται συσσωματώματα κατά μήκος της επιφάνειας.</p>	<p>Υπό τις ίδιες παραμέτρους διεργασίας, οι επιστρωτήρες που εφαρμόζουν τη μεγαλύτερη δύναμη συμπίεσης (π.χ. κύλινδρος και στρογγυλεμένη λεπίδα) μπορούν να παρασύρουν ελαφρώς το στερεοποιημένο τεμάχιο μέσω της αυξημένης τριβής, προκαλώντας ανακρίβειες διαστάσεων.</p>
<p>Παράμετροι Διαδικασίας Επανεπίστρωσης και Ρύθμιση / Μοτίβο Διασποράς</p>	<p>Ταχύτητα πρόωσης του επιστρωτήρα $\uparrow \Rightarrow ET \uparrow$.</p>	<p>Κλίση λεπίδας $\uparrow \Rightarrow ΠΣΣ \uparrow$. Ταχύτητα μετατόπισης του επιστρωτήρα $\uparrow \Rightarrow ΠΣΣ \downarrow$. Δεν υπάρχει κόσκινο μπροστά από τον κύλινδρο/λεπίδα $\Rightarrow O$ διαχωρισμός της σκόνης γίνεται ορατός $\Rightarrow ΠΣΣ$ που μειώνεται όσο απομακρύνεται το σημείο του κάδου τροφοδοσίας [59].</p>	<p>Ταχύτητα πρόωσης του κυλίνδρου $\uparrow \Rightarrow$ Ενισχύεται το φαινόμενο έκρηξης σωματιδίων \Rightarrow κενά στρωμάτων και ανομοιογένεια \uparrow [73]. Για τον πρόσθια περιστρεφόμενο κύλινδρο \Rightarrow συχνοί διαχωρισμοί και κενά.</p>	<p>Οποιοσδήποτε ρυθμίσεις που αυξάνουν την ET και μειώνουν την ΠΣΣ προκαλούν μείωση της ακρίβειας. (π.χ., μεταφορική ταχύτητα του επιστρωτήρα, έλλειψη κόσκινου)</p>
<p>Ονομαστικό, Αποτελεσματικό και Πραγματικό Πάχος Στρώσης</p>	<p>Ένα πραγματικό πάχος κοντά στη μέγιστη διάμετρο σωματιδίων σκόνης προκαλεί υψηλή τιμή τραχύτητας. Υψηλότερες τιμές πάχους μειώνουν αυτό το φαινόμενο. (Απαραίτητο το $t_{act} \gg D_{90}$. Εάν $t_{act} \sim D_{90} \Rightarrow ET \uparrow$)</p>	<p>$(t_{eff} - t_{nom}) \uparrow \Leftrightarrow ΠΣΣ \downarrow$ Ασάφεια για τη σύνδεση μεταξύ t και ΠΣΣ</p>	<p>Σχεδόν κανένα διάκενο για μια πλήρως ανεπτυγμένη ροή σωματιδίων κάτω από τη λεπίδα, η οποία επιτυγχάνεται για $t_{nom, min} = 4D_{90}$. [101]</p>	<p>Το πρώτο στρώμα έχει πάχος t_{nom}. Αφού απλωθούν περίπου 6-10 στρώσεις, επιτυγχάνεται το t_{eff}. [56], [57].</p>
<p>Περιβαλλοντικές Παράμετροι</p>	<p>Υγρασία $\uparrow \Rightarrow$ Ρευστότητα \downarrow (γενικά) $\Rightarrow ET \uparrow$</p>	<p>Υγρασία $\uparrow \Rightarrow$ Ρευστότητα \downarrow (γενικά) $\Rightarrow ΠΣΣ \downarrow$</p>	<p>Υγρασία $\uparrow \Rightarrow$ Ρευστότητα \downarrow (γενικά) \Rightarrow Περισσότερες</p>	<p>Υγρασία $\uparrow \Rightarrow$ Ρευστότητα \downarrow</p>

	Θερμοκρασία↑ (~ T_g για πολυμερή ή T_m για άλλες σκόνες) ⇒ Ρευστότητα↓ (γενικά) ⇒ ET↑	Θερμοκρασία↑ (~ T_g για πολυμερή ή T_m για άλλες σκόνες) ↑⇒ Ρευστότητα↓ (γενικά) ⇒ ΠΣΣ↓	επιφανειακές ατέλειες Θερμοκρασία↑ (~ T_g για πολυμερή ή T_m για άλλες σκόνες) ↑⇒ Ρευστότητα↓ (γενικά) ⇒ Περισσότερες επιφανειακές ατέλειες	(γενικά) ⇒ ET↑ & ΠΣΣ↓ ⇒ ET↑ & ($t_{eff}-t_{nom}$)↑ ⇒ Ακρίβεια↓
--	---	---	--	--

(**Σημείωση:** Με βάση αναφορές και παρατηρήσεις του συγγραφέα.)

Πίνακας 2.12: Μέθοδοι αξιολόγησης της ομαλότητας και της ομοιογένειας του στρώματος σκόνης που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία.

Μέθοδος	Πυκνότητα συσσώρευσης	Επιφανειακή Τραχύτητα	Ατέλειες	Ακρίβεια πάχους	Βαθμός επεμβατικότητας	Πηγή
3D σάρωση λευκού φωτός	✓	✓	✓	✓	ND-D	Pasalopoulos et al. (2020) [103]
Απεικόνιση στρώματος με δυαδική όραση κάμερας	✗	✓	✓	✗	ND-D	Lin et al. (2019) [106]
Πειραματική διάταξη εργαστηριακής κλίμακας/εξοπλισμός εισαγωγής (λήψη δειγμάτων) Μικροτομογραφία ακτίνων-Χ/μικροσκοπία σάρωσης με λέιζερ (αξιολόγηση δειγμάτων)	✗	✓	✓ (μόνο στο δείγμα)	✗	D	Beitz et al. (2019) [107]
Πολυμερές με δυνατότητα σκλήρυνσης με υπεριώδη ακτινοβολία ως συνδετικό υλικό (λήψη δειγμάτων) Νανοϋπολογιστική τομογραφία (αξιολόγηση δείγματος)	✓	✓	✓ (μόνο στο δείγμα)	✓	D	Ali et al. (2018) [99]
Εκτυπωμένα με SLS κλειστά δοχεία σε σχήμα κοίλου κυλίνδρου με κωνικό καπάκι (λήψη δειγμάτων)	✓	✗	✗	✗	D	Jacob et al. (2016) [108]

Πυκνότητα = βάρος της παγιδευμένης σκόνης διαιρούμενο με τον εσωτερικό όγκο του κοίλου δοχείου (αξιολόγηση δείγματος)						
Ειδικά σχεδιασμένος θάλαμος δόμησης με πλάκα δόμησης που μοιάζει με έμβολο (δειγματοληψία) Τρισδιάστατη μικροτομογραφία ακτίνων X (αξιολόγηση δείγματος)	✓	✓	✓	✓	ND-D (Πολύ μικρά αντικείμενα μόνο για πειραματισμό)	Lhuissier et al. (2020) [110]
Δοχεία 10x10x10 (1000 mm ³ εσωτερικού όγκου) κατασκευασμένα μέσω SLM (λήψη δειγμάτων) Ζύγιση δειγμάτων σκόνης με ηλεκτρονική ζυγαριά και υπολογισμός της πυκνότητας συσκευασίας με διαίρεση με τον όγκο του δοχείου	✓	✗	✗	✗	D	Choi et al. (2017) [109]
Προσαρμοσμένη πλατφόρμα (εναλλάξιμος επιστρωτήρας, αισθητήρας εικόνας επαφής (CIS) και υπόστρωμα)	✓ (εκτίμηση με βάση την πυκνότητα των επιφανειακών σωματιδίων)	✓	✓	✓	ND-ZD	Le et al. (2021) [95]
Μετρολογία υψηλής ακρίβειας με βάση κάμερα δομημένου φωτός, CCD ή CMOS - αξιολόγηση των μετρήσεων με ανάλυση συνάρτησης δομής	✗	✓	✓	✗	ND-D	Kalms et al. (2019) [104], Kalms et al. (2020) [105]
Τρισδιάστατη μέτρηση της κλίνης σκόνης μέσω της τεχνικής προφίλομετρίας προβολής κροσσών	✗	✓	✓	✓	ND-D	Liu et al. (2020) [113], Zhang et al. (2016) [114], Land et al. (2015) [115]

Μέθοδοι οπτικής ανίχνευσης (τρισδιάστατη τοπογραφία επιφάνειας (προβολή εικόνας κροσσών) μέσω ενισχυμένης προφίλομετρίας μέτρησης φάσης (EPMP) και δεδομένα τρισδιάστατου περιγράμματος της συντηγμένης περιοχής)	✗	✓	✓	✓	ND-D	Li et al. (2018) [116]
Χωρική χαρτογράφηση του στρώματος σκόνης μέσω απεικόνισης ακτίνων X διέλευσης	✓(estimated)	✓	✓	✓	ND-D	Penny et al. (2021) [96]
Ψηφιακή, βασισμένη σε pixel- προσέγγιση που βασίζεται στη χωρική διακριτοποίηση του χώρου εργασίας	✓	✓	✓	✗	ND-D	He et al. (2020) [111]

(Σημείωση: Βαθμός επεμβατικότητας (έχει 3 τιμές ανάλογα με το αν η μέθοδος καταστρέφει ή όχι το στρώμα (τα στρώματα) σκόνης που εφαρμόζεται και, στην περίπτωση που δεν καταστρέφει το στρώμα (τα στρώματα), αν καθυστερεί ή όχι τη διαδικασία προσθετικής κατασκευής) = 1) (ND-ZD) Μη καταστροφική, μηδενική καθυστέρηση/Non-destructive, zero delay - 2) (ND-D) Μη καταστροφική, καθυστέρηση/ Non-destructive, delay - ή 3) (D) Καταστροφική/ Destructive).

2.6 Δείκτες Ποιότητας Τελικού Τεμαχίου (ΔΠΤΤ)

Πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στο τελικό μέρος των διεργασιών ΣΚΠ όσον αφορά τα προκαθορισμένα πρότυπα μηχανικών ιδιοτήτων που καθορίζουν την ποιότητά του. Μόνο με τη διασφάλιση της ομοιογένειας και της ομοιομορφίας της κλίνης σκόνης με τον πλήρη έλεγχο των παραμέτρων της διεργασίας διασποράς σκόνης είναι δυνατόν να ελεγχθούν οι ιδιότητες του τελικού τεμαχίου. Οι συνηθέστερες ιδιότητες του τελικού τεμαχίου που μετρούν οι ερευνητές είναι η πυκνότητα/πορώδες, η μηχανική αντοχή (διαρροή, εφελκυσμός, επιμήκυνση θραύσης), η σκληρότητα, η επιφανειακή τραχύτητα και η ακρίβεια των διαστάσεων, καθώς και η εμφάνιση επιφανειακών ή εσωτερικών ατελειών, όπως προεξοχές, πόροι ή κοιλότητες [61]. Η παρούσα εργασία θα επιχειρήσει να συνδέσει αυτούς τους δείκτες ποιότητας με τους

δείκτες ποιότητας του στρώματος της μη λιωμένης σκόνης και, τελικά, με τις παραμέτρους της διαδικασίας διασποράς σκόνης. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι δείκτες ποιότητας του τελικού προϊόντος εξαρτώνται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους της διαδικασίας σύντηξης σκόνης, όπως η απόσταση των πάσων της δέσμης, η ταχύτητα σάρωσης, η ισχύς της δέσμης λέιζερ/ηλεκτρονίων κ.λπ.

Για το λόγο αυτό είναι εξαιρετικά δύσκολο να συνδεθούν οι διαφορές της ποιότητας του τελικού τεμαχίου με έναν συγκεκριμένο δείκτη ποιότητας της κλίνης σκόνης, εκτός εάν σχεδιαστεί ένα πείραμα που διατηρεί σταθερές τις παραμέτρους σύντηξης της σκόνης και οι ερευνητές μεταβάλλουν μόνο τις παραμέτρους διασποράς της σκόνης, προκειμένου να καταλήξουν σε ασφαλή συμπεράσματα, κάτι που, εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς, δεν έχει γίνει σε καμία έρευνα μέχρι σήμερα. Στον Πίνακα 2.13 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των δεικτών ποιότητας του στρώματος σκόνης και των δεικτών ποιότητας του τελικού τεμαχίου, όπως παρατηρήθηκε από τους συγγραφείς και καταγράφηκε στη βιβλιογραφία.

2.6.1 Πυκνότητα/Ποσοστό πορώδους

Οι Spierings et al. (2011) απέδειξαν ότι η ΚΜΣ επηρεάζει την πυκνότητα του τελικού τεμαχίου. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη πυκνότητα, καθώς και χαμηλότερη επιφανειακή τραχύτητα (ενότητα 2.6.4) και αυξημένη μηχανική αντοχή (ενότητα 2.6.2), στη ΕΠΛ του 316L, είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί μεγαλύτερη ποσότητα λεπτόκοκκων σωματιδίων στη σκόνη [117]. Επίσης, το μέγεθος των μεγάλων σωματιδίων πρέπει να παραμείνει περιορισμένο και αρκετά κάτω από το πραγματικό πάχος στρώματος, ώστε να διασφαλιστεί ότι η τραχύτητα του στρώματος σκόνης θα παραμείνει εντός αποδεκτών επιπέδων.

Έχει αναφερθεί στις ενότητες 2.2.7 και 2.4.2 ότι, η μεταβολή του πάχους στρώματος επηρεάζει την πυκνότητα συσκευασίας του μη λιωμένου στρώματος. Αυτό έχει αποδειχθεί στην περίπτωση ενός αντιπεριστρεφόμενου κυλίνδρου (επιστρωτήρα) με σύνθετο PA12-ίνες γυαλιού (ακανόνιστο PA12 με επιμήκη σφαιροκυλινδρικά σωματίδια γυαλιού) (Tan et al., 2021) και για μια ράβδο (επιστρωτήρα) με SS316L με σχεδόν σφαιρικά σωματίδια (Xiang et al., 2021) [35], [97]. Πιο συγκεκριμένα, και στις δύο προαναφερθείσες μελέτες, η αύξηση του πάχους του στρώματος είχε θετική επίδραση, αυξάνοντας και την πυκνότητα συσσώρευσης. Στο ίδιο συμπέρασμα

κατέληξαν και οι Chen et al. (2019), για τα σφαιρικά σωματίδια SS316L με επανεπίστρωση με λεπίδα. Το εξήγησαν αυτό αναφερόμενοι στο στατικό και δυναμικό «φαινόμενο του τοίχου» [118]. Ωστόσο, άλλοι ερευνητές, όπως οι Shanjani et al. (2008), Budding et al. (2013) και Mostafaei et al. (2021) αναφέρουν ότι ένα μικρότερο πάχος στρώματος έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη πυκνότητα συσσώρευσης, ενώ όλοι τους εξέτασαν τον αντίθετα περιστρεφόμενο κύλινδρο ως επιστρωτήρα [5], [72], [27]. Είναι πιθανόν και οι δύο αντιφατικές απόψεις να είναι σωστές και να υπάρχει κάποια άλλη πτυχή αυτής της πολύπλοκης διαδικασίας που είναι η ρίζα αυτής της διαφοράς, ωστόσο αυτό πρέπει να διερευνηθεί διεξοδικά. Εικάζεται ότι, η αιτία αυτής της διαφοράς είναι: (i) το σχήμα των σωματιδίων στην περίπτωση του σύνθετου υλικού PA12-υαλοβάμβακα, καθώς τα επιμήκη σφαιροκυλινδρικά σωματίδια υαλοβάμβακα προσθέτουν μια εντελώς νέα πολυπλοκότητα στην προσομοίωση και είναι πιθανό να μην εκτιμήθηκαν σωστά οι σωστές τιμές των συντελεστών τριβής κύλισης και ολίσθησης, καθώς και η επιφανειακή ενέργεια, παράγοντας που επηρεάζει τις δυνάμεις προσκόλλησης και συνοχής, και ii) στον κατακόρυφο επιστρωτήρα λεπίδας, ο οποίος δεν συμπίεζει πραγματικά τη σκόνη, εκτός εάν διεγείρεται από κάποια δόνηση, πράγμα που σημαίνει ότι μεταβάλλει κυρίως το ύψος του στρώματος και το επίπεδο συμπίεσης εξαρτάται κυρίως από την ΚΜΣ, την τραχύτητα του υποστρώματος και το θ των σωματιδίων [20], [97]. Σε κάθε περίπτωση, προκειμένου να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα, είναι απαραίτητη μια συγκριτική μελέτη, στην οποία οι δευτερεύουσες παράμετροι της διαδικασίας, όπως το υλικό της σκόνης, η ΚΜΣ, το σχήμα των σωματιδίων, το υλικό και το σχήμα του επιστρωτήρα, οι παράμετροι της διαδικασίας επανεπίστρωσης και η διάταξη/το μοτίβο διασποράς και οι περιβαλλοντικές παράμετροι θα καταστούν μη παράγοντες, καθώς θα διατηρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της σειράς πειραμάτων. Είναι επίσης σημαντικό να εκτελεστεί ένα πείραμα όχι μόνο για να ελεγχθεί μέσω της γωνίας πρηνούς και της γωνίας χιονοστιβάδας ότι έχουν επιλεγεί οι σωστές παράμετροι τριβής και συνοχής/προσκόλλησης, αλλά και για να εκτελεστεί πειραματικά η εξάπλωση του στρώματος σκόνης και να συγκριθεί με το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ΜΔΣ, καθώς πολλοί ερευνητές έχουν επισημάνει ότι οι δοκιμές διάτμησης και τα πειράματα ρευστότητας δεν συσχετίζονται απόλυτα με την ικανότητα εξάπλωσης της σκόνης για τη μέθοδο εξάπλωσης που εξετάζεται κάθε φορά [88].

Παρόλο που η καλύτερη πυκνότητα συσσώρευσης του στρώματος σκόνης σημαίνει γενικά πιο πυκνά τελικά εξαρτήματα, με λιγότερους και μικρότερους πόρους, μερικές φορές αυτό δεν συμβαίνει. Αυτό συμβαίνει, επειδή, αυξάνοντας το ονομαστικό πάχος στρώματος, το πραγματικό πάχος στρώματος αυξάνεται πολύ περισσότερο, καθιστώντας μερικές φορές αδύνατο για τη δέσμη λέιζερ ή την πηγή ισχύος να διεισδύσει μέχρι το υπόστρωμα και να εκτελέσει τη σύντηξη μεταξύ του τρέχοντος και του προηγούμενου στρώματος. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία πόρων στο τελικό τεμάχιο, εντός των οποίων παγιδεύονται τα μη λιωμένα/μη πυροσυσσωματωμένα σωματίδια [119]. Εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς, κανένας ερευνητής δεν έχει εντοπίσει αυτή την αντίφαση, όπου, αν και παράγεται στρώμα σκόνης με καλύτερο επίπεδο συμπίκνωσης, το τελικό τεμάχιο έχει φτωχότερες ιδιότητες όσον αφορά την πυκνότητα/πορώδες, επειδή η θετική επίδραση του αυξημένου επιπέδου συμπίκνωσης έχει αντισταθμιστεί αρνητικά από έναν άλλο παράγοντα, το βάθος διείσδυσης της δέσμης σε σχέση με το πραγματικό πάχος στρώματος.

2.6.2 Αντοχή διαρροής / αντοχή σε εφελκυσμό / επιμήκυνση κατά τη θραύση

Η τελική αντοχή σε εφελκυσμό (UTS) είναι το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο που μπορεί να αντέξει ένα υλικό πριν από τη θραύση, ενώ το όριο διαρροής (YS) είναι το εφελκυστικό φορτίο που μπορεί να αντέξει ένα υλικό πριν υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Η επιμήκυνση κατά τη θραύση (μέτρο της ολκιμότητας) είναι ο λόγος μεταξύ του μεταβαλλόμενου (τελικού) μήκους και του αρχικού μήκους μετά τη θραύση του δοκιμίου. Η αντοχή διαρροής, η UTS και η επιμήκυνση κατά τη θραύση είναι ιδιότητες που χρησιμεύουν ως δείκτες ποιότητας του τελικού τεμαχίου και μπορούν να διαφέρουν με βάση τις διαφορές των παραμέτρων της διαδικασίας διασποράς σκόνης, των δεικτών ποιότητας της κλίνης σκόνης και των παραμέτρων της διαδικασίας σύντηξης, όπως η απόσταση των πάσων της δέσμης, η ταχύτητα σάρωσης, η ισχύς του λέιζερ κ.λπ.

Οι Leicht et al. (2021) έδειξαν ότι η αύξηση του t_{nom} από 20 μm σε 80 μm μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα χωρίς να έχει καθόλου αρνητική επίδραση στην UTS. Ωστόσο, το όριο διαρροής και η επιμήκυνση σε θραύση μειώθηκαν κατά 15% και 30% αντίστοιχα όταν το ονομαστικό πάχος στρώματος αυξήθηκε από 20 σε 80 μm [120]. Οι συγγραφείς όμως, χρησιμοποίησαν σκόνη με ΚΜΣ μεταξύ 20 και 53 μm , που σημαίνει

ότι όλα τα σωματίδια είναι μεγαλύτερα από το ονομαστικό πάχος στρώματος, οπότε κατά τη διάρκεια της διάστροφης των πρώτων στρώσεων, και ενώ το t_{act} δεν είχε φτάσει ακόμα στην τιμή t_{eff} , ο επιστρωτήρας εναπόθεσε ένα στρώμα που αποτελείται αποκλειστικά από λεπτά σωματίδια, που σημαίνει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα στρώματος, οπότε τα αποτελέσματα έχουν ένα εγγενές σφάλμα λόγω της διαφοράς στην ΚΜΣ της αποτιθέμενης σκόνης σε κάθε στρώμα. Για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι $d_{90} < t_{act, min} = t_{nom}$.

Οι Ali et al. (2017) έδειξαν ότι η κλίση της θερμοκρασίας και ο ρυθμός ψύξης είναι παράγοντες που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κρυσταλλογραφική μικροδομή του χάλυβα κατά τη διάρκεια της ΕΤΛ. Έλεγξαν αυτούς τους παράγοντες με προθέρμανση του θαλάμου και της κλίνης σε διάφορες θερμοκρασίες, από 100 έως περίπου 900 °C. Αυτό, με τη σειρά του, επηρεάζει την UTS, το όριο διαρροής, την ολκιμότητα και τη σκληρότητα Vickers (βλ. ενότητα 2.6.3) του παραγόμενου τεμαχίου. Ωστόσο, δεν αξιολόγησαν καμία παράμετρο διασποράς σκόνης ή δείκτες ποιότητας στρώματος σκόνης για να αναπτύξουν μια σύνδεση με τη μικροδομή των τελικών τεμαχίων [84].

Οι Soundarapandiyan et al. (2021) εξέτασαν την επίδραση της ανακύκλωσης σκόνης στην UTS, YS, επιμήκυνση κατά τη θραύση, ενέργεια κρούσης Charpy και σκληρότητα. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, αν και οι τρεις τελευταίες δεν παρουσίασαν καμία διαφορά, η YS και η UTD αυξήθηκαν οριακά όταν χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένη σκόνη. Το απέδωσαν αυτό στην αυξημένη ποσότητα οξυγόνου στην επαναχρησιμοποιημένη σκόνη Ti6Al4V, ωστόσο, δεν έκαναν στατιστική ανάλυση για να καθορίσουν τη σημασία της πυκνότητας συσσώρευσης της κλίνης σκόνης σε αυτά τα αποτελέσματα, παρόλο που είδαν επίσης ότι η διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης μειώθηκε δραστικά όταν χρησιμοποιήθηκε επαναχρησιμοποιημένη σκόνη, λόγω των εσωτερικών ατελειών του τελικού τεμαχίου που προκλήθηκαν από τα κενά της κλίνης σκόνης [28].

Οι Spierings et al. (2011) αναφέρουν ότι τα λεπτόκοκκα σωματίδια λιώνουν εύκολα και προάγουν υψηλή πυκνότητα και αντοχή σε εφελκυσμό του τελικού τεμαχίου, ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια προάγουν υψηλότερη επιμήκυνση θραύσης [117]. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ΚΜΣ πρέπει να επιλέγεται ώστε να συμμορφώνεται με αυτές τις αντιφατικές παρατηρήσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου.

2.6.3 Σκληρότητα

Η σκληρότητα είναι ένα σημαντικό κριτήριο ποιότητας του τελικού τεμαχίου, καθώς επιτρέπει σε ένα τεμάχιο να αντιστέκεται στην πλαστική παραμόρφωση, τη διείδυση, την εσοχή και τις χαραγές. Ως εκ τούτου, μια υψηλή τιμή σκληρότητας αυξάνει την αντίσταση στη φθορά λόγω τριβής ή διάβρωσης (π.χ. από νερό, λάδι ή ατμό). Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας είναι οι δοκιμές εσοχής, όπως στις δοκιμές Brinell, Rockwell και Vickers. Οι δοκιμές αυτές διαφέρουν κυρίως ως προς το σχήμα του εντυπώματος (πυραμίδα με βάση το τετράγωνο για τη δοκιμή Vickers, εντυπώματος με σφαίρα για τη δοκιμή Brinell), αλλά και ως προς το υλικό του εντυπώματος. Η σκληρότητα υπολογίζεται με βάση το βάθος και το σχήμα της εγκοπής που αφήνεται στο δοκίμιο.

Στις κατεργασίες ΣΚΠ, η σκληρότητα συνδέεται άμεσα με την κρυσταλλική μικροδομή του τεμαχίου, η οποία επιτυγχάνεται με το μοτίβο θέρμανσης-ψύξης που ακολουθείται κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Η προθέρμανση και η πυκνότητα ισχύος του λέιζερ παίζουν σημαντικό ρόλο, αλλά έχει αποδειχθεί ότι η επίδραση του πάχους του στρώματος είναι εξίσου σημαντική.

Μια ιδιαίτερα πορώδης κλίση σκόνης σημαίνει ότι η ενέργεια που παρέχεται στο στρώμα θα βρει μεγαλύτερη αντίσταση στη μεταφορά σε κοντινές θέσεις της κηλίδας λέιζερ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με αγωγιμότητα του στρώματος είναι μια σταθμισμένη μέση τιμή της αγωγιμότητας του υλικού του όγκου της σκόνης και της αγωγιμότητας του αέρα, με τα βάρη να καθορίζονται από το πορώδες (αντίστροφα, την πυκνότητα συσσώρευσης) του εναποτιθέμενου στρώματος. Όσο πιο πορώδες είναι, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του αέρα στο στρώμα και τόσο χαμηλότερη η θερμική αγωγιμότητα. Αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μοτίβο θέρμανσης και ψύξης που θα ακολουθηθεί τοπικά, άρα και την κρυσταλλική μικροδομή του τελικού τεμαχίου. Γενικά, η πιο αργή ψύξη οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές σκληρότητας. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η χαμηλή πυκνότητα συσσώρευσης του εναποτιθέμενου στρώματος οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές πυκνότητας του τελικού τεμαχίου, με περισσότερα μόρια κατανεμημένα στον όγκο του. Όσο υψηλότερο είναι το πορώδες του τελικού τεμαχίου, τόσο χαμηλότερη είναι η σκληρότητά του, καθώς ο δείκτης κατά τη διάρκεια της δοκιμής διεισδύει ευκολότερα στο τεμάχιο, λόγω της κατάρρευσης των μικροπόρων κατά τα στάδια προφόρτισης ή

φόρτισης της δοκιμής [121]. Οι Ziri et al. (2021) έδειξαν επίσης ότι, δεδομένου ότι το πορώδες μπορεί να συνδεθεί με την ΚΜΣ, μία στενή ΚΜΣ με μέσая μέση διάμετρο ($D_{50}=29 \mu\text{m}$ και $D_{90}=41 \mu\text{m}$) είναι προτιμότερη για την επίτευξη υψηλής σκληρότητας σε σύγκριση με πολύ χονδροκόκκες ή πολύ λεπτόκοκκες σκόνες [121]. Το ίδιο επιβεβαιώθηκε και από τους Balbaa et al. (2021), όπου μια πολύ λεπτόκοκκη σκόνη, με μέση διάμετρο μικρότερη από $10 \mu\text{m}$, άρα με πολύ χαμηλότερη ρευστότητα, παρήγαγε στρώματα σκόνης με πολύ χαμηλότερη πυκνότητα συσσώρευσης. Αυτό οδήγησε σε πολύ υψηλότερο πορώδες του τελικού τεμαχίου και, κατά συνέπεια, σε πολύ χαμηλότερη σκληρότητα του τελικού τεμαχίου. Η μικροσκληρότητα του τεμαχίου ήταν επίσης χαμηλότερη για την πιο λεπτόκοκκη σκόνη, η οποία προκλήθηκε από τις μικρορωγμές, καθώς η μικροσκληρότητα δεν εξαρτάται από το πορώδες, όπως η μακροσκληρότητα [122].

Οι Nadiyah et al. (2021) έδειξαν με παραγοντικά πειράματα ότι, μεταξύ του πάχους στρώματος, της ισχύος του λέιζερ και της ταχύτητας σάρωσης λέιζερ, το πάχος στρώματος έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη σκληρότητα του τελικού τεμαχίου. Συμπέραναν ότι ένα μικρό πάχος στρώματος απαιτεί μικρότερη ποσότητα ενέργειας για τη δημιουργία τεμαχίων με επαρκή σκληρότητα, ενώ τα παχύτερα στρώματα χρειάζονται περισσότερη ενέργεια για να λιώσουν σε επαρκές βάθος, γεγονός που δημιουργεί πιο βίαια φαινόμενα τήξης, άρα αυξάνει το πορώδες του τελικού τεμαχίου μέσω keyholing και απογύμνωσης, οδηγώντας σε χαμηλότερη σκληρότητα [123]. Μεγάλη επιφανειακή τραχύτητα στρώματος σημαίνει μεγάλη διακύμανση του πάχους του στρώματος σκόνης, η οποία μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στη σκληρότητα μέσω του μηχανισμού που εξηγήθηκε επίσης παραπάνω.

2.6.4 Επιφανειακή Τραχύτητα Τεμαχίου

Οι Spierings et al. (2011) κατέγραψαν καλύτερη ποιότητα επιφάνειας με μία ΚΜΣ που περιείχε περισσότερα λεπτόκοκκα σωματίδια [117]. Αυτό αποδίδεται στο ότι τα λεπτόκοκκα σωματίδια καλύπτουν τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων σωματιδίων. Ωστόσο, ένας υπερβολικός αριθμός λεπτόκοκκων σωματιδίων μπορεί να προκαλέσει μειωμένη ρευστότητα και απλωσιμότητα λόγω αυξημένης συνοχής και να έχει τα αντίθετα αποτελέσματα από τα επιθυμητά. Οι Azar et al. (2021) [124] ανέφεραν ότι μια αυξημένη τιμή της επιφανειακής τραχύτητας του τελικού τεμαχίου επιδεινώνει την απόδοση σε κόπωση του υλικού Ti-6Al-4V όπως κατασκευάστηκε, όπως

αποδεικνύεται και από τις μελέτες των Wycisk et al. (2014) [100]. Αυτό μπορεί να ισχύει ανεξάρτητα από το υλικό, αλλά δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά.

Τα μεγάλα σωματίδια, ιδίως τα ακανόνιστου σχήματος, τείνουν να αυξάνουν την επιφανειακή τραχύτητα του τελικού τεμαχίου [122]. Πιο συγκεκριμένα, οι Balbaa et al. (2021) αναφέρουν αύξηση της τάξης του 5-73% για τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με χονδρόκοκκη σκόνη σε σύγκριση με τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με πιο λεπτόκοκκη σκόνη, ανάλογα με την ταχύτητα σάρωσης με λέιζερ [122]. Επίσης, η αύξηση του πάχους στρώματος τείνει να αυξήσει την επιφανειακή τραχύτητα του τελικού τεμαχίου, αλλά μόνο εάν τα πάχη στρώματος είναι μικρότερα από το μέγιστο μέγεθος σωματιδίων της σκόνης. Αυτό συμβαίνει επειδή, εάν το $d_{90} > t_{nom}$, τότε αυτό που στην πραγματικότητα συμβαίνει είναι μια επιλεκτική εναπόθεση μίας πιο «λεπτόκοκκης» ΚΜΣ, η οποία γίνεται πιο χονδρόκοκκη καθώς αυξάνεται το πάχος του στρώματος, άρα μειώνεται η πυκνότητα συσσώρευσης της σκόνης εντός του στρώματος (στην περίπτωση που όλες οι σκόνες παρουσιάζουν καλή ρευστότητα και οι δυνάμεις συνοχής δεν εμποδίζουν την εναπόθεση) [61].

Εκτός από την οριζόντια τραχύτητα της επιφάνειας του τελικού τεμαχίου, η κάθετη είναι επίσης σημαντική. Η τιμή αυτή γίνεται μεγαλύτερη με την αύξηση του πραγματικού πάχους στρώματος, λόγω του φαινομένου της αναβαθμίδας [103].

2.6.5 Διαστασιακή Ακρίβεια

Οι Azar et al. (2021) παρέχουν μια διαγραμματική σύνδεση μεταξύ της ακρίβειας διαστάσεων και της τραχύτητας επιφάνειας του τελικού τεμαχίου για τη ΣΚΠ των μετάλλων. Συγκρίνουν επίσης την καμπύλη με άλλες τεχνολογίες κατασκευής, όπως η στίλβωση, η μηχανική κατεργασία, η σφυρηλάτηση και η χύτευση με άμμο [124].

Οι Brika et al. (2020) συνέκριναν τα εξαρτήματα που κατασκευάστηκαν με ΕΤΛ από τρεις διαφορετικές παρτίδες σκόνης κράματος Ti-6Al-4V (που κατασκευάστηκαν με 3 διαφορετικές μεθόδους, ώστε το σχήμα τους να είναι διαφορετικό, αλλά η ΚΜΣ τους να είναι περίπου η ίδια). Έδειξαν ότι η πιο σφαιρική σκόνη έχει καλύτερη ρευστότητα και την πιο αποτελεσματική συσκευασία σωματιδίων, που οδηγεί σε πυκνότερες κλίνες σκόνης και δημιούργησε τελικά εξαρτήματα με ανώτερη πυκνότητα (βλ. *ενότητα 2.6.1*), επιφανειακό φινίρισμα (βλ. *ενότητα 2.6.4*) και ακρίβεια διαστάσεων. Μια μεγαλύτερη ποσότητα λεπτόκοκκων σωματιδίων επηρεάζει αρνητικά τις προαναφερθείσες

ιδιότητες λόγω των αυξημένων δυνάμεων συνοχής [58]. Οι Balbaa et al. (2021) κατέληξαν επίσης στο ίδιο συμπέρασμα συγκρίνοντας μια λεπτόκοκκη σκόνη με 75% μεγαλύτερη συνοχή που δημιούργησε στρώματα με 30% μικρότερη πυκνότητα συσσώρευσης από μια πιο χονδρόκοκκη σκόνη. Η πιο λεπτόκοκκη σκόνη οδήγησε στην κατασκευή τεμαχίων με χαμηλότερη διαστασιακή ακρίβεια τόσο στο επίπεδο X-Y, όσο και κατά μήκος της διεύθυνσης κατασκευής (άξονας ύψους-Z) αποδεικνύοντας την επίδραση της ΚΜΣ, η οποία επηρεάζει με τη σειρά της τη ρευστότητα της σκόνης και στη συνέχεια την πυκνότητα συσσώρευσης, την τραχύτητα της επιφάνειας και τη διαστασιακή ακρίβεια του τελικού τεμαχίου. Η χαμηλότερη διαστασιακή ακρίβεια στο επίπεδο X-Y οφείλεται κυρίως στην υψηλή πρόσφυση της λεπτόκοκκης σκόνης, η οποία προκαλεί την προσκόλληση των μη λιωμένων ή μερικώς λιωμένων σωματιδίων στις πλευρές του τεμαχίου, ενώ η χαμηλότερη διαστασιακή ακρίβεια κατά μήκος του άξονα Z οφείλεται στην τάση των σωματιδίων της λεπτόκοκκης σκόνης να σχηματίζουν συσσωματώματα, τα οποία με τη σειρά τους είτε αυξάνουν δραστικά την τραχύτητα της επιφάνειας του εναποτιθέμενου στρώματος, είτε κληρονομούν ατέλειες στα επόμενα στρώματα, τα οποία συσσωρεύονται και μεγεθύνουν τα διαστασιακά σφάλματα [122].

Είναι επίσης προφανές ότι το πάχος του στρώματος επηρεάζει την ακρίβεια των διαστάσεων λόγω του φαινομένου των σκαλοπατιών. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του στρώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια της διαστασιακής ακρίβειας και της ποιότητας της επιφάνειας (βλ. ενότητα 2.6.4) [103].

2.6.6 Εμφάνιση επιφανειακών ή εσωτερικών ελαττωμάτων

Οι Soundarapandiyan et al. (2021) συνέκριναν τη διάρκεια ζωής σε κόπωση δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με ΤΔΗ από παρθένα και 10 φορές επαναχρησιμοποιημένη σκόνη Ti6Al4V. Διαπίστωσαν ότι τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν από επαναχρησιμοποιημένη σκόνη είχαν περίπου 25-30% μειωμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση, την οποία απέδωσαν στην αύξηση των εσωτερικών ατελειών έλλειψης σύντηξης στις ανακυκλωμένες κατασκευές. Εντόπισαν αυτές τις ατέλειες στα κενά που σχηματίζονται στην κλίση της σκόνης, λόγω του μειωμένου αριθμού λεπτόκοκκων σωματιδίων και της παρουσίας ορισμένων ακανόνιστων σωματιδίων με υψηλό λόγο διαστάσεων (επιμήκη) που υπάρχουν στην επαναχρησιμοποιημένη σκόνη [28].

Οι Balbaa et al. (2021) απέδειξαν ότι οι εξαιρετικά συνεκτικές, πολύ λεπτόκοκκες σκόνες, με μέσο μέγεθος μικρότερο από 10 μm , δημιουργούν μικρορωγμές, οι οποίες μπορούν να μειώσουν δραστικά τη μικροσκληρότητα του τεμαχίου. Επιπλέον, η παρουσία πόρων στον όγκο του τελικού τεμαχίου μπορεί να μειώσει δραστικά και τη μακρο-σκληρότητα, καθώς ο εντυπωτής διεισδύει ευκολότερα στο τεμάχιο [122].

Πίνακας 2.13: Σύνδεση μεταξύ των δεικτών ποιότητας στρώματος σκόνης (ΔΠΣΣ) και των δεικτών ποιότητας τελικού τεμαχίου (ΔΠΤΤ).

(**Σημείωση:** Με βάση αναφορές και παρατηρήσεις του συγγραφέα.)

ΚΠΣΣ\ΚΠΤΤ	Ποκνότητα/ πορώδες	Αντοχή σε εφελκυσμό/ κάμψη	Σκληρότητα	Επιφανειακή τραχύτητα	Διαστασιακή ακρίβεια	Εμφάνιση επιφανειακών ή εσωτερικών ατελειών
Επιφανειακή τραχύτητα (ΕΤ)	ΕΤ \uparrow \Rightarrow Πορώδες \uparrow	ΕΤ \uparrow \Rightarrow Αντοχή εφελκυσμού/ κάμψης \downarrow (Δεν έχει εξεταστεί σύνδεση με επιμήκυνση θραύσης)	Η σχέση αυτή δεν έχει εξεταστεί σε καμία έρευνα, εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς.	ΕΤ στρώματος σκόνης \uparrow \Rightarrow ΕΤ τελικού τεμαχίου \uparrow	ΕΤ \uparrow \Rightarrow Διαστασιακή ακρίβεια \downarrow	ΕΤ \uparrow \Rightarrow Επιφανειακές/ εσωτερικές ατέλειες \uparrow
Ποκνότητα συσσώρευσης σκόνης (ΠΣ)	ΠΣ \uparrow \Rightarrow Πορώδες \downarrow	ΠΣ \uparrow \Rightarrow Αντοχή εφελκυσμού/κάμψης \uparrow (Δεν έχει εξεταστεί σύνδεση με επιμήκυνση θραύσης)	Η σχέση αυτή δεν έχει εξεταστεί σε καμία έρευνα, εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς..	ΠΣ \uparrow \Rightarrow ΕΤ \downarrow	ΠΣ \uparrow \Rightarrow Διαστασιακή ακρίβεια \uparrow	ΠΣ \uparrow \Rightarrow Επιφανειακές/ εσωτερικές ατέλειες \downarrow
Εμφάνιση επιφανειακών ατελειών	Η εμφάνιση επιφανειακών ελαττωμάτων, όπως ρωγμές λόγω πολύ υψηλής συμπίεσης από τον επιστρωτήρα, αυλακώσεις από την έλξη συσσωματωμάτων σκόνης, ή κενά και κοιλότητες από μια εξαιρετικά συνεκτική σκόνη ή μια πολύ υψηλή μεταφορική ταχύτητα του επιστρωτήρα καθιστούν το στρώμα σκόνης ακατάλληλο για ΣΚΠ, επομένως η συμπλήρωση αυτών των τετραγώνων δεν θα είχε νόημα.					
Απόκλιση πάχους στρώσης	$t_{\text{act}} > t_{\text{desired}} \Rightarrow$ Πιθανή μερική τήξη στρώσης \Rightarrow Πορώδες \uparrow	$t_{\text{act}} > t_{\text{desired}} \Rightarrow$ Πιθανή μερική τήξη \Rightarrow Ακατάλληλη συγκόλληση μεταξύ στρωμάτων \Rightarrow Αντοχή σε εφελκυσμό κατά μήκος της διεύθυνσης χτισίματος του τεμαχίου \downarrow	$t_{\text{act}} < t_{\text{desired}} \Rightarrow$ Πιθανή επανάτηξη προηγούμενης στρώσης \Rightarrow διαφορετική κρυσταλλική δομή (για μεταλλικές σκόνες) \Rightarrow Μεταβολή της σκληρότητας ανάλογα με το μοτίβο θέρμανσης- ψύξης (ποσοστό ωστενίτη- μαρτενσίτη)	$t_{\text{act}} < t_{\text{desired}} \Rightarrow$ Πιθανό πιτσύλισμα/φαινόμενο κλειδαρότρυπας λόγω της μεγαλύτερης ενέργειας που κατανέμεται σε μικρότερη ποσότητα σκόνης \Rightarrow ΕΤ \downarrow λόγω σταγονιδίων που επιμολύνουν την επιφάνεια	$(t_{\text{eff}} - t_{\text{nom}}) \uparrow \Rightarrow$ Διαστασιακή ακρίβεια \downarrow	$t_{\text{act}} > t_{\text{desired}} \Rightarrow$ Πιθανή μερική τήξη στρώσης \Rightarrow εσωτερικοί πόροι $t_{\text{act}} < t_{\text{desired}} \Rightarrow$ Πιθανή επανάτηξη προηγούμενης στρώσης \Rightarrow διαφορετική κρυσταλλικοί δομή ανατηγμένου μετάλλου.

Σημείωση:

1. $t_{act} > t_{desired}$ μπορεί να συμβεί εάν οι ερευνητές παραλείψουν να λάβουν υπόψη τους τη συρρίκνωση του στρώματος σκόνης λόγω απογύμνωσης, πιτσιλισμού, διείσδυσης του λιωμένου υλικού στο πορώδες της σκόνης που λειτουργεί ως υποστήριξη.
2. $t_{act} < t_{desired}$ μπορεί να συμβεί εάν οι ερευνητές υπερεκτιμήσουν τη συρρίκνωση του στρώματος σκόνης (ενδεχομένως υποεκτιμώντας την πυκνότητα συσσώρευσης του στρώματος σκόνης), συνεπώς υπολογίζουν μεγαλύτερη τιμή ($t_{eff} - t_{nom}$) από την πραγματική

Τα συσσωματώματα σκόνης που σχηματίζονται από σωματίδια πολύ συνεκτικών σκονών μπορούν να παρασυρθούν στην κλίνη σκόνης και να σχηματίσουν ατέλειες στρώματος σκόνης, όπως εξηγείται στην ενότητα 2.4.3. Γενικά, κάθε ελάττωμα που προκαλείται στο στρώμα σκόνης μπορεί να κληρονομηθεί και στο τελικό τεμαχίο. Επιπλέον, η χαμηλή πυκνότητα συσσώρευσης αυξάνει το πορώδες του τελικού τεμαχίου, επομένως, κάθε ρύθμιση των παραμέτρων διεργασίας που προκαλεί χαμηλή πυκνότητα συσσώρευσης του μη λιωμένου στρώματος μπορεί να οδηγήσει σε εσωτερικές ατέλειες του τελικού τεμαχίου.

Είναι σημαντικό να λαμβάνεται πάντα υπόψη η διαφορά μεταξύ του πραγματικού και του ονομαστικού πάχους στρώματος και να μην βαθμονομείται ποτέ η ισχύς μιας δέσμης λέιζερ/ηλεκτρονίων θεωρώντας ότι το ονομαστικό πάχος στρώματος είναι το πραγματικό. Στην πρώτη περίπτωση, η δέσμη ενδέχεται να μην είναι αρκετά ισχυρή ώστε να λιώσει αρκετά βαθιά ώστε να ενοποιήσει το (n+1)-οστό στρώμα με το n-οστό στρώμα, δημιουργώντας πόρους. Στη δεύτερη περίπτωση, η ισχύς της δέσμης μπορεί να είναι πολύ μεγάλη για το πραγματικό πάχος στρώματος, δημιουργώντας βίαια φαινόμενα τήξης, προκαλώντας πιτσιλιές που θα επιμολύνουν την κλίνη σκόνης, αυξάνοντας την επιφανειακή τραχύτητα του τελικού τεμαχίου ή ακόμη και προκαλώντας διαστασιακές ανακρίβειες, αφού οι πιτσιλιές μπορούν ακόμη και να διαταράξουν τον επιστρωτήρα κατά την εναπόθεση του επόμενου στρώματος σκόνης. Επιπλέον, η βίαιη τήξη μπορεί να προκαλέσει ακόμη και «κλειδαρότρυπες», δηλαδή εσωτερικές ατέλειες που επιδεινώνουν τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου και αυξάνουν το πορώδες του [125], [126]–[128].

2.7 Συζήτηση

Αυτό το κεφάλαιο καταφέρνει να φωτίσει πολλές από τις πτυχές της διαδικασίας διασποράς σκόνης για ΣΚΠ, καθώς και να προσδιορίσει τις σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων της διαδικασίας, των δεικτών ποιότητας στρώματος σκόνης (ΔΠΣΣ) και των δεικτών ποιότητας τελικού τεμαχίου (ΔΠΤΤ). Εντοπίστηκαν επίσης πολλά κενά στη βιβλιογραφία. Ο Πίνακας 2.3 δείχνει ότι δεν έχει διαπιστωθεί σύνδεση μεταξύ του υλικού της πούδρας και του σχήματος του επιστρωτήρα ή της στρατηγικής επανεπίστρωσης. Παρόλο που όλα τα είδη κόνεων μπορούν να απλωθούν ανεξάρτητα από το σχήμα του επιστρωτήρα και τη στρατηγική που χρησιμοποιείται, έχει αποδειχθεί ότι δεν είναι εξίσου αποτελεσματικό κάθε σχήμα και στρατηγική επιστρωτήρα και δεν επιτυγχάνει υψηλά πρότυπα ΔΠΣΣ. Οι ερευνητές θα πρέπει να επιδιώξουν να καλύψουν αυτό το κενό γνώσης. Επιπλέον, ο Πίνακας 2.8 δείχνει ότι, εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς, δεν έχει διαπιστωθεί καμία σχέση μεταξύ της στρατηγικής επανεπίστρωσης και του υλικού του επιστρωτήρα. Πιο συγκεκριμένα, δεν είναι σαφές εάν ορισμένες πτυχές της στρατηγικής επανεπίστρωσης, όπως η μεταφορική ταχύτητα της λεπίδας ή του κυλίνδρου ή η σκόπιμη δόνηση του επιστρωτήρα, θα οδηγούσαν σε διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά τους δείκτες ΔΠΣΣ, εάν ο επιστρωτήρας ήταν κατασκευασμένος από διαφορετικά υλικά (π.χ. λιγότερο ελαστικά, σκληρότερα, πιο άκαμπτα υλικά κ.λπ.). Αυτό είναι ένα κενό γνώσης που θα πρέπει να εξεταστεί από τους ερευνητές προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία.

Οι Πίνακες 2.14, 2.15 και 2.16 παρέχουν μια κατηγοριοποίηση ορισμένων σημαντικών άρθρων που εστιάζουν στην εξάπλωση/επανεπίστρωση σκόνης για διεργασίες ΣΚΠ. Οι παράμετροι της διεργασίας, οι δείκτες ποιότητας της στρώσης σκόνης και οι δείκτες ποιότητας του τελικού προϊόντος στους οποίους επικεντρώνεται κάθε άρθρο παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.14, 2.15 και 2.16 αντίστοιχα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι περισσότερες εργασίες χρησιμοποιούν πειράματα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.14, ακόμη και αν πρόκειται αποκλειστικά για τον υπολογισμό της τιμής μιας ιδιότητας που είναι απαραίτητη για τη δημιουργία μιας προσομοίωσης, για την επικύρωση του αποτελέσματος μιας προσομοίωσης ή για τη σωστή βαθμονόμηση μιας προσομοίωσης πριν από την εκτέλεσή της. Αυτό οφείλεται στο πολύ υψηλό επίπεδο πολυπλοκότητας που διαθέτει η διαδικασία εναπόθεσης

σκόνης, το οποίο καθιστά αδύνατη την προσομοίωση χωρίς να γίνουν (πολλές) παραδοχές.

Όσον αφορά τις παραμέτρους της διεργασίας, ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τον Πίνακα 2.14. Πρώτον, όσον αφορά το υλικό, οι περισσότερες εργασίες επικεντρώνονται σε μέταλλα και σημαντικά λιγότερα άρθρα επικεντρώνονται σε πολυμερή, κεραμικά ή σύνθετα υλικά. Αυτό αντανακλά τις ανώτερες μηχανικές ιδιότητες που παρέχουν τα μέταλλα και την ικανότητά τους να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ταυτόχρονα, τα κεραμικά και ιδίως τα σύνθετα υλικά βρίσκονται ακόμη σε προγεννητικό στάδιο όσον αφορά τις κατεργασίες ΣΚΠ και χρειάζονται πολύ περισσότερη έρευνα μέχρι να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν ευρέως. Δεύτερον, τα περισσότερα άρθρα εξετάζουν πρωτίστως το πάχος του στρώματος, το σχήμα των σωματιδίων και την ΚΜΣ και δευτερευόντως τις στρατηγικές επανεπίστρωσης, αλλά λίγες εργασίες εστιάζουν στο σχήμα και το υλικό του επιστρωτήρα, παρόλο που υπάρχει πληθώρα διαφορετικών επιστρωτήρων και υλικών που προσφέρουν διαφορετικές δυνατότητες. Ο τομέας αυτός αποδεικνύεται περισσότερο βιομηχανικός παρά ακαδημαϊκά εξετασμένος. Τέλος, σχεδόν καμία εργασία δεν εξετάζει ή δεν αναφέρεται καν στις περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία κατά τη διαδικασία επανεπίστρωσης, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι έχουν αποδεδειγμένη σχέση με τη ρευστότητα και την απλωσιμότητα των σκονών. Αυτό πρέπει να διορθωθεί άμεσα. Οι συγγραφείς προτείνουν να αναπτυχθεί ένα πρωτόκολλο για τον καθορισμό τυπικών αποδεκτών ορίων για την υγρασία και τη θερμοκρασία. Κάθε εργασία που σχετίζεται με την επάλειψη σκόνης πρέπει να αναφέρεται σε αυτό το πρωτόκολλο, ώστε να διασφαλίζεται η εγκυρότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους.

Όσον αφορά τους ΔΠΣΣ, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.15, τα περισσότερα άρθρα εξετάζουν την επιφανειακή τραχύτητα και την πυκνότητα συσσώρευσης, ενώ λιγότερες εργασίες εστιάζουν στις επιφανειακές ατέλειες του στρώματος και στην ακρίβεια επίτευξης του επιθυμητού πάχους στρώματος. Στις περισσότερες εργασίες δεν εξετάζεται καν η διαφορά μεταξύ ονομαστικού, αποτελεσματικού και πραγματικού πάχους στρώματος. Έχει παρατηρηθεί ότι, αν και υπάρχουν εργασίες που εξετάζουν τη ρευστότητα της σκόνης, ελάχιστες τη συνδέουν άμεσα με τους άλλους ΔΠΣΣ. Επίσης, παρόλο που υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την ακριβή μέτρηση των ΔΠΣΣ, οι περισσότερες από αυτές είναι είτε καταστροφικές, είτε μη καταστροφικές, αλλά με

σημαντική καθυστέρηση που προστίθεται στη διαδικασία, πράγμα που σημαίνει ότι θα μείωναν σημαντικά την παραγωγικότητα αν επρόκειτο να εφαρμοστούν σε μηχανές ΣΚΠ βιομηχανικής παραγωγής. Αυτό προκύπτει από τον Πίνακα 2.12. Ως εκ τούτου, πρέπει να αναπτυχθεί μια σταθερή μη επεμβατική μέθοδος επαρκούς ταχύτητας και ακρίβειας που να μπορεί να εφαρμοστεί στη γραμμή, προκειμένου να αποτραπεί η κατασκευή ελαττωματικών εξαρτημάτων ή ακόμη και να εντοπιστεί τότε πρέπει να αποξεσθεί και να εφαρμοστεί εκ νέου ένα νέο στρώμα σκόνης, πράγμα που δεν μπορεί να γίνει μέχρι σήμερα.

Όσον αφορά τους ΔΠΤΤ, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.16, τα περισσότερα έργα επικεντρώνονται στην πυκνότητα/πορώδες και στην αντοχή και ολκιμότητα του εξαρτήματος. Λιγότερες εργασίες εστιάζουν στη σκληρότητα και τη μικροσκληρότητα, τη διαστασιακή ακρίβεια και την επιφανειακή τραχύτητα. Τέλος, όλα τα άρθρα που εξετάζουν τη μικροδομή με τη μορφή εσωτερικών και επιφανειακών ατελειών το κάνουν ως μέσο εξήγησης της μειωμένης πυκνότητας και της μηχανικής αντοχής και σπάνια εστιάζουν στην εύρεση της σχέσης μεταξύ των ΔΠΤΤ και των εσωτερικών ή επιφανειακών ατελειών του τελικού τεμαχίου και της μορφολογίας των ατελειών. Αυτό είναι κάτι που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ώστε να προσδιοριστεί αντίστροφα ποιο είδος ατέλειας στρώματος σκόνης που δεν έχει υποστεί πυροσυσσωμάτωση προκαλεί ποια ατέλεια τελικού τεμαχίου (π.χ., θα μπορούσε μια ρωγμή να προκαλέσει έναν πόρο και σε ποιο βαθμό το σχήμα της ρωγμής θα μπορούσε να καθορίσει το μέγεθος και το σχήμα του πόρου;).

Προκειμένου να εμβαθύνουμε στο θέμα των ΔΠΤΤ και της σύνδεσής τους με τους ΔΠΣΣ, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πολύ λίγες εργασίες ασχολούνται επί του παρόντος με τη σύνδεση μεταξύ της ποιότητας του στρώματος μη λιωμένης σκόνης και των διεργασιών του ύστερου σταδίου, δηλαδή των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα όταν η δέσμη λέιζερ αλληλεπιδρά με τα σωματίδια σκόνης. Όταν συμβαίνει αυτό, λαμβάνουν χώρα διάφορα φαινόμενα. Τα σωματίδια εξαχνώνονται εν μέρει, προκαλώντας πίδακες ατμών που δημιουργούν διαταραχές τόσο στη λίμνη τήγματος όσο και στα μη λιωμένα σωματίδια σκόνης. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει κάθε είδους πιτσιλιές (π.χ. στερεές ή υγρές πιτσιλιές) [127], [128]. Η πίεση ανάκρουσης και η πίεση της ακτινοβολίας λέιζερ μπορούν επίσης να προκαλέσουν φαινόμενα όπως η δημιουργία πιτσιλίσματος και η απογύμνωση. Έχει αποδειχθεί ότι η πίεση ακτινοβολίας είναι συγκρίσιμη με τις αεροδυναμικές δυνάμεις και το βάρος των

κόκκων όσον αφορά την τάξη μεγέθους [129]. Η πυκνότητα συσσώρευσης του στρώματος ή, αντίστροφα, το πορώδες του στρώματος σκόνης, παίζει σημαντικό ρόλο όσον αφορά τη δημιουργία πιτσιλίσματος, καθώς μετρά τον όγκο των κοιλοτήτων αέρα που υπάρχουν μέσα στο στρώμα.

Εάν αυτοί οι αγωγοί/«σήραγγες» μεταξύ των σωματιδίων της σκόνης έχουν σημαντικό μέγεθος, τότε οι πίδακες ατμών ενδέχεται να διαφύγουν χωρίς να δημιουργηθούν στερεά πιτσιλίσματα. Ωστόσο, όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα συσσώρευσης, τόσο μικρότερη είναι η σκέδαση της δέσμης λέιζερ που θα λάβει χώρα εσωτερικά, δηλαδή στο εσωτερικό του μη λιωμένου στρώματος, και αυτό σημαίνει ότι η πραγματική τιμή της απορροφησιμότητας λέιζερ θα είναι μειωμένη. Πράγματι, υπάρχουν διάφορες εργασίες που αποδεικνύουν ότι οι μικρότερες κατανομές μεγέθους σωματιδίων προάγουν την τιμή της απορροφησιμότητας λόγω της αυξημένης εσωτερικής σκέδασης της δέσμης [130]. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι μια μεγαλύτερη ποσότητα λεπτόκοκκων σωματιδίων αυξάνει τη συνοχή της σκόνης και καθιστά πολύ δύσκολη την εξάπλωση ενός ομοιόμορφου στρώματος με υψηλή πυκνότητα συσσώρευσης. Αυτό σημαίνει ότι, αν και μια μικρότερη τιμή πυκνότητας συσσώρευσης θα οδηγήσει σε λιγότερο βίαια φαινόμενα και θα μειώσει τον κίνδυνο δημιουργίας πιτσιλίσματος, θα μειώσει επίσης την ικανότητα του στρώματος σκόνης να λιώνει πλήρως και αποτελεσματικά, αυξάνοντας τον κίνδυνο μερικής τήξης και εσωτερικού πορώδους/ατελειών. Η σχέση αντιστάθμισης μεταξύ αυτών των δύο πρέπει να εξεταστεί πειραματικά, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να θυσιαστεί η ποιότητα του τελικού εξαρτήματος είτε από την πρώτη είτε από τη δεύτερη.

Επίσης, η επίδραση της πίεσης ακτινοβολίας σε ένα ολόκληρο στρώμα σκόνης δεν έχει εξεταστεί διεξοδικά, παρόλο που η σημασία της έχει αποδειχθεί, οπότε δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί συμπέρασμα για το πώς επηρεάζεται από ορισμένους ΔΠΣΣ. Επιπλέον, οι Guo et al. (2018) απέδειξαν ότι, με βάση την περιβαλλοντική πίεση και ρυθμίζοντας το πάχος του στρώματος μπορεί κανείς να ελαχιστοποιήσει το συνολικό (θερμό και ψυχρό) πιτσιλίσμα (spatter-διασπορά θερμών και υγρών «πιτσιλιών»). Για να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι, η μεγαλύτερη περιβαλλοντική πίεση αυξάνει την ποσότητα της θερμής διασποράς αλλά μειώνει την ποσότητα της συνολικής διασποράς. Επίσης, η μείωση του πραγματικού πάχους στρώματος μειώνει επίσης τη διασπορά [131]. Ωστόσο, η μείωση του πάχους στρώματος χωρίς ταυτόχρονη προσαρμογή της ισχύος της δέσμης λέιζερ θα σήμαινε ότι το βάθος διείσδυσης θα επηρέαζε τα 2 ή

περισσότερα προηγούμενα στρώματα, αυξάνοντας δραστικά την παραμένουσα τάση και επηρεάζοντας τη μικροδομή του τελικού τεμαχίου [132]. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένας ακόμη συμβιβασμός όσον αφορά την ποιότητα, αυτή τη φορά λόγω του πάχους στρώματος.

Επιπλέον, όταν η δέσμη λέιζερ αλληλεπιδρά με τα σωματίδια της σκόνης, τα σωματίδια αρχίζουν να λιώνουν από το εξωτερικό και η συμπεριφορά της συνένωσής τους επηρεάζεται από την κατανομή μεγέθους και το σχήμα των κόκκων της σκόνης [133]. Τα μικρότερα σωματίδια λιώνουν ευκολότερα και λειτουργούν ως συγκολλητικό υλικό που θα συνδέσει τα μεγαλύτερα σωματίδια μεταξύ τους. Επίσης, τα επιμήκη ή ακανόνιστα σωματίδια παρουσιάζουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα σφαιρικά.

Πίνακας 2.14: Κατηγοριοποίηση των άρθρων με βάση την παράμετρο της διαδικασίας στην οποία εστιάζουν κατά τη διάρκεια της μελέτης.

Παράμετροι διεργασίας\ Πηγές		[134]	[63]	[95]	[117]	[70]	[35]	[120]	[72]	[65]	[66]	[76]	[74]	[71]	[88]	[135]	[79]
Υλικό σκόνης	Πολυμερή		✓			✓									✓		
	Κεραμικά	✓												✓			
	Μέταλλα			✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓
	Σύνθετα						✓		✓								
Κατανομή μεγέθους σωματιδίων (ΚΜΣ)		✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Σχήμα σωματιδίων		✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Υλικό επιστρωτήρα		✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Σχήμα επιστρωτήρα		✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Παράμετροι και στρατηγική επανεπίστρωσης		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Ονομαστικό και πραγματικό πάχος στρώσης		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Περιβαλλοντικές παράμετροι		✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓
<i>Experimental (E), simulation (S), or analytical (A) work</i>		E	E&S	E	E	E&S	E&S	E	E	E	E	E	E&A	S	E&A	E	E

(**Σημείωση:** ✓= απλή αναφορά της παραμέτρου, χωρίς όμως να μελετάται η επίδρασή της ή να διατηρείται σταθερή, ✓= εκτεταμένη μελέτη της επίδρασής της στη διαδικασία, ✗= η παράμετρος δεν αναφέρεται στη μελέτη.)

Η πυκνότητα συσσώρευσης του στρώματος επηρεάζει τη διείσδυση της υγρής κόλλας στα σωματίδια που βρίσκονται βαθύτερα μέσα στο στρώμα. Ωστόσο, εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς, δεν υπάρχει καμία εργασία που να εξετάζει συστηματικά τη

σχέση μεταξύ της ποιότητας του στρώματος σκόνης και της δυαδικής συνένωσης των σωματιδίων, αν και υπάρχουν εργασίες που εξετάζουν την επίδραση του μεγέθους και του σχήματος των σωματιδίων στη δυαδική συνένωση των κόκκων σκόνης.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πυκνότητα συσσώρευσης επηρεάζει άμεσα την απορροφησιμότητα λέιζερ από το στρώμα. Αποδεικνύεται ότι η απόσβεση της δέσμης λέιζερ στο στρώμα σκόνης είναι έως και τέσσερις τάξεις μεγέθους μικρότερη σε σύγκριση με τους αντίστοιχους συντελεστές του ίδιου χύδην υλικού με αυτό της σκόνης. Αυτό σημαίνει ότι το βάθος διείσδυσης της δέσμης λέιζερ είναι μεγαλύτερο μέσω της υπέρθεσης των στρωμάτων σκόνης σε σύγκριση με αυτό που θα ήταν αν η δέσμη κατευθυνόταν στο στερεό, χύδην υλικό.

Αυτό εξηγείται εύκολα με βάση τη θεωρία της σκέδασης. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέσο μέγεθος των σωματιδίων της σκόνης, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διείσδυσης και τόσο μικρότερος ο συντελεστής εξασθένησης. Παρά το γεγονός ότι η εξασθένηση εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων (τα ακανόνιστα σωματίδια αυξάνουν την τυχαιότητα του μοτίβου σκέδασης), αλλά και από το μήκος κύματος του λέιζερ και το ίδιο το υλικό (ανακλαστικότητα και απορροφησιμότητα χύδην υλικού), είναι σαφές ότι όσο πυκνότερο (ή, ισοδύναμα, όσο λιγότερο πορώδες) είναι το στρώμα σκόνης, τόσο μικρότερο είναι το βάθος διείσδυσης της δέσμης λέιζερ [136]. Η παρατήρηση αυτή, ωστόσο, έρχεται σε σύγκρουση με την επισήμανση ότι οι μικρότερες κατανομές μεγέθους σωματιδίων αυξάνουν την απορροφησιμότητα λέιζερ που έγινε σε προηγούμενη ενότητα. Οι συγγραφείς τείνουν να πιστεύουν ότι η σχέση μεταξύ της πυκνότητας συσσώρευσης και της απορροφησιμότητας λέιζερ δεν είναι γραμμική, αλλά μπορεί να επιτευχθεί μια μέγιστη τιμή απορροφησιμότητας για κάποια τιμή της πυκνότητας συσσώρευσης του μη πυροσυσσωματωμένου στρώματος.

Εξάλλου, αν η πυκνότητα συσσώρευσης πλησιάζει το 100%, τότε το στρώμα σκόνης τείνει να συμπεριφέρεται ως χύδην στερεό υλικό, το οποίο αποδεδειγμένα έχει πολύ μεγαλύτερη ανακλαστικότητα σε σύγκριση με οποιοδήποτε πορώδες στρώμα σκόνης. Ωστόσο, αυτή η τιμή της πυκνότητας συσσώρευσης που βελτιστοποιεί την απορροφησιμότητα λέιζερ δεν έχει καθοριστεί ούτε πειραματικά και αναλυτικά, ούτε μέσω προσομοιώσεων, παρά την προφανή σημασία της για την κατανόηση των θεμελιωδών αρχών των διεργασιών ΣΚΠ.

Πίνακας 2.15: Κατηγοριοποίηση των άρθρων με βάση τους δείκτες ποιότητας του στρώματος σκόνης που χρησιμοποιούν για να καταλήξουν σε συμπεράσματα.

Δείκτες Ποιότητας Στρώματος Σκόνης\Πηγές	[134]	[63]	[95]	[70]	[35]	[72]	[65]	[66]	[74]	[71]	[88]	[79]
Επιφανειακή τραχύτητα (ΕΤ)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Πυκνότητα συσσώρευσης (ΠΣ)	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Εμφάνιση επιφανειακών ελαττωμάτων	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗
Ακρίβεια επίτευξης του επιθυμητού πάχους στρώματος	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
(Ρευστότητα)	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓

(**Σημείωση 1:** ✓= απλή αναφορά του δείκτη, αλλά όχι μελέτη του τρόπου με τον οποίο επηρεάζεται, √= εκτεταμένη μελέτη του τρόπου με τον οποίο επηρεάζεται ο δείκτης κατά τη διαδικασία, ✗= ο δείκτης δεν αναφέρεται στη μελέτη; **Σημείωση 2:** Η ρευστότητα εξετάζεται επίσης εδώ, παρά το γεγονός ότι δεν αποτελεί ΔΠΣΣ, δεδομένου ότι την επηρεάζει άμεσα.)

Πίνακας 2.16: Κατηγοριοποίηση των άρθρων με βάση τους δείκτες ποιότητας του τελικού προϊόντος που χρησιμοποιούν για να καταλήξουν σε συμπεράσματα.

Δείκτες Ποιότητας Τελικού Τεμαχίου\Πηγές	[117]	[120]	[65]	[66]	[76]	[135]
Πυκνότητα/Ποσοστό πορώδους	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Δύναμη παραγωγής / αντοχή σε εφελκυσμό / επιμήκυνση κατά τη θραύση	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Σκληρότητα	✗	✗	✓	✗	✓	✗
Επιφανειακή τραχύτητα	✓	✗	✗	✓	✗	✗
Διαστασιακή ακρίβεια	✗	✗	✗	✓	✗	✗
Εμφάνιση επιφανειακών ή εσωτερικών ελαττωμάτων	✗	✓	✓	✓	✓	✗

(**Σημείωση:** ✓= απλή αναφορά του δείκτη, αλλά όχι μελέτη του τρόπου με τον οποίο επηρεάζεται, √= εκτεταμένη μελέτη του τρόπου με τον οποίο επηρεάζεται ο δείκτης κατά τη διαδικασία, X= ο δείκτης δεν αναφέρεται στη μελέτη.)

2.8 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Το κεφάλαιο αυτό κατηγοριοποιεί αρχικά τις παραμέτρους της διεργασίας που επηρεάζουν την εναπόθεση σκόνης για τις κατεργασίες ΣΚΠ. Ορίστηκαν παράγοντες όπως το υλικό της σκόνης, η ΚΜΣ, το σχήμα των σωματιδίων, το πάχος του στρώματος, το σχήμα και το υλικό του επιστρωτήρα, η στρατηγική επανεπίστρωσης, καθώς και περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία και περιεγράφηκε διεξοδικά ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τη διαδικασία. Ο τρόπος με τον οποίο η μεταβολή μιας από αυτές δημιουργεί μεταβολή σε οποιαδήποτε από τις άλλες παραμέτρους της διεργασίας εξετάστηκε και παρουσιάστηκε με τη χρήση των Πινάκων 2.3 έως και 2.10.

Η επίδραση των αναφερόμενων παραμέτρων της διεργασίας στο στρώμα σκόνης έγινε εμφανής με την εξέταση τεσσάρων ΔΠΣΣ, της επιφανειακής τραχύτητας, της πυκνότητας συσσώρευσης, της εμφάνισης ατελειών και της ακρίβειας επίτευξης του επιθυμητού πάχους στρώματος.

Τέλος, η επίδραση καθενός από τους τέσσερις ΔΠΣΣ στην ποιότητα του τελικού τεμαχίου εξετάστηκε με τον καθορισμό 6 ΔΠΤΤ, της πυκνότητας, της μηχανικής αντοχής, της σκληρότητας, της τραχύτητας, της ακρίβειας διαστάσεων και των ατελειών.

Με τον τρόπο αυτό, κατέστη δυνατή η αποκωδικοποίηση μιας εξαιρετικά πολύπλοκης διαδικασίας με την ανάλυση της και τον εντοπισμό συνδέσεων μεταξύ των παραμέτρων της διαδικασίας και των ΔΠΣΣs στο πρώτο στάδιο και των ΔΠΣΣ και των ΔΠΤΤ στο δεύτερο στάδιο. Τα κυριότερα σημεία του άρθρου μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Η ποιότητα του στρώματος σκόνης εξαρτάται από τη ρευστότητα που εμφανίζει η σκόνη κατά τη διαδικασία εναπόθεσης, ωστόσο δεν υπάρχει καμία πειραματική δοκιμή που να μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια τη ρευστότητα της σκόνης για κάθε διαφορετική στρατηγική εναπόθεσης. Ένας συνδυασμός των

δοκιμών γωνίας πρανούς και χιονοστιβάδας μπορεί να είναι αρκετός για να εξασφαλιστεί η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

2. Δεν δίνεται αρκετή προσοχή στους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι συγγραφείς προτείνουν την ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου που πρέπει να τηρείται κατά τη διάρκεια των δοκιμών εναπόθεσης σκόνης, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ακριβή και αξιόπιστα μεταξύ διαφορετικών εργασιών.
3. Η αξιολόγηση της ποιότητας του στρώματος σκόνης γίνεται κυρίως με οπτικές μεθόδους, ωστόσο δεν έχει δημιουργηθεί on-line εφαρμογή της μεθόδου και η τρέχουσα υπολογιστική ταχύτητα παραμένει περιορισμός. Εάν δεν αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, ένας τρόπος πρόβλεψης και πρόληψης ελαττωματικών εξαρτημάτων λόγω κακής ποιότητας στρώματος πούδρας θα παραμείνει πρόκληση για τη βιομηχανία.
4. Το σύστημα ΠΔ-ΔΠΣΣ-ΔΠΤΤ (ΠΔ σημαίνει παράμετροι διεργασίας) θα μπορούσε να υιοθετηθεί από το σύνολο της ερευνητικής κοινότητας προκειμένου να απλοποιηθεί και να βελτιωθεί η κατανόηση της διεργασίας εναπόθεσης σκόνης για ΣΚΠ. Πρόκειται για ένα στιβαρό, καλά καθορισμένο σύστημα που μπορεί να διασταυρωθεί με μεθόδους παραγοντικών πειραμάτων (π.χ. πειράματα Taguchi με ANOVA) για να διαπιστωθούν αλληλεπιδράσεις και συνδέσεις σε όλη τη διαδικασία με συστηματικό τρόπο που είναι λιγότερο χρονοβόρο από τον τρόπο με τον οποίο εξετάζεται η διαδικασία μέχρι σήμερα.
5. Μια παρόμοια ανασκόπηση που θα εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο η ποιότητα του στρώματος σκόνης σε συνδυασμό με τις παραμέτρους της δέσμης λέιζερ (π.χ. ισχύς, ταχύτητα σάρωσης, απόσταση παράλληλων πάσων, μήκος κύματος κ.λπ.) αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν τους ΔΠΤΤ είναι υψίστης σημασίας. Η υψηλή πολυπλοκότητα της διαδικασίας εμποδίζει τους ερευνητές να αναλύσουν τον μεγάλο αριθμό παραμέτρων ταυτόχρονα, οπότε η μέθοδος της διάσπασης της διαδικασίας σε πιο εύκολα παρατηρήσιμες και ερευνητές υποδιαδικασίες είναι ο μόνος τρόπος για να ενισχυθεί η γνώση και η κατανόηση της ερευνητικής κοινότητας σχετικά με τις διαδικασίες ΣΚΠ. Υπό αυτό το πρίσμα, οι ΔΠΤΤ μπορούν να επεκταθούν ώστε να συμπεριλάβουν τη μικροδομή και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων.

Στο μέλλον, οι ερευνητές θα πρέπει τελικά να στοχεύουν στην ανάπτυξη μιας καθολικά εφαρμόσιμης μεθόδου στην οποία, με βάση τα επιθυμητά επίπεδα ΔΠΤΤ, θα επιλέγονται τα κατάλληλα επίπεδα εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων της διαδικασίας. Είναι επίσης απαραίτητο να παρακολουθείται η διαδικασία επανεπίστρωσης ώστε να διασφαλίζεται ένα σταθερά υψηλό επίπεδο ΔΠΤΤ. Είναι δυνατή η μεταβολή των παραμέτρων της διεργασίας μεταξύ των στρώσεων, προκειμένου να γίνει ενεργή τελειοποίηση των ΔΠΣΣ και, τελικά, των ΔΠΤΤ, γεγονός που θα παρέχει στους ερευνητές τη δυνατότητα να αναπτύξουν λειτουργικά διαβαθμισμένα τελικά εξαρτήματα, με μηχανικές ιδιότητες που ποικίλλουν εντός του όγκου τους. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου πρωτοκόλλου κατασκευής θα έφερνε τις διεργασίες ΣΚΠ σε ένα εντελώς διαφορετικό επίπεδο. Αν και πρόκειται για ένα δύσκολο έργο, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα της διαδικασίας, οι συγγραφείς πιστεύουν ακράδαντα ότι είναι απαραίτητο προκειμένου οι διαδικασίες ΣΚΠ να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους.

3 Σχεδιασμός Συστήματος Επανεπίστρωσης / Εναπόθεσης Πούδρας (ΣΕΠ)

Στο παρόν κεφάλαιο [59], [137] παρουσιάζεται ο μεθοδολογικός σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πρωτότυπου συστήματος επανεπίστρωσης σκόνης (ΣΕΠ) για μια προσαρμοσμένη μηχανή επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (ΕΠΛ) με στόχο τη διερεύνηση/μοντελοποίηση και συγκριτική αξιολόγηση της διαδικασίας όσον αφορά τις πολυμερείς σκόνες. Αρχικά, εξετάζονται οι διαθέσιμες μέθοδοι εναπόθεσης σκόνης, δηλαδή: μηχανική, ηλεκτροστατική, δονητική, ψεκασμός με τη βοήθεια αερολύματος και εναπόθεση με ακροφύσιο πύργου. Χρησιμοποιείται η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process- AHP) για τη συστηματική σύγκριση και κατάταξή τους σύμφωνα με κριτήρια όπως: ανάγκη βαθμονόμησης, ταχύτητα εναπόθεσης, ποιότητα της εναποτιθέμενης επιφάνειας, λειτουργική απλότητα, ευκολία ελέγχου/αυτοματισμού, ευκολία κατασκευής και κόστος. Η μηχανική μέθοδος βρέθηκε να είναι η πιο συμφέρουσα. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα πρωτότυπο, προσαρμοσμένο ΣΕΠ που χρησιμοποιεί συνδυασμό κυλίνδρου/λεπίδας παρέχοντας μηχανικές λύσεις για τις επιμέρους λειτουργίες που πρέπει να υποστηρίζονται και να χωρίζονται σε ομάδες δοσομετρητή/κόσκινου και επιστρωτήρα. Κάθε ομάδα συγκρίνεται μέσω AHP με το -ευρέως υιοθετημένο στη βιομηχανία- μηχανικό ΣΕΠ αναφοράς και αποδεικνύεται η υπεροχή του πρωτοτύπου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο λεπτομερής σχεδιασμός του τελευταίου.

3.1 Μέθοδοι Εναπόθεσης

Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (ΕΠΛ) και η τήξη (ΕΤΛ) είναι διεργασίες προσθετικής κατασκευής (ΠΚ) με σύντηξη κλίνης πούδρας (ΣΚΠ). Εναποτίθενται πολύ λεπτά στρώματα πυκνά συσσωρευμένης σκόνης μετάλλου, πολυμερούς ή σύνθετου υλικού και κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο αντικείμενο με πυροσυσσωμάτωση ή τήξη του στρώματος σκόνης, η οποία προκαλείται από

εστιασμένη δέσμη λέιζερ. Η βιβλιογραφία έχει αποδείξει τη σημασία ενός ομοιόμορφου και ομοιογενούς στρώματος σκόνης για τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Η ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος μη πυροσυσσωματωμένης σκόνης καθορίζεται από την επιφανειακή τραχύτητα, την πυκνότητα και τη διαφορά μεταξύ του πραγματικού πάχους και του αναμενόμενου, θεωρητικού πάχους [103], [71]. Παρόλο που η σημασία της εναπόθεσης σκόνης έχει αποδειχθεί και συζητηθεί σε πολλά άρθρα, δεν έχει υπάρξει μια ολοκληρωμένη, συγκριτική ανασκόπηση που να καλύπτει τις διάφορες μεθόδους εναπόθεσης σκόνης που υλοποιούνται σε αντίστοιχους σχεδιασμούς συστημάτων επανεπίστρωσης σκόνης (ΣΕΠ). Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες.

Πρώτον, τα συστήματα μηχανικής εναπόθεσης σκόνης εξαρτώνται αποκλειστικά από φαινόμενα που βασίζονται στην τριβή μεταξύ ενός επιστρωτήρα και των κόκκων σκόνης σε ένα υπόστρωμα [138]. Μια σχισμή τροφοδοσίας [139] ή ένας κάδος τροφοδοσίας/έμβολο παροχής σκόνης είναι κοινά χαρακτηριστικά που παρέχουν την απαραίτητη ποσότητα σκόνης, σε συνδυασμό με μια μέθοδο, τις περισσότερες φορές μια λεπίδα και/ή έναν κύλινδρο, για την εξάπλωση ενός ομοιόμορφου στρώματος [72].

Δεύτερον, υπάρχουν ηλεκτροστατικές μέθοδοι εναπόθεσης σκόνης, όπως το πιστόλι κορώνας, το τριβοηλεκτρικό πιστόλι [140] ή το ηλεκτροφωτογραφικό ΣΕΠ [141]. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με βάση την αρχή της έλξης μεταξύ σωματιδίων με αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Τα σωματίδια της σκόνης φορτίζονται με διάφορους τρόπους (πιστόλι κορώνας, τριβοηλεκτρικό πιστόλι, κύλινδρος φόρτισης στην ηλεκτροφωτογραφία) και στη συνέχεια εναποτίθενται σε γειωμένη μεταλλική επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να είναι η πλατφόρμα κατασκευής της μηχανής ΕΠΛ, στην περίπτωση της ηλεκτροστατικής εναπόθεσης με πιστόλι, ή μια φορτισμένη πλάκα φορέα που θα μεταφέρει τη σκόνη στην πλατφόρμα κατασκευής, στην περίπτωση της ηλεκτροφωτογραφικής εναπόθεσης σκόνης.

Τρίτον, υπάρχουν δονητικές μέθοδοι εναπόθεσης σκόνης. Περιλαμβάνουν ως επί το πλείστον ένα ακροφύσιο πολύ μικρού ανοίγματος, μέσα από το οποίο η σκόνη δεν μπορεί να περάσει μόνο μέσω των βαρυτικών δυνάμεων, λόγω απόφραξης. Ωστόσο, η σκόνη ρευστοποιείται μέσω δονήσεων ή διέγερσης με υπερήχους που οδηγούν σε εξαιρετικά συνεπή ροή σκόνης, άρα σε πολύ ακριβή έλεγχο της ποσότητας σκόνης.

Έχει επίσης αποδειχθεί ότι οι κατάλληλα συντονισμένοι υπέρηχοι μπορούν να έχουν θετική επίδραση στην επακόλουθη συμπύκνωση της σκόνης [142], [143].

Η τέταρτη κατηγορία περιλαμβάνει τις πιο σπάνιες μεθόδους εναπόθεσης σκόνης που δεν μπορούν να ενταχθούν σε μία από τις τρεις προαναφερθείσες κατηγορίες, όπως η εναπόθεση με ψεκασμό με τη βοήθεια αερολύματος (Aerosol Assisted Spray Deposition- AASD) και οι μέθοδοι με τη βοήθεια ροής αερίου, όπως το ακροφύσιο πύργου και η ομοαξονική παροχή σκόνης. Στην AASD, η σκόνη αναμιγνύεται με ένα υγρό και στη συνέχεια ψεκάζεται σε μια επιφάνεια για να δημιουργηθεί το στρώμα το οποίο πρέπει να στεγνώσει πριν από τη σάρωση με λέιζερ [144], [145]. Στη μέθοδο με ακροφύσιο πύργου, η σκόνη προωθείται προς τα πάνω μέσω ενός ακροφυσίου μέσω ενός ρεύματος αέρα και στη συνέχεια συγκρούεται με ένα οριζόντιο κάλυμμα εκτροπής που κάνει τα σωματίδια της σκόνης να κινούνται σε ακτινική κατεύθυνση. Στη συνέχεια, η σκόνη πέφτει στο τραπέζι εναπόθεσης μέσω βαρυτικών δυνάμεων δημιουργώντας ένα ομοιόμορφο στρώμα [146]. Το ομοαξονικό σύστημα σκόνης υλοποιείται από μια ειδικά σχεδιασμένη κεφαλή που φιλοξενεί τόσο τα συστήματα τροφοδοσίας σκόνης, μέσω ροής αερίου, όσο και την ακτίνα λέιζερ που λιώνει τη σκόνη με ένα κατάλληλα ενσωματωμένο σύστημα ψύξης. Ωστόσο, αυτό εφαρμόζεται κυρίως στην εναπόθεση κατευθυνόμενης ενέργειας (Directed Energy Deposition-DED) και όχι στην ΠΚ κλίνης σκόνης [147].

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στον εντοπισμό των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των προαναφερθέντων μεθόδων και στη σύγκρισή τους μέσω της AHP, αφού καθοριστούν συγκεκριμένα κριτήρια για τον προσδιορισμό της καταλληλότητάς τους για την ΠΚ σε κλίση σκόνης. Ως αποτέλεσμα, σχεδιάζεται ένα πρωτότυπο ΣΕΠ και ο σχεδιασμός χωρίζεται σε δύο ομάδες, την ομάδα δοσομετρητή/κόσκινου και την ομάδα επανεπίστρωσης που καλύπτει τις σχετικές λειτουργίες. Κάθε μία από τις ομάδες συγκρίνεται μέσω AHP με τον αντίστοιχο πιο συνηθισμένο βιομηχανικό/εμπορικό σχεδιασμό ΣΕΠ, που ονομάζεται ΣΕΠ αναφοράς, αποδεικνύοντας την υπεροχή του πρώτου. Στη συνέχεια κατασκευάζεται το πρωτότυπο και η λειτουργία του δοκιμάζεται προκαταρκτικά σε μια πρωτότυπη μηχανή ΕΠΛ. Στην ενότητα 0 αναλύονται οι κύριες μέθοδοι διασποράς σκόνης και προσδιορίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στην ενότητα 3.3, οι μέθοδοι αυτές συγκρίνονται μέσω της AHP. Στην ενότητα 3.4, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του πρωτότυπου ΣΕΠ και συγκρίνεται με το ΣΕΠ αναφοράς μέσω AHP. Στην ενότητα 3.5

περιγράφεται η υλοποίηση του πρωτότυπου ΣΕΠ και παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών δοκιμών λειτουργικότητας. Τέλος, η Ενότητα 3.6 συνοψίζει τα συμπεράσματα της μελέτης και ορίζει τη μελλοντική συνέχεια της παρούσας εργασίας.

3.2 Ανάλυση Εναλλακτικών Μεθόδων Εναπόθεσης Πούδρας

Η ΕΠΑ/ΕΤΑ απαιτεί την εναπόθεση ενός ομοιόμορφου και ομοιογενούς στρώματος σκόνης [148], πάνω στο οποίο η δέσμη λείζερ θα ακολουθήσει στη συνέχεια την προκαθορισμένη από το λογισμικό τεμαχισμού διαδρομή για την κατασκευή του επιθυμητού τεμαχίου. Η μηχανική εναπόθεση σκόνης είναι η πιο διαδεδομένη στη βιβλιογραφία μέχρι στιγμής, καθώς είναι σχετικά γρήγορη, απλή και παρέχει αποδεκτή ποιότητα στρώματος σκόνης [72]. Ωστόσο, η μέθοδος βασίζεται αναμφισβήτητα σε μεγάλο βαθμό στα χαρακτηριστικά της σκόνης [149], όπως η σφαιρικότητα και η γωνιακότητα των σωματιδίων και η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων [94], τα οποία επηρεάζουν άμεσα τη ρευστότητα και την απλωσιμότητα της σκόνης [102], [150], δεδομένου ότι κατά την αλληλεπίδραση του επιστρωτήρα με το υπόστρωμα της σκόνης θα αναπτυχθούν δυνάμεις πρόσφυσης και συνοχής. Στο πλαίσιο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα συσσωματώματα σκόνης που προκαλούνται από την αυξημένη υγρασία μπορεί να επηρεάσουν την ακεραιότητα της επιφάνειας κατά τη διαδικασία εναπόθεσης, απαιτώντας κοσκίνισμα της ακατέργαστης σκόνης. Υπάρχουν πολλές παράμετροι διεργασίας [71], [8], όπως η ταχύτητα πρόωσης του επιστρωτήρα, η διάμετρος του κυλίνδρου, η ταχύτητα περιστροφής του κυλίνδρου και η κατεύθυνση περιστροφής, το σχήμα του προφίλ και η γωνία κλίσης της οδηγού λεπίδας [64], καθώς και πολλά διαφορετικά πρότυπα επανεπίστρωσης στρώματος, π.χ. μόνο με κύλινδρο, μόνο με λεπίδα ή με συνδυασμένη δράση [72]. Έτσι, μπορεί να υπάρξει εκθετική αύξηση της πολυπλοκότητας της διαδικασίας, η οποία όμως εγγυάται σχεδόν βέλτιστο χειρισμό διαφορετικών τύπων σκόνης μετά, για παράδειγμα, από παραγοντικά πειράματα.

Η ηλεκτροστατική εναπόθεση σκόνης εφαρμόζεται σε πολυμερείς σκόνες αλλά όχι σε μεταλλικά σωματίδια. Μια ανάλογη διαδικασία θα μπορούσε να εφαρμοστεί για σκόνες σιδηρομαγνητικών κραμάτων [151], η οποία θα εκμεταλλεύεται μια μέθοδο μαγνήτισης αντί της ηλεκτροστατικής φόρτισης, ωστόσο καμία τέτοια μέθοδος δεν έχει

περιγραφεί στη βιβλιογραφία εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς. Η διαδικασία είναι πολύ γρήγορη και εγγυάται την κάλυψη της επιφάνειας, εφόσον το τραπέζι κατασκευής είναι γειωμένο (για ηλεκτροστατική εναπόθεση) ή κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό μέταλλο (για ηλεκτρομαγνητική εναπόθεση). Ωστόσο, κάθε σωματίδιο σκόνης δεν έχει το ίδιο μέγεθος, πράγμα που σημαίνει ότι το ηλεκτρικό φορτίο ποικίλλει [140]. Συμπερασματικά, δεν θα έλκονται όλα τα σωματίδια στην πλατφόρμα κατασκευής με την ίδια δύναμη- ως εκ τούτου, είναι δύσκολο να βαθμονομηθεί αυτή η διαδικασία όσον αφορά την ομοιομορφία και την ομοιογένεια του στρώματος. Λόγω των φαινομένων ηλεκτροστατικής έλξης σε συνδυασμό με τις δυνάμεις βαρύτητας και Van der Waals μεταξύ των σωματιδίων, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια η τροχιά των σωματιδίων [140], [152], [153] και να συνδεθούν οι παράμετροι της διαδικασίας με το επίπεδο συμπίεσης, την τραχύτητα της επιφάνειας και το πάχος του στρώματος. Επιπλέον, οι παράμετροι ηλεκτροστατικής φόρτισης θα πρέπει να προσαρμόζονται με κάθε επόμενο στρώμα σκόνης που προστίθεται, προκειμένου να επιτυγχάνεται επαρκής έλξη με την αύξηση της απόστασης από την πλάκα. Συνολικά, η ανάγκη για προηγμένο έλεγχο είναι επιτακτική όσον αφορά τα επιθυμητά πρότυπα ποιότητας και συνέπειας και αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της μεθόδου.

Η εναπόθεση σκόνης με τη βοήθεια δονήσεων/υπερήχων περιλαμβάνει συνήθως ένα ακροφύσιο με μικρό άνοιγμα, με το οποίο καθίσταται πολύ χρονοβόρα η δημιουργία κλίνης σκόνης με τους ρυθμούς ροής που επιτυγχάνονται με ένα μόνο ακροφύσιο, επομένως θεωρείται πιο κατάλληλη για κατεργασίες κατευθυνόμενης εναπόθεσης ενέργειας (Directed Energy Deposition- DED) [154]. Ωστόσο, η διέγερση με δόνηση/υπέρηχο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποβοήθηση της ομοιογενούς εναπόθεσης και συμπύκνωσης της σκόνης. Επιπλέον, στην περίπτωση εναπόθεσης πολλαπλών υλικών, η συμβολή αυτών των μεθόδων μπορεί να είναι σημαντική, δεδομένου ότι μπορούν να χορηγήσουν μικρές ποσότητες σκόνης με μεγάλη ακρίβεια όσον αφορά την ακρίβεια θέσης. Αυτό θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην κατασκευή σύνθετων τεμαχίων. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν πολύ μικρούς ρυθμούς ροής, οπότε θα ήταν χρονοβόρο να απλωθεί ένα μεγάλο στρώμα. Επιπλέον, θα ήταν δύσκολο να απομονωθεί η διέγερση ή να βαθμονομηθεί και να ελεγχθεί η συχνότητά της έτσι ώστε να επιδρά μόνο στο νεοαποτιθέμενο στρώμα, χωρίς να επηρεάζονται τα χαμηλότερα στρώματα όσον αφορά το ύψος του στρώματος και τη

συμπύκνωση της σκόνης. Αυτό σημαίνει ότι η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της σκόνης (π.χ. μέσω ανάλυσης διακριτών στοιχείων) θα είναι απολύτως απαραίτητη για την ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου που θα διατηρεί υψηλά πρότυπα ανεξάρτητα από τον τύπο της σκόνης.

Όσον αφορά την τέταρτη κατηγορία μεθόδων εναπόθεσης σκόνης, το ομοαξονικό σύστημα παροχής σκόνης είναι αυστηρά σχεδιασμένο για DED [147], αλλά οι άλλες δύο μέθοδοι είναι ενδιαφέρουσες και παρουσιάζουν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η μέθοδος AASD είναι πολύ ακριβής και μπορεί να εναποθέσει επιτυχώς στρώματα πολύ μικρού ύψους, συνδυάζοντας πολύ χαμηλή επιφανειακή τραχύτητα με καλή συμπίεση της σκόνης [144], [145], αλλά με μέγιστο ρυθμό εναπόθεσης πάχους 150 $\mu\text{m}/\text{ώρα}$. Επιπλέον, εμπλέκονται πολλά στάδια για τη δημιουργία των διαλυμάτων - πρόδρομων ουσιών και εναιωρημάτων, τον ψεκασμό τους στο υπόστρωμα και στη συνέχεια την εξάτμιση της υγρής φάσης του εναιωρήματος, γεγονός που καθιστά πολύ δύσκολη την ενσωμάτωση της διαδικασίας σε ένα ΣΕΠ. Τα γνωστά παραδείγματα εφαρμογής αναφέρονται σε σκόνη αλουμίνης ή διοξειδίου του τιτανίου, στις οποίες εμπλέκονται χημικές αντιδράσεις- συνεπώς, η όλη διαδικασία πρέπει να είναι εξαιρετικά διαφοροποιημένη προκειμένου να επιτευχθεί καθολικότητα για να εφαρμοστεί σε μια σειρά τύπων σκόνης. Επιπλέον, είναι απαραίτητο ένα ισχυρό σύστημα ελέγχου, δεδομένου ότι το πάχος του στρώματος και η συμπίεση της σκόνης καθορίζονται μέσω πολλών αλληλένδετων σταδίων. Εναλλακτικά, η μέθοδος με ακροφύσιο πύργου είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί με οποιονδήποτε τύπο σκόνης, ανεξάρτητα από το υλικό, την κατανομή μεγέθους και το σχήμα [146]. Το πάχος του στρώματος ελέγχεται από τη ροή του αέρα μέσω του ακροφυσίου, αλλά τα στρώματα δεν είναι απόλυτα οριζόντια αλλά προφίλ, οδηγώντας έτσι σε ανακρίβεια διαστάσεων. Ο έλεγχος του βαθμού συμπίεσης μπορεί να είναι δυνατός μόνο με την μεταβολή του ύψους του ακροφυσίου του πύργου, έτσι ώστε οι βαρυτικές δυνάμεις να επιδρούν πριν από τις διασωματιδιακές. Η διαδικασία είναι αρκετά γρήγορη, αλλά το μέγεθος των τεμαχίων περιορίζεται από τη θέση του ακροφυσίου του πύργου στη μέση της πλατφόρμας κατασκευής.

3.3 Σύγκριση Μεθόδων Εναπόθεσης Πούδρας

Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα ΣΕΠ στο πλαίσιο της ΕΠΛ/ΕΤΛ, το πρώτο βήμα ήταν η συγκριτική αξιολόγηση των υποψήφιων μεθόδων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα

3.2 μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη αυτής της απόφασης είναι η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), μια πολυκριτηριακή μέθοδος λήψης αποφάσεων που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Saaty [155]. Λεπτομέρειες της μεθόδου μπορούν να βρεθούν στα [156], [157].

Οι εναλλακτικές λύσεις κωδικοποιούνται ως Alt_i ($i=1$ έως 5) ως εξής:

1. Alt_1 : Μηχανική εναπόθεση
2. Alt_2 : Ηλεκτροστατική εναπόθεση (ή μαγνητική για σιδηρομαγνητικές σκόνες)
3. Alt_3 : Εναπόθεση με ψεκασμό αερολύματος (AASD)
4. Alt_4 : Εναπόθεση με ακροφύσιο πύργου
5. Alt_5 : Εναπόθεση με δόνηση/υπέρηχο

Τα κριτήρια βάσει των οποίων θα αξιολογηθούν οι εναλλακτικές μέθοδοι κωδικοποιούνται ως Cr_j ($j=1$ έως 7) ως εξής:

1. Cr_1 -*Ανάγκη βαθμονόμησης*: Πόσες πτυχές της διαδικασίας πρέπει να βαθμονομηθούν για να λειτουργήσει όπως προβλέπεται με το επιθυμητό αποτέλεσμα (π.χ. για μηχανική εναπόθεση, βαθμονόμηση τόσο του κυλίνδρου όσο και του τραπεζιού).
2. Cr_2 -*Εύκολη αυτοματοποίηση και έλεγχος για καθολική εφαρμογή*: Πόσο εύκολο είναι να αναπτυχθεί ένα ΣΕΠ που να λειτουργεί αυτόματα και να προσαρμόζεται σε διάφορους τύπους σκόνης.
3. Cr_3 -*Απλότητα της διαδικασίας*: Πόσα στάδια (συμπεριλαμβανομένων των προπαρασκευαστικών) πρέπει να εκτελεστούν (π.χ. για μηχανική εναπόθεση, προηγούμενο κοσκίνισμα της σκόνης).
4. Cr_4 -*Ποιότητα της εναποτιθέμενης επιφάνειας*: Αυτή ποσοτικοποιείται από το πάχος του στρώματος, την τραχύτητα της επιφάνειας, τη συμπίεση της σκόνης κατά μέσο όρο σε όλο το στρώμα και από την τυπική απόκλιση αυτών των ιδιοτήτων.
5. Cr_5 -*Ταχύτητα διάστρωσης*: Ο χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή ενός πλήρους στρώματος πάνω στο προηγούμενο στρώμα.
6. Cr_6 -*Κόστος κατασκευής*: Εκτίμηση του χρηματικού κόστους του σχεδιασμού ΣΕΠ για την αντίστοιχη μέθοδο.

7. *Cr7-Ευκολία κατασκευής*: Πόσο εύκολο είναι να κατασκευαστεί ένας σχεδιασμός ΣΕΠ για την αντίστοιχη μέθοδο.

Αυτοί καθορίστηκαν με βάση την εμπειρία του συγγραφέα και τους γενικούς στόχους και σκοπούς βιομηχανικού και εμπορικού σχεδιασμού για ευρεία παραγωγή.

Στη συνέχεια, πρέπει να καθοριστεί η σπουδαιότητα καθενός από αυτά τα κριτήρια, δηλαδή οι τιμές των *διανυσμάτων προτεραιότητας* (Priority Vectors- PV). Έτσι, ο Πίνακας 3.1 συμπληρώνεται με βάση μια κλίμακα σχετικής σημασίας. Ειδικότερα, η ένταση της σημασίας αποδίδεται κυρίως σε μονές τιμές από το 1 έως το 9 που δηλώνουν: ίση, αδύναμη, ουσιώδης, αποδεδειγμένη και απόλυτη σημασία, αντίστοιχα, του ενός μέρους έναντι του άλλου. Οι ζυγές τιμές (2 έως 8) μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν απαιτείται συμβιβασμός. Εάν η ένταση του μέρους Α έναντι του μέρους Β ισούται με k , τότε η ένταση του Β έναντι του Α είναι το αντίστροφό της, δηλαδή $1/k$. Οι εκτιμώμενες τιμές που εμφανίζονται στον Πίνακα 3.1 βασίζονται στην ανάλυση που παρατίθεται στην ενότητα 3.2.

Για να ελεγχθεί εάν ο πίνακας είναι συνεπής, υπολογίζονται οι δείκτες CI (Consistency Index) και CR (Consistency Ratio) όπως στην εξίσωση (3.1), όπου λ_{max} είναι η μέγιστη ιδιοτιμή και n είναι το μέγεθος του πίνακα [157]. Ο δείκτης RCI (Random Consistency Index) εξαρτάται από το μέγεθος του πίνακα. Για $n=7$, $RCI=1.32$. Στην περίπτωση του Πίνακα 3.1 ο υπολογισμένος δείκτης συνέπειας δεν υπερβαίνει το 10%, επομένως ο πίνακας είναι συνεπής και τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα.

$$CR = \frac{CI}{RCI} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \frac{1}{RCI} \quad (3.1)$$

Πίνακας 3.1: Πίνακας κρίσης κριτηρίων για την επιλογή μεθόδου εναπόθεσης σκόνης.

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	PVCr
Cr1	1	1/2	1/2	1/5	1/4	2	3	0.077
Cr2	2	1	1/2	1/3	1/3	2	2	0.097
Cr3	2	2	1	1/3	1/3	3	3	0.133
Cr4	5	3	3	1	3	4	5	0.352
Cr5	4	3	3	1/3	1	4	4	0.239
Cr6	1/2	1/2	1/3	1/4	1/4	1	2	0.058
Cr7	1/3	1/2	1/3	1/5	1/4	1/2	1	0.044
	$\lambda_{max} = 7.3709$				$CR = 4.68\% < 10\%$			

Το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μέγιστη ιδιοτιμή είναι το κύριο ιδιοδιάνυσμα. Το διάνυσμα προτεραιότητας (PV) υπολογίζεται κανονικοποιώντας το τελευταίο, δηλαδή διαιρώντας κάθε συντεταγμένη του διανύσματος με το άθροισμα των συντεταγμένων του [157]. Με βάση την αντίστοιχη στήλη του Πίνακα 3.1, το σημαντικότερο κριτήριο είναι η ποιότητα της επιφάνειας εναπόθεσης (Cr4, PV=35,2%), ακολουθούμενη στενά από την ταχύτητα εναπόθεσης (Cr5, PV=23,9%). Τα λιγότερο σημαντικά κριτήρια ήταν η ευκολία κατασκευής (Cr7, PV=4,36%) και το κόστος κατασκευής (Cr6, PV=5,76%), κυρίως επειδή το κόστος κατασκευής μπορεί εύκολα να αντισταθμιστεί από την αξιοπιστία και τη δυνατότητα παραγωγής ποιοτικών εξαρτημάτων, ενώ όλες οι μέθοδοι, ακόμη και οι πιο δύσκολες στην εφαρμογή τους, μπορούν να παράγουν σχέδια ΣΕΠ που είναι αρκετά εύκολα στην κατασκευή.

Πίνακας 3.2: Πίνακες κρίσης για τα κριτήρια Cr1 έως Cr7 για την επιλογή της μεθόδου εναπόθεσης σκόνης.

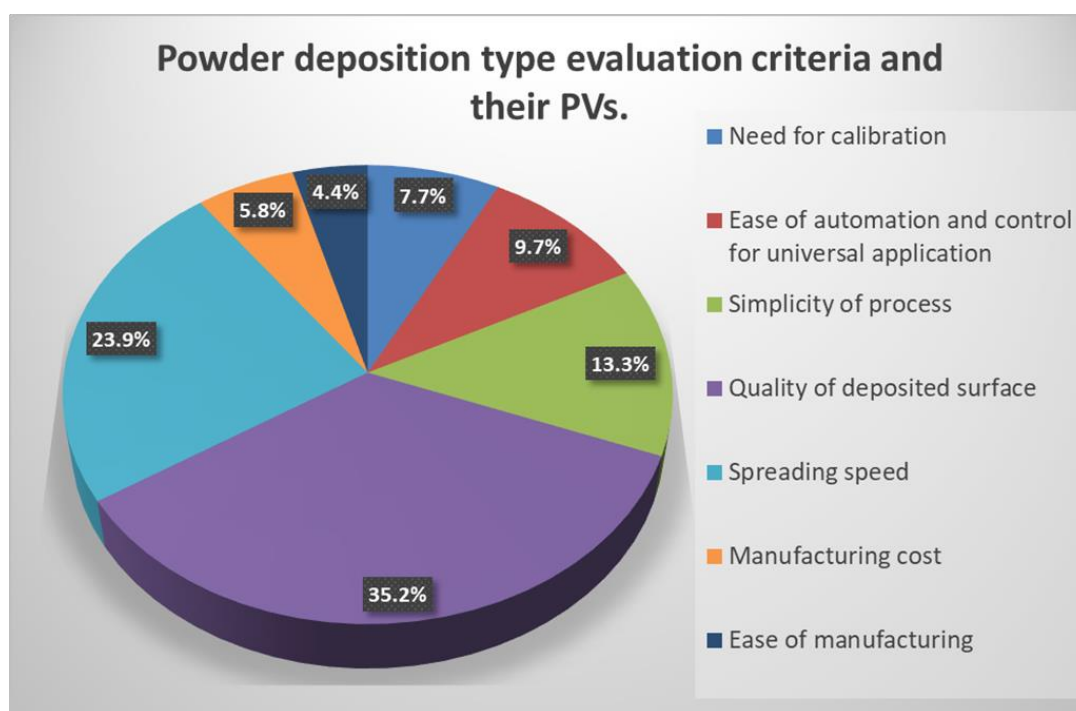
	Cr1						Cr2						Cr3						Cr4					
Alt _j /Alt _i	1	2	3	4	5	PV	1	2	3	4	5	PV	1	2	3	4	5	PV	1	2	3	4	5	PV
1	1	5	5	1/2	3	.322	1	5	5	3	4	.473	1	3	5	1/2	2	.270	1	3	1	5	2	.317
2	1/5	1	2	1/4	2	.115	1/5	1	3	1/3	1/2	.095	1/3	1	4	1/4	1/3	.105	1/3	1	1/3	3	1/2	.115
3	1/5	1/2	1	1/5	1/3	.056	1/5	1/3	1	1/4	1/3	.054	1/5	1/4	1	1/5	1/4	.049	1	3	1	5	3	.349
4	2	4	5	1	3	.399	1/3	3	4	1	3	.247	2	4	5	1	2	.378	1/5	1/3	1/5	1	1/3	.055
5	1/3	1/2	3	1/3	1	.108	1/4	2	3	1/3	1	.133	1/2	3	4	1/2	1	.197	1/2	2	1/3	3	1	.164
λ_{max}	5.280						5.255						5.227						5.092					
CR(%)	6.25						5.69						5.07						2.06					

	Cr5						Cr6						Cr7						FP
Alt _j /Alt _i	1	2	3	4	5	PV	1	2	3	4	5	PV	1	2	3	4	5	PV	
1	1	2	5	3	4	.416	1	3	4	2	3	.388	1	3	5	1/3	3	.263	0.352
2	1/2	1	4	2	3	.261	1/3	1	2	1/3	1/2	.105	1/3	1	4	1/4	1/2	.106	0.146
3	1/5	1/4	1	1/4	1/2	.058	1/4	1/2	1	1/3	1/3	.070	1/5	1/4	1	1/5	1/4	.047	0.159
4	1/3	1/2	4	1	2	.169	1/2	3	3	1	3	.282	3	4	5	1	3	.437	0.201
5	1/4	1/3	2	1/2	1	.096	1/3	2	3	1/3	1	.154	1/3	2	4	1/3	1	.147	0.143
λ_{max}	5.095						5.190						5.323						
CR(%)	2.12						4.23						7.21						

Στη συνέχεια, πρέπει να διαμορφωθούν οι πίνακες εναλλακτικής κρίσης για κάθε κριτήριο, συγκρίνοντας ανά ζεύγη κάθε εναλλακτική μέθοδο με όλες τις άλλες μεθόδους για κάθε κριτήριο με τη σειρά [157]. Έτσι, αναπτύσσονται 7 υποπίνακες.

Αφού ελεγχθεί η συνέπεια κάθε εναλλακτικού πίνακα κρίσης (με υπολογισμό CR, σημειώνοντας ότι $RCI=1,12$ για $n=5$), υπολογίζονται τα διανύσματα προτεραιότητας όπως στην περίπτωση του Πίνακα 3.1. Οι επιμέρους πίνακες εναλλακτικής κρίσης συνδυάζονται στον Πίνακα 3.2.

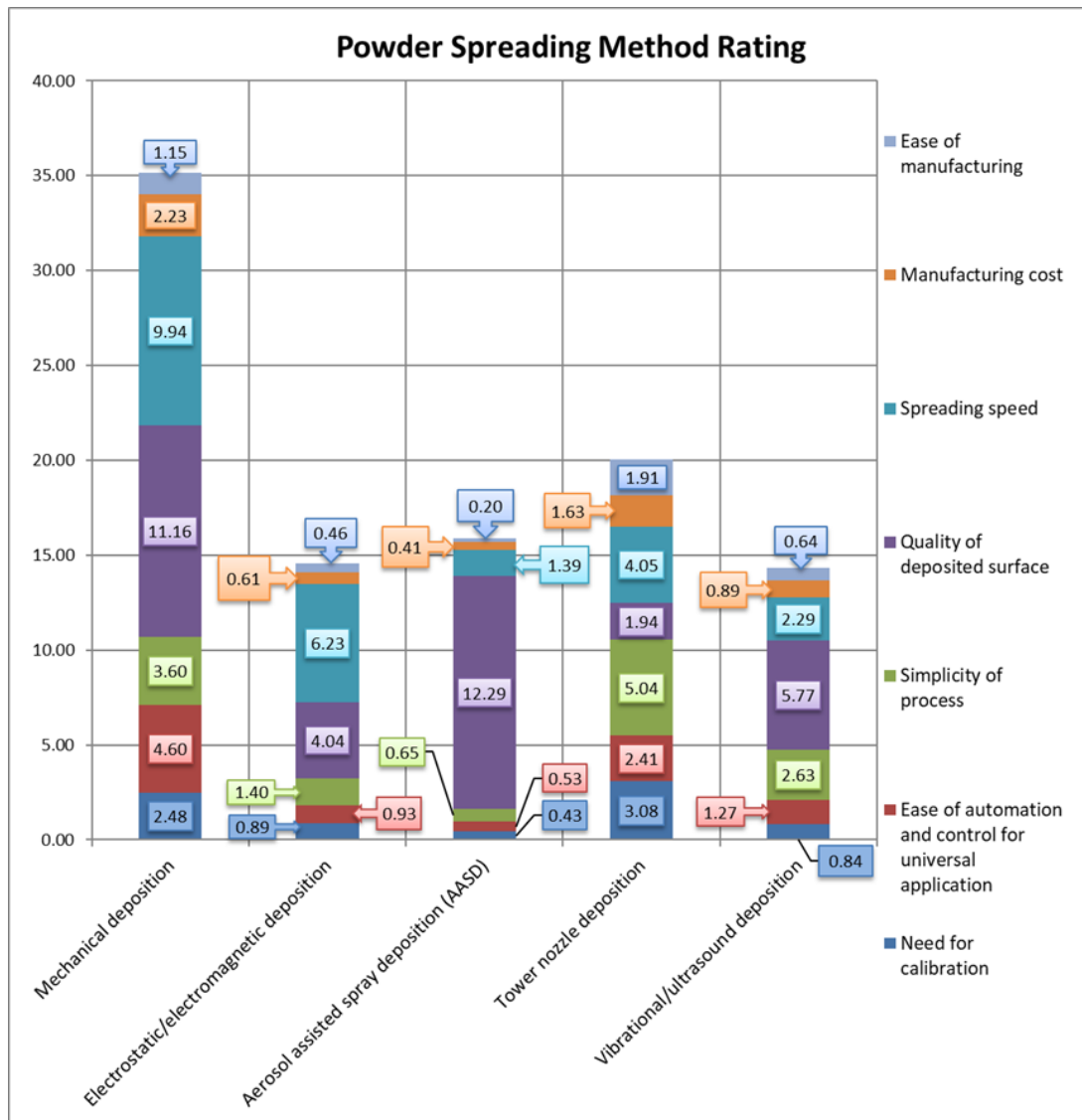
Τα Σχήματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζουν μια σύγκριση των μεθόδων που εξετάστηκαν σε όλα τα εξεταζόμενα κριτήρια. Στο Σχήμα 3.1, αρχικά, παρουσιάζονται γραφικά τα κριτήρια με βάση τη σπουδαιότητά τους, όπως αυτά καθορίστηκαν από τη διαδικασία AHP. Το σημαντικότερο κριτήριο είναι μακράν η ποιότητα της αποτιθέμενης επιφάνειας, με τιμή προτεραιότητας 35,2%, και ακολουθεί η ταχύτητα εναπόθεσης, με PV 23,9%. Τα λιγότερο σημαντικά κριτήρια είναι η ευκολία κατασκευής και το κόστος κατασκευής, με τιμές προτεραιότητας 4,4% και 5,8% αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1: Τα 7 κριτήρια για την αξιολόγηση των 5 διαφορετικών μεθόδων εναπόθεσης σκόνης και οι αντίστοιχες τιμές προτεραιότητάς τους.

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η κατάταξη κάθε μίας από τις 5 εναλλακτικές μεθόδους εναπόθεσης σκόνης σε σχέση με κάθε μία από τις άλλες όσον αφορά κάθε ένα από τα 7 κριτήρια και συνολικά. Στο Σχήμα 3.2 το ύψος της μπάρας δείχνει τη συνολική βαθμολογία (PV) κάθε μεθόδου, ενώ κάθε μπάρα αναλύεται σε 7 μικρότερες, δείχνοντας πώς κάθε κριτήριο συμβάλλει στη βαθμολογία της μεθόδου. Η μηχανική εναπόθεση (Alt1) συγκαταλέγεται μεταξύ των δύο μεθόδων που

κατατάσσονται υψηλότερα, καθώς είναι πρώτη όσον αφορά τα Cr2, Cr5 και Cr6, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Η συνολική συνέπεια της μεθόδου την καθιστά μια ιδιαίτερα αξιόπιστη λύση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η AASD (Alt3) δεν προτείνεται παρά την υπεροχή της όσον αφορά την ποιότητα της επιφάνειας (Cr4), κυρίως λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας (Cr3) και της χαμηλής ταχύτητας εναπόθεσης (Cr5). Αντίθετα, η μέθοδος του ακροφυσίου πύργου (Alt4) δεν είναι η καλύτερη παρά το γεγονός ότι είναι η ευκολότερη στη βαθμονόμηση (Cr1), η απλούστερη (Cr3) και η ευκολότερη στην κατασκευή (Cr7), λόγω της πολύ χαμηλής ποιότητας επιφάνειας (Cr4), και πιο συγκεκριμένα λόγω της αδυναμίας της να παράγει ένα απόλυτα οριζόντιο στρώμα.



Σχήμα 3.2: Βαθμολογία μεθόδου εναπόθεσης σκόνης.

Η ηλεκτροστατική (Alt2) και η δονητική (Alt5) εναπόθεση, παρά το γεγονός ότι είναι πολλά υποσχόμενες όσον αφορά την ταχύτητα εξάπλωσης και την ποιότητα της επιφάνειας (δηλαδή τα πιο σημαντικά κριτήρια) αντίστοιχα, είναι πολύ δύσκολο να βαθμονομηθούν και να ελεγχθούν.

Η τελική προτεραιότητα (FP_i) της i εναλλακτικής λύσης ($i=1$ έως 5) με βάση και τα 7 κριτήρια ($N=7$) υπολογίζεται ως εξής:

$$FP_i = \sum_{j=1}^N PV_{ji} \cdot PVCr_j \quad (3.2)$$

Σύμφωνα με τη στήλη FP του Πίνακα 3.2, η καλύτερη μέθοδος εναπόθεσης σκόνης είναι η μηχανική εναπόθεση (Alt1, FP= 35,2%), με το ακροφύσιο πύργου (Alt4, FP= 20,1%) να είναι η πλησιέστερη εναλλακτική λύση και τις υπόλοιπες να βρίσκονται πολύ πίσω από αυτήν.

3.4 Διαμόρφωση Προσαρμοσμένου Μηχανικού ΣΕΠ και Σύγκριση με το Υπάρχον Σημείο Αναφοράς

Στις περισσότερες βιβλιογραφικές πηγές οι παράμετροι της δέσμης λέιζερ και η διαδρομή που ακολουθεί η δέσμη στο στρώμα σκόνης έχουν εξεταστεί ως το κύριο αντικείμενο βελτιστοποίησης της διεργασίας [158]. Ωστόσο, η ποιότητα του στρώματος πούδρας, όσον αφορά το συνεπές πάχος, τη συμπίεση της πούδρας και την επιφανειακή τραχύτητα, είναι επίσης υψίστης σημασίας και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου [98],[159],[106]. Εν ολίγοις, πρέπει να εναποτίθενται ομοιογενή στρώματα σκόνης με το επιθυμητό πάχος. Η ομοιογένεια του στρώματος σκόνης εξετάζεται μέσω παραμέτρων που αποδεδειγμένα επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού τεμαχίου, όπως ο βαθμός συμπίεσης της σκόνης [99], [108], η επιφανειακή τραχύτητα του μη πυροσυσσωματωμένου στρώματος [160] και το πάχος του στρώματος [161]. Αυτές έχουν αξιολογηθεί εκτενώς στην *Ενότητα 2.4*.

Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα ΕΠΛ διατίθενται με το δικό τους σύστημα επανεπίστρωσης με πούδρα (ΣΕΠ) εγκατεστημένο. Ωστόσο, παρόλο που αυτές οι μηχανές προσφέρουν κάποια ελευθερία όσον αφορά την επιλογή των παραμέτρων πυροσυσσωμάτωσης, ο έλεγχος της εναπόθεσης του στρώματος σκόνης περιορίζεται

κυρίως στην παράμετρο του πάχους του στρώματος. Ως εκ τούτου, παρέχεται ελάχιστος χώρος στους ερευνητές που επιθυμούν να πειραματιστούν με τις παραμέτρους δυναμικής και ρεολογίας της σκόνης για να εξετάσουν την επίδρασή τους στην ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος μη πυροσυσσωματωμένης σκόνης. Οι περιορισμοί στον έλεγχο των παραμέτρων εξάπλωσης της σκόνης και της δέσμης λέιζερ είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο οι ερευνητές έχουν αναπτύξει πρωτότυπες μηχανές ΕΠΛ ανοικτού συστήματος, για να εξετάσουν συσχετίσεις παραμέτρων που δεν θα μπορούσαν να εξεταστούν στις κλειστές, βιομηχανικές μηχανές SLS [162].

Προκειμένου να επιτευχθούν ομοιογενή, υψηλής ποιότητας στρώματα σκόνης, έχουν σχεδιαστεί διάφορα προσαρμοσμένα συστήματα μηχανικής εναπόθεσης σκόνης. Όσον αφορά την αποθήκευση της ακατέργαστης σκόνης, η πιο συνηθισμένη λύση είναι το έμβολο παροχής σκόνης, βλ. *Σχήμα 3.3*. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι η σκόνη που αποθηκεύεται πρέπει προηγουμένως να κοσκινίζεται κατάλληλα, ώστε να είναι εγγυημένα απαλλαγμένα από συσσωματώματα και να έχει την επιθυμητή κατανομή μεγέθους κόκκων. Δεδομένου ότι η υγρασία του περιβάλλοντος μπορεί να προκαλέσει σχηματισμό συσσωματωμάτων, η δεξαμενή αποθήκευσης σκόνης πάνω από το έμβολο πρέπει να αδειάζει και να ξαναγεμίζει τακτικά, διαφορετικά οι συνθήκες της ακατέργαστης σκόνης δεν μπορούν να θεωρηθούν ούτε σταθερές ούτε γνωστές.

Ένα ΣΕΠ πρέπει να παρέχει τις ακόλουθες λειτουργίες: α) ακριβή δοσομέτρηση του κατάλληλου όγκου σκόνης για να απλωθεί σε ένα στρώμα, β) κοσκίνισμα της σκόνης προκειμένου να διασπαστούν τα συσσωματώματα που ενδέχεται να έχουν σχηματιστεί λόγω των συνθηκών αποθήκευσης, και γ) διάστρωση της σκόνης για να σχηματιστεί ένα στρώμα. Η εξέταση των διαφορετικών λειτουργιών είναι απαραίτητη προκειμένου να καταστεί δυνατή η αξιόπιστη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων. Στην προκειμένη περίπτωση, θα συγκριθεί ένας βασικός εμπορικά διαθέσιμος σχεδιασμός ΣΕΠ [163], [164], που στο εξής θα ονομάζεται «ΣΕΠ αναφοράς», με ένα πρωτότυπο ΣΕΠ. Το ΣΕΠ αναφοράς αποτελείται από ένα έμβολο παροχής σκόνης που υποστηρίζει την πρώτη ύλη μέσα σε ένα δοχείο, το οποίο κινείται προς τα πάνω για να παρέχει την ποσότητα σκόνης που πρόκειται να διαστρωθεί, και ένα έμβολο κατασκευής που κινείται προς τα κάτω κάθε φορά που πρόκειται να εναποτεθεί ένα νέο στρώμα, βλέπε *Σχήμα 3.3*. Συνήθως, για την επανεπίστρωση χρησιμοποιείται είτε ένας κύλινδρος είτε μία οδηγός λεπίδα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα του ΣΕΠ αναφοράς μπορούν να βρεθούν για παράδειγμα στα [165], [166].

Στο πρωτότυπο ΣΕΠ, οι προαναφερθείσες λειτουργίες υλοποιούνται με τη μορφή δύο ομάδων:

1. Η ομάδα *δοσομέτρησης/κοσκίνισης*, η οποία είναι υπεύθυνη για τη χορήγηση ακριβώς της απαραίτητης ποσότητας σκόνης και φροντίζει να φιλτράρει τους υπερμεγέθεις κόκκους και τα συσσωματώματα. Αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα: i) χοάνη/δοσομετρητής σκόνης, ii) κόσκινο.
2. Η ομάδα *επανεπίστρωσης*, η οποία είναι υπεύθυνη για την ομοιόμορφη διασπορά της πούδρας στο τραπέζι κατασκευής και αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα: (i) Οδηγός λεπίδα, (ii) Κύλινδρος επανεπίστρωσης, (iii) Γραμμικός φορέας ΣΕΠ και σύστημα γραμμικής κίνησης.

3.4.1 Αξιολόγηση ομάδας δοσομέτρησης/κοσκίνισης

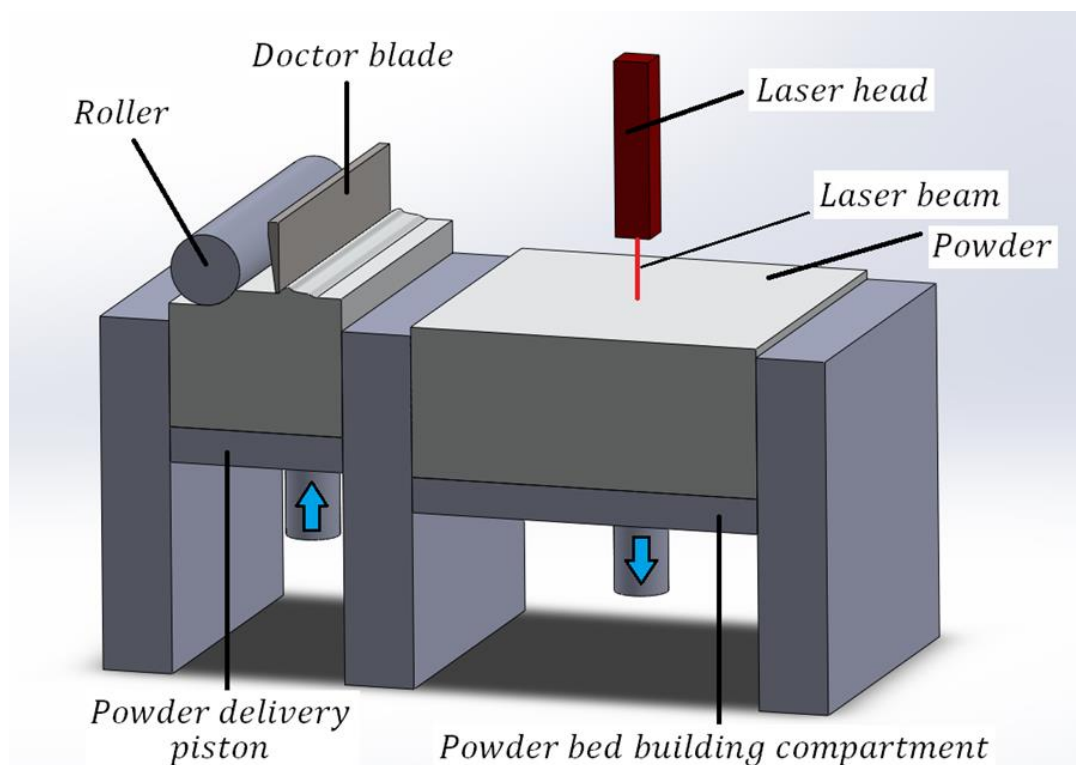
Οι δύο εναλλακτικές λύσεις προς σύγκριση είναι το πρωτότυπο ΣΕΠ (Alt1), βλέπε *Σχήμα 3.4*, και το ΣΕΠ αναφοράς (Alt2), βλέπε *Σχήμα 3.3*.

Όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 3.4(α)*, ο δοσομετρητής του πρωτοτύπου ΣΕΠ περιλαμβάνει μια χοάνη, όπου αποθηκεύεται η σκόνη, και ένα τύμπανο δοσομετρητή. Το τελευταίο διαθέτει τυφλές σφαιρικές εσοχές τοποθετημένες σε ελικοειδές μοτίβο. Κάθε μια από τις εσοχές μπορεί να αποθηκεύσει μια ορισμένη ποσότητα σκόνης. Ενώ ο κύλινδρος περιστρέφεται μέσω του βηματικού κινητήρα, αυτές οι εσοχές απελευθερώνουν τη σκόνη που είναι παγιδευμένη στο εσωτερικό τους όταν φτάσουν στο χαμηλότερο σημείο του κυλίνδρου, στο κόσκινο, βλέπε *Σχήμα 3.4(β)*. Ελέγχοντας τη γωνία περιστροφής του βηματικού κινητήρα του δοσομετρητή, είναι δυνατός ο ακριβής έλεγχος της ποσότητας σκόνης που εναποτίθεται στο κόσκινο. Γίνεται φανερό ότι, ανάλογα με τη γωνία περιστροφής του τυμπάνου του δοσομετρητή, η ποσότητα σκόνης που χορηγείται στο κόσκινο θα είναι περίπου ίση με $(n \cdot V_{\text{ind}})$, όπου n είναι ο αριθμός των εσοχών που απελευθέρωσαν το περιεχόμενό τους σε σκόνη και V_{ind} είναι ο όγκος κάθε εσοχής. Με τη ρύθμιση της ταχύτητας με την οποία περιστρέφεται ο κινητήρας και λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα συσσώρευσης της σκόνης, επιτυγχάνεται ο έλεγχος της εισροής σκόνης (μάζα σκόνης ανά μονάδα χρόνου). Αυτοί οι δύο έλεγχοι σε συνδυασμό βελτιστοποιούν το χρόνο που απαιτείται για την επαναπλήρωση του κόσκινου μεταξύ των στρώσεων.

Στη συνέχεια, η σκόνη κοσκινίζεται από το εναλλάξιμο πλέγμα που είναι στερεωμένο στο κάτω μέρος του κόσκινου, το οποίο εξαναγκάζεται σε παλινδρομική κίνηση μέσω ενός έκκεντρου, βλέπε *Σχήμα 3.4(ε)*. Το πλήρες συγκρότημα παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.4(β)*. Η παλινδρομική κίνηση ενός πλέγματος κοσκινίζει τη σκόνη. Η εναλλαξιμότητα του πλέγματος επιτρέπει την επιλογή διαφόρων μεγεθών πλέγματος για την επίτευξη της επιθυμητής κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σκόνης. Η παλινδρομική κίνηση του κόσκινου παρέχεται από βηματικό κινητήρα που κινεί το εν λόγω έκκεντρο, το οποίο περιστρέφεται στην αύλακα μιας συνδετικής ράβδου, βλέπε *Σχήμα 3.4(στ)*, μετατρέποντας έτσι την περιστροφική σε ταλαντωτική γραμμική κίνηση. Η ράβδος του κόσκινου ολισθαίνει μέσα σε κουζινέτα για την ελαχιστοποίηση των τριβών. Κατά το κοσκίνισμα, οι κόκκοι που υπερβαίνουν το όριο μεγέθους καθώς και μεγαλύτερα συσσωματώματα κόκκων παρακρατούνται στη δεξαμενή κοσκίνισης. Εάν αυτά εναποτίθεντο στην κλίνη σκόνης, θα σύρονταν στη συνέχεια κατά μήκος του στρώματος σκόνης από τη λεπίδα ή τον κύλινδρο, δημιουργώντας έτσι βαθιές αυλακώσεις στο στρώμα σκόνης και καθιστώντας το τελικά άχρηστο. Η κοσκινισμένη σκόνη καταλήγει στο διαμέρισμα της κλίνης σκόνης, συσσωρευόμενη μπροστά από τη ρύθμιση λεπίδας-κυλίνδρου που έχει επιλεγεί (βλέπε ενότητα 2.2.6). Είναι δυνατόν να γίνει κοσκίνισμα πριν το ΣΕΠ αρχίσει να κινείται κατά μήκος του άξονα x για να διασκορπιστεί η σκόνη, πράγμα που σημαίνει μεγαλύτερο ύψος της συσσωρευμένης σκόνης (άρα υψηλότερο επίπεδο συμπίεσης), ή να γίνει κοσκίνισμα καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του ΣΕΠ για ελεγχόμενη εναπόθεση σκόνης και μικρότερο ύψος της συσσωρευμένης σκόνης. Ο ρυθμός με τον οποίο εναποτίθεται η σκόνη μπορεί να ελεγχθεί με τη ρύθμιση της ταχύτητας του βηματικού κινητήρα του κόσκινου. Η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος σε συνδυασμό με μια προσομοίωση κόσκινου με βάση τη χρησιμοποιούμενη δυναμική της σκόνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της επιθυμητής ταχύτητας για την κατάλληλη ποσότητα σκόνης ανά μονάδα χρόνου που απαιτείται (βλ. Κεφάλαιο 5) για τη διαδικασία [167].

Η κοσκινισμένη σκόνη πέφτει με τη βαρύτητα στο τραπέζι κατασκευής, το οποίο κινείται προς τα κάτω μέσω ενός εμβόλου, ορίζοντας έτσι το πάχος του στρώματος. Συγκριτικά, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.3*, το ΣΕΠ αναφοράς περιλαμβάνει ένα έμβολο παροχής σκόνης, το οποίο αποτελεί το κάτω περίβλημα του χώρου αποθήκευσης σκόνης (κάδος τροφοδοσίας). Η προς τα πάνω κίνηση αυτού του εμβόλου παρέχει την

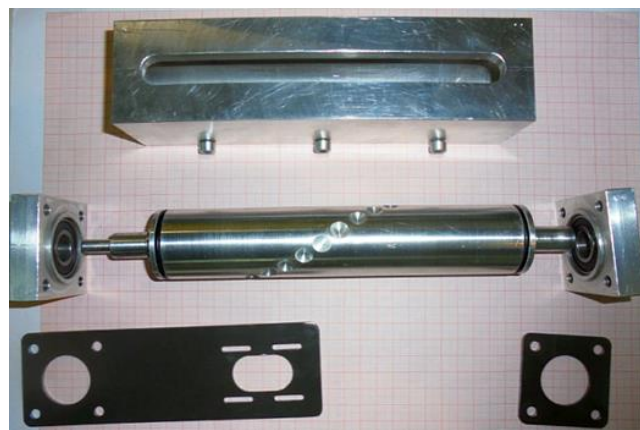
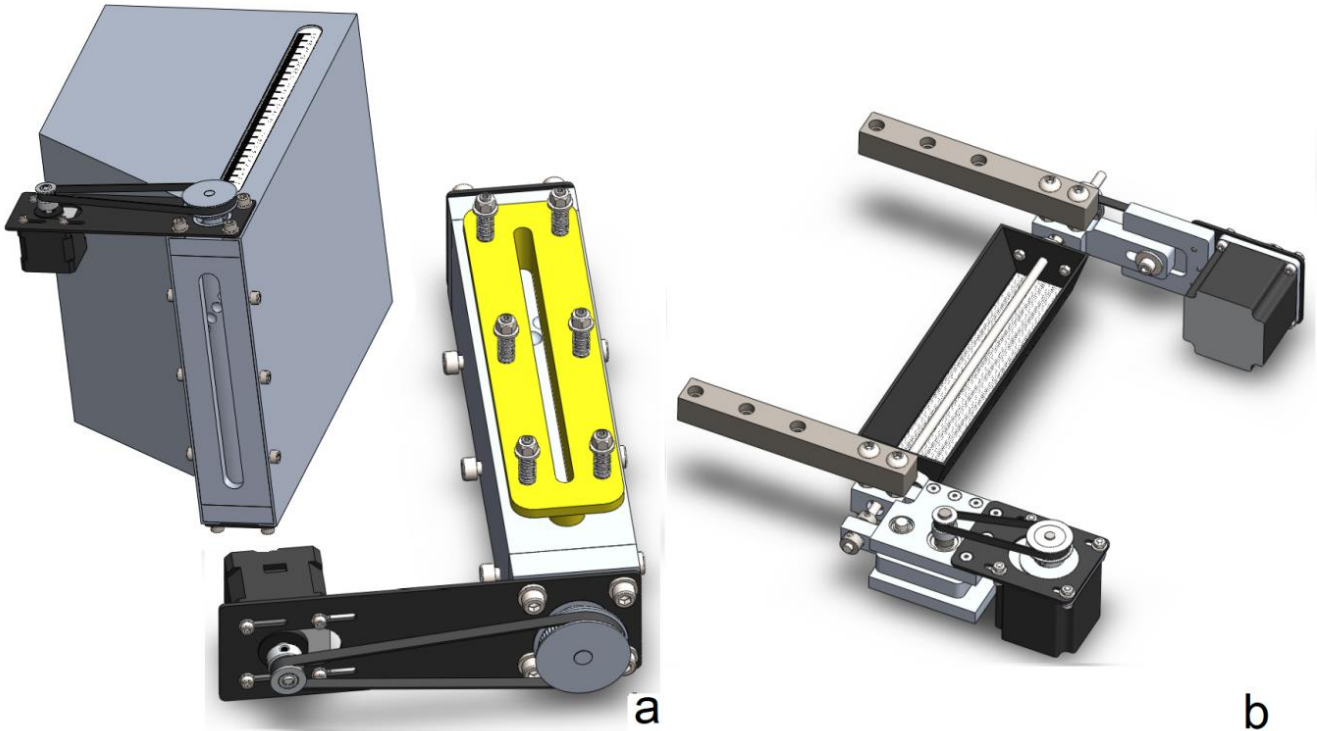
επιθυμητή ποσότητα σκόνης, η οποία στη συνέχεια απλώνεται από τον επιστρωτήρα πάνω στο τραπέζι κατασκευής.

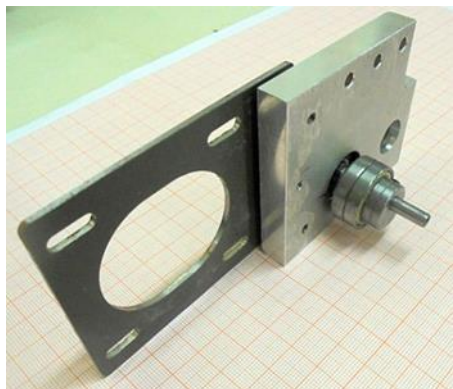


Σχήμα 3.3: Κοινός εμπορικά διαθέσιμος σχεδιασμός ΣΕΠ.

Χρησιμοποιώντας μια κρεμαστή χοάνη σκόνης (σιλό) αντί για κάδο τροφοδοσίας στο πρωτότυπο ΣΕΠ, είναι εύκολο να εγκατασταθούν πρόσθετα συστήματα, όπως αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας για τη μέτρηση των περιβαλλοντικών παραγόντων που επηρεάζουν ενεργά την ποιότητα της σκόνης. Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις, είναι δυνατή η τοποθέτηση ενός αφυγραντήρα σε συνδυασμό με θέρμανση με λάμπα ή απλώς ο έλεγχος της δέσμης λέιζερ της μηχανής ΕΠΛ κατά τρόπο ώστε να εξουδετερώνονται οι επιπτώσεις της υγρασίας στη σκόνη. Επιπλέον, είναι δυνατόν να τοποθετηθεί ένας αναδευτήρας σκόνης για τη διασφάλιση της ποιότητας της σκόνης ή ένας μάντας επανατροφοδότησης για την επανατροφοδότηση της μη πυροσυσσωματωμένης σκόνης στη χοάνη μετά από έναν κύκλο πυροσυσσωμάτωσης. Η δεξαμενή είναι εξοπλισμένη με μετρητή στάθμης σκόνης για να παρακολουθείται πότε πρέπει να ξαναγεμίσει. Μέχρι στιγμής, η αξιολόγηση αυτή πραγματοποιείται οπτικά από τον χειριστή του μηχανήματος, ωστόσο είναι δυνατόν να αυτοματοποιηθεί μέσω αισθητήρων στάθμης. Αυτό θα επέτρεπε επίσης στον χρήστη να ορίσει αυτόματα

για μια αναλογία φρέσκιας/ανακυκλωμένης σκόνης. Η εγκατάσταση τέτοιων βοηθητικών συστημάτων θα ήταν δύσκολη στο ΣΕΠ αναφοράς, λόγω των πιθανών παρεμβολών με το έμβολο και τον επιστροφτήρα.





ε



στ



ζ

Σχήμα 3.4: (α) Σχέδιο CAD του υποσυστήματος χοάνης-δοσομετρητή, (β) Σχέδιο CAD του υποσυστήματος Siever, (γ) Φωτογραφία του υποσυστήματος χοάνης-δοσομετρητή, (δ) Φωτογραφία των εξαρτημάτων του δοσομετρητή, (ε) έκκεντρο του κόσκινου, (στ) ράβδος σύνδεσης του κόσκινου, (ζ) συναρμολόγηση του κόσκινου.

Επιπλέον, ο σχεδιασμός του πρωτοτύπου ΣΕΠ είναι εξαιρετικά ακριβής όταν πρόκειται για τη χορήγηση της ακριβούς ποσότητας σκόνης που είναι απαραίτητη, προωθώντας έτσι την οικονομία της σκόνης, καθώς λιγότερη σκόνη θα αναγκαστεί να μετακινηθεί πάνω στο τραπέζι. Στο ΣΕΠ αναφοράς, μεγάλη ποσότητα σκόνης ωθείται προς τα πάνω, ώστε να διασφαλιστεί ότι το τραπέζι κατασκευής θα καλυφθεί πλήρως, ενώ η υπόλοιπη σκόνη παραμένει στο θάλαμο του μηχανήματος, δημιουργώντας ένα κέικ σκόνης μεγαλύτερου όγκου. Αυτό θεωρείται ανακυκλωμένη σκόνη, επειδή, λόγω της θερμικής φόρτισης, οι ιδιότητές της θα έχουν υποβαθμιστεί.

Ο κύλινδρος του δοσομετρητή με τις εσοχές του αρχικά σπάει τα μεγαλύτερα συσσωματώματα σκόνης που μπορεί να υπάρχουν μέσα στην πρώτη ύλη. Τα εναπομείναντα συσσωματώματα συγκρατούνται στο κόσκινο, αποτρέποντας έτσι τον επιστρωτήρα (κύλινδρο ή λεπίδα) από το να τα παρασύρει κατά μήκος του στρώματος και να δημιουργήσει επιζήμιες ρωγμές.

Το κόσκινο είναι εξοπλισμένο με εναλλάξιμο πλέγμα για την επίτευξη του μέγιστου μεγέθους σωματιδίων σκόνης που είναι απαραίτητο, καθώς αυτό επηρεάζει το ελάχιστο επιθυμητό πάχος στρώματος. Με τη χρήση μιας υπέρθεσης διαφορετικών πλεγμάτων, ενώ ελέγχεται η παλινδρομική διέγερση του κόσκινου και η ταχύτητα πρόωσης του επιστρωτήρα, είναι δυνατόν να ελεγχθεί ακόμη και η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, αν και αυτό είναι δύσκολο σε συνθήκες ξηρού κοσκίνισματος. Αντίθετα, στο ΣΕΠ αναφοράς, ο μόνος τρόπος για να διασφαλιστεί ότι δεν θα διασκορπιστούν συσσωματώματα στην πλατφόρμα κατασκευής είναι να πραγματοποιηθεί κοσκίνισμα της σκόνης πριν από τη φόρτωσή της στον κάδο τροφοδοσίας. Ο τελευταίος πρέπει να αδειάζει και να ξαναγεμίζει σε τακτική βάση, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία συσσωματωμάτων λόγω υγρασίας. Ο πρωτότυπος σχεδιασμός ΣΕΠ θεωρείται ευκολότερος στην κατασκευή, καθώς δεν απαιτεί τη σφράγιση μιας μεγάλης περιμέτρου επιφάνειας από τη διεύθυνση σκόνης, όπως συμβαίνει στο ΣΕΠ αναφοράς. Επιπλέον, κάθε εξάρτημα του πρωτότυπου ΣΕΠ είναι σχετικά μικρό, καθιστώντας ευκολότερη την επίτευξη των απαιτούμενων ανοχών.

Το μειονέκτημα είναι ότι το κόσκινο του πρωτότυπου ΣΕΠ πρέπει να αδειάζει από τον κινητήρα ανατροπής σε έναν κάδο απορριμμάτων σκόνης που είναι τοποθετημένος μετά το τέλος του τραπεζιού κατασκευής, εάν η συσσώρευση συσσωματωμάτων παρεμποδίζει τη διαδικασία κοσκίνισης λόγω φαινομένων απόφραξης. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η σωστή βαθμονόμηση της ταχύτητας παλινδρόμησής του, έτσι ώστε η εναποτιθέμενη ποσότητα σκόνης ανά μονάδα χρόνου να είναι αρκετή για την εξάπλωση του στρώματος με την προκαθορισμένη ταχύτητα πρόωσης του επιστρωτήρα.

Λαμβάνοντας υπόψη την προαναφερθείσα ανάλυση, η AHP διεξάγεται με τα ακόλουθα 6 κριτήρια:

1. *Cr1-Ευκολία κατασκευής*: Πόσο περίπλοκη είναι η κατασκευή του σχεδιασμένου συστήματος από άποψη χρόνου και ακρίβειας κατεργασίας για να είναι λειτουργικό με κανονικό προσδόκιμο ζωής.
2. *Cr2-Ταχύτητα εξάπλωσης του στρώματος*: Ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρώσει το σύστημα έναν πλήρη κύκλο εργασίας, που αντιστοιχεί στην εξάπλωση ενός μόνο στρώματος σκόνης.
3. *Cr3-Ευκολία προσαρμογής*: Πόσο εύκολο είναι για το σύστημα να φιλοξενήσει επιπλέον βοηθητικές λειτουργίες/συσκευές, π.χ. επανατροφοδότηση της

αρχικής δεξαμενής αποθήκευσης σκόνης, αναδευτήρα λεπίδας, αφυγραντήρα κ.λπ.

4. *Cr4-Αξιοπιστία*: Η πιθανότητα το σύστημα να παρεμποδίζεται από σφάλματα που θα αναγκάσουν τη διαδικασία να σταματήσει ή θα καταστήσουν το κατασκευασμένο τεμάχιο άχρηστο.
5. *Cr5-Οικονομία σκόνης*: Η ικανότητα του συστήματος να λειτουργεί χρησιμοποιώντας την ελάχιστη ποσότητα σκόνης ανά κύκλο εργασίας ή ισοδύναμα δημιουργώντας την ελάχιστη ποσότητα ανακυκλωμένης σκόνης.
6. *Cr6-Κόστος κατασκευής*: Το χρηματικό κόστος κατασκευής και συντήρησης του συστήματος.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται ο πίνακας κρίσης κριτηρίων που συγκρίνει το σύστημα που χορηγεί τη σκόνη, ενώ στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι εναλλακτικοί πίνακες κρίσης για τα κριτήρια Cr1 έως Cr6. Πρέπει να σημειωθεί όσον αφορά την εξίσωση (3.1) ότι $CRI=1,24$ για $n=6$, ενώ οι πίνακες 2×2 είναι εξ ορισμού συνεπείς, δηλαδή δεν χρειάζεται να υπολογιστεί το CR.

Πίνακας 3.3: Πίνακας κρίσης κριτηρίων για τον σχεδιασμό της ομάδας δοσομετρητή σκόνης/κόσκινου.

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	PVCr	
Cr1	1	1/4	1/4	1/6	1/3	1/2	0.040	
Cr2	4	1	1/3	1/5	2	4	0.134	
Cr3	4	3	1	1/5	3	3	0.202	
Cr4	6	5	5	1	4	5	0.470	
Cr5	3	1/2	1/3	1/4	1	3	0.098	
Cr6	2	1/4	1/3	1/5	1/3	1	0.056	
	$\lambda_{max} = 6.5257$				$CR = 8.48\% < 10\%$			

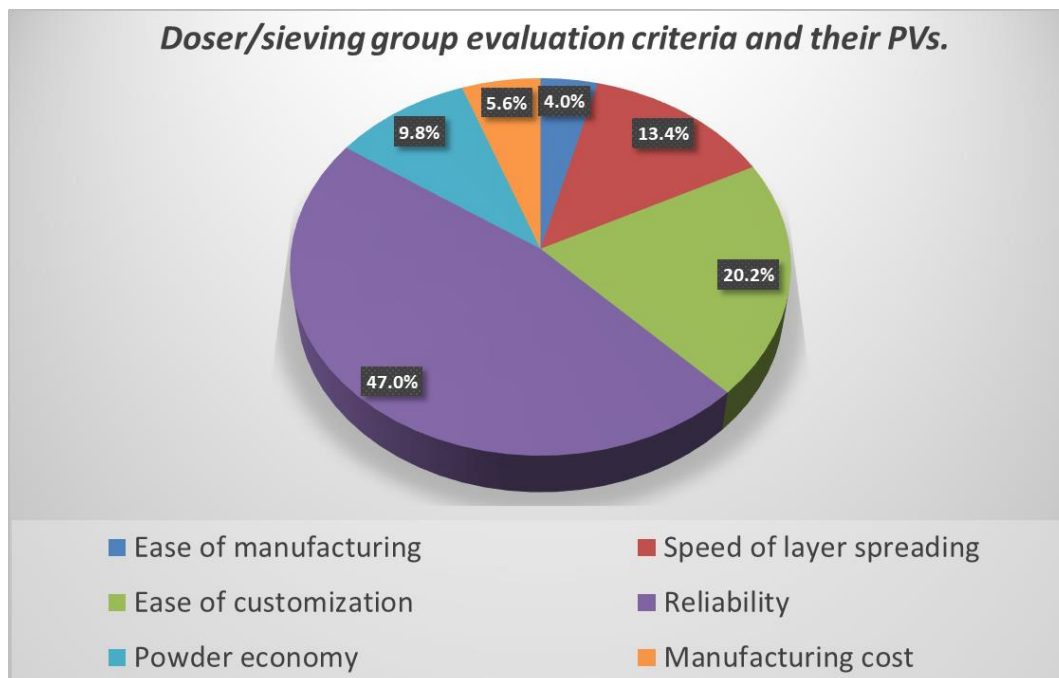
Πίνακας 3.4: Εναλλακτικοί πίνακες κρίσης για τα κριτήρια Cr1 έως Cr6 για το σχεδιασμό ομάδας δοσομετρητή/κοσκίνου σκόνης.

Alt _j /Alt _i	Cr1			Cr2			Cr3			Cr4			Cr5			Cr6			FP
	1	2	PV	1	2	PV	1	2	PV	1	2	PV	1	2	PV	1	2	PV	
1	1	2	.667	1	1/3	.25	1	4	.80	1	3	.75	1	2	.667	1	1	.50	0.668
2	1/2	1	.333	3	1	.75	1/4	1	.20	1/3	1	.25	1/2	1	.333	1	1	.50	0.332

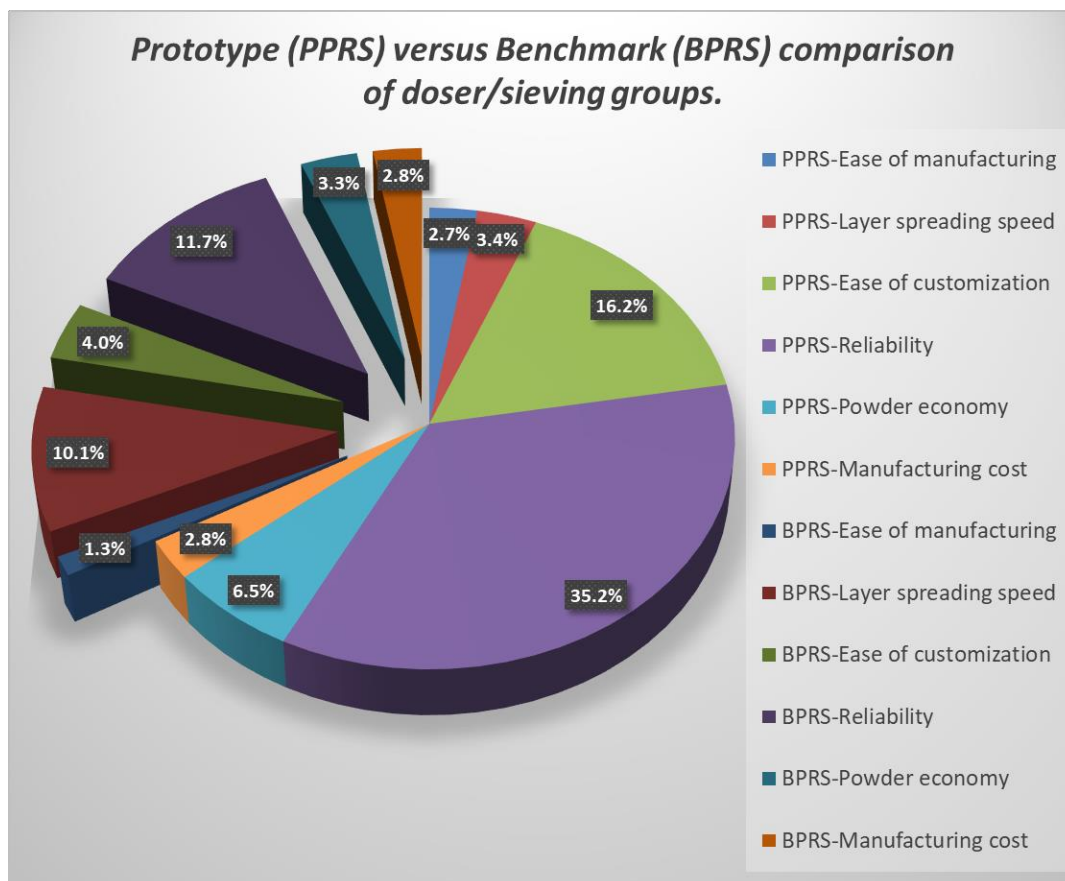
Στο Σχήμα 3.5(α) απεικονίζεται γραφικά η σημασία των κριτηρίων για την αξιολόγηση των ομάδων δοσομετρητών/κοσκίνων. Το σημαντικότερο κριτήριο είναι μακράν η

αξιοπιστία του συστήματος, με PV 47%, και ακολουθεί η ευκολία προσαρμογής του, με PV 20,2%. Αντίθετα, τα λιγότερο σημαντικά κριτήρια είναι η ευκολία κατασκευής και το κόστος κατασκευής με τιμές προτεραιότητας 4% και 5,6% αντίστοιχα. Στο Σχήμα 3.5(β) συγκρίνονται οι δύο εναλλακτικές λύσεις ως προς τα διάφορα κριτήρια σύμφωνα με την AHP. Το PRS αναφοράς υπερτερεί μόνο όσον αφορά τη συμβολή του υποσυστήματος δοσομετρητή/διαχωριστή στην ταχύτητα εξάπλωσης (Cr2), ενώ τα PRS αναφοράς και πρωτότυπου συνεπάγονται ισοδύναμο κόστος κατασκευής (Cr6), δηλαδή τις ίδιες διαδικασίες κατασκευής (τόρνος CNC και φρέζα CNC) και το ίδιο κόστος υλικών.

Αντίθετα, το πρωτότυπο PRS υπερτερεί όσον αφορά την αξιοπιστία (Cr4) και την ευκολία προσαρμογής (Cr3), τα οποία είναι τα δύο πιο επιδραστικά κριτήρια (46,96% και 20,24% αντίστοιχα) που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το συνολικό αποτέλεσμα. Αυτό δείχνει ότι το πρωτότυπο PRS είναι προτιμότερο, επιτυγχάνοντας τελική τιμή προτεραιότητας (FP) 66,8% σε σύγκριση με το 33,2% του PRS αναφοράς, βλέπε Πίνακα 3.4.



α

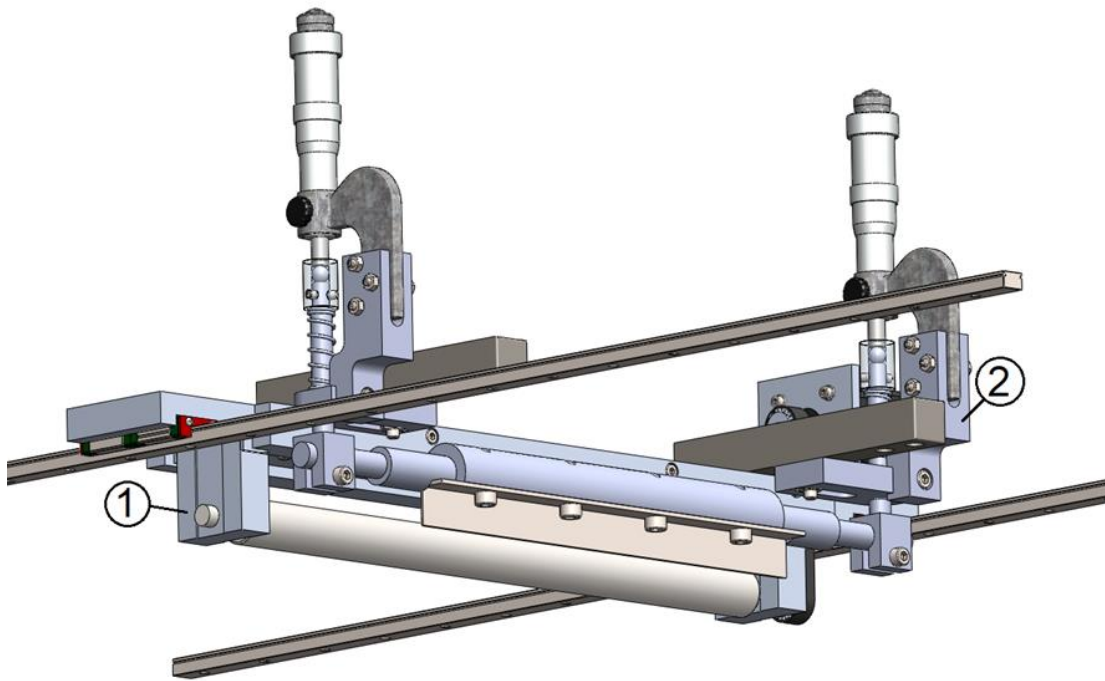


β

Σχήμα 3.5: (α) Τα 6 κριτήρια για την αξιολόγηση των ομάδων δοσομετρητή/κόσκινου του πρωτοτύπου ΣΕΠ και του ΣΕΠ αναφοράς και οι αντίστοιχες τιμές προτεραιότητάς τους, (β) $PV_{Al_i} \cdot PV_{Cr_j}$ σε σχέση με τα κριτήρια για την αξιολόγηση AHP της ομάδας δοσομετρητή/κόσκινου (ανεπτυγμένη προβολή για το ΣΕΠ αναφοράς, κανονική προβολή για το πρωτότυπο ΣΕΠ).

3.4.2 Αξιολόγηση της ομάδας επανεπίστρωσης

Η ομάδα επανεπίστρωσης του πρωτοτύπου ΣΕΠ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6 και αποτελείται από ένα υποσύστημα οδηγού λεπίδας, ένα υποσύστημα κυλίνδρου επανεπίστρωσης και το υποσύστημα μεταφοράς και γραμμικής κίνησης του ΣΕΠ. Αυτό δεν διαφέρει ουσιαστικά από το ΣΕΠ αναφοράς, ωστόσο, λόγω των χαρακτηριστικών που εξηγούνται στη συνέχεια, προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία πειραματισμού.



Σχήμα 3.6: Ομάδα επανεπίστρωσης πρωτότυπου ΣΕΠ που αποτελείται από το υποσύστημα κυλίνδρου (1) και το υποσύστημα λεπίδας (2).

Ειδικότερα, το υποσύστημα λεπίδας βαθμονομείται μέσω κατακόρυφων μικρομέτρων για τη ρύθμιση του ύψους στρώματος. Επιπλέον, ο σχεδιασμός επιτρέπει μία κλίση της λεπίδας γύρω από τον άξονα y και μια (μικρότερη) γύρω από τον άξονα z . Ο άξονας y είναι κατά μήκος της λεπίδας, ενώ ο άξονας z είναι κατακόρυφος, δηλαδή κάθετος στο τραπέζι κατασκευής της μηχανής ΕΠΛ. Το εύρος της κλίσης που επιτρέπει ο σχεδιασμός δίνεται σε μοίρες στον Πίνακα 3.9 [59]. Η λεπίδα είναι εναλλάξιμη, βλέπε Σχήμα 3.6, προκειμένου να αξιολογούνται διαφορετικά υλικά και προφίλ λεπίδων όσον αφορά την ποιότητα διάστρωσης στρώματος. Επιπλέον, το σύστημα ελέγχου του επιστρωτήρα επιτρέπει τη ρύθμιση της ταχύτητας τροφοδοσίας του επιστρωτήρα και της ταχύτητας περιστροφής και της κατεύθυνσης περιστροφής του κυλίνδρου. Στη βιβλιογραφία, εξετάζεται η συνεργασία μιας λεπίδας με έναν κύλινδρο που περιστρέφεται προς τα εμπρός, προκειμένου να προστεθεί περαιτέρω συμπίεση στη σκόνη και να αυξηθεί η πυκνότητα συσώρευσης των κόκκων [72]. Έχει αποδειχθεί ότι αυτό έχει θετική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου, όπως η πυκνότητα και η αντοχή σε εφελκυσμό [168]. Υπάρχουν επίσης συστήματα τα οποία διαθέτουν μόνο μια ράβδο για την εξάπλωση της σκόνης [72]. Οι λεπίδες διατίθενται σε διάφορα γεωμετρικά σχήματα με συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

[169]. Προκειμένου να διεξαχθούν κατάλληλα πειράματα, είναι απαραίτητο να μπορούν να δοκιμαστούν λεπίδες διαφορετικής γεωμετρίας και υλικών και σε διαφορετικές κλίσεις. Οι προαναφερθείσες ρυθμίσεις και η σύνδεσή τους με την ποιότητα του στρώματος εξετάστηκαν στο κεφάλαιο 2.

Επιπλέον, ο σχεδιασμός του πρωτοτύπου ΣΕΠ μπορεί να καθορίσει με ακρίβεια την κάθετη απόσταση μεταξύ της λεπίδας και του κυλίνδρου για να διαπιστωθεί ότι το στρώμα πιέζεται ομοιόμορφα και αποκτά ομοιόμορφη συμπίεση σκόνης. Το ύψος της συσσώρευσης της σκόνης μπροστά από τον κύλινδρο συνδέεται με την πίεση που ασκεί ο κύλινδρος στο στρώμα σκόνης [170], δηλαδή τη συμπίεση της σκόνης. Μια πολύ μεγάλη συσσώρευση σκόνης μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε ασυνέχεια του στρώματος σκόνης, π.χ. σε ρωγμές των «πλακών» σκόνης λόγω των πολύ μεγάλων ποσοτήτων πίεσης που αναπτύσσονται μεταξύ του κυλίνδρου και του στρώματος σκόνης [170], [71], καθιστώντας το στρώμα άχρηστο για πυροσυσσωμάτωση/ τήξη. Στο ΣΕΠ αναφοράς με έναν μόνο κύλινδρο η συσσώρευση σκόνης μειώνεται σταδιακά. Καθώς ο κύλινδρος προωθείται, μια μικρότερη ποσότητα σκόνης συσσωρεύεται μπροστά του και το ύψος του λόφου σκόνης μειώνεται. Αυτό κάνει τη δύναμη συμπίεσης να μειώνεται, το επίπεδο συμπίεσης του στρώματος σκόνης μειώνεται προς το τέλος του και η πυκνότητα του τελικού τεμαχίου διαφέρει κατά μήκος του στρώματος [99]. Επιπλέον, ο επιστρωτήρας του ΣΕΠ αναφοράς δεν επιτρέπει τη βαθμονόμηση, πόσο μάλλον τη ρύθμιση, των παραμέτρων εναπόθεσης της σκόνης. Αντ' αυτού, ακολουθείται ένα ενιαίο μοτίβο εναπόθεσης σκόνης με τις ίδιες τιμές παραμέτρων διεργασίας, ανεξάρτητα από το υλικό της σκόνης, το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων.

Λαμβάνοντας υπόψη την προαναφερθείσα ανάλυση, η AHP ακολουθείται και εδώ για την αξιολόγηση της ομάδας επανεπίστρωσης του πρωτοτύπου (Alt1) έναντι του ΣΕΠ αναφοράς (Alt2), χρησιμοποιώντας 6 κριτήρια ως εξής:

1. *Cr1-Ευκολία κατασκευής*: βλέπε Cr1 της ομάδας δοσομετρητή/κόσκινου στην ενότητα 3.4.1.
2. *Cr2-Κόστος κατασκευής*: βλέπε Cr6 της ομάδας δοσομετρητή/κόσκινου στην ενότητα 3.4.1.

3. *Cr3-Αξία πειραματισμού*: Πόσα περιθώρια πειραματισμού στην έρευνα παρέχει ο σχεδιασμός (π.χ. εναλλακτικά πρότυπα διασποράς σκόνης, δυνατότητα ελέγχου των αντίστοιχων ρυθμίσεων κ.λπ.)
4. *Cr4-Ταχύτητα εξάπλωσης στρώματος*: βλέπε Cr2 της ομάδας δοσομετρητή/κόσκινου στην ενότητα 3.4.1.
5. *Cr5-Αξιοπιστία*: βλέπε Cr4 της ομάδας δοσομετρητή/κόσκινου στην ενότητα 3.4.1.
6. *Cr6-Προσαρμοστικότητα, ευκολία παρακολούθησης της διαδικασίας και δυνατότητα ελέγχου*: Πόσο εύκολο είναι να εφαρμοστούν μέσα παρακολούθησης της διαδικασίας (π.χ. αισθητήρες) και να ελεγχθούν μηχανικές και ηλεκτρολογικές είσοδοι για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων.

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζεται ο πίνακας κρίσης κριτηρίων για τη σύγκριση της ομάδων επανεπίστρωσης στρώματος, ενώ στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται οι εναλλακτικοί πίνακες κρίσης για τα κριτήρια Cr1 έως Cr6.

Πίνακας 3.5: Πίνακας κρίσης κριτηρίων για το σχεδιασμό του υποσυστήματος επανεπίστρωσης σκόνης.

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	PVCr
Cr1	1	1/2	1/4	1/4	1/6	1/4	0.0414
Cr2	2	1	1/4	1/4	1/5	1/4	0.0546
Cr3	4	4	1	2	1/3	1	0.1802
Cr4	4	4	1/2	1	1/5	1/2	0.123
Cr5	6	5	3	5	1	3	0.4206
Cr6	4	4	1	2	1/3	1	0.1802
	$\lambda_{max} = 6.2723$				CR = 4.39% < 10%		

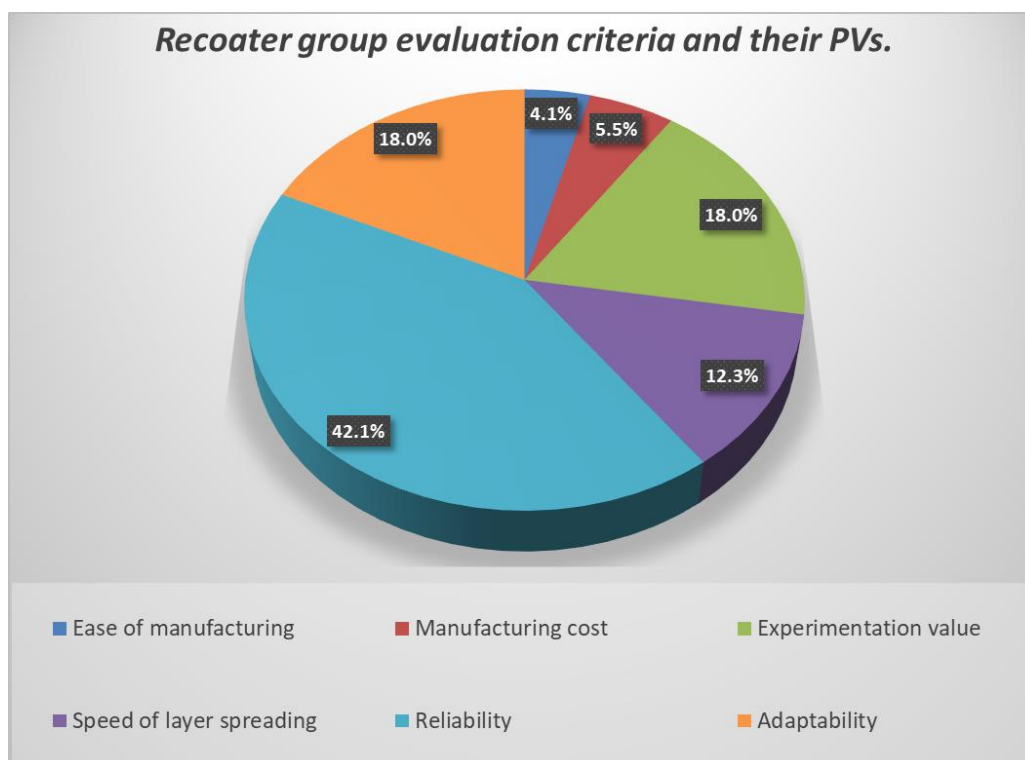
Πίνακας 3.6: Εναλλακτικοί πίνακες κρίσης για τα κριτήρια Cr1 έως Cr6 για το σχεδιασμό του υποσυστήματος επανεπίστρωσης με σκόνη.

	Cr1			Cr2			Cr3			Cr4			Cr5			Cr6			FP
	1	2	PV	1	2	PV	1	2	PV	1	2	PV	1	2	PV	1	2	PV	
1	1	1/3	.25	1	1/2	.333	1	4	.80	1	1	.50	1	2	.667	1	3	.75	0.65
2	3	1	.75	2	1	.667	1/4	1	.20	1	1	.50	1/2	1	.333	1/3	1	.25	0.35

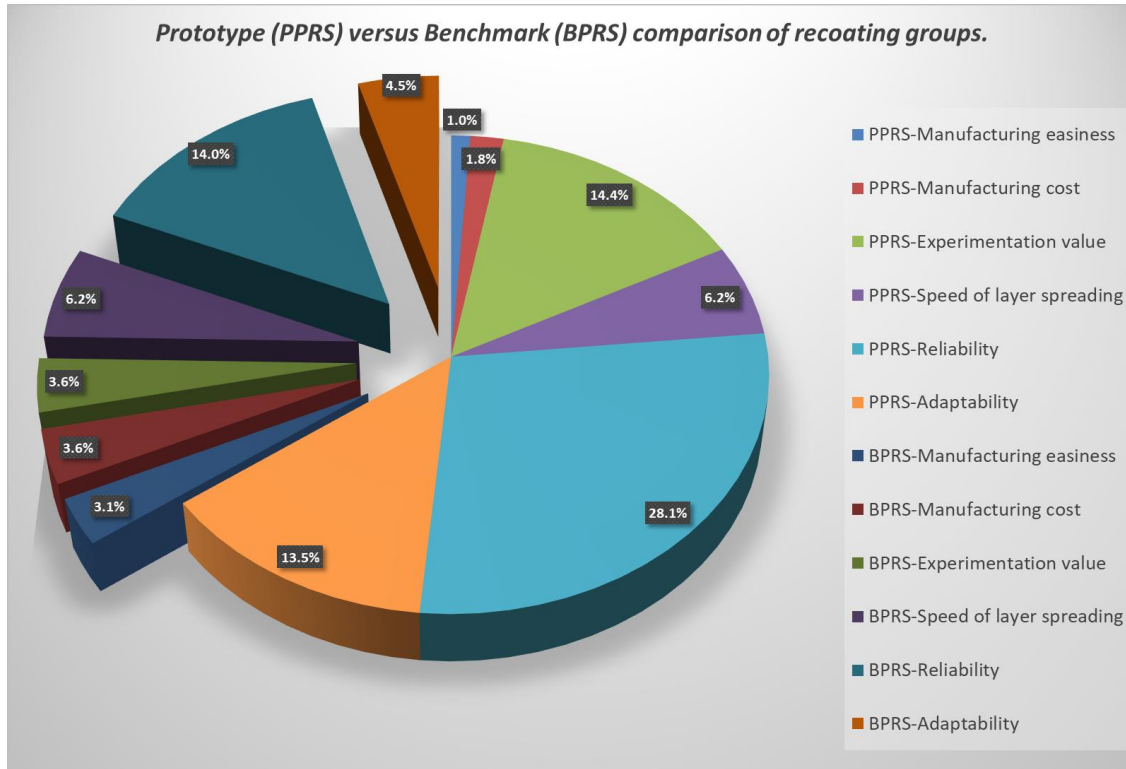
Στο Σχήμα 3.7(α) απεικονίζεται γραφικά η σημασία των κριτηρίων για την αξιολόγηση των ομάδων επανεπίστρωσης. Το σημαντικότερο κριτήριο είναι μακράν η αξιοπιστία

του συστήματος, με τιμή PV 42,1%, ακολουθούμενη από την προσαρμοστικότητα και την αξία του πειραματισμού, που σημειώνουν τιμές προτεραιότητας 18% έκαστη. Αντίθετα, τα λιγότερο σημαντικά κριτήρια είναι η ευκολία κατασκευής και το κόστος κατασκευής με τιμές προτεραιότητας 4,1% και 5,5% αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 3.7(β) παρουσιάζεται η σύγκριση AHP των υποσυστημάτων επανεπίστρωσης για όλα τα εφαρμοστέα κριτήρια. Παρόλο που ο σχεδιασμός ΣΕΠ αναφοράς είναι ευκολότερος στην κατασκευή (Cr1) και λιγότερο δαπανηρός (Cr2) και τα δύο σχέδια είναι ισοδύναμα όσον αφορά την ταχύτητα διάστρωσης στρώματος (Cr4), το πρωτότυπο ΣΕΠ υπερτερεί όσον αφορά την ερευνητική αξία (Cr3) και την αξιοπιστία (Cr5), τα οποία υπερέχουν των δύο προηγούμενων κριτηρίων. Επιπλέον, προσφέρει μια φιλική προς τον χρήστη ηλεκτρονική πλατφόρμα εργασίας, παρέχοντας τη δυνατότητα παρακολούθησης της ποιότητας της επιφάνειας και τον ανάλογο έλεγχο των παραμέτρων της διαδικασίας για την επίτευξη καλύτερου αποτελέσματος. Το συνολικό αποτέλεσμα δείχνει την υπεροχή του πρωτοτύπου ΣΕΠ, με ποσοστό προτεραιότητας 64,99% σε σύγκριση με το 35,01% του σχεδιασμού ΣΕΠ αναφοράς, βλέπε Πίνακα 3.6.



α



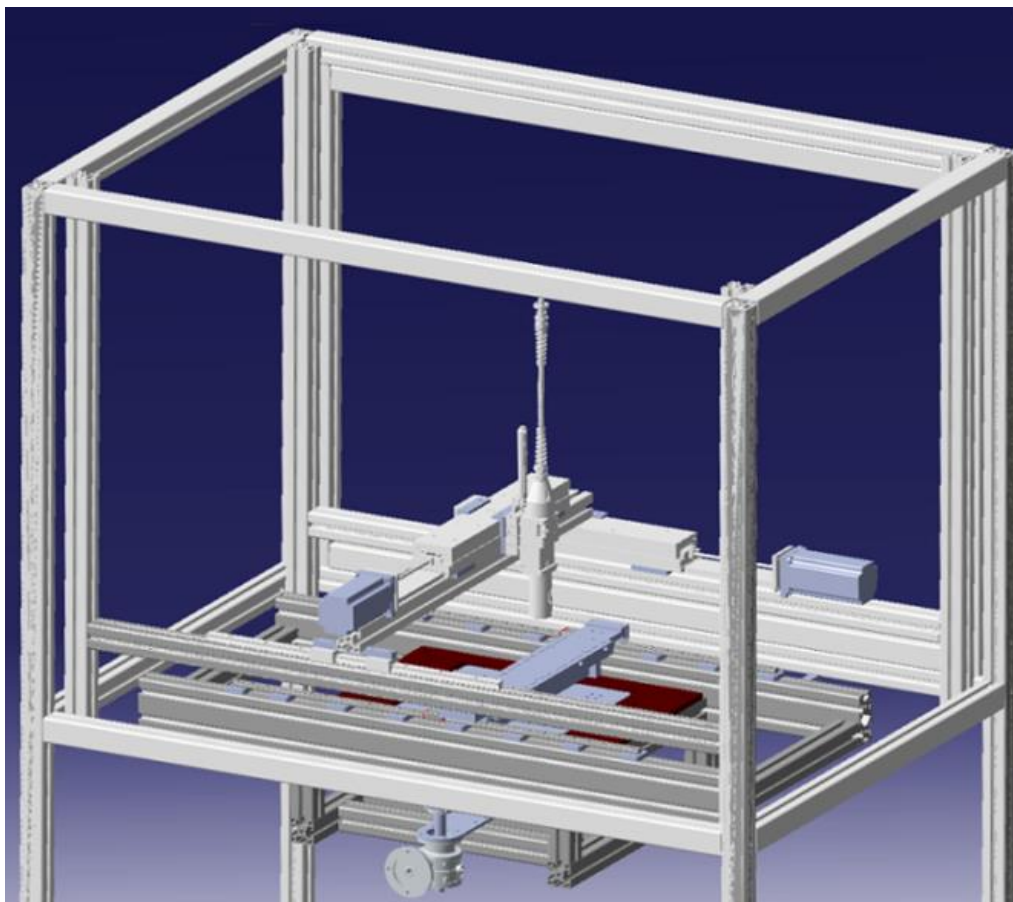
β

Σχήμα 3.7: (α) Τα 6 κριτήρια για την αξιολόγηση των ομάδων επανεπίστρωσης του πρωτότυπου ΣΕΠ και του ΣΕΠ αναφοράς και οι αντίστοιχες τιμές προτεραιότητας, (β) $PV_{Al_i} \cdot PV_{Cr_j}$ σε σχέση με τα κριτήρια για την αξιολόγηση ΑΗΡ της ομάδας επανεπίστρωσης (ανεπτυγμένη προβολή για το ΣΕΠ αναφοράς, κανονική προβολή για το πρωτότυπο ΣΕΠ).

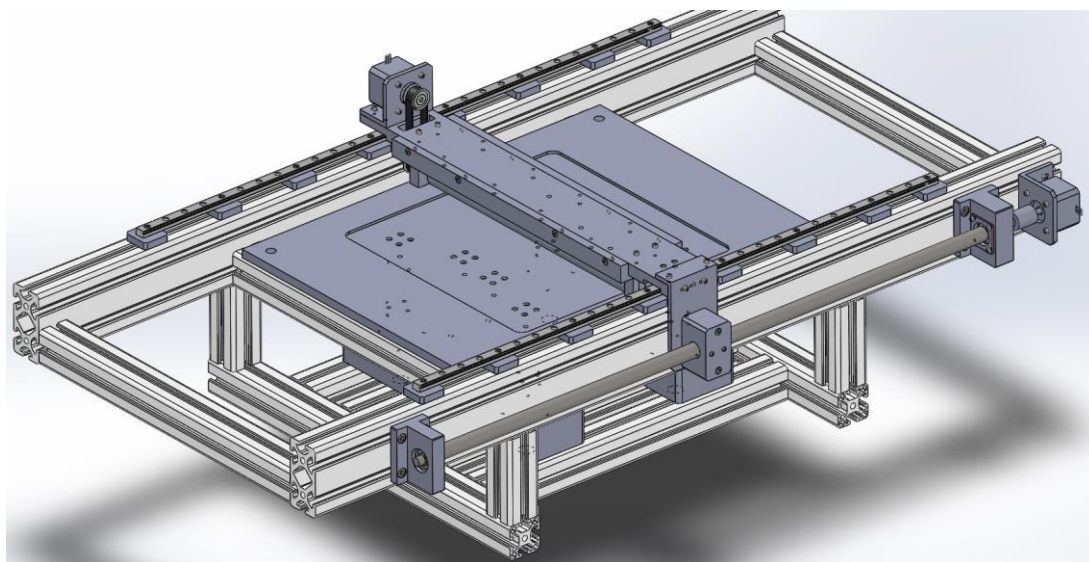
3.5 Υλοποίηση του πρωτότυπου ΣΕΠ

3.5.1 Τελικός σχεδιασμός και προδιαγραφές

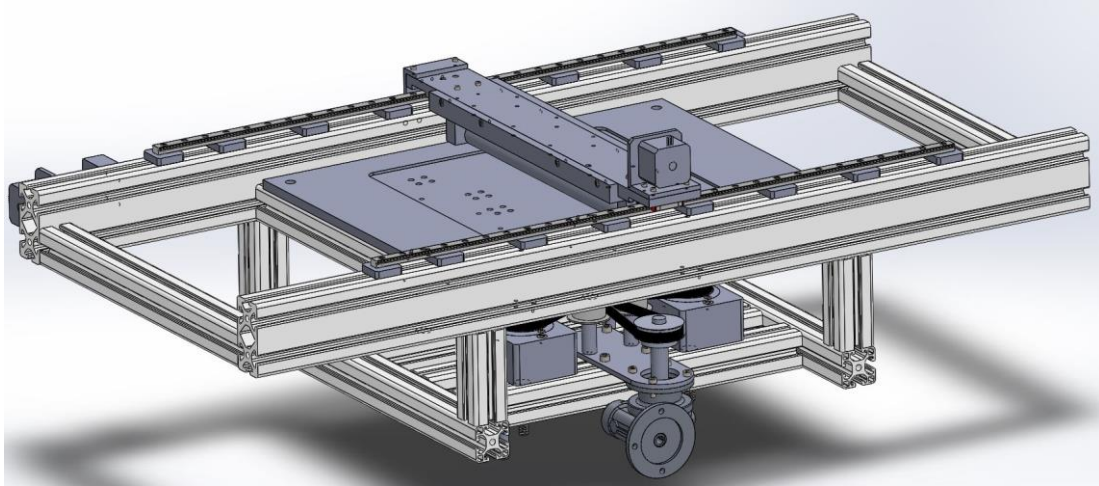
Ο σχεδιασμός της πρωτότυπης μηχανής ΕΠΛ/ΕΤΛ στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί το ΣΕΠ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8 [171], [172], [173].



α



β



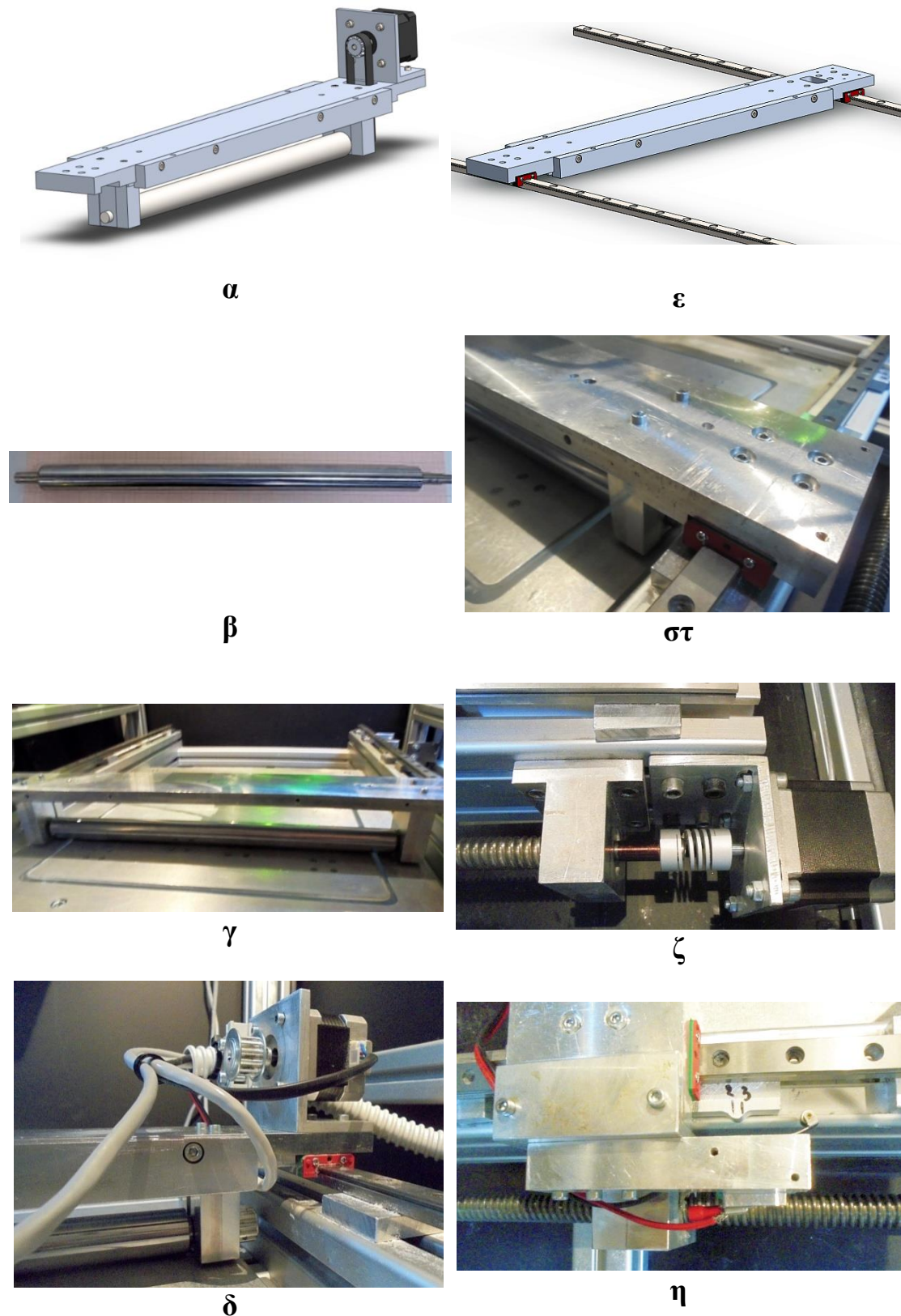
γ

Σχήμα 3.8: Μοντέλο CAD της μηχανής ΕΠΛ/ΕΤΛ χωρίς ΣΕΠ: **(α)** ορατή κεφαλή λέιζερ και σύστημα κίνησης λέιζερ, **(β)** μόνο η πλάκα κατασκευής και το συγκρότημα κυλίνδρου του ΣΕΠ με το σύστημα κίνησής του, **(γ)** ορατό σύστημα κατακόρυφης μετατόπισης της πλάκας κατασκευής.

Το υποσύστημα κυλίνδρου παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.9(α)* έως (δ). Ο κύλινδρος συγκαταλέγεται μεταξύ των συνηθέστερων μεθόδων εναπόθεσης και συμπίεσης ενός ομοιόμορφου, ομοιογενούς στρώματος σκόνης, είτε σε συνδυασμό με μια οδηγό λεπίδα είτε χωρίς αυτή, ενισχύοντας την πυκνότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του πυροσυσσωματωμένου τεμαχίου.

Στο προτεινόμενο ΣΕΠ, ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από inox χάλυβα διαμέτρου 22 mm, βλέπε *Σχήμα 3.9(β)* και (γ), ο οποίος περιστρέφεται μέσω ενός βηματικού κινητήρα, βλέπε *Σχήμα 3.9(δ)*. Η κατεύθυνση περιστροφής του (προς τα εμπρός ή προς τα πίσω) και η ταχύτητα περιστροφής μπορούν να ρυθμιστούν πλήρως.

Στο *Σχήμα 3.9(ε)* έως (η) παρουσιάζεται το μοντέλο του γραμμικού φορέα του πρωτότυπου ΣΕΠ. Ο φορέας κινείται επί γραμμικών εδράνων, βλέπε *Σχήμα 3.9(στ)*. Η κίνηση στον άξονα x εξασφαλίζεται από έναν βηματικό κινητήρα και ένα περίβλημα με οδηγό κοχλία-παξιμάδι, βλέπε *Σχήμα 3.9(ζ)*.



Σχήμα 3.9: Αριστερή στήλη: (α) Τρισδιάστατο σχέδιο CAD, (β) Μη τοποθετημένος κύλινδρος, (γ) Τοποθετημένος κύλινδρος, (δ) Βηματικός κινητήρας, δεξιά στήλη: Σύστημα γραμμικής κίνησης PRS: (ε) τρισδιάστατο σχέδιο CAD, (στ) γραμμικό ρουλεμάν-ράγα, (ζ) βηματικός κινητήρας άξονα x, (η) περίβλημα οδηγού κοχλία-παξιμαδιού και διακόπτης γραμμικού κωδικοποιητή.

Οι τερματικοί διακόπτες χρησιμοποιούνται για να σηματοδοτούν τα άκρα της διαδρομής της άμαξας. Στο *Σχήμα 3.9(η)* διακρίνεται μια πλάκα γραμμικού κωδικοποιητή, με ενδείξεις (2) και (3) που δηλώνουν τις θέσεις στις οποίες ο τερματικός διακόπτης θα αλλάξει τιμή. Με αυτόν τον τρόπο, η θέση του φορέα παρακολουθείται και ελέγχεται από έναν μικροελεγκτή ArduinoTM UNO. Ο γραμμικός κωδικοποιητής αποτελείται από 4 τέτοιες πλάκες ασφαλισμένες σε συγκεκριμένα σημεία κατά μήκος του άξονα x. Αυτό είναι απαραίτητο για να γνωρίζει ο ελεγκτής πού βρίσκεται το ΣΕΠ κάθε στιγμή, ώστε να ελέγχει πότε αρχίζει και πότε σταματάει να περιστρέφεται κάθε βηματικός κινητήρας. Για παράδειγμα, όταν το ΣΕΠ ενεργοποιεί τον διακόπτη του γραμμικού κωδικοποιητή στο σημείο (2) (βλέπε *Σχήμα 3.9(η)*), ο ελεγκτής θα σταματήσει τον βηματικό κινητήρα του άξονα x και θα ξεκινήσει τον κινητήρα του τυμπάνου του δοσομετρητή σκόνης, αφού το (2) σηματοδοτεί τη συντεταγμένη x στην οποία το κόσκινο βρίσκεται ακριβώς κάτω από τη δεξαμενή τροφοδοσίας.

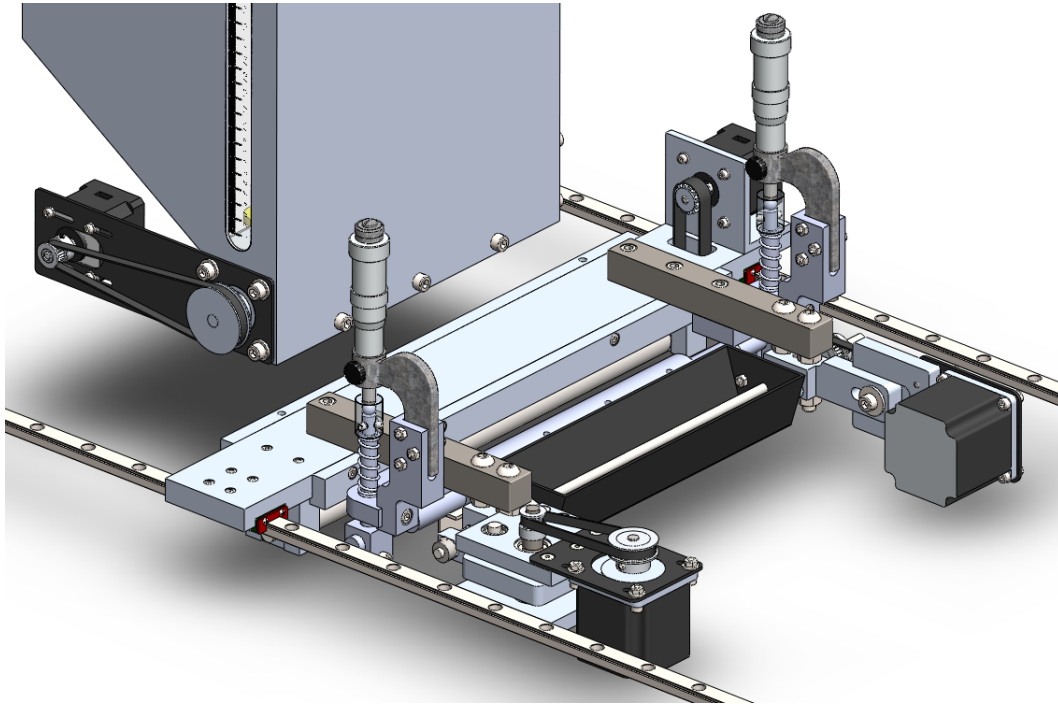
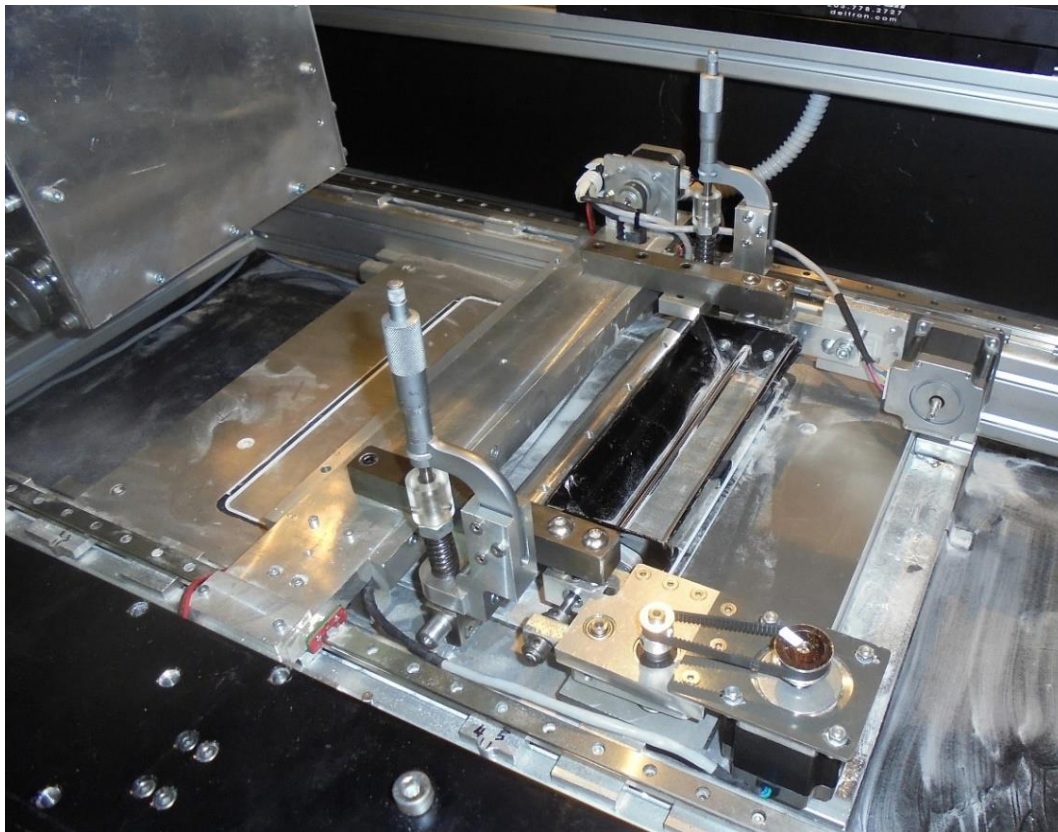
Ο *Πίνακας 3.7* συνοψίζει τα κύρια χαρακτηριστικά των κινητήρων που χρησιμοποιούνται στο ΣΕΠ και των ελεγκτών τους. Όλοι οι κινητήρες ελέγχονται μέσω ενός μόνο μικροελεγκτή ArduinoTM UNO στον οποίο έχει φορτωθεί η βιβλιοθήκη «AccelStepper.h».

Πίνακας 3.7: Βηματικοί κινητήρες και ελεγκτές ΣΕΠ (CW: δεξιόστροφα, CCW: αριστερόστροφα).

Εργασία	Τύπος	Ροπή συγκράτησης (kg.cm)	Βήμα (°)	Ταχύτητα (rpm)	Ένταση ρεύματος (A/phase)	Τάση (V)
Κίνηση φορείου	57BYGH420 (NEMA23)	9	1.8	50-300	2	3.6
Περιστροφή κυλίνδρου	42BYGHW804 (NEMA 17)	4.8	1.8	20-100 (CW/CCW)	1.2	3.6
Ανατροπή κόσκινου	57BYGH420 (NEMA23)	9	1.8	50	2	3.6
Δόνηση κόσκινου	57BYGH420 (NEMA23)	9	1.8	50-300	2	3.6
Περιστροφή δοσομετρητή	42BYGHW804 (NEMA 17)	4.8	1.8	20-200	1.2	3.6

Όλοι οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν αγοράστηκαν από την Wantai Motors. Κάθε βηματικός κινητήρας οδηγείται μέσω ξεχωριστού οδηγού DQ420MA της Wantai Motors. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα ειδικά κατασκευασμένα εξαρτήματα είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο, εκτός από τα στηρίγματα τοποθέτησης των

βηματικών κινητήρων, τα οποία είναι κατασκευασμένα από σίδηρο, και το κόσκινο, το οποίο κατασκευάστηκε επίσης από φύλλο σιδήρου πάχους 1 mm μέσω κάμψης.

*α**β*

Σχήμα 3.10: Πρωτότυπο ΣΕΠ (*a*) όπως σχεδιάστηκε, (*b*) όπως κατασκευάστηκε και συναρμολογήθηκε.

Το πρωτότυπο ΣΕΠ, όπως διαμορφώθηκε στην ενότητα 3.5, έχει σχεδιαστεί λεπτομερώς όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10(*a*). Ο κατάλογος υλικών (Ενότητα 8.1:

παράρτημα Α) αποτελείται από 5 υποσυστήματα και 107 κωδικούς εξαρτημάτων που αντιστοιχούν σε 327 μέρη, εκ των οποίων 39 κωδικοί εξαρτημάτων αφορούν βίδες, παξιμάδια και ροδέλες που αντιστοιχούν σε 218 μέρη. Μια επισκόπηση του κατασκευασμένου ΣΕΠ παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.10(β)*. 44 μέρη κατασκευάστηκαν εσωτερικά σε ένα κέντρο κατεργασιών CNC (HAAS TM-1) και σε έναν τόρνο CNC, ενώ τα υπόλοιπα αγοράστηκαν.

3.5.2 Περιγραφή κύκλου λειτουργίας ΣΕΠ

Το συναρμολογημένο ΣΕΠ απεικονίζεται στο *Σχήμα 3.10*. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι λειτουργίες του ΣΕΠ.

Πρώτον, η βάση του ΣΕΠ έχει μετακινηθεί στον αριστερό τερματοδιακόπτη κατά μήκος του άξονα x. Στη συνέχεια μετακινείται προς τα δεξιά και τοποθετεί το κόσκινο ακριβώς κάτω από το άνοιγμα του δοσομετρητή. Δεύτερον, ο κινητήρας του δοσομετρητή περιστρέφει τον κύλινδρο με προκαθορισμένη γωνία και ταχύτητα, προκειμένου να γεμίσει το κόσκινο με την επιθυμητή ποσότητα σκόνης πρώτης ύλης. Τρίτον, το μοτέρ του δοσομετρητή σταματά και το φορείο του ΣΕΠ αρχίζει να κινείται προς τα δεξιά κατά μήκος του άξονα x. Όταν ο διακόπτης γραμμικού κωδικοποιητή, βλέπε *Σχήμα 3.9(η)*, φτάσει στο καθορισμένο σημείο, δηλαδή το κόσκινο βρίσκεται πάνω από το αριστερό άκρο του διαμερίσματος της κλίνης σκόνης, ο κινητήρας του κόσκινου αρχίζει να δονεί το κόσκινο. Τέταρτον, ενώ το σύνολο του συγκροτήματος συνεχίζει να κινείται προς τα δεξιά, ο συνδυασμός κυλίνδρου - οδηγού λεπίδας θα εφαρμόσει το στρώμα πούδρας στο διαμέρισμα κλίνης πούδρας ακολουθώντας τις επιλεγμένες ρυθμίσεις όσον αφορά την τροφοδοσία και την ταχύτητα περιστροφής/κατεύθυνση. Πέμπτον, όταν ο διακόπτης γραμμικού κωδικοποιητή σηματοδοτήσει την τελική θέση, δηλαδή όταν έχει εναποτεθεί ολόκληρο το στρώμα, το φορείο του ΣΕΠ θα κινηθεί προς τα αριστερά κατά μήκος του άξονα x. Αφού το λέιζερ ολοκληρώσει την πυροσυσσώματωση του στρώματος, ο κύκλος λειτουργίας του ΣΕΠ θα επαναληφθεί. Ενδέχεται να χρειαστούν μικρές προσαρμογές της διαδικασίας μεταξύ του πρώτου στρώματος και των επόμενων στρωμάτων. Για παράδειγμα, στον πρώτο κύκλο, το άδειο κόσκινο θα πρέπει να γεμίσει με μεγαλύτερη ποσότητα σκόνης από ό,τι στους επόμενους κύκλους, όπου θα πρέπει να αναπληρωθεί στο κόσκινο μόνο η ποσότητα σκόνης που εναποτέθηκε στον προηγούμενο κύκλο.

Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να κωδικοποιηθούν περισσότερες στροφές του βηματικού κινητήρα του δοσομετρητή για τον πρώτο κύκλο. Επίσης, μετά από έναν καθορισμένο αριθμό κύκλων, το κόσκινο θα πρέπει να αδειάσει για να αποφευχθεί η απόφραξη των ανοιγμάτων του πλέγματος από τον αυξημένο αριθμό παγιδευμένων υπερμεγέθων συσσωματωμάτων και κόκκων. Ως εκ τούτου, μετά από κάθε, π.χ., 20 στρώματα σκόνης που διασπείρονται, το κόσκινο θα πρέπει να αδειάζει μέσω του βηματικού κινητήρα ανατροπής στην καθορισμένη θέση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, παρόλο που αυτή είναι η τρέχουσα ρουτίνα σύμφωνα με την οποία λειτουργεί το ΣΕΠ, ρυθμίζοντας τις θέσεις των διακοπών του φορείου του ΣΕΠ (βλ. Σχήμα 3.9(η)) και κάνοντας τις κατάλληλες αλλαγές στον κώδικα του μικροελεγκτή, είναι δυνατόν να εκτελεστούν πολλές διαφορετικές ρουτίνες διασποράς (π.χ. κύλινδρος αντίθετης περιστροφής για τη διασπορά ενός αρχικού στρώματος, στη συνέχεια, κατά την επαναφορά του ΣΕΠ χρήση κυλίνδρου περιστροφής προς τα εμπρός για αυξημένη συμπίεση της σκόνης και πυκνότητα συσσώρευσης κ.λπ.)

Πίνακας 3.8: Δυνατότητες ΣΕΠ ανά υποσύστημα.

Υποσύστημα	Δυνατότητα
Χοάνη/δοσομετρητής σκόνης	Ακριβής και αποδοτική ως προς το χρόνο μέτρηση της ποσότητας σκόνης. Αρχική θραύση συσσωματωμάτων
Κόσκινο	Έλεγχος κατανομής μεγέθους σωματιδίων/κόκκων. Εναλλάξιμο πλέγμα. Συγκράτηση συσσωματωμάτων κόκκων σκόνης.
Οδηγός λεπίδα	Εναλλάξιμη-αποσπώμενη. Περιστροφή γύρω από τον άξονα y και (μικρότερη) γύρω από τον άξονα x. Ρυθμιζόμενο ύψος με ακρίβεια μικρομέτρου.
Κύλινδρος	Αφαιρούμενος. Ρυθμιζόμενη κατεύθυνση και ταχύτητα περιστροφής.
Φορείο/σύστημα κίνησης	Ρυθμιζόμενη ταχύτητα. Παρακολουθούμενη θέση για σχεδιασμό-βελτιστοποίηση της διαδικασίας.

Στον Πίνακα 3.8 παρατίθεται περίληψη των δυνατοτήτων που σχετίζονται με κάθε υποσύστημα. Το εύρος των ρυθμιζόμενων τιμών των παραμέτρων λειτουργίας του ΣΕΠ βρίσκεται στον Πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9: Εύρος ρυθμιζόμενων παραμέτρων ΣΕΠ.

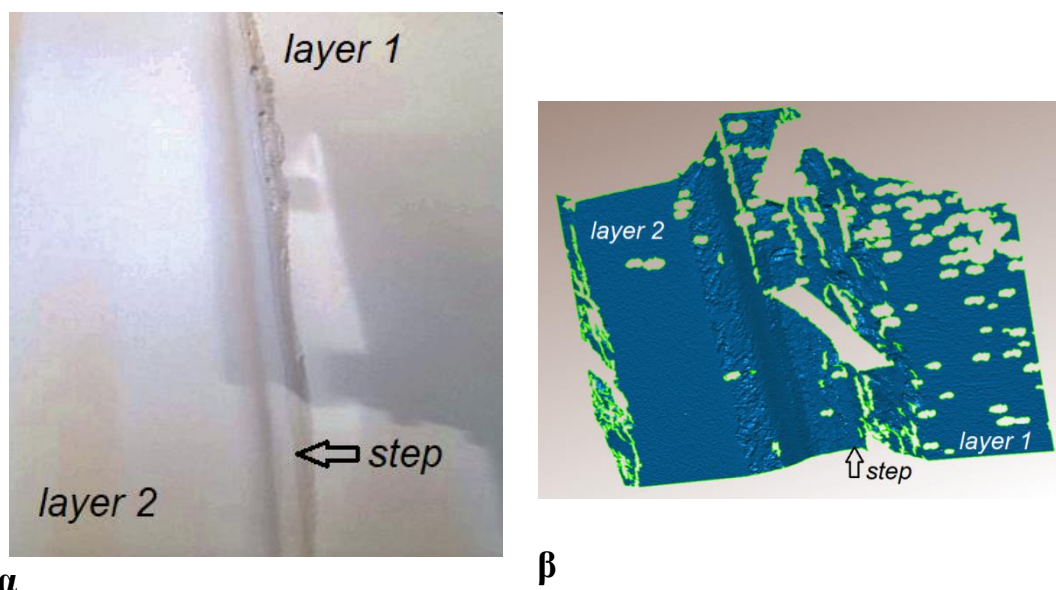
Υποσύστημα	Ρυθμιζόμενη παράμετρος	Εύρος
Δοσομετρητής σκόνης	Γωνία περιστροφής (°)	(Χωρίς μέγιστη τιμή)
	Ταχύτητα (RPM)	(60 to 600)
Κόσκινο	Εναλλάξιμο πλέγμα	(Οποιοδήποτε μέγεθος πλέγματος)
	Ταχύτητα παλινδρόμησης (RPM)	(100 to 600)
Όδηγος λεπίδα	Εναλλάξιμη λεπίδα	(Οποιοδήποτε σχήμα προφίλ λεπίδας)
	Ύψος κατά τον z-άξονα (mm)	(0 έως 20)
	Κλίση περί τον y-άξονα (°)	(-50 έως 50)
	Κλίση περί τον z-άξονα (°)	(-15 έως 15)
Κύλινδρος	Περιστροφική ταχύτητα (RPM)	(20 έως 100)
	Φορά περιστροφής	(CW/FW ή CCW/BW)
Φορείο ΣΕΠ	Ταχύτητα κατά τον x-άξονα (mm/sec)	(5 έως 30) (μπορεί να πολλαπλασιαστεί)

3.5.3 Εκτίμηση ακρίβειας

Ο πρωτότυπος σχεδιασμός ΣΕΠ και η προβλεπόμενη λειτουργικότητά του επαληθεύτηκαν με προκαταρκτικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν απλώνοντας μεμονωμένα στρώματα σκόνης PA12 (DuraForm™ της 3D Systems) και μετρώντας το πάχος του στρώματος με τη χρήση σαρωτή λευκού φωτός (IScan M300 της Imetrics™) [103]. Μια μετατόπιση της πλατφόρμας κατασκευής προς τα κάτω κατά 100 μm επέτρεψε την εναπόθεση στρώματος ίσου πάχους από το ΣΕΠ. Το πείραμα επαναλήφθηκε τρεις φορές και οι μετρήσεις έγιναν δύο φορές για κάθε επανάληψη για λόγους αξιοπιστίας. Το μέσο πάχος στρώματος που προέκυψε ήταν 105,7 μm, με τυπική απόκλιση 5,6 μm. Τα αποτελέσματα αυτά θεωρούνται ικανοποιητικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι ελήφθησαν χωρίς προηγούμενη ιδιαίτερη βαθμονόμηση σε σχέση με τις παραμέτρους της διεργασίας, όπως η ταχύτητα του κυλίνδρου, η πρόωση του επιστρωτήρα, το μέγεθος των σωματιδίων της σκόνης, η παλινδρομική ταχύτητα κοσκίνισης κ.λπ. [59].

Πιο συγκεκριμένα, το ΣΕΠ ρυθμίστηκε έτσι ώστε να απλώνεται ένα στρώμα πάχους 0,1 mm. Πάνω σε ένα υπάρχον στρώμα κατασκευάστηκε ένα νέο στρώμα, αλλά όχι σε όλο το μήκος του πρώτου. Έτσι, ο κύλινδρος προγραμματίστηκε να σταματήσει στη

μέση της διαδρομής, ώστε να σχηματιστεί ένα σκαλοπάτι μεταξύ του νέου και του προηγούμενου στρώματος, βλ. Σχήμα 3.11(α). Αυτή η βαθμιδωτή στρώση σαρώθηκε με τη χρήση του IScan M300 της Imetric™, που διαθέτει ονομαστική ακρίβεια 8 μm (βλέπε Πίνακα 3.10 για τις προδιαγραφές). Το νέφος σημείων που προέκυψε παρεμβλήθηκε με χρήση κατάλληλου λογισμικού, κατασκευάζοντας έτσι δύο επίπεδα βέλτιστης προσαρμογής που αντιστοιχούν στην προηγούμενη και τη νέα στρώση, βλέπε Σχήμα 3.11(β).



Σχήμα 3.11: Βαθμιαία στρώματα: (α) στην κλίνη σκόνης, (β) αποτέλεσμα σάρωσης.

Πίνακας 3.10: Προδιαγραφές του IScan M300 (φακοί V70).

Όγκος μέτρησης (mm x mm)	Απόσταση μέτρησης (mm)	Απόσταση σημείων (mm)	Θόρυβος (mm)	Ακρίβεια (mm)
70x55	235	0.055	0.0025	0.008

Η απόστασή τους μετρήθηκε με το ίδιο λογισμικό και συγκρίθηκε με το ονομαστικό πάχος του στρώματος των 100 μm . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα απόκλισης πάχους για σαρωμένες στρώσεις (μm).

Δοκιμή\Στρώμα	Σάρωση			
	1	2	3	Μέση τιμή
1	-1.20	-2.30	-3.00	-2.17
2	10.10	9.80	9.00	9.63
3	9.00	10.20	9.30	9.50

Η μέση απόλυτη απόκλιση μεταξύ των δύο επιπέδων για την πρώτη δοκιμή είναι χαμηλότερη από την ακρίβεια του οργάνου μέτρησης, επομένως είναι αρκετά χαμηλή, αλλά δεν είναι πραγματικά δυνατό να εκτιμηθεί. Ωστόσο, για τις επόμενες δύο δοκιμές, η μέση απόκλιση είναι περίπου 10% και η τυπική απόκλιση είναι περίπου 0,5 μm . Αυτές οι μετρήσεις είναι απολύτως αποδεκτές, διότι, παρόλο που το μέσο σφάλμα μπορεί να φαίνεται υψηλό, μπορεί να ρυθμιστεί με βαθμονόμηση, δεδομένου ότι η τυπική απόκλιση είναι πολύ χαμηλή. Η μέση απόκλιση στο πάχος του στρώματος συσχετίζεται με ελεγχόμενες παραμέτρους του ΣΕΠ, οι οποίες πρόκειται να καθοριστούν με κατάλληλα πειράματα. Επιπλέον, ο πλήρης κύκλος ΣΕΠ διαρκεί συνήθως ~47,5 δευτερόλεπτα, τα οποία αναλύονται όπως φαίνεται στον *Πίνακα 3.12*.

Πίνακας 3.12: Κατανομή κύκλου λειτουργίας ΣΕΠ.

Φάση	Συνήθης διάρκεια (sec)	Ελάχιστη διάρκεια (sec)
Κίνηση προς τον δοσομετρητή	7.5	5
Φόρτωση σκόνης	3	2
Κίνηση προς την πλατφόρμα κατασκευής	3	2
Δονητικό κοσκίνισμα	6	3
Εναπόθεση στρώματος	24	18
Κίνηση προς το αριστερό τέρμα (home)	4	3
Σύνολο	47.5	33

Ο χρόνος που χρειάζεται το ΣΕΠ για να μετακινηθεί προς τον δοσομετρητή, προς την πλατφόρμα κατασκευής, να εναποθέσει ένα στρώμα και να μετακινηθεί προς τα αριστερά εξαρτάται από τον βηματικό κινητήρα του άξονα x, ο οποίος επί του παρόντος μεταδίδει κίνηση στο ΣΕΠ μέσω ενός περιβλήματος με κοχλία-παξιμάδι. Αυτοί οι χρόνοι θα μπορούσαν να βελτιωθούν σημαντικά, εάν το σύστημα κίνησης αντικατασταθεί από έναν μάντα ακριβείας, βλέπε *Σχήμα 3.12*. Η εναπόθεση στρώματος και το κοσκίνισμα θα μπορούσαν να εκτελούνται ταυτόχρονα για τον έλεγχο του βαθμού συμπίεσης της σκόνης- π.χ., όταν χρησιμοποιείται μόνο ένας κύλινδρος είναι απαραίτητο να ελέγχεται το ύψος της συσσώρευσης της σκόνης εμπροσθεν αυτού. Επιπλέον, μπορεί να είναι απαραίτητο να μειωθεί σκόπιμα ο χρόνος εναπόθεσης σκόνης, προκειμένου να εξεταστεί η συσχέτισή του με την ποιότητα των στρώσεων.



Σχήμα 3.12: Εναλλακτική λύση του οδηγού γραμμικής κίνησης.

Όσον αφορά τη λειτουργικότητα, έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις: Επιτυγχάνεται καλός έλεγχος της ποσότητας σκόνης που εναποτίθεται στο κόσκινο. Επίσης, τα μικρά ανοίγματα στον κύλινδρο του δοσομετρητή διασπούν τα μεγάλα συσσωματώματα σκόνης, βοηθώντας έτσι τη διαδικασία κοσκίνισης. Ο γραμμικός κωδικοποιητής βοηθά το σύστημα να σταματήσει το κοσκίνισμα πριν το ΣΕΠ φτάσει στον αριστερό ακραίο διακόπτη- έτσι, χρησιμοποιείται λιγότερη σκόνη ανά κατασκευασμένο τεμάχιο. Το προτεινόμενο σύστημα κυλίνδρου-οδηγού λεπίδας είναι πολύ ευέλικτο και επιτρέπει πολλούς συνδυασμούς παραμέτρων. Επίσης, το σύστημα είναι στιβαρό, φιλικό προς τον χρήστη και μπορεί να ελεγχθεί μέσω της διεπαφής ArduinoTM με απλές προσαρμογές του κώδικα προγράμματος. Από την άλλη πλευρά, τα σωματίδια σκόνης μολύνουν το περιβάλλον εργασίας της μηχανής και ενδεχομένως επηρεάζουν τα ρουλεμάν και τις κινούμενες επιφάνειες αυξάνοντας την τριβή μεταξύ τους, δημιουργώντας την ανάγκη αντικατάστασής τους συχνότερα από ό,τι θα έπρεπε, επομένως ένα καλύτερο μέσο προστασίας μπορεί να αποδειχθεί απαραίτητο.

Ο κώδικας Arduino που ελέγχει το ΣΕΠ βρίσκεται στο Παράρτημα Β (Ενότητα 8.2).

3.6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Το κεφάλαιο αυτό καλύπτει έναν τομέα που έχει παραμεληθεί στη βιβλιογραφία, καθώς αξιολογεί συγκριτικά πολλαπλές μεθόδους εναπόθεσης σκόνης όχι με αφηρημένο τρόπο, αλλά με τη χρήση ποσοτικής ανάλυσης με τη μορφή της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης (AHP). Τα κριτήρια καταλληλότητας της μεθόδου προσδιορίστηκαν στο πλαίσιο της ανάπτυξης μιας ανοικτής μηχανής ΕΠΛ/ΕΤΛ με σκοπό τον πειραματισμό με τις παραμέτρους της διεργασίας. Οι εναλλακτικές λύσεις τεκμηριώθηκαν και εξηγήθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους προκειμένου να υποστηριχθεί η σύγκριση ανά ζεύγη στην AHP. Ως καταλληλότερη μέθοδος αποδείχθηκε η μηχανική εναπόθεση σκόνης.

Προκειμένου να εφαρμοστεί η μηχανική μέθοδος εναπόθεσης, αναζητήθηκε μια βελτιωμένη λύση σε σχέση με τη λύση που συναντάται συνήθως σε πολλές εμπορικά διαθέσιμες μηχανές ΕΠΛ/ΕΤΛ, δηλαδή το ΣΕΠ με διπλό έμβολο. Για μια αξιόπιστη σύγκριση ήταν απαραίτητο να καθοριστούν πρώτα οι πέντε λειτουργίες που υποστηρίζονται από ένα μηχανικό ΣΕΠ. Το πρωτότυπο ΣΕΠ χωρίστηκε σε δύο υποομάδες που η καθεμία περιλαμβάνει συγκεκριμένες λειτουργίες, δηλαδή την ομάδα δοσομέτρησης/κοσκίνισης, η οποία είναι υπεύθυνη για τη χορήγηση της σωστής ποσότητας σκόνης στο τραπέζι κατασκευής, και την ομάδα επανεπίστρωσης, η οποία είναι υπεύθυνη για την εξάπλωση ενός ομοιόμορφου και ομοιογενούς στρώματος σκόνης. Η AHP εκτελέστηκε δύο φορές για την αξιολόγηση αυτών των ομάδων, αποδεικνύοντας ποσοτικά ότι και οι δύο ήταν σαφώς ανώτερες από το ΣΕΠ αναφοράς.

Σε αυτό το σημείο, θα ήταν χρήσιμο να τονιστεί το γεγονός ότι η AHP, παρά το γεγονός ότι είναι μια ισχυρή μέθοδος στατιστικής ανάλυσης, στηρίζεται στη σύγκριση ανά ζεύγη. Είτε πρόκειται για τη σύγκριση κατά ζεύγη για να προσδιοριστεί αν ένα κριτήριο είναι πιο σημαντικό από ένα άλλο, είτε για το πόσο καλά αξιολογούνται δύο διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις όσον αφορά ένα συγκεκριμένο κριτήριο, ο αριθμός που αποδίδεται ως αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης κατά ζεύγη αναπόφευκτα ενσωματώνει την υποκειμενική γνώμη ενός ειδικού για το θέμα. Για παράδειγμα, ο συγγραφέας θεωρεί ότι το κόστος κατασκευής είναι ένα πολύ λιγότερο σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση μεταξύ των μεθόδων εναπόθεσης σκόνης σε σύγκριση με την επιτεύξιμη ποιότητα επιφάνειας, και ως εκ τούτου του αποδίδει μια τιμή $\frac{1}{4}$, που

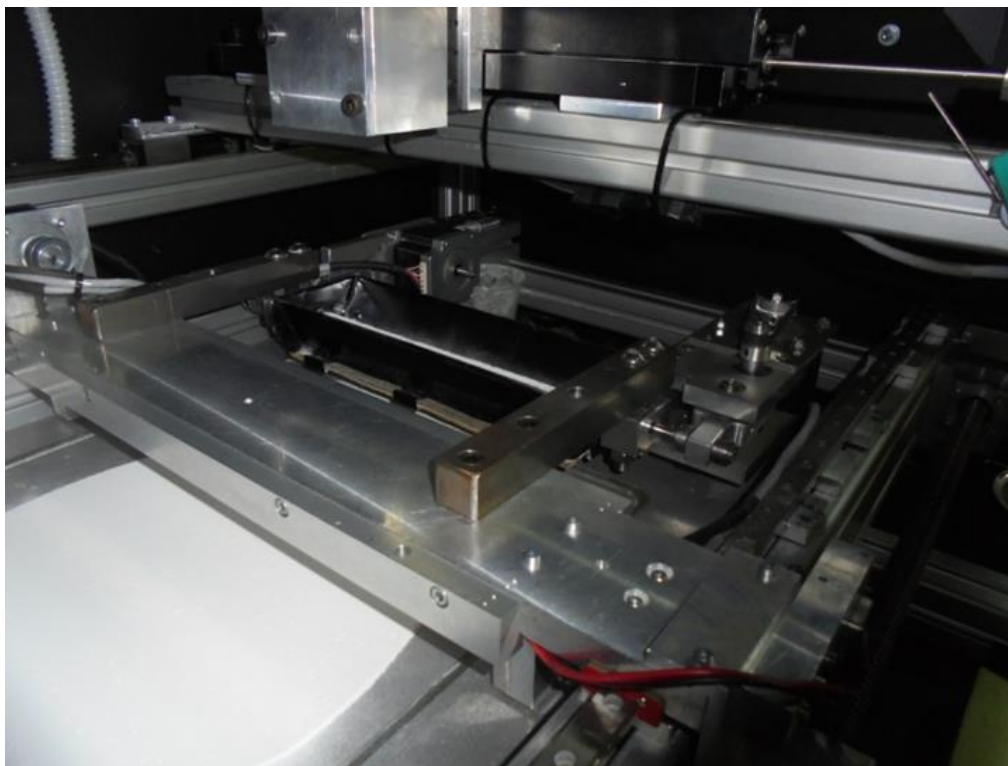
σημαίνει ότι η ποιότητα επιφάνειας έχει μεγάλη σημασία έναντι του κόστους κατασκευής (η ισχυρή είναι 4, βαθμολογία μεταξύ της ασθενούς και της ουσιώδους, οι οποίες είναι ίσες με 3 και 5 αντίστοιχα). Ωστόσο, εάν μια κατασκευαστική εταιρεία προέβαινε σε παρόμοια ανάλυση, με στόχο την ανάπτυξη ενός εμπορικού ΣΕΠ, θα επεδίωκε επίσης το υψηλότερο δυνατό κέρδος χωρίς να ελαττώσει την ποιότητα του τελικού προϊόντος ή να το καταστήσει πολύ ακριβό, γεγονός που θα περιορίζε δραστικά τις πωλήσεις. Έτσι, είναι πιθανό να δοθεί διαφορετική τιμή στο ζεύγος ποιότητα επιφάνειας-κόστος κατασκευής (π.χ. 3, καθιστώντας την ποιότητα επιφάνειας ασθενέστερη προτεραιότητα έναντι του κόστους κατασκευής). Έτσι, γίνεται φανερό ότι, όχι μόνο οι διαφορετικές γνώμες των εμπειρογνομόνων αλλά και οι διαφορετικοί στόχοι των ατόμων που είναι υπεύθυνα για την εφαρμογή της AHP μπορεί να έχουν αντίκτυπο στα αποτελέσματα των μεθόδων. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη αυτή η εγγενής αβεβαιότητα [174] όταν πρόκειται για ανθρώπινες γνώμες, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει μεθόδους που αντισταθμίζουν το γεγονός αυτό, προσαρμόζοντας την αρχική AHP και συνδυάζοντάς την με άλλες μεθόδους. Ορισμένα παραδείγματα είναι η SMAA-AHP (Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis) [175], [176] και οι μέθοδοι fuzzy-AHP [177], [178]. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι είναι πολύ πιο πολύπλοκες από την απλή AHP και, παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται ευρέως, η υπεροχή τους έναντι της αρχικής μεθόδου AHP εξακολουθεί να αμφισβητείται [177].

Το ΣΕΠ που αναπτύχθηκε σχεδιάστηκε λεπτομερώς και αποτελείται από 68 κωδικούς εξαρτημάτων, εκτός από βίδες, παξιμάδια και ροδέλες. 44 ειδικά σχεδιασμένα εξαρτήματα κατασκευάστηκαν εσωτερικά και 283 αγοράστηκαν. Το ΣΕΠ δοκιμάστηκε προκαταρκτικά και η ακρίβεια του πάχους στρώματος που επιτεύχθηκε κρίθηκε αποδεκτή, βλέπε *Σχήμα 3.13*.

Το ΣΕΠ που αναπτύχθηκε βασίζεται στην τροφοδοσία ενός κόσκινου μέσω ενός κατακόρυφου σιλό για την απόθεση σκόνης στην πλάκα κατασκευής. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη εμβόλου/δεξαμενής τροφοδοσίας που διαθέτουν οι περισσότερες εμπορικές μηχανές ΕΠΛ/ΕΤΛ, πράγμα που σημαίνει ότι, προκειμένου να εφαρμοστεί σε μια εμπορική μηχανή ΕΠΛ, θα πρέπει να προσαρμοστεί ή ακόμη και να αντικατασταθεί ολόκληρη η μέθοδος τροφοδοσίας πρώτων υλών.

Οι τρέχουσες εργασίες αφορούν τη διασφάλιση της ποιότητας των στρώσεων από την άποψη της συμπίεσης, της τραχύτητας της επιφάνειας και του πραγματικού ύψους των στρώσεων σε πολλαπλά σημεία της κλίνης σκόνης με πειραματικό προσδιορισμό της επιρροής των παραμέτρων της διεργασίας με συστηματικό και στατιστικά σημαντικό τρόπο. Επιπλέον, η σημαντική επικάλυψη μεταξύ των εναλλακτικών μεθόδων εναπόθεσης σε όλα τα κριτήρια υποδεικνύει τη δυνατότητα συνδυασμού των μεθόδων σε υβριδικά συστήματα εναπόθεσης σκόνης [179], [180], [181], η οποία είναι μια κατεύθυνση που ίσως αξίζει να διερευνηθεί.

Η ανάπτυξη αυτής της πειραματικής συσκευής βασίστηκε στην αποδεδειγμένη σημασία της κοσκίνισης της σκόνης όσον αφορά τη διασφάλιση της ποιότητας του στρώματος σκόνης και τη διατήρηση της οικονομίας της σκόνης. Ωστόσο, το κοσκίνισμα είναι μια περίπλοκη διαδικασία που πρέπει να βαθμονομηθεί. Η διοχέτευση πολύ μεγαλύτερης ποσότητας σκόνης από την απαραίτητη στο κόσκινο θα προκαλούσε την απόφραξη του πλέγματος του κόσκινου λόγω της περίσσειας μεγάλων κόκκων και συσσωματωμάτων, ενώ μια μικρότερη ποσότητα θα ήταν ανεπαρκής για την πλήρη εναπόθεση του στρώματος σε μία μόνο διαδρομή του επιστρωτήρα. Ως εκ τούτου, ο συγγραφέας έχει εργαστεί σε προσομοιώσεις κοσκίνισης σκόνης (βλ. Κεφάλαιο 5), για να εξετάσει πώς οι δονητικές παράμετροι του κόσκινου (συχνότητα και πλάτος ταλάντωσης) σε σχέση με το μέγεθος του πλέγματος και τα γεωμετρικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά της σκόνης επηρεάζουν τη συμπεριφορά της κοσκίνισης. Απώτερος στόχος ήταν η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης σκόνης, της ποιότητας του αποτιθέμενου στρώματος όσον αφορά την πυκνότητα συσσώρευσης και την επιφανειακή τραχύτητα. Το κοσκίνισμα εξετάστηκε επίσης ως μέθοδος εναπόθεσης σκόνης χωρίς επιστρωτήρα, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ταχύτητα εναπόθεσης στρώματος.



Σχήμα 3.13: Το ΣΕΠ κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης.

Συμπερασματικά, ο προτεινόμενος και κατασκευασμένος σχεδιασμός ΣΕΠ είναι χαμηλού κόστους, κατασκευασμένος εσωτερικά, φιλικός προς το χρήστη και παρέχει πλήρη έλεγχο της διαδικασίας εναπόθεσης του στρώματος σκόνης παρέχοντας τις κατάλληλες βοηθητικές λειτουργίες. Ο υψηλός βαθμός προσβασιμότητας και προσαρμοστικότητας του συστήματος σημαίνει ότι σε λίγα μόνο λεπτά αλλαγής μπορεί να υλοποιηθεί και να εξετασθεί πειραματικά μια εντελώς διαφορετική ρύθμιση της διαδικασίας. Το ΣΕΠ έχει δοκιμαστεί με επιτυχία και η ποιότητα του στρώματος σκόνης που εναποτίθεται έχει αξιολογηθεί μέσω τρισδιάστατης σάρωσης λευκού φωτός, επιτυγχάνοντας σφάλμα πάχους στρώματος μικρότερο από 10 μm .

4 Προσομοιώσεις Εναπόθεσης Σκόνης

Για να αξιολογηθεί η μηχανική εναπόθεση σκόνης μέσω μιας οδηγού λεπίδας, εφαρμόζεται ένας σχεδιασμός πειραμάτων Taguchi (DoE) [182]. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μέσω προσομοιώσεων με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων στο πακέτο λογισμικού EDEM, το οποίο παραχωρήθηκε ευγενικά από την Altair™.

4.1 Ιδιότητες Υλικού Σκόνης

Η σκόνη που επιλέχθηκε για τα πειράματα ήταν η σκόνη σφαιρικής αλουμίνας SA-ZL-20 (Al_2O_3) που παρείχε η κατασκευάστρια εταιρεία Sinoenergy Group™. Το φύλλο δεδομένων της σκόνης μπορεί να δει κανείς στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Προδιαγραφές της σκόνης που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

Ιδιότητα		Μονάδα	Τιμή
Μέγεθος σωματιδίου (κόκκου)	D ₁₀	μm	8.2
	D ₅₀	μm	21
	D ₉₀	μm	47.5
Ειδική επιφάνεια		m ² /g	0.19
Ηλεκτρική αγωγιμότητα		μs/cm	300
pH		-	8.5
Υγρασία		%	0.05
Πυκνότητα Χύδην Υλικού		g/cm ³	3.8
Σφαιρικότητα		%	96
Χημική σύσταση	Al ₂ O ₃	%	99.5
	Fe ₂ O ₃	ppm	300
	Na ₂ O	ppm	3500
Περιεκτικότητα σε ιόντα	Na ⁺	ppm	400

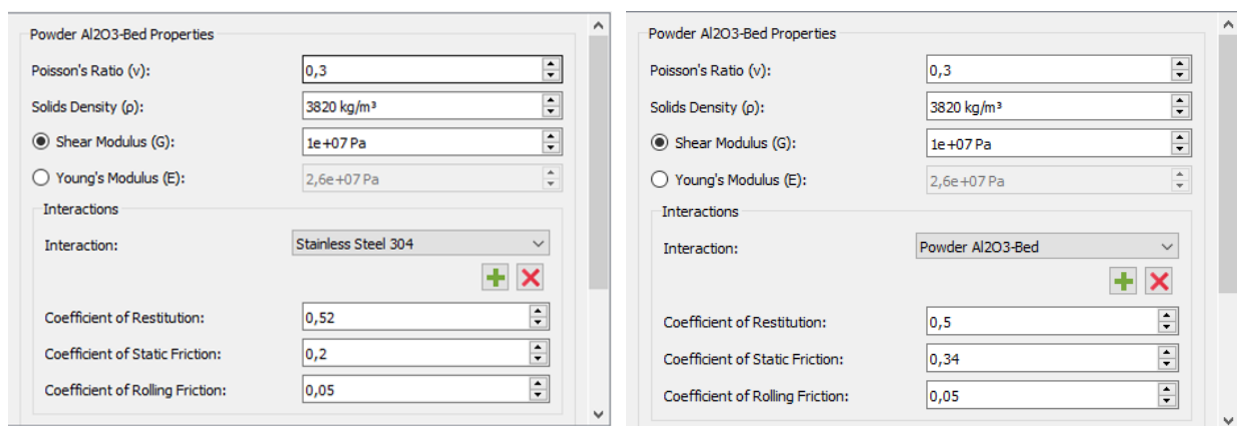
Για να απεικονίσουμε με ακρίβεια τη συγκεκριμένη σκόνη στο λογισμικό EDEM™, πρέπει να ορίσουμε το υλικό. Το λογισμικό EDEM™ δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει αρχικά τόσο τις ιδιότητες του υλικού της σκόνης (βλ. Σχήμα 4.1) όσο και

να ορίσει την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και το σχήμα των σωματιδίων (βλ. Σχήμα 4.2).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, εισάγεται ο λόγος Poisson (ν) της αλουμίνας, ίσος με 0,3 [71], καθώς και η χύδην πυκνότητα του στερεού (ρ), ίση με 3820 Kg/m³ [71], και το μέτρο διάτμησης (G), ίσο με $1 \cdot 10^7$ Pa. Ας γίνει σαφές ότι είναι δυνατόν να εισαχθεί είτε η τιμή του μέτρου διάτμησης είτε η τιμή του μέτρου Young (E), αφού το άλλο υπολογίζεται από το πρώτο και το λόγο Poisson, από την Εξίσωση (4.1).

$$E = 2G \cdot (1 + 2\nu) \Leftrightarrow G = \frac{E}{2 \cdot (1 + 2\nu)} \quad (4.1)$$

Τα σεμινάρια του λογισμικού EDEMTM προτείνουν τη χρήση μιας αρχικής τιμής του G γύρω στο $1 \cdot 10^7$ Pa, καθώς η χρήση της πραγματικής τιμής επηρεάζει δραστικά το χρονικό βήμα, καθιστώντας το εξαιρετικά μικρό, καθιστώντας έτσι την προσομοίωση μη βιώσιμη χρονικά. Σε γενικές γραμμές, η προτεινόμενη τιμή του G για προσομοιώσεις EDEMTM, σύμφωνα με το υποστηρικτικό εκπαιδευτικό υλικό που παρέχεται από την AltairTM, κυμαίνεται μεταξύ $1 \cdot 10^6$ Pa και $1 \cdot 10^9$ Pa. Στις προσομοιώσεις ΜΔΣ (DEM), είναι κοινή πρακτική να χρησιμοποιούνται χαμηλότερες τιμές μέτρου διάτμησης για σωματιδιακά υλικά σε σύγκριση με την πραγματική τιμή του μέτρου διάτμησης του χύδην υλικού.



Σχήμα 4.1: Ρύθμιση των ιδιοτήτων του υλικού της σκόνης και των αλληλεπιδράσεων στο λογισμικό EDEM.

Ωστόσο, πριν από την εκτέλεση του συνόλου των προσομοιώσεων, είναι εξαιρετικά σημαντικό να εξεταστεί πώς η επιλεγμένη τιμή του μέτρου διάτμησης επηρεάζει τόσο το χρονικό βήμα, άρα τον συνολικό χρόνο των προσομοιώσεων, όσο και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Οι Zhang et al. (2020) επέλεξαν για τις προσομοιώσεις τους μια

τιμή 3 GPa ($3 \cdot 10^9$ Pa) [71], η οποία βρίσκεται εκτός του προτεινόμενου εύρους από τα σεμινάρια EDEMTM. Ωστόσο, η τιμή αυτή εξακολουθεί να είναι δύο τάξεις μεγέθους κάτω από την πραγματική τιμή του, η οποία είναι περίπου 150 GPa [183], [184], [185]. Αφού έκαναν δοκιμές διάτμησης κελιού για να καθορίσουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων και τοιχώματος, δηλαδή τους συντελεστές επαναφοράς, στατικής τριβής και τριβής κύλισης, έκαναν διασταυρωτικές προσομοιώσεις/πειράματα των δοκιμών γωνίας χιονοστιβάδας και γωνίας πρανούς, διαπιστώνοντας ότι οι γωνίες αποκλίνουν μόνο κατά +1,1% και +1,6% αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό επικύρωσε τη ρεαλιστική συμπεριφορά των σωματιδίων σκόνης εντός του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Ωστόσο, οι Chen et al. (2017) [186] εξέτασαν κατά πόσες τάξεις μεγέθους είναι δυνατόν να μειωθεί το μέτρο ελαστικότητας Young χωρίς να επηρεαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα πείραμα ανάμιξης σκόνης σε τύμπανο κύλισης, το οποίο είναι πολύ παρόμοιο με τη δοκιμή γωνίας χιονοστιβάδας. Στην ουσία, λόγω της εξίσωσης (4.1), εάν ο λόγος Poisson είναι σταθερός, τότε τα E και G συνδέονται γραμμικά. Ως εκ τούτου, μια μείωση του E κατά n τάξεις μεγέθους θα έχει ως αποτέλεσμα μια μείωση του G κατά n τάξεις μεγέθους και αντίστροφα. Οι Chen et al. απέδειξαν ότι, όταν το E κυμαινόταν μεταξύ της πραγματικής τιμής, E_0 , και της τιμής $0,001E_0$, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν συγκρίσιμα και έμοιαζαν πολύ με το πραγματικό πείραμα, τόσο ως προς τα αποτελέσματα της γωνίας χιονοστιβάδας, όσο και ως προς τη μηχανική της ανάμιξης και τη συμπεριφορά της σκόνης. Ωστόσο, όταν η τιμή E ορίστηκε σε $0,0007E_0$, και για όλες τις τιμές κάτω από αυτή, η γωνία χιονοστιβάδας μειώθηκε κατά περίπου 15% (από 33° σε 28°) και, λόγω της μείωσης των δυνάμεων διάτμησης, ο ρυθμός ανάμιξης μειώθηκε [186]. Ωστόσο, το είδος του πειράματος (ανάμιξη σκόνης σε τύμπανο) στηρίζεται πολύ περισσότερο στις δυνάμεις διάτμησης, σε σύγκριση με την επανεπικάλυψη σκόνης μιας κλίνης μέσω μιας λεπίδας. Οι Fouda et al. (2019) μελέτησαν την εναπόθεση μιας σκόνης μονομερούς μεγέθους Ti6Al4V μέσω μιας λεπίδας. Η βαθμονόμηση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε και πάλι μέσω διασταύρωσης προσομοίωσης και πειραματικών αποτελεσμάτων μιας δοκιμής γωνίας πρανούς. Μελέτησαν επίσης το εύρος του μέτρου διάτμησης από 1MPa έως 100 MPa. Δεδομένου ότι το πραγματικό μέτρο διάτμησης του Ti6Al4V (G_0) είναι περίπου ίσο με 42,5 GPa, 1 MPa είναι ίσο με $2,2 \cdot 10^{-5} \cdot G_0$ και 100 MPa είναι ίσο με $2,2 \cdot 10^{-3} \cdot G_0$, αντιπροσωπεύοντας μείωση κατά 5 και 3 τάξεις

μεγέθους αντίστοιχα. Οι διαφορές που επέβαλε η διακύμανση του μέτρου διάτμησης στην κινηματική της σκόνης ήταν ελάχιστες, οπότε επιλέχθηκε η τιμή 1 MPa για τη μεγιστοποίηση του χρονικού βήματος και την ελαχιστοποίηση του χρόνου προσομοίωσης.

Ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας κατέληξε στο ίδιο συμπέρασμα μετά την αξιολόγηση της διασποράς σκόνης της ίδιας δοκιμής που διεξήχθη τρεις φορές, τη μία με τιμή μέτρου διάτμησης 10 MPa ($6,6 \cdot 10^{-5} \cdot G_0$), τη δεύτερη με μέτρο διάτμησης 150 MPa ($10^{-3} \cdot G_0$) και την τρίτη με την πραγματική τιμή 150 GPA (G_0). Μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης δοκιμής, η κινηματική της σκόνης μεταβλήθηκε ελάχιστα και η μόνη παράμετρος ποιότητας που μεταβλήθηκε ελάχιστα ήταν η απόκλιση πάχους στρώσης (LTD- Layer Thickness Deviation) ($h_l - h_{l,th}$), από -21,2 σε -18,9 μm . Ο λόγος επιφανειακής κάλυψης (SCR- Surface Coverage Ratio) και η πυκνότητα συσσώρευσης (PD- Packing Density) του στρώματος παρέμειναν ουσιαστικά ανεπηρέαστες, ενώ η επιφανειακή RMS τραχύτητα του στρώματος (S_q) μεταβλήθηκε ελάχιστα. Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.2. Στις παρενθέσεις, ο αναγνώστης μπορεί να ελέγξει την απόκλιση των κριτηρίων ποιότητας όσον αφορά την τρίτη δοκιμή, στην οποία χρησιμοποιήθηκε η πραγματική τιμή του μέτρου διάτμησης του υλικού σκόνης.

Πίνακας 4.2: Ποιότητα στρώματος για διάφορες τιμές μέτρου διάτμησης. Οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή #9 του πίνακα Taguchi L27 για την εξάπλωση σκόνης, δηλαδή $U_{tr}=0,01$ m/sec, $f_{vib}=2000$ Hz, $A_{vib}=5$ μm και $\theta_{rel}=5^\circ$.

TRIAL #	G (Pa)	$|h_l - h_{th}|$ (μm)	SCR (%)	$S_q - RMS$ (μm)	PD (% of BD)
1	$1 \cdot 10^7$	21.5 (+18.8%)	99.3 (-0.1%)	16.4 (+10%)	67.8 (+0.6%)
2	$1.5 \cdot 10^8$	18.9 (+4.4%)	99.4 (\equiv)	15.8 (+6%)	67.4 (\equiv)
3	$1.5 \cdot 10^{11}$	18.1	99.4	14.9	67.4

Προκειμένου η προσομοίωση DEM να εκτελείται με σταθερό τρόπο, το κρίσιμο χρονικό βήμα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το χρονικό βήμα Rayleigh [187], ως εξής (εξίσωση (4.2)).

$$\Delta t_c = \frac{\pi \cdot r_{min}}{\beta} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (4.2)$$

Όπου r_{min} είναι η ελάχιστη ακτίνα σωματιδίου που βρέθηκε στο πεδίο προσομοίωσης [188], [189], ρ είναι η χύδην πυκνότητα της σκόνης, G είναι το μέτρο διάτμησης του

υλικού της σκόνης και το β μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση (4.3) [190], [191], με ν να είναι ο λόγος Poisson του υλικού της σκόνης.

$$\beta = 0.8766 + 0.163\nu \quad (4.3)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 (γ) και (δ), ο συγγραφέας έχει ορίσει την ελάχιστη ακτίνα σωματιδίων σε $r_{\min}=2,5 \mu\text{m}$, προκειμένου να μην επιτρέψει σε πολύ μικρά σωματίδια να επιβάλουν ένα πολύ μικρό χρονικό βήμα και να αποτρέψει την εμφάνιση εξαιρετικά συνεκτικής συμπεριφοράς της σκόνης. Ομοίως, ο συγγραφέας έχει ορίσει τη μέγιστη διάμετρο σωματιδίων σε $D_{\max}=75 \mu\text{m}$, η οποία είναι κατά 25% μικρότερη από το θεωρητικό πάχος στρώματος $h_{l,th}$, δεδομένου ότι σωματίδια με διάμετρο περίπου ίση με την κάθετη απόσταση μεταξύ της λεπίδας και του υποστρώματος θα επιδείνωναν δραστικά την ποιότητα της επιφάνειας [8]. Μετά τον υπολογισμό του κρίσιμου χρονικού βήματος μεταξύ των τριών δοκιμών, παρουσιάζεται ο Πίνακας 4.3.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τόσο το κρίσιμο χρονικό βήμα όσο και ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης των τριών δοκιμών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το EDEMTM προσφέρει τη δυνατότητα προγραμματισμού σε NVIDIATM CUDA. Ο προγραμματισμός καρτών γραφικών μειώνει δραστικά το χρόνο προσομοίωσης για προβλήματα που είναι συμβατά με τον παράλληλο υπολογισμό. Στην περίπτωση των προσομοιώσεων DEM, είναι δυνατή η εκτέλεση των υπολογισμών για πολλαπλά σωματίδια σκόνης σε παράλληλη αρχιτεκτονική. Η δυνατότητα αυτή ενεργοποιήθηκε, οπότε, για απλούς υπολογισμούς με βάση την CPU, οι χρόνοι προσομοίωσης θα αυξάνονταν εκθετικά καθώς ο αριθμός των σωματιδίων αυξανόταν.

Πίνακας 4.3: Υπολογισμένα χρονικά βήματα για διάφορες τιμές μέτρου διάτμησης.

<i>TRIAL</i> #	r_{\min} (μm)	ρ ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$)	ν	β	G (Pa)	Δt_c (nsec)	t_{sim} (h)
1	2.5	3820	0.3	0.9255	10^7	165.861	2.5
2	2.5	3820	0.3	0.9255	$1.5 \cdot 10^8$	42.825	25
3	2.5	3820	0.3	0.9255	$1.5 \cdot 10^{11}$	1.354	168

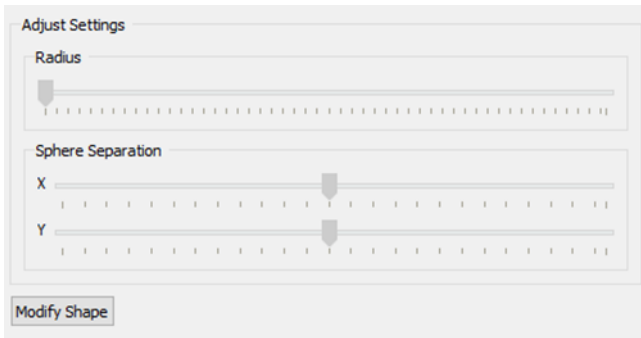
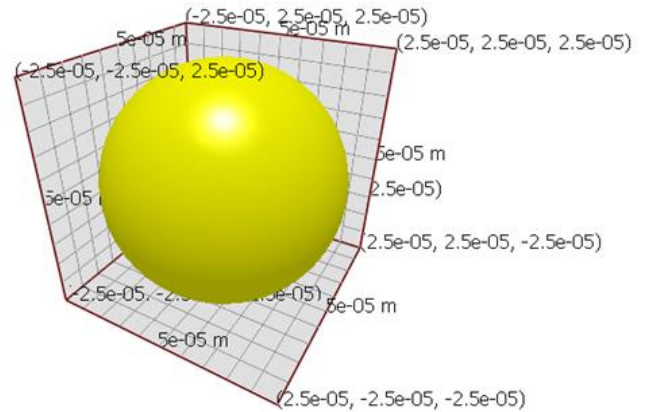
Με τη μείωση του μέτρου διάτμησης κατά τρεις τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με την πραγματική τιμή του, η προσομοίωση έτρεξε σε περίπου ένα δέκατο (1/10) του χρόνου, από 168 ώρες σε μόλις 15 ώρες, ενώ τα μόνα κριτήρια ποιότητας που επηρεάστηκαν ελάχιστα ήταν η απόκλιση του πάχους του στρώματος και η μέση τετραγωνική ρίζα

τραχύτητας της επιφάνειας, τα οποία αυξήθηκαν κατά 4,4% και 6% αντίστοιχα. Με μια περαιτέρω μείωση του μέτρου διάτμησης κατά άλλη μια τάξη μεγέθους, και πάλι τα μόνα κριτήρια ποιότητας που επηρεάστηκαν ήταν η απόκλιση πάχους επιφανειακού στρώματος και η μέση τετραγωνική ρίζα τραχύτητας επιφάνειας, τα οποία αυξήθηκαν κατά επιπλέον 14,4% και 4% αντίστοιχα, με τα ποσοστά να υπολογίζονται ως κλάσμα των τιμών τους στην προσομοίωση πραγματικού κόσμου G (δοκιμή #3).

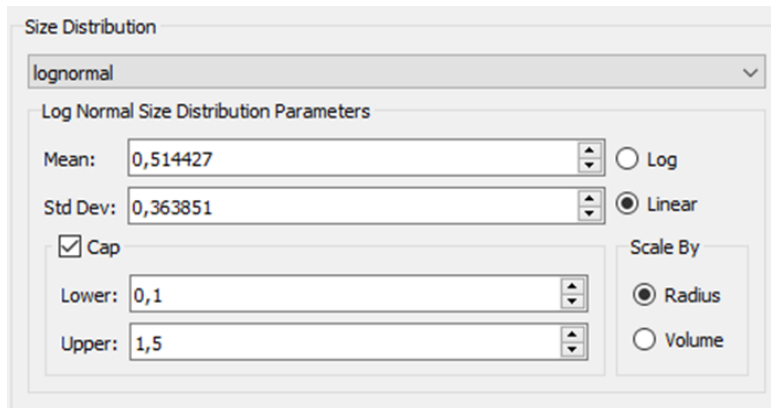
Μπορεί να συναχθεί με ασφάλεια το συμπέρασμα ότι, προκειμένου οι προσομοιώσεις να εκτελούνται αρκετά γρήγορα ώστε να ολοκληρώνονται οι 27 προσομοιώσεις του σχεδιασμού Taguchi σε εύλογο χρονικό διάστημα, πρέπει να επιλέγεται η μικρότερη τιμή του μέτρου διάτμησης. Η απόκλιση μπορεί να θεωρηθεί σημαντική μόνο στην περίπτωση του πάχους στρώματος (18,8 %), αλλά όχι σε τέτοιο επίπεδο ώστε να δικαιολογείται η εκτέλεση προσομοιώσεων σε 12 (25/2,5) ή 67 (168/2,5) φορές τον χρόνο προσομοίωσης που απαιτείται για το μικρότερο εξεταζόμενο μέτρο διάτμησης. Ακόμη και έτσι, η μελέτη παραμένει «στην ασφαλή πλευρά», διότι, μειώνοντας το μέτρο διάτμησης, η ποιότητα του στρώματος φαίνεται να επιδεινώνεται. Εάν η ποιότητα της επιφάνειας θεωρείται αποδεκτή από την τιμή του μέτρου διάτμησης 10 MPa, τότε το στρώμα που παράγεται από την πραγματική τιμή του μέτρου διάτμησης θα είναι υψηλότερης ποιότητας, καθιστώντας το επίσης αποδεκτό.

4.2 Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων

Δεδομένου ότι η σκόνη που επιλέχθηκε ήταν σφαιρική αλουμίνα, στο λογισμικό EDEM επιλέχθηκε ομοιόμορφο σφαιρικό σχήμα για όλα τα σωματίδια. Ως εκ τούτου, δεν υπήρχε ανάγκη εισαγωγής ενός τρισδιάστατου προτύπου μέσω σαρώσεων SEM των σωματιδίων της σκόνης, γεγονός που θα καθιστούσε την προσομοίωση πιο αργή. Όσον αφορά το μέγεθος, πραγματοποιήθηκαν ορισμένοι υπολογισμοί σε λογιστικό φύλλο Excel προκειμένου να εξεταστεί ποιο είδος κατανομής ταιριάζει καλύτερα στους τρεις αριθμούς ΚΜΣ (D_{10} , D_{50} και D_{90}) που παρέχονται από τον κατασκευαστή της σκόνης.

α**β****γ**

<input checked="" type="checkbox"/> Edit Contact Radius						
Name	Position X (m)	Position Y (m)	Position Z (m)	Physical Radius (m)	Contact Radius (m)	
0 sphere 0	0	0	0	2.5e-05	2.6e-05	

δ

Σχήμα 4.2: (α) Ορισμός αρχικών ρυθμίσεων για σφαιρικό σωματίδιο- (β) απεικόνιση σωματιδίου- (γ) γεωμετρικά δεδομένα σφαίρας- (δ) επιλογή και παραμετροποίηση κατανομής μεγέθους σωματιδίων.

Σε πολλές μελέτες χρησιμοποιείται μια λογαριθμοκανονική κατανομή για την προσέγγιση της κατανομής μεγέθους σωματιδίων μιας δεδομένης σκόνης, ωστόσο δεν έχει τεκμηριωθεί καμία μέθοδος καθορισμού των παραμέτρων της λογαριθμοκανονικής κατανομής με βάση τις προαναφερθείσες προδιαγραφές ΚΜΣ σκόνης.

Αρχικά, η λογαριθμοκανονική κατανομή ορίζεται ως εξής:

Έστω Z μια τυπική κανονική μεταβλητή, δηλαδή μια μεταβλητή που ακολουθεί κανονική (γκουασιανή) κατανομή, και $\mu \in (-\infty, +\infty)$, $\sigma > 0$ δύο πραγματικοί αριθμοί. Τότε, η κατανομή της μεταβλητής

$$X = e^{\mu + \sigma Z}$$

ονομάζεται λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους μ και σ . Πρέπει να τονιστεί ότι οι παράμετροι αυτές είναι η αναμενόμενη τιμή (ή μέση τιμή) και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα του φυσικού λογαρίθμου της μεταβλητής και όχι της ίδιας της μεταβλητής X . Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της μεταβλητής X , η οποία ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή, δίνονται από τις εξισώσεις (4.4) και (4.5) αντίστοιχα.

$$\mu_X = \sqrt{e^{2\mu + \sigma^2}} \quad (4.4)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\mu_X^2 (e^{\sigma^2} - 1)} \quad (4.5)$$

Και, αντίστροφα

$$\mu = \ln \left(\frac{\mu_X^2}{\sqrt{\mu_X^2 + \sigma_X^2}} \right) \quad (4.6)$$

$$\sigma^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} \right) \quad (4.7)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_X(x)$ και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής $F_X(x)$ μιας λογαριθμοκανονικής κατανομής δίνονται στις εξισώσεις (4.8) και (4.9) αντίστοιχα.

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (4.8)$$

$$F_X(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \quad (4.9)$$

Όπου erf η συνάρτηση σφάλματος, βλέπε Εξίσωση (4.10)

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (4.10)$$

Λύνοντας το ακόλουθο σύστημα των εξισώσεων (4.11), (4.12) and (4.13)

$$\left. \begin{array}{l} D_{90} = 47.5 \\ D_{50} = 21 \\ D_{10} = 8.2 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_X(47.5) = 0.9 \\ F_X(21) = 0.5 \\ F_X(8.2) = 0.1 \end{array} \right. \quad (4.11)$$

$$(4.12)$$

$$(4.13)$$

Οι (4.12) και (4.13) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μ και σ , χρησιμοποιώντας την (4.9). Το αποτέλεσμα είναι

$$\{\mu = 3.0445\} \quad (4.14)$$

$$\{\sigma = 0.7338\} \quad (4.15)$$

Ενώ η (4.11) χρησιμοποιείται για να επικυρωθεί ότι η προσέγγιση είναι καλή προσαρμογή.

$$F_X(47.5) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln 47.5 - 3.0445}{0.7338 \cdot \sqrt{2}} \right) \right] = 0.867 \cong 0.9$$

Με απόκλιση της τάξης του

$$\frac{0.867 - 0.9}{0.9} \cdot 100\% = -3.7\%$$

Χρησιμοποιώντας τις (4.14) και (4.15), η Εξίσωση (4.9) δίνει

$$(4.9) \stackrel{(4.14),(4.15)}{\iff} F_X(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln x - 3.0445}{0.7338 \cdot \sqrt{2}} \right) \right] \quad (4.16)$$

Οπότε, για να υπολογιστεί το D_{90} , η Εξίσωση (4.16) δίνει

$$F_X(x) = 0.9 \Rightarrow \operatorname{erf} \left(\frac{\ln x - 3.0445}{0.7338 \cdot \sqrt{2}} \right) = 0.8 \Rightarrow \frac{\ln x - 3.0445}{0.7338 \cdot \sqrt{2}} = 0.9062 \Rightarrow$$

$$x = 53.78 \cong 47.5$$

Με απόκλιση της τάξης του

$$\frac{53.78 - 47.5}{47.5} \cdot 100\% = +13.2\%$$

Για να οριστεί η λογαριθμοκανονική κατανομή στο λογισμικό EDEM, ο χρήστης πρέπει να εισαγάγει τις τιμές μ_X και σ_X , οι οποίες υπολογίζονται με τη χρήση των εξισώσεων (4.4) και (4.5).

$$(4.4) \stackrel{(4.14),(4.15)}{\iff} \mu_X = 27.488 \quad (4.17)$$

$$(4.5) \stackrel{(4.17),(4.15)}{\iff} \sigma_X = 23.216 \quad (4.18)$$

Το λογισμικό απαιτεί οι τιμές που εισάγει ο χρήστης να κανονικοποιούνται, δηλαδή να διαιρούνται με τη μέση διάμετρο του σωματιδίου που έχει επιλεγεί, η οποία είναι 50

μm (βλέπε Σχήμα 4.2(γ), πεδίο "Physical Radius"). Ως εκ τούτου, οι τιμές που πρέπει να εισάγει ο χρήστης είναι οι εξής

$$\frac{\mu_x}{D_{ave}} = \frac{27.488}{50} = 0.549758 \quad (4.19)$$

$$\frac{\sigma_x}{D_{ave}} = \frac{23.216}{50} = 0.464323 \quad (4.20)$$

Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται ως είσοδος στις παραμέτρους "Mean" και "Std. dev" της καρτέλας της λογαριθμοκανονικής κατανομής, βλέπε Σχήμα 4.2(δ). Επιπλέον, στο ίδιο Σχήμα, ο χρήστης ορίζει τα ανώτατα και κατώτατα όρια μεγέθους σωματιδίων, ως αριθμό που πολλαπλασιάζεται με το μέσο μέγεθος σωματιδίων που έχει οριστεί στο Σχήμα 4.2(γ), στην καρτέλα "Physical Radius".

4.3 Υπολογισμός των Δυνάμεων Συνοχής

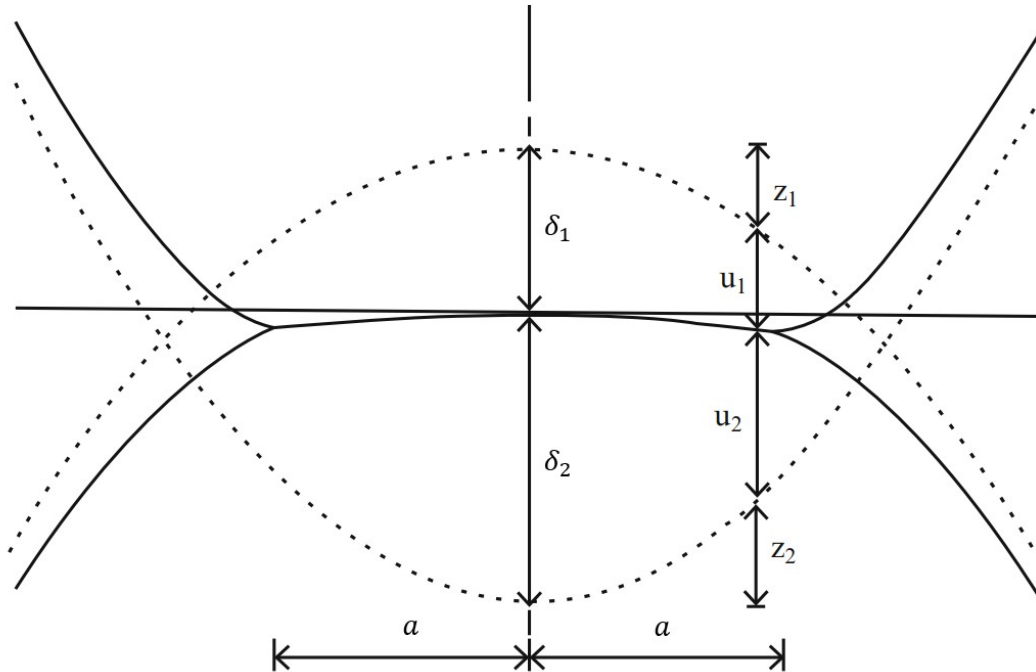
Στο Σχήμα 4.2(γ), είναι ορατή μια άλλη επιλογή. Πρόκειται για την καρτέλα "Contact radius". Αυτή η καρτέλα πρέπει να συμπληρωθεί με μια τιμή μεγαλύτερη από τη φυσική ακτίνα και χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που πρέπει να ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις συνοχής και προσκόλλησης.

Με τον όρο "συνεκτικές" δυνάμεις (ή δυνάμεις συνοχής), αναφέρονται οι δυνάμεις που εφαρμόζονται μεταξύ σωματιδίων του ίδιου υλικού, ενώ με τον όρο "προσκολλητικές δυνάμεις" αναφέρονται οι δυνάμεις που εφαρμόζονται μεταξύ διαφορετικών υλικών, όπως αυτές που αναπτύσσονται μεταξύ των σωματιδίων και της οδηγού λεπίδας, της πλάκας εναπόθεσης, δηλαδή του υποστρώματος, ή οποιουδήποτε άλλου σώματος της προσομοίωσης.

Σε περιπτώσεις όπως αυτές που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, η κίνηση των πολύ λεπτόκοκκων κόνεων με διάμετρο σωματιδίων μικρότερη από 100 μm δεν διέπεται αποκλειστικά από βαρυτικές δυνάμεις, αλλά και από ελκτικές δυνάμεις Van Der Waals [192]. Προκειμένου η προσομοίωση να λάβει υπόψη της και αυτές τις δυνάμεις, το μοντέλο επαφής που επιλέχθηκε είναι το "Hertz-Mindlin with JKR v2".

Η γενική γεωμετρία μιας επαφής μεταξύ δύο ανόμοιων, άνισου μεγέθους, σφαιρικών, ελαστικών σωματιδίων που υπόκεινται σε μια κανονική δύναμη F_n φαίνεται στο Σχήμα 4.3 [192]. Σε αυτό το Σχήμα, το αγγλικό a δηλώνει την ακτίνα της κυκλικής περιοχής

επαφής που δημιουργούν τα δύο συμπιεσμένα σφαιρικά σωματίδια. δ_i , $i=1,2$, (ελληνικό "δέλτα") δηλώνει την απόσταση μεταξύ του ορίου κάθε σφαίρας με τη συμπιεσμένη επιφάνεια, αν οι σφαίρες ήταν ασυμπίεστες στο ίδιο σημείο που βρίσκονται τη δεδομένη στιγμή. Συνεπώς, $\delta_n = \delta_1 + \delta_2$ είναι η σχετική προσέγγιση των κεντροειδών των δύο σφαιρών που έρχονται σε επαφή.



Σχήμα 4.3: Επαφή δύο ανόμοιων, άνισου μεγέθους, σφαιρικών, ελαστικών σωματιδίων, που υπόκεινται σε κανονική δύναμη. Περιγραφή της παραμόρφωσης κάθε σωματιδίου [192].

Η σχετική προσέγγιση μεταξύ των σφαιρών είναι θετική όταν οι σφαίρες βρίσκονται σε επαφή και συμπιέζονται μεταξύ τους, δηλαδή όταν η απόσταση μεταξύ των κέντρων τους είναι μικρότερη από το άθροισμα των δύο ακτίνων τους, και αρνητική όταν η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο σφαιρών είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το άθροισμα των ακτίνων τους.

Αν στην περίπτωση που περιγράφεται εξετάζεται η ελαστική, μη συνεκτική επαφή μεταξύ δύο ανόμοιων, άνισου μεγέθους, σφαιρικών, ελαστικών σωματιδίων, που υπόκεινται σε μια κανονική δύναμη, τότε η ανάλυση είναι η εξής:

Η κατανομή της πίεσης που υφίσταται εντός αυτής της κυκλικής περιοχής επαφής συμβολίζεται από την Εξίσωση (4.21).

$$p(r) = p_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.21)$$

Ενώ οι μετατοπίσεις των σφαιρών (από το αρχικό τους σημείο αν δεν υπήρχε η επαφή) στην περιοχή επαφής, σύμφωνα με την εξίσωση (4.22).

$$u_i(r) = \frac{\pi p_0 (1 - \nu_i)^2}{4aE_i} (2a^2 - r^2) \quad (4.22)$$

Όπου E_i και ν_i είναι το μέτρο ελαστικότητας Young και ο λόγος Poisson κάθε σφαίρας αντίστοιχα.

Με βάση το Σχήμα 4.3, η εξίσωση (4.23) δίνει:

$$u_1(r) + u_2(r) = \delta_n - \left(\frac{r^2}{2R^*} \right) \quad (4.23)$$

Όπου το R^* δηλώνει τη σχετική ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας και δίνεται από την εξίσωση (4.24).

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4.24)$$

$$(4.23) \xrightarrow{(4.22)} \left(\frac{\pi p_0}{4aE^*} \right) (2a^2 - r^2) = \delta_n - \left(\frac{r^2}{2R^*} \right) \quad (4.25)$$

Όπου το E^* δηλώνει τη σχετική ενδοτικότητα επαφής και δίνεται από την εξίσωση (4.26)

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \quad (4.26)$$

Έτσι, η σχετική προσέγγιση δίνεται ως εξής

$$(4.25) \xrightarrow{r=0} \delta_n = \frac{\pi p_0 a}{2E^*} \quad (4.27)$$

Και η ακτίνα της περιοχής επαφής, ως εξής:

$$(4.26) \xrightarrow{(4.27), r=a} a = \frac{\pi p_0 R^*}{2E^*} \quad (4.28)$$

Και η κανονική δύναμη δίνεται από την

$$F_n = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2 \quad (4.29)$$

Έτσι, οι ισοδύναμες εξισώσεις για δ_n και a είναι οι εξής

$$(4.27) \xrightarrow{(4.29), a^2=R^*\delta_n} a^3 = \frac{3F_n R^*}{4E^*} \quad (4.30)$$

$$(4.28) \xrightarrow{(4.29), a^2=R^*\delta_n} \delta_n^3 = \frac{9F_n^2}{16R^*E^{*2}} \quad (4.31)$$

Έτσι, αναδιατάσσοντας την εξίσωση (4.30),

$$(4.30) \Rightarrow F_n = \frac{4}{3} E^* (R^* \delta_n^3)^{1/2} \quad (4.32)$$

Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της κανονικής δυσκαμψίας της επαφής ως εξής:

$$k_n = \frac{dF_n}{d\delta_n} = 2E^* (R^* \delta_n)^{1/2} = 2E^* a \quad (4.33)$$

Η παραπάνω ανάλυση (μοντέλο Hertz-Mindlin [193], [194], [192]) είναι πολύ χρήσιμη στην περίπτωση που οι ερευνητές δεν επιθυμούν να αξιολογήσουν οποιαδήποτε πλαστική παραμόρφωση που προκαλείται στα σωματίδια και, ταυτόχρονα, τα σωματίδια είναι πάνω από ένα ορισμένο όριο μεγέθους, συνήθως πάνω από 50 μm [192], ώστε οι δυνάμεις συνοχής και πρόσκόλλησης να είναι αμελητέες σε σχέση με τις βαρυτικές, άρα χωρίς επίδραση στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Ωστόσο, στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη, όπου η ελάχιστη διάμετρος των σωματιδίων είναι στα 5 μm , δηλαδή μια τάξη μεγέθους μικρότερη σε σχέση με το όριο όπου οι δυνάμεις συνοχής δεν έχουν καμία αξία, είναι επιτακτική ανάγκη να συμπεριληφθούν στο μοντέλο, οπότε υπάρχει ανάγκη προσαρμογής της ανάλυσης που παρουσιάζεται παραπάνω.

Υπάρχει ένα πλήθος μηχανισμών με τους οποίους τα μικροσκοπικά σωματίδια μπορούν να προσκολληθούν μεταξύ τους. Στην περίπτωση σχετικά ισχυρών δεσμών, μπορεί να είναι στερεοί, τσιμεντοποιημένοι ή κολλημένοι με ένα ιξώδες υγρό. Οι ασθενέστεροι δεσμοί μπορεί να παρέχονται από κρεμαστές υγρές γέφυρες, δυνάμεις Van der Waals, ηλεκτροστατικές δυνάμεις ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία [192]. Στην παρούσα εργασία, ωστόσο, δεν υπάρχει παρουσία ιξώδους υγρού ή υγρασίας που θα μπορούσε να δημιουργήσει υγρούς δεσμούς. Το ηλεκτροστατικό φορτίο αγνοείται, καθώς η ελάχιστη

διάμετρος των σωματιδίων είναι στα 5 μm , που δεν είναι στη νανοκλίμακα, όπου οι δυνάμεις που οφείλονται στα ηλεκτροστατικά φορτία αρχίζουν να ξεπερνούν τις βαρυτικές δυνάμεις. Αν και μπορεί να αναπτυχθεί κάποιο ηλεκτροστατικό φορτίο, είτε μέσω της επαφής του μονωτικού υλικού (οξείδιο του αλουμινίου) με το υπόστρωμα (πλάκα ανοξειδωτού χάλυβα), είτε μέσω της επαφής των σωματιδίων αλουμίνιας μεταξύ τους, δεδομένου ότι είναι ανόμοιου μεγέθους [195], θα ήταν αμελητέο λόγω του μάλλον μεγάλου μέσου μεγέθους του δείγματος σκόνης που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι, ακόμη και στην περίπτωση ρευστοποιημένης κλίνης σωματιδίων αλουμίνιας, το φορτίο της σκόνης αλουμίνιας είναι σχετικά ουδέτερο [196]. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση εναπόθεσης σκόνης, όπου πραγματοποιείται πολύ μικρότερη διέγερση των σωματιδίων, τα φορτία που αναπτύσσονται θα είναι ακόμη πιο ασήμαντα. Κατά παρόμοιο τρόπο, δεν υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία, οπότε, ο μόνος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι οι δυνάμεις Van der Waals.

Επιπλέον, στην παρούσα εργασία δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη καμία πλαστική παραμόρφωση των σωματιδίων ή των γεωμετριών, δεδομένου ότι τα υλικά είναι πολύ υψηλής σκληρότητας και συγκρούονται μεταξύ τους με σχετικά χαμηλές ταχύτητες, με αποτέλεσμα να μην προκαλούνται μόνιμες παραμορφώσεις.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των αυτοκόλλητων σωματιδίων λόγω των δυνάμεων Van der Waals, το μοντέλο JKR (Johnson-Kendall-Roberts) [197] και το μοντέλο DMT (Derjaguin-Muller-Toporov) [198].

Ακολουθεί σύντομη επεξήγηση του μοντέλου JKR:

Η γενική σχέση μεταξύ της κανονικοποιημένης κανονικής δύναμης και της κανονικοποιημένης σχετικής προσέγγισης σωματιδίων στο μοντέλο JKR δίνεται από την εξίσωση (4.34). Η κανονική δύναμη F_n^{JKR} κανονικοποιείται διαιρώντας την με τη δύναμη αποκόλλησης, F_{po} , και η σχετική προσέγγιση δ_n κανονικοποιείται διαιρώντας την με τη σχετική προσέγγιση κατά τη στιγμή αποκόλλησης δ_{to} .

$$\frac{\delta_n}{\delta_{to}} = \frac{3 \left(\frac{F_n^{JKR}}{F_{po}} \right) + 2 + 2 \left(1 + \frac{F_n^{JKR}}{F_{po}} \right)^{1/2}}{3^{2/3} \left[\frac{F_n^{JKR}}{F_{po}} + 2 + 2 \left(1 + \frac{F_n^{JKR}}{F_{po}} \right)^{1/2} \right]^{1/3}}, \frac{F_n^{JKR}}{F_{po}} \geq -1 \quad (4.34)$$

Με F_{po} τη μέγιστη εφελκυστική δύναμη που απαιτείται για τη διακοπή της επαφής μεταξύ των δύο σωματιδίων (δηλαδή τη "δύναμη απομάκρυνσης"). Η δύναμη απομάκρυνσης για το μοντέλο JKR δίνεται από την εξίσωση (4.35)

$$F_{po} = \frac{3}{2} \pi R^* \Gamma \quad (4.35)$$

Και δ_{to} είναι η σχετική προσέγγιση τη στιγμή της αποκόλλησης, η οποία δίνεται από την εξίσωση (4.36).

$$\delta_{to} = \left(\frac{3F_{po}^2}{16R^*E^{*2}} \right)^{1/3} \quad (4.36)$$

Το μοντέλο JKR δίνει τις εξισώσεις (4.37) και (4.38) για την κανονική δύναμη F_n^{JKR} και τη σχετική προσέγγιση δ_n αντίστοιχα ως συναρτήσεις της ακτίνας της επιφάνειας επαφής, a .

$$F_n^{JKR} = \frac{4E^*a^3}{3R^*} - (8\pi E^* \Gamma a^3)^{1/2} \quad (4.37)$$

$$\delta_n = \frac{a^2}{R^*} - \left(\frac{2\pi \Gamma a}{E^*} \right)^{1/2} \quad (4.38)$$

Η ακτίνα της επιφάνειας επαφής μεταξύ των δύο σφαιρών τη στιγμή της ισορροπίας ορίζεται ως a_0 και δίνεται από την εξίσωση (4.39).

$$(4.37) \xrightarrow{F_n^{JKR}=0, a>0} a_0 = \sqrt[3]{\frac{9\pi \Gamma R^{*2}}{2E^*}} \quad (4.39)$$

Η σειρά των γραμμάτων του Σχήματος 4.4(β) από το Α έως το F δείχνει πώς περιγράφεται μια επαφή. Αρχικά, στο σημείο Α, τα δύο σωματίδια δεν βρίσκονται σε επαφή, ασκείται μηδενική δύναμη μεταξύ τους και υπάρχει αρνητική σχετική προσέγγιση. Καθώς τα δύο σωματίδια πλησιάζουν το ένα το άλλο, φτάνουν τελικά στο σημείο Β, όπου τα σωματίδια βρίσκονται απειροελάχιστα πριν από την επαφή. Η

σχετική προσέγγιση είναι μηδενική, που σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των σφαιρών είναι περίπου ίση με το άθροισμα των δύο ακτίνων, αλλά η δύναμη παραμένει μηδενική. Ωστόσο, μόλις επιτευχθεί η επαφή (σημείο C), η οποία ελέγχεται στην προσομοίωση μέσω των φυσικών ακτίνων των δύο σωματιδίων, η σχετική προσέγγιση και η κανονικοποιημένη προσέγγιση γίνονται ακριβώς ίσες με μηδέν (Εξίσωση (4.40))

$$\frac{\delta_{n,C}}{\delta_{to}} = 0 \quad (4.40)$$

Και η δύναμη πέφτει αμέσως σε τιμή (Εξίσωση (4.41))

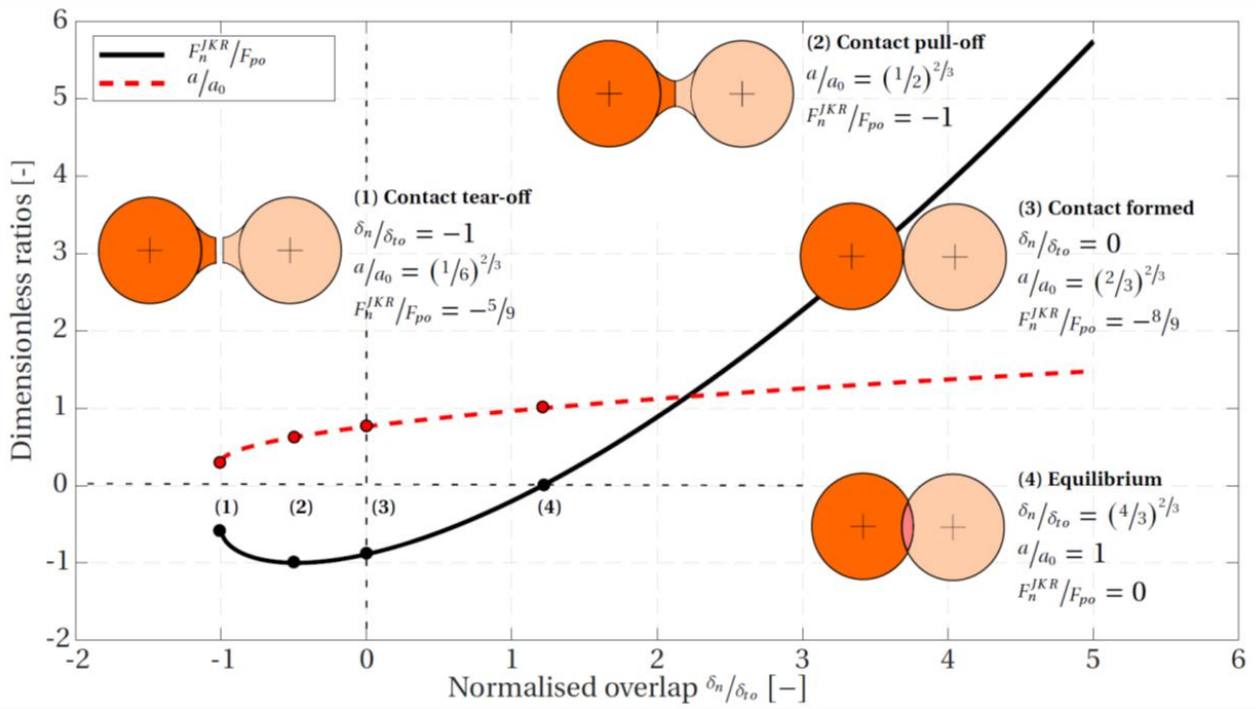
$$(4.34) \xrightarrow{(4.40)} \frac{F_{n,C}^{JKR}}{F_{po}} = -\frac{8}{9} \quad (4.41)$$

Στο σημείο επαφής (σημείο 3 του Σχήματος 4.4(α)/σημείο Γ του Σχήματος 4.4(β)) ισχύει επίσης η ακόλουθη εξίσωση για την ακτίνα της επιφάνειας επαφής:

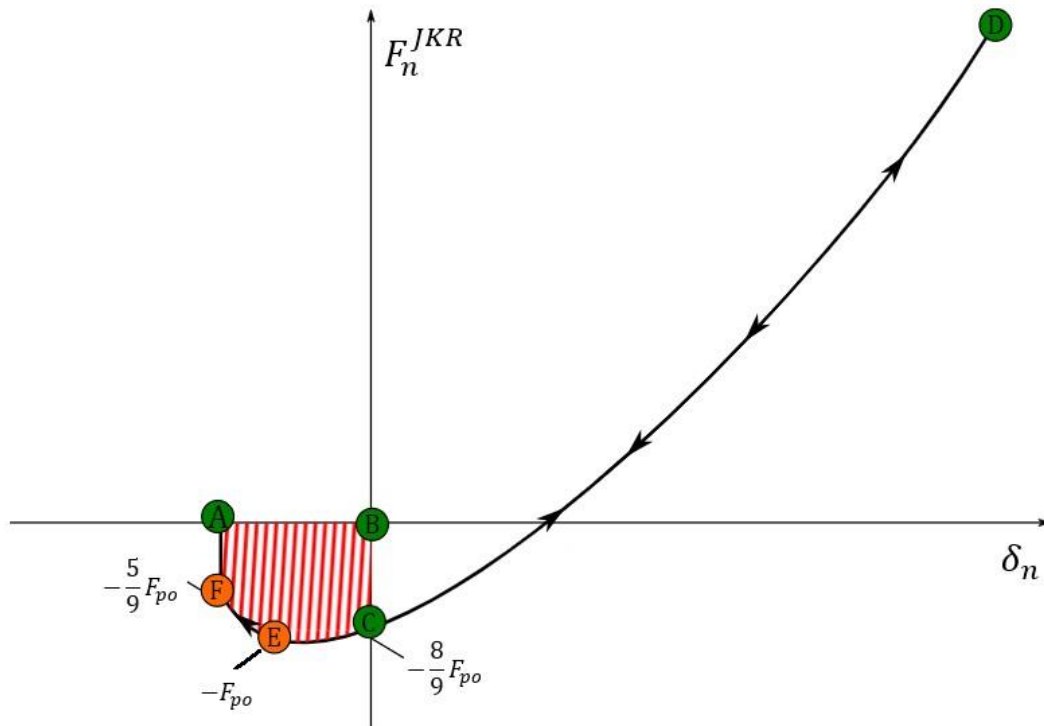
$$(4.38) \xrightarrow{\delta_{n,C}=0,(4.39)} \frac{a_C}{a_0} = \left(\frac{2}{3}\right)^{2/3} \quad (4.42)$$

Στη συνέχεια, αρχίζει το στάδιο της φόρτισης, όταν οι δύο σφαίρες παραμορφώνονται ελαστικά, συμπιέζοντας η μία την άλλη, όπως δείχνει το Σχήμα 4.3. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, τελικά τα δύο σωματίδια επιτυγχάνουν μια κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μια κατάσταση όπου η κάθετη δύναμη που ασκείται το ένα στο άλλο είναι μηδέν (σημείο 4 του Σχήματος 4.4(α)), όπως περιγράφεται στην Εξίσωση (4.43).

$$\frac{F_{n,EQ}^{JKR}}{F_{po}} = 0 \quad (4.43)$$



a



b

Σχήμα 4.4: (a) Επεξήγηση των 4 κρίσιμων στιγμών του μοντέλου επαφής JKR για συνεκτικές, ελαστικές επαφές (επαφή, ισορροπία, απομάκρυνση, αποκόλληση) [199]; (b) Οπτική απεικόνιση του έργου της πρόσφυσης μεταξύ των δύο επιφανειών και της σειράς εξέλιξης της επαφής [200].

Στο σημείο ισορροπίας ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις

$$(4.34) \xrightarrow{(4.43)} \frac{\delta_{n,EQ}}{\delta_{to}} = \left(\frac{4}{3}\right)^{2/3} \quad (4.44)$$

$$\frac{a_{EQ}}{a_0} = 1 \quad (4.45)$$

Μετά την ισορροπία, η φόρτιση συνεχίζεται, αλλά η συμπίεση τώρα επιβραδύνεται αντί να επιταχύνεται, καθώς η δύναμη είναι τώρα θετική, πράγμα που σημαίνει ότι οι δύο σφαίρες τώρα απωθούνται και οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτές μέσω της συμπεριφοράς τους ως μη γραμμικά ελατήρια ξεπερνούν τις ελκτικές δυνάμεις Van der Waals. Τελικά, η επιβράδυνση αναγκάζει τη συμπίεση να φτάσει σε ένα μέγιστο σημείο, το οποίο είναι το σημείο D του Σχήματος 4.4(β).

Στη συνέχεια, δεδομένου ότι θεωρείται ότι δεν υπάρχει πλαστική παραμόρφωση, η σχετική προσέγγιση αρχίζει να γίνεται μικρότερη, καθώς οι σφαίρες αρχίζουν να επιταχύνονται προς την αντίθετη κατεύθυνση, με τα κέντρα τους να απομακρύνονται μεταξύ τους. Το διάγραμμα δύναμης συναρτήσει της σχετικής προσέγγισης ακολουθεί την ίδια καμπύλη, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό είναι το στάδιο αποφόρτισης, όπου η αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Μόλις η σχετική προσέγγιση μηδενιστεί και πάλι, στο σημείο 3 ή C του Σχήματος 4.4(α) ή του Σχήματος 4.4(β) αντίστοιχα, ανακτάται όλο το έργο που έγινε κατά το στάδιο της φόρτισης.

Ωστόσο, δεδομένου ότι τα δύο σώματα εξακολουθούν να βρίσκονται σε συνεκτική επαφή, πρέπει να προσδοθεί επιπλέον έργο προκειμένου να διαχωριστούν. Το έργο αυτό, που ονομάζεται W_{adh} , δίνεται από την περιοχή που επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα, στο Σχήμα 4.4(β). Αρχικά, η σχετική προσέγγιση αρχίζει να παίρνει αρνητικές τιμές και εμφανίζεται το φαινόμενο του "λαιμού". Τελικά, στο σημείο "απομάκρυνσης" (σημείο 2 ή σημείο E στο Σχήμα 4.4(α) ή στο Σχήμα 4.4(β) αντίστοιχα), η δύναμη λαμβάνει μέγιστη αρνητική τιμή και ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{F_{n,E}^{JKR}}{F_{po}} = -1 \quad (4.46)$$

$$(4.34) \xrightarrow{(4.46)} \frac{\delta_{po}}{\delta_{to}} = -\left(\frac{1}{3}\right)^{2/3} \quad (4.47)$$

$$(4.37) \xrightarrow{F_{n,E}^{JKR} = -F_{po}, (4.35), (4.39)} \frac{a_{po}}{a_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{2/3} \quad (4.48)$$

Εάν το σύστημα ελέγχεται από το φορτίο, τότε η κατάσταση γίνεται ασταθής στο σημείο απομάκρυνσης που περιγράφεται παραπάνω. Ωστόσο, οι προσομοιώσεις σωματιδιακών συστημάτων ελέγχονται πάντοτε από τη μετατόπιση, επομένως ο δεσμός σπάει στο σημείο αποκόλλησης (σημείο 1 ή F του Σχήματος 4.4(α) ή του Σχήματος 4.4(β) αντίστοιχα) [201]. Στο σημείο αποκόλλησης ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\delta_{n,F}}{\delta_{to}} = -1 \quad (4.49)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος της Εξίσωσης (4.34) είναι $\frac{\delta_n}{\delta_{to}} \geq \frac{\delta_{po}}{\delta_{to}} = -\left(\frac{1}{3}\right)^{2/3} \cong -0.481$, οπότε είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί η εν λόγω Εξίσωση για τον υπολογισμό των σημείων του διαγράμματος JKR που βρίσκονται μεταξύ των σημείων απομάκρυνσης και αποκόλλησης.

$$\frac{F_{n,to}^{JKR}}{F_{po}} = -\frac{5}{9} \quad (4.50)$$

$$\frac{a_{to}}{a_0} = \left(\frac{1}{6}\right)^{2/3} \quad (4.51)$$

Τέλος, το πρόσθετο έργο πρόσφυσης που απαιτείται για τη διακοπή της επαφής δίνεται από την Εξίσωση (4.52):

$$W_{adh} = \int_{\delta_n=0}^{\delta_n=\delta_{to}} F_n^{JKR}(\delta_n) d\delta_n = \int_{a=a_c}^{a=a_{to}} F_n^{JKR}(a) \frac{d\delta_n}{da} da \quad (4.52)$$

Με βάση τις (4.37), (4.38), (4.39), (4.42) και (4.51), η Εξίσωση (4.52) δίνει:

$$W_{adh} = \int_{a=\left(\frac{2}{3}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{9\pi\Gamma R^*2}{2E^*}}}^{a=\left(\frac{1}{6}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{9\pi\Gamma R^*2}{2E^*}}} \left[\frac{4E^* a^3}{3R^*} - (8\pi E^* \Gamma a^3)^{1/2} \right] \cdot \left[\frac{2a}{R^*} - \left(\frac{2\pi\Gamma}{4E^* a} \right)^{1/2} \right] da \Rightarrow$$

$$\Rightarrow W_{adh} = \frac{8E^*}{15R^{*2}} (a_{to}^5 - a_c^5) - \frac{4\sqrt{2\pi\Gamma E^*}}{3R^*} (a_{to}^{7/2} - a_c^{7/2}) + \pi\Gamma (a_{to}^2 - a_c^2) \quad (4.53)$$

Με

$$a_{to} = \left(\frac{1}{6}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{9\pi\Gamma R^*2}{2E^*}}$$

Και

$$a_c = \left(\frac{2}{3}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{9\pi\Gamma R^*2}{2E^*}}$$

Αφού εξηγήσουμε τους μηχανισμούς πίσω από το μοντέλο JKR, θα ακολουθήσει η αιτιολόγηση του λόγου για τον οποίο επιλέχθηκε αυτό το μοντέλο επαφής.

Παρόλο που οι επιστήμονες αρχικά πίστευαν ότι τα δύο μοντέλα (JKR και DMT) ήταν ανταγωνιστικά μεταξύ τους, σύντομα άρχισαν να πιστεύουν ότι αποτελούν όρια ενός εύρους λύσεων που διέπονται από τη μη διαστατική, παράμετρο Tabor μ , η οποία φαίνεται στην Εξίσωση (4.54) [192]. Οι Grierson et al. (2005) [202] αναφέρουν ότι "η παράμετρος Tabor είναι φυσικά ισοδύναμη με το λόγο μεταξύ της κανονικής ελαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από την πρόσφυση (δηλαδή, απουσία εφαρμοζόμενου φορτίου) και του χωρικού εύρους των ίδιων των δυνάμεων πρόσφυσης".

$$\mu = \left(\frac{R^*\Gamma^2}{E^*z_0^3}\right)^{1/3} \quad (4.54)$$

Στην εξίσωση (4.54), z_0 είναι ο διαχωρισμός ισορροπίας στο δυναμικό Lennard-Jones, Γ είναι το έργο πρόσφυσης, το οποίο δίνεται ως εξής

$$\Gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (4.55)$$

Όπου γ_1 και γ_2 είναι οι επιφανειακές ενέργειες των δύο σωμάτων που έρχονται σε επαφή και γ_{12} είναι η ενέργεια της διεπιφάνειας. Στην περίπτωση που δύο σωματίδια του ίδιου υλικού βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους, η ενέργεια διεπιφάνειας είναι μηδέν και η εξίσωση (4.55) δίνει $\Gamma=2\gamma$, αφού $\gamma_1=\gamma_2=\gamma$.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές απόψεις σχετικά με τις περιοχές των τιμών των παραμέτρων Tabor και ποιο μοντέλο πρόσφυσης επαφής είναι εφαρμόσιμο σε κάθε περιοχή. Ο Thornton [192] προτείνει ότι γενικά, για $\mu < 0,1$, το μοντέλο DMT είναι κατάλληλο, ενώ για $\mu > 5$ προτιμάται η θεωρία JKR. Για τις τιμές που βρίσκονται στην ενδιάμεση περιοχή, ο Maugis (1992) έχει αναπτύξει μια αναλυτική προσέγγιση [203], την προσέγγιση Maugis-Dugdale (MD), ωστόσο είναι αναλυτική, άρα πολύ πιο περίπλοκη από τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα. Παρ' όλα αυτά, έχει αποδειχθεί ότι η προσέγγιση Maugis είναι ακριβής σε όλες τις περιοχές της παραμέτρου Tabor [204],

ενώ οι JKR και DMT είναι οι προσεγγίσεις MD σε υψηλές και χαμηλές τιμές της παραμέτρου Tabor αντίστοιχα. Ο Greenwood (1997), αφού συνέκρινε την επίδραση της παραμέτρου Tabor στη συμφωνία μεταξύ του αναλυτικού μοντέλου των Maugis-Dugdale και των προβλέψεων του μοντέλου JKR/DMT, αναφέρει ότι, για τιμές $\mu \geq 3$, η θεωρία JKR αποτελεί καλή προσέγγιση της πραγματικής ακτίνας επαφής, που ορίζεται ως η θέση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης. Τα σχήματα και οι κατανομές πίεσης βρίσκονται επίσης σε συμφωνία με αυτές που προβλέπει η θεωρία JKR [205].

Ο Greenwood αποδεικνύει επίσης ότι η θεωρία DMT είναι "λανθασμένη στη θεωρία και στην πράξη" (Greenwood, 2017) [205]. Αντ' αυτού, η εξίσωση Bradley-Derjaguin (4.56) περιγράφει με ακρίβεια τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το εφελκυστικό φορτίο σε σχέση με τον διαχωρισμό. Η εξίσωση (4.56) είναι ακριβής για όλες τις τιμές του μ για μεγάλους θετικούς διαχωρισμούς και είναι ακριβής ακόμη και για αρνητικούς διαχωρισμούς, για μικρές τιμές του μ [205].

$$T(\delta_n) = 2\pi R^* \Gamma \left[\frac{4}{3} \left(\frac{z_0}{\delta_n} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{z_0}{\delta_n} \right)^8 \right] \quad (4.56)$$

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο, από εδώ και στο εξής, στην παρούσα εργασία, ο συγγραφέας δεν θα αναφέρεται στο DMT, αλλά στο μοντέλο Bradley-Derjaguin, για μικρές τιμές της παραμέτρου Tabor. Η εφαρμογή του μοντέλου MD σε μια προσομοίωση DEM θα αύξανε δραστικά το χρόνο προσομοίωσης, καθώς η μέθοδος περιλαμβάνει πολύ περισσότερες εξισώσεις και μαθηματικούς υπολογισμούς. Γενικά, το μοντέλο JKR εφαρμόζεται για υλικά μεγάλης διαμέτρου, πιο εύκαμπτα (μικρότερο μέτρο ελαστικότητας Young), ενώ το μοντέλο DMT προτιμάται για μικρότερα σώματα από πιο άκαμπτα υλικά (μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας Young) [204]. Προκειμένου να εξεταστεί ποιο μοντέλο πρέπει να επιλεγεί, ήταν απαραίτητο να υπολογιστούν οι τιμές των παραμέτρων Tabor για τα σωματίδια α-αλουμίνας, ως εξής:

Η επιφανειακή ενέργεια της άμορφης αλουμίνας ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) είναι $\gamma_{\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3} = 0.97 \pm 0.04 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$ [206]. Ωστόσο, η τιμή αυτή αναφέρεται σε νανοσωματίδια με διάμετρο μεταξύ 2-5 nm και ισχύει για επιφάνειες μεγαλύτερες από 370 m²/g. Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 δείχνει πώς μεταβάλλεται η επιφάνεια των σφαιρικών σωματιδίων αλουμίνας με τη μεταβολή της διαμέτρου του σωματιδίου. Είναι γνωστό ότι η επιφανειακή ενέργεια εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, με τη γενική παραδοχή να είναι ότι μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων [207].

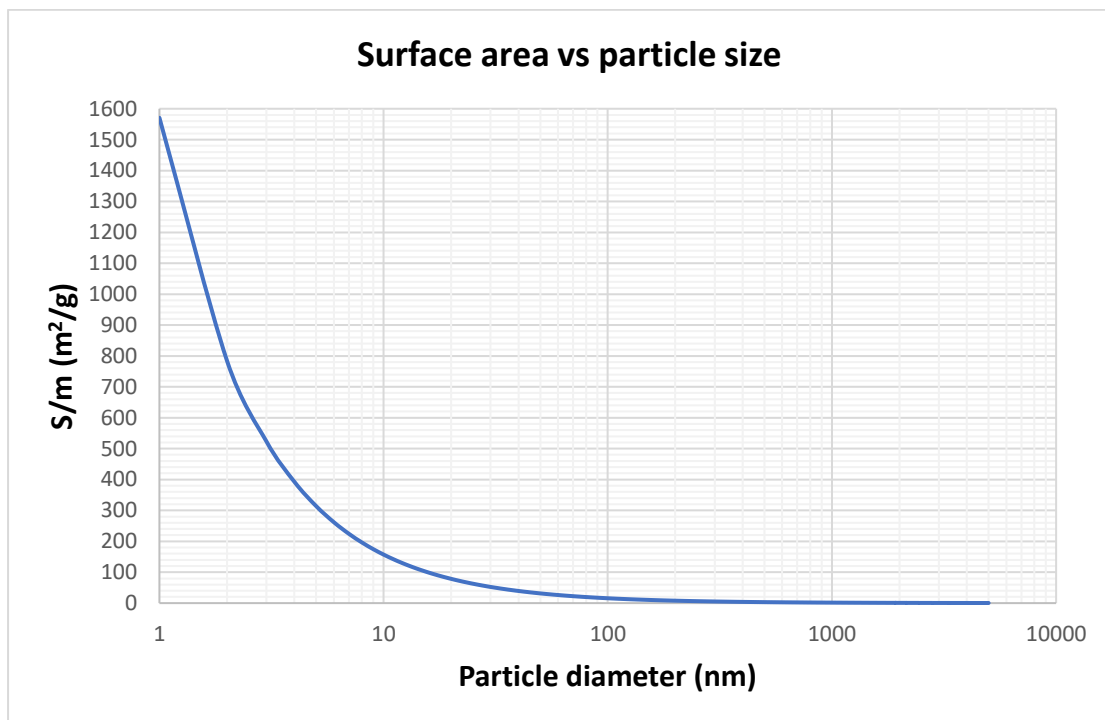
Αυτό δικαιολογείται, καθώς ο αριθμός των επόμενων γειτόνων των επιφανειακών ατόμων μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων [207].

Οι Teresch et al. (2000) υπολόγισαν την επιφανειακή ενέργεια της στοιχειομετρικής (1-Al-τελική) άμορφης αλουμίνας ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ως $\gamma_{\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3} = 2.13 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$ [208]. Αυτή η επιφάνεια είναι η πιο σταθερή έκφραση της α -αλουμίνας. Πράγματι, η τιμή αυτή έρχεται σε συμφωνία με τον εμπειρικό κανόνα ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος των σωματιδίων, αυξάνεται και η επιφανειακή ενέργεια. Επομένως, για δύο σωματίδια α -αλουμίνας που έρχονται σε επαφή, $\Gamma \cong 4.26 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$.

Τα R^* και E^* υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.24) και (4.26) αντίστοιχα, αντικαθιστώντας τα $E_1=E_2=E$ και $\nu_1=\nu_2=\nu$, συνεπώς λαμβάνοντας

$$R^* = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.57)$$

$$E^* = \frac{E}{2(1 - \nu^2)} \quad (4.58)$$



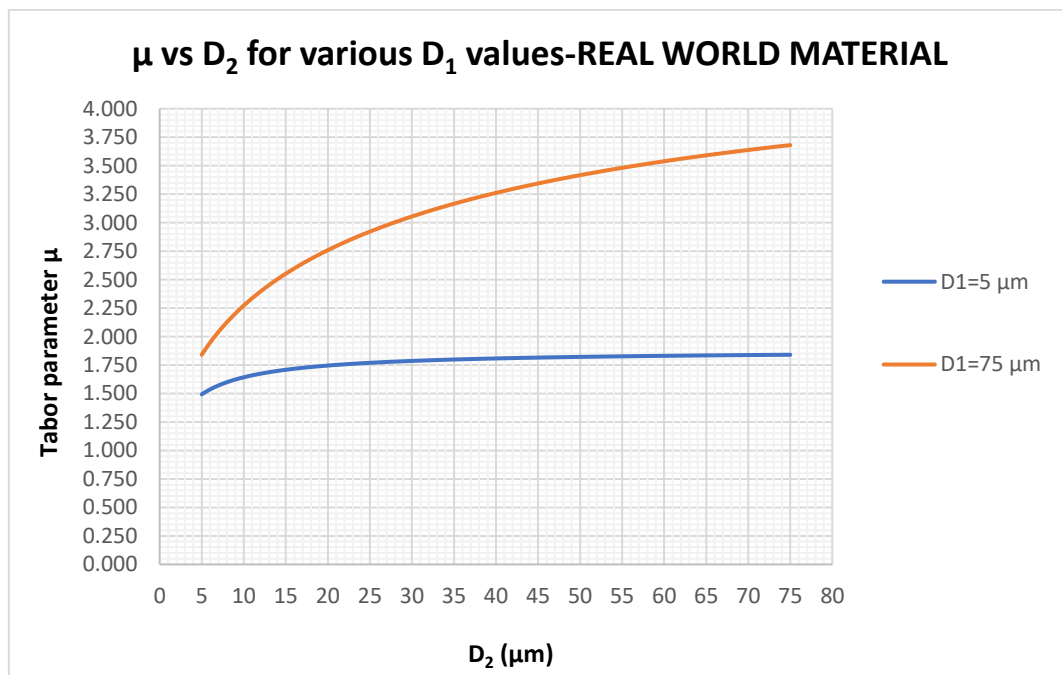
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα της επιφάνειας σε σχέση με τη διάμετρο των σωματιδίων για σφαιρικά σωματίδια α -αλουμίνας.

Τέλος, ο διαχωρισμός ισορροπίας στο δυναμικό Lennard-Jones για το $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ είναι $z_{0\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3} = 5.1 \text{ \AA} = 5.1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ [209]. Το διάγραμμα του Σχήματος 4.6 δείχνει πώς μεταβάλλεται η τιμή της παραμέτρου Tabor ανάλογα με τη διάμετρο των δύο

σφαιρικών σωματιδίων α-αλουμίνας που βρίσκονται σε επαφή. Ας σημειωθεί ότι το μέτρο διάτμησης ρυθμίζεται σε $1,29 \cdot 10^{11}$ Pa, έτσι ώστε, σε συνδυασμό με λόγο Poisson 0,3, το μέτρο Young είναι το μέγιστο εντός του ορίου που προβλέπεται στο [185], δηλαδή 413 GPa.

Μπορεί να υποθεθεί ότι η παράμετρος Tabor μ αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων. Εάν το πρώτο από τα δύο σωματίδια που βρίσκονται σε επαφή έχει διάμετρο 5 μm , τότε οι τιμές της παραμέτρου Tabor κυμαίνονται μεταξύ 1,492 και 1,840 για τη διάμετρο του δεύτερου σωματιδίου που είναι 5 και 75 μm αντίστοιχα. Εάν όμως η διάμετρος του πρώτου σωματιδίου είναι 75 μm , οι τιμές της παραμέτρου Tabor κυμαίνονται μεταξύ 1,840 και 3,681 για τη διάμετρο του δεύτερου σωματιδίου που είναι 5 και 75 μm αντίστοιχα.

Ο Greenwood [205] υποδεικνύει ότι, καθώς αυξάνεται η παράμετρος Tabor, η δύναμη απομάκρυνσης, δηλαδή η δύναμη που απαιτείται για τον διαχωρισμό δύο σφαιρών μειώνεται σταθερά από την τιμή Bradley ($2\pi R^* \Gamma$) προς την τιμή JKR ($\frac{3}{2}\pi R^* \Gamma$). Για $\mu \geq 3$, το μοντέλο JKR είναι ακριβές [210], για $2 \leq \mu \leq 3$ οι καμπύλες διαχωρισμού δύναμης μοιάζουν με ένα υβρίδιο της προσέγγισης JKR για θετικές και οριακά αρνητικές τιμές προσέγγισης και της καμπύλης Bradley για μεγάλες αρνητικές διαχωριστικές τιμές, ενώ για $\mu \leq 0,2$ προσεγγίζουν την καμπύλη Bradley στην περιοχή εφελκυσμού.



Σχήμα 4.6: Καμπύλη της παραμέτρου Tabor συναρτήσει της διαμέτρου του δεύτερου σωματιδίου, για τις δύο ακραίες τιμές της διαμέτρου του πρώτου αντικειμένου.

Κρίνοντας από το Σχήμα 4.6, μπορεί να συναχθεί ότι, για το υλικό του πραγματικού κόσμου, σχεδόν όλες οι επαφές των μεγαλύτερων σωματιδίων (με διάμετρο περίπου 60-75 μm) θα μπορούσαν να μοντελοποιηθούν μέσω JKR ή τουλάχιστον μέσω υβριδικού JKR, όπως προτείνει ο Greenwood για τις τιμές $\mu \geq 2$. Ωστόσο, για τα μικρότερα σωματίδια (διαμέτρου περίπου 5-15 μm), η εξίσωση Bradley-Derjaguin (4.56) ή ακόμη και η αναλυτική προσέγγιση MD θα ήταν καλύτερη. Η προσέγγιση MD θα καθιστούσε την προσομοίωση πολύ πιο αργή, ωστόσο, τα μοντέλα Bradley-Derjaguin και τα υβριδικά μοντέλα JKR θα ήταν ωφέλιμα σε περιοχές όπου η JKR φαίνεται να αποκλίνει σημαντικά από την αναλυτική λύση του προβλήματος της συνεκτικής ελαστικής επαφής.

Στις δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, προκειμένου να καθοριστεί ποια τιμή του μέτρου διάτμησης θα χρησιμοποιούνταν στις σειρές προσομοιώσεων, το μέτρο διάτμησης και, συνεπώς, το μέτρο Young μεταβλήθηκε από την πραγματική του τιμή σε μια τιμή 4 τάξεις μεγέθους μικρότερη. Η τιμή της παραμέτρου Tabor αυξάνεται με τη μείωση του σχετικού μέτρου ελαστικότητας (E^*), λαμβάνοντας μεγαλύτερες τιμές κατά 3 τάξεις μεγέθους. Ως εκ τούτου, η επιλογή του μοντέλου "Hertz-Mindlin with JKR v2" στο λογισμικό EDEM είναι απολύτως δικαιολογημένη.

Στο Σχήμα 4.2(γ), υπάρχει ένα πεδίο που ονομάζεται "Contact radius". Η μεταβλητή αυτή θα ονομάζεται από εδώ και στο εξής $R_{c,EDEM}$ και δίνεται από την εξίσωση (4.59).

$$R_{c,EDEM} \geq R_{particle} + |\delta_{to}| \quad (4.59)$$

Όπου η $R_{particle}$ αναφέρεται στη μέση ακτίνα σωματιδίου, όπως δίνεται στο πεδίο "Physical Radius" του Σχήματος 4.2(γ) και δ_{to} είναι η σχετική προσέγγιση των δύο σωματιδίων σε επαφή (και τα δύο ακτίνας ίσης με $R_{particle}$) κατά την οποία η επαφή σπάει, με το "to" να σημαίνει "αποκόλληση" (tear-off). Η σχετική προσέγγιση τη στιγμή της αποκόλλησης δίνεται από την εξίσωση (4.60) [192].

$$\delta_{to} = \left(\frac{3F_{po}^2}{16R^*E^{*2}} \right)^{1/3} \quad (4.60)$$

Με F_{po} τη μέγιστη εφελκυστική δύναμη που απαιτείται για τη διακοπή της επαφής μεταξύ των δύο σωματιδίων (δηλαδή τη "δύναμη απομάκρυνσης"- "pull-off force"), η

οποία δίνεται από τις εξισώσεις (4.61) και (4.62) για τα μοντέλα JKR και Bradley (ή DMT) αντίστοιχα [192].

$$F_{po}^{JKR} = \frac{3}{2} \pi R^* \Gamma \quad (4.61)$$

$$F_{po}^{Bradley} = 2\pi R^* \Gamma \quad (4.62)$$

Τέλος, η εξίσωση (4.60), αφού αντικατασταθεί από τις εξισώσεις (4.61), (4.57) και (4.58), παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (4.63):

$$\delta_{to} = \sqrt[3]{\frac{16.655 R_1 R_2 \Gamma^2 (1 - \nu^2)^2}{(R_1 + R_2) E^2}} \quad (4.63)$$

Και, για $R_1 = R_2 = R_{ave} = 25 \mu m$, η (4.63) γράφεται ως:

$$\delta_{to} = \sqrt[3]{\frac{8.327 R_{ave} \Gamma^2 (1 - \nu^2)^2}{E^2}} \quad (4.64)$$

Συνεπώς, ο Πίνακας 4.4 σχηματίζεται, ως εξής:

Πίνακας 4.4: Υπολογισμένη σχετική προσέγγιση και παράμετρος Tabor για διαφορετικές τιμές μέτρου διάτμησης.

CASE	G (Pa)	ν	E (Pa)	E* (Pa)	R _{ave} (μm)	R* (μm)	$\Gamma \left(\frac{J}{m^2} \right)$	z ₀ (Å)	δ _{to} (μm)	μ
SIM – 1	1 · 10 ⁷	0.3	3.2 · 10 ⁷	1.76 · 10 ⁷	25	12.5	4.26	5.1	1.451	1768.56
SIM – 2	1.5 · 10 ⁸	0.3	4.8 · 10 ⁸	2.64 · 10 ⁸	25	12.5	4.26	5.1	0.239	290.78
RW – 3	1.29 · 10 ¹¹	0.3	4.13 · 10 ¹¹	2.27 · 10 ¹¹	25	12.5	4.26	5.1	0.003	3.22

Ψάχνοντας στη βιβλιογραφία και στα σεμινάρια του λογισμικού EDEM, παραμένει ασαφές και, εξ όσων γνωρίζει ο συγγραφέας, αδοκίμαστο, αν η ρύθμιση της ακτίνας επαφής πρέπει να επιλέγεται με βάση την τιμή του μέτρου διάτμησης του πραγματικού υλικού ή με βάση την τιμή του μέτρου διάτμησης που έχει οριστεί στο περιβάλλον προσομοίωσης, προκειμένου να αυξηθεί το χρονικό βήμα. Ως εκ τούτου, συγκρίθηκαν τρεις περιπτώσεις, προκειμένου να εξεταστούν οι διαφορές. Εξετάζοντας την παράμετρο Tabor για κάθε περίπτωση, παρατηρείται ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η δυσκαμψία του σωματιδίου, τόσο μικρότερη είναι η σχετική προσέγγισή τη στιγμή

θραύσης του δεσμού. Πράγματι, όταν το υλικό γίνεται λιγότερο εύκαμπτο και χάνει την ελαστικότητά του, που υποδηλώνεται από την αύξηση κατά 4 τάξεις μεγέθους του μέτρου ελαστικότητας Young, η παράμετρος Tabor μειώνεται κατά 3 τάξεις μεγέθους, από 1768,56 σε 3,22, ενώ η αντίστοιχη προσέγγιση στη στιγμή θραύσης του δεσμού μειώνεται επίσης από περίπου 1,5 μm σε περίπου 3 nm.

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι η ακτίνα επαφής του EDEM δεν εξετάζει αν δύο σωματίδια ή ένα σωματίδιο και ένα σώμα στην προσομοίωση έχουν πλησιάσει αρκετά το ένα το άλλο ώστε να ασκηθούν δυνάμεις πρόσφυσης/συγκόλλησης. Αυτή είναι μια κοινή παρανόηση που πρέπει να διευκρινιστεί. Προκειμένου να εφαρμοστούν οι δυνάμεις πρόσφυσης/συγκόλλησης, δύο σωματίδια ή ένα σωματίδιο και ένα γεωμετρικό σώμα πρέπει πρώτα να έρθουν σε φυσική επαφή. Αυτός ο έλεγχος γίνεται μέσω των φυσικών ακτίνων των δύο σωμάτων. Ωστόσο, η ακτίνα επαφής δημιουργεί μια ζώνη γύρω από κάθε σωματίδιο όπου είναι δυνατή η αρνητική προσέγγιση. Καθώς τα δύο σωματίδια συγκρούονται, επιδεικνύουν ταυτόχρονα την ενδοτικότητα/ελαστικότητά τους και τη συνοχή τους. Η ορμή τους δημιουργεί μια δύναμη σύγκρουσης και συμπεριφέρονται σαν ελατήρια, αρχικά με θετική προσέγγιση, όπου επιβραδύνονται καθώς παραμορφώνονται όλο και περισσότερο. Ωστόσο, αυτή η σύγκρουση είναι λιγότερο "βίαιη" και επιβραδύνονται πιο αργά απ' ό,τι θα επιβραδύνονταν αν δεν υπήρχαν οι δυνάμεις συνοχής, αφού τώρα έλκονται μεταξύ τους λόγω των δυνάμεων Van der Waals. Τελικά, η προσέγγιση θα σταματήσει να αυξάνεται και θα μειωθεί και πάλι, ωστόσο, όταν μηδενιστεί, τα σωματίδια δεν θα διαχωριστούν, αλλά θα αναπτυχθεί το "φαινόμενο του λαιμού", αφού τα σωματίδια θα παραμείνουν σε επαφή λόγω των δυνάμεων συνοχής και απαιτείται περαιτέρω έργο προκειμένου να δημιουργηθούν δύο νέες, διαχωρισμένες επιφάνειες. Το Σχήμα 4.4 εξηγεί τα στάδια μιας επαφής μεταξύ δύο σωματιδίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα επαφής του EDEM, τόσο μεγαλύτερη είναι η αρνητική προσέγγιση που θα επιτρέψει, άρα τόσο μεγαλύτερη είναι η "ζώνη επιρροής" που θα δημιουργήσει το κάθε σωματίδιο γύρω του, εντός της οποίας θα δράσουν ελκτικές δυνάμεις πρόσφυσης. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα επαφής του EDEM, τόσο πιο συνεκτική συμπεριφορά θα παρουσιάζει η σκόνη. Το υλικό του πραγματικού κόσμου είναι πολύ πιο άκαμπτο και λιγότερο συνεκτικό σε σύγκριση με αυτό των προσομοιώσεων. Για τις προσομοιώσεις, η τιμή της ακτίνας επαφής είναι 26 μm , η οποία θα ίσχυε στην περίπτωση που η σχετική προσέγγιση κατά τη θραύση του δεσμού θα ήταν 1 μm . Αυτή η τιμή επιλέχθηκε

προκειμένου να στρογγυλοποιηθεί προς τα κάτω από την τιμή 26,451 που θα έπρεπε να έχει με βάση την τιμή που έχει οριστεί από την προσομοίωση για τον λόγο διάτμησης του υλικού. Αυτό κάνει το υλικό να παρουσιάζει μια συμπεριφορά πιο κοντά στην πραγματικότητα. Ωστόσο, η περαιτέρω σμίκρυνση θα προκαλούσε μεγάλη απόκλιση από την υπολογισμένη τιμή, γεγονός που θα δημιουργούσε ένα μη ρεαλιστικό υλικό με πολύ χαμηλή σχετική προσέγγιση στη θραύση του δεσμού παρά την πολύ υψηλή ελαστικότητά του. Επιπλέον, θέτοντας τη διαφορά μεταξύ της φυσικής ακτίνας και της ακτίνας επαφής του μέσου σωματιδίου στο 1 μm , η προσομοίωση είναι εύκολα κλιμακούμενη, ενώ η αυξημένη συνοχή καθιστά τη μελέτη αυτή "εκ του ασφαλούς", αφού, αν το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να αντιμετωπίσει τη συνοχή του υλικού προσομοίωσης, το υλικό του πραγματικού κόσμου θα είναι πολύ πιο εύκολο να απλωθεί ομοιόμορφα.

Έχει κάποιο ενδιαφέρον να εξετάσουμε τη διακύμανση της συμπεριφοράς των σωματιδίων στην προσομοίωση σε σχέση με τη συμπεριφορά τους στον πραγματικό κόσμο. Για το λόγο αυτό συμπληρώνεται ο Πίνακας 4.5.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5, το υλικό του πραγματικού κόσμου παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία και μικρότερη ενδοτικότητα, χάρη στο υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας Young. Αυτό αντικατοπτρίζεται επίσης στην υπολογιζόμενη παράμετρο Tabor για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4.5: Η σχέση των τιμών των παραμέτρων μεταξύ του πραγματικού κόσμου και του υλικού που ορίζεται από την προσομοίωση.

	<i>REAL-WORLD PARTICLES</i>	<i>SIMULATION PARTICLES</i>
<i>Young's modulus</i>	↑ (less elasticity)	↓ (more elasticity)
<i>Tabor's parameter</i>	<5 (less elasticity)	>100 (more elasticity)
<i>Suitable model for F_{po}</i>	Bradley ($2\pi R^* \Gamma$) (more cohesion)	JKR ($\frac{3}{2}\pi R^* \Gamma$) (less cohesion)
<i>Relative approach at bond breakage δ_{to} (μm)</i>	3nm (less cohesion)	1451nm (more cohesion)

(Σημείωση: Σε παρένθεση, αναφέρεται πώς η παράμετρος αυτή επηρεάζει τη συμπεριφορά της σκόνης σε σύγκριση με την αντίστοιχη.)

Το καταλληλότερο μοντέλο για να περιγράψει τα σωματίδια του πραγματικού κόσμου θα ήταν το μοντέλο δύναμης απομάκρυνσης Bradley, ενώ η προσομοίωση υλοποιεί μια δύναμη απομάκρυνσης JKR, η οποία είναι 25% χαμηλότερη. Αυτό σημαίνει ότι, παρά την υψηλότερη ακαμψία τους, η οποία μεταφράζεται σε συντομότερες συγκρούσεις μικρότερων παραμορφώσεων και σε πιο απότομα προφίλ δυνάμεων κατά την επαφή για τα σωματίδια του πραγματικού κόσμου, αυτά απαιτούν 25% μεγαλύτερη δύναμη απομάκρυνσης προκειμένου να ξεφύγουν από τις δυνάμεις συνάφειας των γειτονικών τους σωματιδίων, γεγονός που αντισταθμίζει ελαφρώς τη λιγότερο συνεκτική συμπεριφορά που επιδεικνύουν, η οποία είναι επίσης ορατή από την εξέταση της σχετικής προσέγγισης κατά τη θραύση του δεσμού.

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα το μέγεθος των δυνάμεων συνοχής, ας εξετάσουμε το απλό πρόβλημα δύο σφαιρικών σωματιδίων σε μια κανονική, κεντρική σύγκρουση, όπου το ένα από αυτά, το οποίο στο εξής θα ονομάζεται "Σωματίδιο 1" είναι χωρόδετο, δηλαδή ακίνητο και αμετακίνητο. Αυτό σημαίνει ότι διατηρείται στο ίδιο σημείο, ενώ αυτό που συγκρούεται πάνω του, το οποίο στο εξής θα ονομάζεται "Σωματίδιο 2", υφίσταται όλες τις επιδράσεις ορμής από τη σύγκρουση.

Τη στιγμή ακριβώς πριν από τη σύγκρουση, το σωματίδιο 1 είναι ακίνητο, δηλαδή $u_{1,before} = 0$, ενώ το σωματίδιο 2 το πλησιάζει με ταχύτητα $u_{2,before} > 0$. Μετά τη σύγκρουση, το σωματίδιο 1 παραμένει στην ίδια θέση, ακόμα ακίνητο, οπότε $u_{1,after} = 0$, ενώ το σωματίδιο 2 απομακρύνεται από το σωματίδιο 1, με ταχύτητα $u_{2,after} > 0$. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, το μοντέλο JKR προτείνει μια αρχική επαφή, στη συνέχεια ένα στάδιο φόρτισης, ακολουθούμενο από ένα στάδιο αποφόρτισης. Όταν το στάδιο αποφόρτισης φτάσει στο σημείο 3 ή C του Σχήματος 4.4(α) ή του Σχήματος 4.4(β) αντίστοιχα, δηλαδή στο σημείο μηδενικής σχετικής προσέγγισης, όλο το έργο που έγινε κατά το στάδιο φόρτισης ανακτάται, αφού δεν υπάρχει πλαστική παραμόρφωση. Το έργο της πρόσφυσης που καταναλώνεται προκειμένου το κινούμενο σωματίδιο να ξεφύγει από την προσκολλητική έλξη του άλλου σωματιδίου είναι η διαφορά μεταξύ της κινητικής ενέργειας του συστήματος πριν από τη σύγκρουση και μετά την αποκόλληση του δεσμού.

$$E_{before} = E_{after} \Rightarrow \frac{1}{2} m_2 u_{2,before}^2 = \frac{1}{2} m_2 u_{2,after}^2 + W_{adh} \Rightarrow$$

$$u_{2,after} = \sqrt{\frac{1}{m_2} (m_2 u_{2,before}^2 - 2W_{adh})} \quad (4.65)$$

Όπου το έργο της προσκόλλησης δίνεται από την εξίσωση (4.53).

Προκειμένου τα σωματίδια να σπάσουν τον συγκολλητικό τους δεσμό, το σωματίδιο 2 πρέπει να έχει $u_{2,before}$ μεγαλύτερο από ένα ορισμένο όριο, διαφορετικά τα δύο σωματίδια παραμένουν συγκολλημένα μεταξύ τους. Το κατώφλι αυτό υπολογίζεται εξασφαλίζοντας ότι η ποσότητα $\frac{1}{m_2}(m_2 u_{2,before}^2 - 2W_{adh})$ είναι θετική. Συνεπώς, το κριτήριο είναι

$$\frac{1}{m_2}(m_2 u_{2,before}^2 - 2W_{adh}) \geq 0 \Rightarrow u_{2,before} \geq \sqrt{\frac{2W_{adh}}{m_2}} \quad (4.66)$$

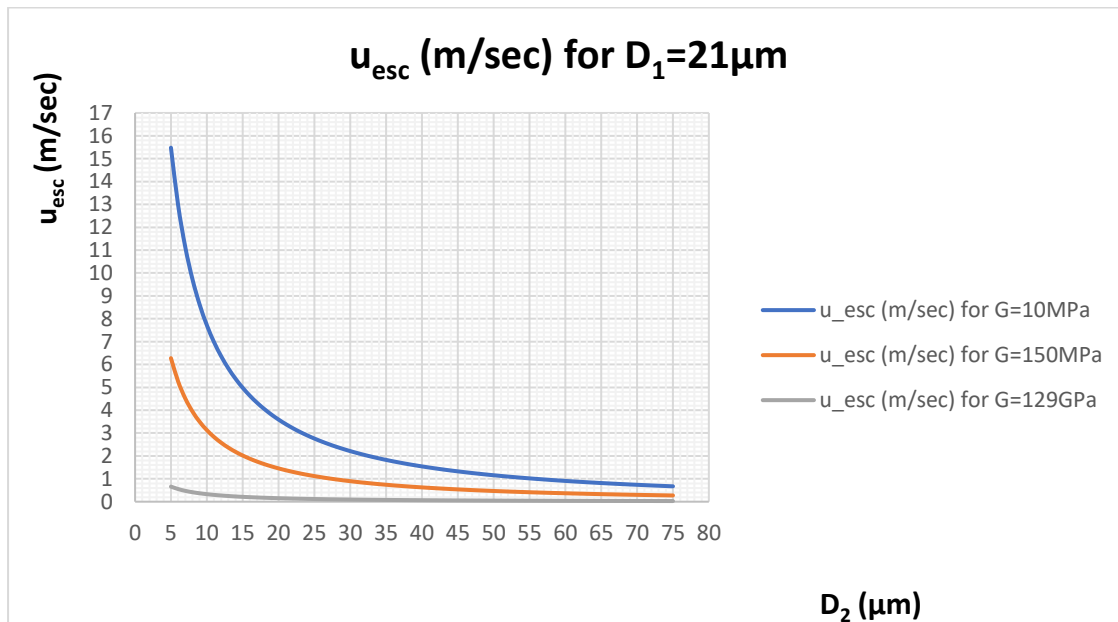
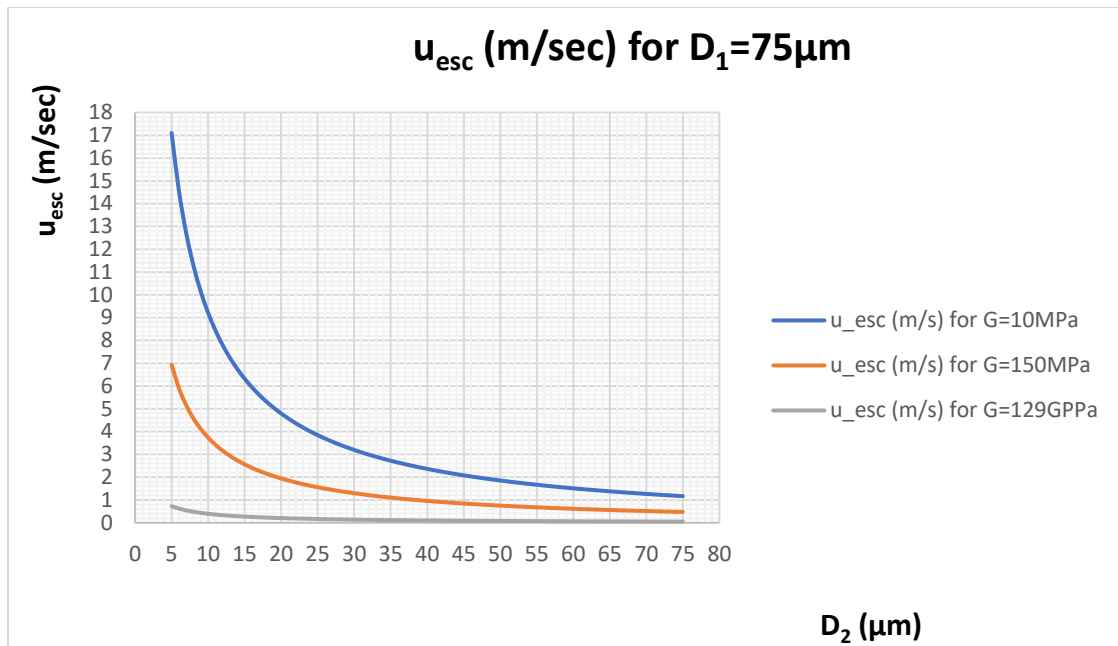
Έτσι, η ταχύτητα διαφυγής ορίζεται ως εξής

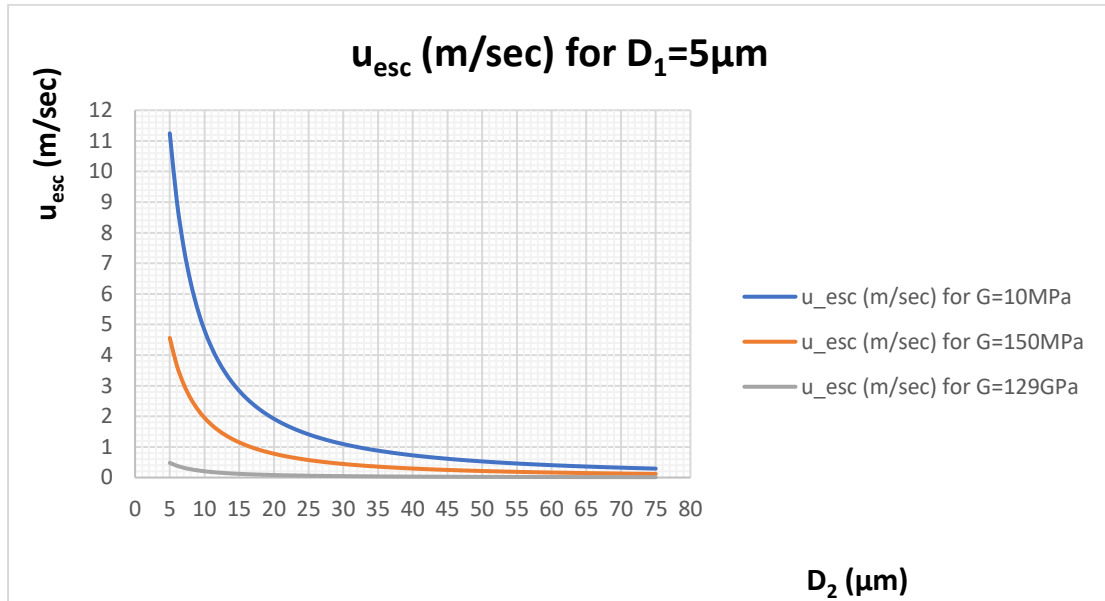
$$u_{esc} = \sqrt{\frac{2W_{adh}}{m_2}} \quad (4.67)$$

Εξετάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, χρησιμοποιώντας τη μέγιστη (D_{max}), την ελάχιστη (D_{min}) και τη μέση (D_{50}) διάμετρο με βάση την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, όπως αυτή ορίστηκε προηγουμένως:

- Σωματίδιο 1: $D_1 = D_{max} = 75 \mu\text{m}$ / Σωματίδιο 2: $D_2 = 5-75 \mu\text{m}$
- Σωματίδιο 1: $D_1 = D_{50} = 21 \mu\text{m}$ / Σωματίδιο 2: $D_2 = 5-75 \mu\text{m}$
- Σωματίδιο 1: $D_1 = D_{min} = 5 \mu\text{m}$ / Σωματίδιο 2: $D_2 = 5-75 \mu\text{m}$

(Σημείωση: Κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει 3 διαφορετικές καμπύλες, η καθεμία για διαφορετική τιμή του μέτρου διάτμησης.)





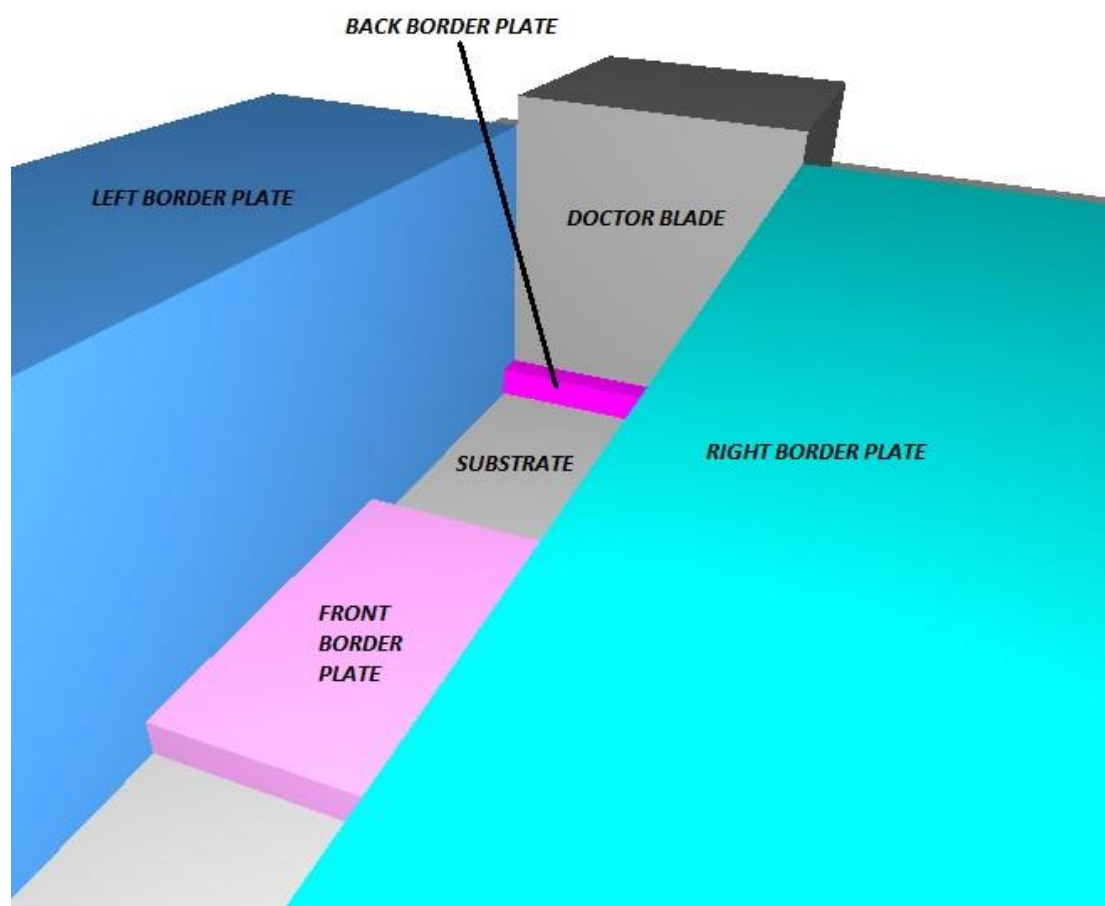
Σχήμα 4.7: Ταχύτητα διαφυγής για 3 διαφορετικές διαμέτρους του χωρόδετου σωματιδίου σε σχέση με τη διάμετρο του συγκρουόμενου σωματιδίου.

Κρίνοντας από τις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 4.7, είναι προφανές ότι, για μια καθορισμένη, σταθερή διάμετρο του χωρόδετου σωματιδίου, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του συγκρουόμενου σωματιδίου, τόσο πιο εύκολα μπορεί να ξεφύγει από την προσκολλητική έλξη μεταξύ των δύο. Επιπλέον, η καμπύλη κινείται χαμηλότερα όσο αυξάνεται το μέτρο διάτμησης, άρα και το μέτρο Young. Αυτό σημαίνει ότι, σωματίδια μεγαλύτερης δυσκαμψίας (λόγω υψηλότερου μέτρου Young), διαφεύγουν ευκολότερα από τον συγκολλητικό δεσμό.

Σε συνέχεια της προηγούμενης ανάλυσης, οι προσομοιώσεις θα ακολουθήσουν το μοντέλο Hertz-Mindlin με JKR, το οποίο εξηγήθηκε παραπάνω. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη συμπεριφορά των σωματιδίων υπό ελαστικές, συγκολλητικές αλληλεπιδράσεις.

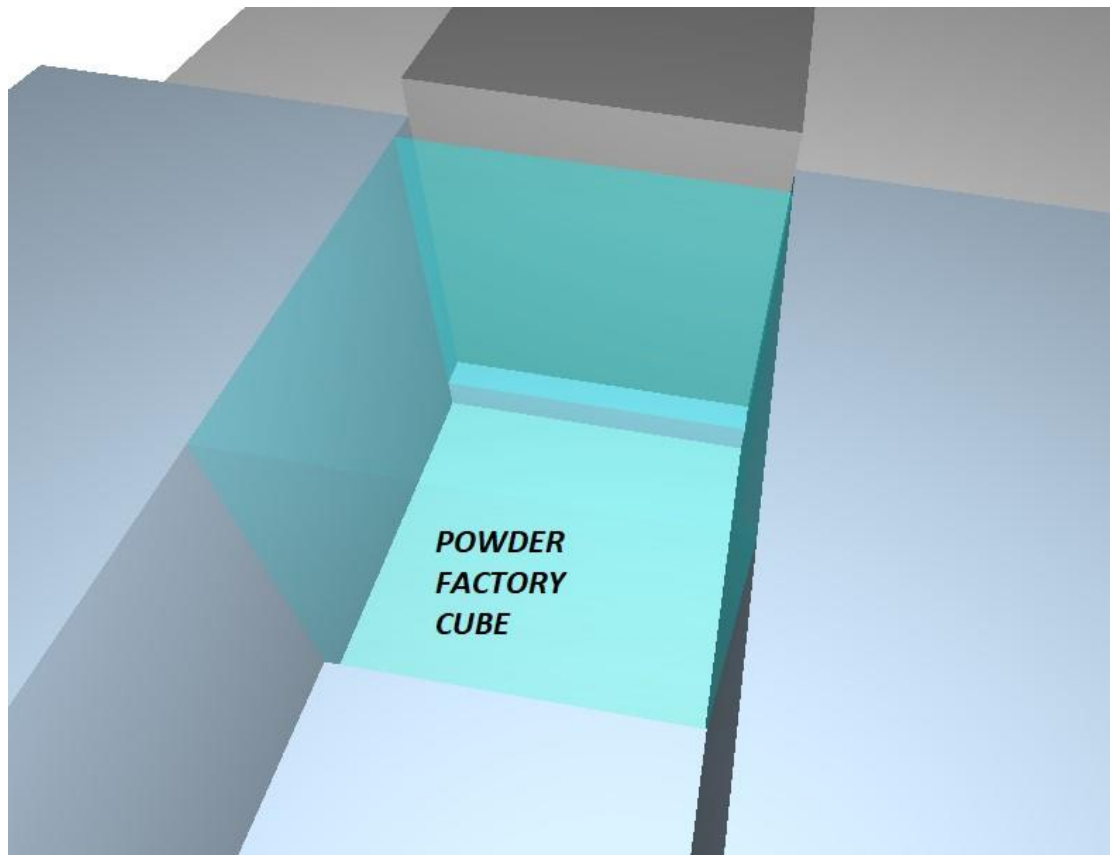
4.4 Γεωμετρία και Περιγραφή της Προσομοίωσης

Η προσομοίωση εναπόθεσης σκόνης διαθέτει 6 φυσικά σώματα και ένα εικονικό σχήμα, απαραίτητο για χρήση ως εργοστάσιο σκόνης. Τα 6 φυσικά σώματα είναι το υπόστρωμα πάνω στο οποίο εναποτίθεται η σκόνη, η λεπίδα που εκτελεί την εναπόθεση της σκόνης και 4 μεταλλικές πλάκες που χρησιμεύουν ως το αριστερό, το δεξί, το πίσω και το μπροστινό όριο του στρώματος σκόνης. Αυτά τα γεωμετρικά όρια δημιουργούν μια τετράγωνη περιοχή δείγματος με πλευρά 1 mm. Το ύψος των πλακών του πίσω και του μπροστινού ορίου είναι ίσο με το θεωρητικό πάχος του στρώματος, δηλαδή 100 μm, ενώ το ύψος των πλακών του δεξιού και του αριστερού ορίου είναι ίσο με 1 mm (βλ. Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Τα φυσικά σώματα της προσομοίωσης εξάπλωσης σκόνης: (α) Ανοιχτό γκρι-Πλατφόρμα κατασκευής υποστρώματος; (β) σκούρο γκρι-λεπίδα (γ) κυανό-δεξιά πλάκα ορίου- (δ) μπλε-αριστερή πλάκα ορίου- (ε) ματζέντα-πίσω πλάκα ορίου- (στ) ροζ-μπροστινή πλάκα ορίου.

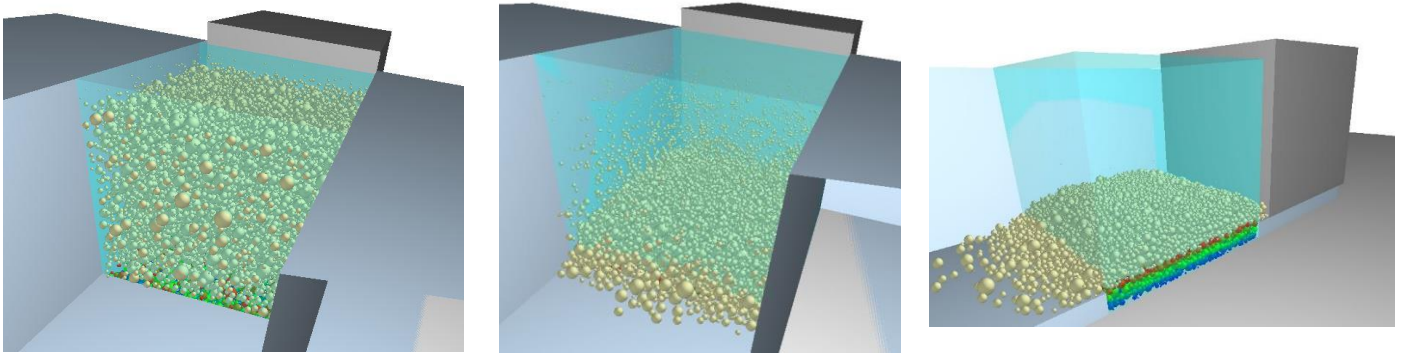
Πάνω από το τετράγωνο του δείγματος υπάρχει ένας εικονικός κύβος πλευράς 1 mm, ο οποίος λειτουργεί ως εργοστάσιο παραγωγής σκόνης (βλέπε *Σχήμα 4.9*). Η προσομοίωση έχει ρυθμιστεί να γεμίζει την περιοχή μέσα σε αυτόν τον εικονικό κύβο με σφαιρικά σωματίδια σκόνης με διάμετρο που ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή που περιγράφηκε σε προηγούμενες ενότητες. Η περιοχή αυτή συμπληρώνεται ταυτόχρονα για όλα τα σωματίδια κατά την έναρξη της προσομοίωσης, με μοναδικό περιορισμό ότι τα σωματίδια δεν πρέπει να βρίσκονται σε φυσική επαφή μεταξύ τους τη στιγμή της δημιουργίας τους.



Σχήμα 4.9: Ημι-διαφανής κυανός κύβος, ο οποίος λειτουργεί ως εργοστάσιο σκόνης.

Στη συνέχεια, τα σωματίδια αφήνονται να πέσουν κατακόρυφα πάνω στο τετράγωνο του δείγματος υπό την επίδραση της βαρύτητας, δημιουργώντας ένα λόφο μπροστά από τη λεπίδα που θα πραγματοποιήσει την εναπόθεση (βλέπε *Σχήμα 4.10*).

Όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 4.10*, όλα τα σωματίδια δημιουργούνται ταυτόχρονα. Τη στιγμή της δημιουργίας των σωματιδίων δεν υπάρχουν φυσικές επαφές μεταξύ δύο σωματιδίων. Στη συνέχεια, τα σωματίδια πέφτουν ελεύθερα πάνω στο υπόστρωμα, γεμίζοντας τον χώρο πάνω από το τετράγωνο του δείγματος.



Σχήμα 4.10: (Αριστερά) Ταυτόχρονη παραγωγή σωματιδίων σκόνης- (Μέση) Ελεύθερη πτώση των σωματιδίων στο υπόστρωμα- (Δεξιά) Ο λόφος έχει δημιουργηθεί- η εναπόθεση είναι έτοιμη να ξεκινήσει.

Τα μικρότερα σωματίδια πέφτουν πιο αργά σε σύγκριση με τα μεγαλύτερα, λόγω της επίδρασης της αντίστασης του αέρα. Η προσομοίωση διαθέτει φυσική βαρύτητα, με $\vec{g} = -9.81\hat{k} \text{ m/sec}^2$ και το μοντέλο αντίστασης Schiller-Naumann [211], [212], ενώ τα χαρακτηριστικά του αέρα είναι:

$$\begin{aligned}\rho_{air} &= 1.225 \text{ Kg/m}^3 \\ \nu_{air} &= 1.81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{sec} \\ \vec{u}_{air} &= 0\hat{i} + 0\hat{j} + 0\hat{k} \\ \text{scale} &= 1\end{aligned}$$

όπου ν_{air} είναι η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα, \vec{u}_{air} είναι η ταχύτητα του αέρα, υποδεικνύοντας ότι σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει ροή αέρα που θα επηρέαζε την κίνηση των σωματιδίων, και "scale=1" σημαίνει ότι το ποσό της αντίστασης που εφαρμόζεται σε κάθε σωματίδιο είναι το πλήρες ποσό σε σχέση με το μέγεθός του και όχι ένα κλάσμα αυτού.

Για τις προσομοιώσεις, το υλικό των φυσικών γεωμετριών είναι Stainless Steel 304, με τις ιδιότητές του να είναι [213]:

$$\begin{aligned}\rho_{St.304} &= 8000 \text{ Kg/m}^3 \\ \nu_{St.304} &= 0.275 \\ G_{St.304} &= 6.23 \cdot 10^{10} \text{ Pa} = 62.3 \text{ GPa} \\ E_{St.304} &= 1.93 \cdot 10^{11} \text{ Pa} = 193 \text{ GPa}\end{aligned}$$

Οι ιδιότητες του υλικού της σκόνης και οι συντελεστές αλληλεπίδρασης σκόνης-σκόνης και σκόνης-στερεών σωμάτων έχουν οριστεί όπως φαίνεται στην ενότητα 4.1 (Σχήμα 4.1).

Αφού δημιουργηθεί ο λόφος και όλα τα σωματίδια έχουν παγώσει, δηλαδή βρίσκονται σε κατάσταση αμελητέας κινητικής ενέργειας, η λεπίδα είναι έτοιμη να εκτελέσει τη διαδικασία εναπόθεσης. Η εναπόθεση αποτελείται από την υπέρθεση δύο κινήσεων-μιας γραμμικής μεταφορικής κίνησης με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος του άξονα εναπόθεσης (άξονας x) και μιας κατακόρυφης (κατά τον άξονα z) δονητικής κίνησης, δηλαδή μιας ημιτονοειδούς ταλάντωσης σταθερής συχνότητας και πλάτους καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας εναπόθεσης.

Προκειμένου η κατακόρυφη ημιτονοειδής ταλάντωση να πραγματοποιείται μεταξύ των θέσεων $z_{\text{down}}=h_{l,\text{th}}$ (όπου $h_{l,\text{th}}$ είναι το θεωρητικό πάχος του στρώματος, δηλ. η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του υποστρώματος και του επιπέδου διασποράς που δημιουργεί το πτερύγιο) και $z_{\text{up}}=h_{l,\text{th}}+2A_{\text{vib}}$ (όπου A_{vib} είναι το πλάτος της ταλάντωσης), στην προσομοίωση, αρχικά πραγματοποιείται μια κατακόρυφη κίνηση μετατόπισης του πτερυγίου, η οποία μετακινεί το πτερύγιο προς τα πάνω κατά μήκος του άξονα z κατά μια μετατόπιση $+A_{\text{vib}}$. Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.11*, η μετατόπιση γίνεται μέσω μιας γραμμικής κίνησης με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα. Στο σχήμα, η κίνηση μετατόπισης έχει διάρκεια $\Delta t=0,005$ sec και ταχύτητα $u_{\text{off}}=0,001$ m/sec, οδηγώντας σε μετατόπιση $\Delta z_{\text{off}}=5$ μm .

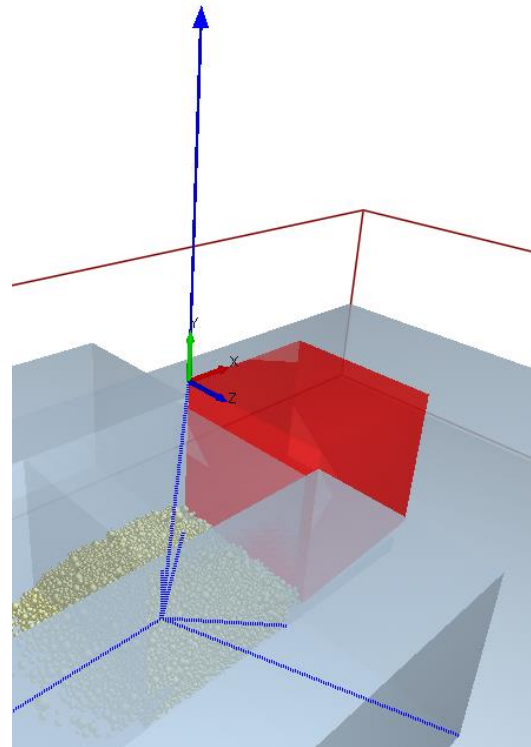
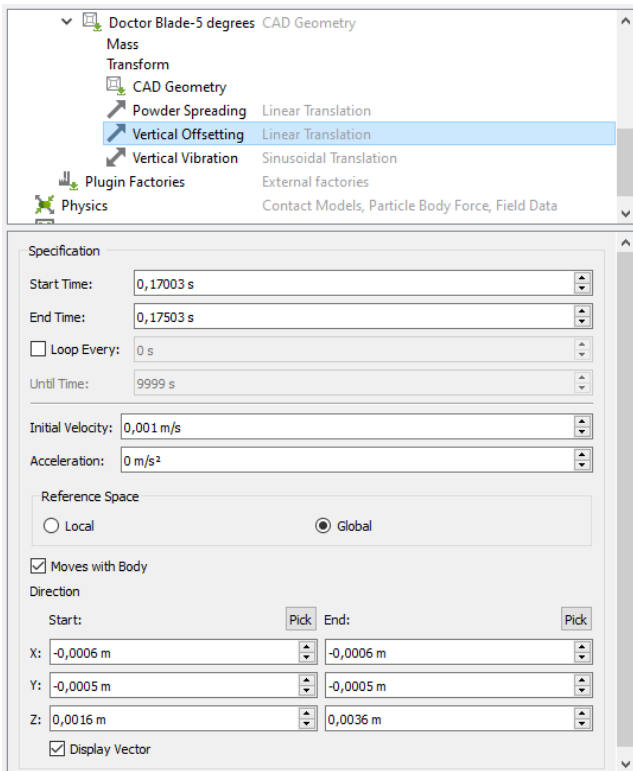
Αφού ολοκληρωθεί αυτό το βήμα, ρυθμίζεται η δόνηση, θεωρώντας την τρέχουσα θέση της λεπίδας κατά μήκος του άξονα z ως σημείο εκκίνησης της ταλάντωσης. Ταυτόχρονα με την έναρξη της δόνησης, ξεκινά και η μεταφορική κίνηση. Στο *Σχήμα 4.12* και στο *Σχήμα 4.13* παρουσιάζεται η ρύθμιση των δύο κινήσεων που, με βάση την αρχή της υπέρθεσης, οδηγούν στη διαδικασία διασποράς της σκόνης.

Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.12*, για τη δόνηση αυτή η συχνότητα ορίζεται σε $f_{\text{vib}}=2000$ Hz και το πλάτος σε $A_{\text{vib}}=5$ μm .

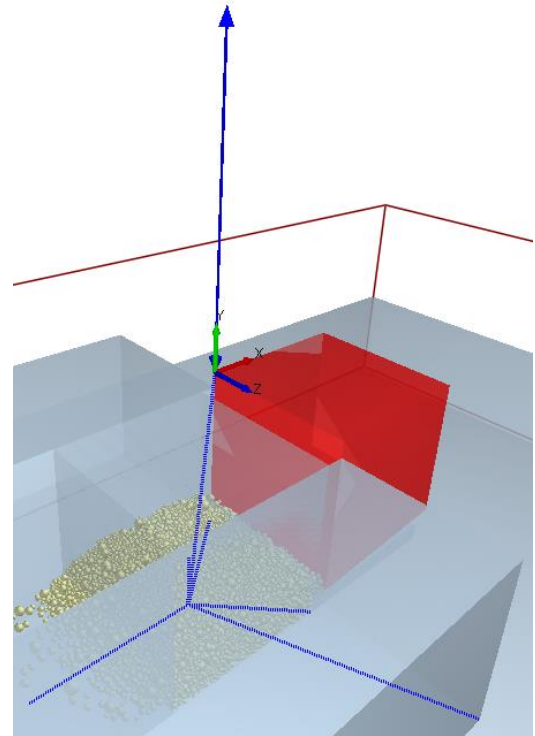
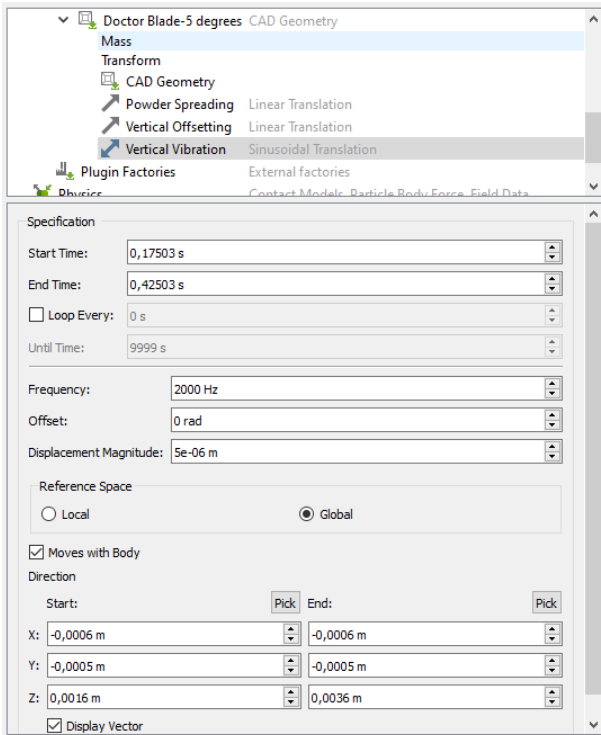
Ομοίως, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.13*, η ταχύτητα διασποράς είναι σταθερή και ορίζεται σε $u_{\text{tr}}=0,01$ m/sec. Η διάρκεια της μεταφορικής κίνησης ρυθμίζεται έτσι ώστε η λεπίδα να περάσει πάνω από το τετράγωνο του δείγματος και να το προσπεράσει σε ασφαλή απόσταση, εξασφαλίζοντας ότι στο τέλος της προσομοίωσης δεν θα υπάρχουν παραμένουσες διαταραχές στο στρώμα που έχει εναποτεθεί από τη λεπίδα και ταυτόχρονα ότι το στρώμα έχει προλάβει να φτάσει σε μια κατάσταση "παγωμένη", δηλαδή σε μια κατάσταση πολύ χαμηλής κινητικής ενέργειας, πολύ κοντά στο να είναι

εντελώς ακίνητα όλα τα σωματίδια. Αφού γίνει αυτή η εκτίμηση του χρόνου για τη μεταφορική κίνηση, ορίζεται η ίδια διάρκεια για τη δονητική κίνηση.

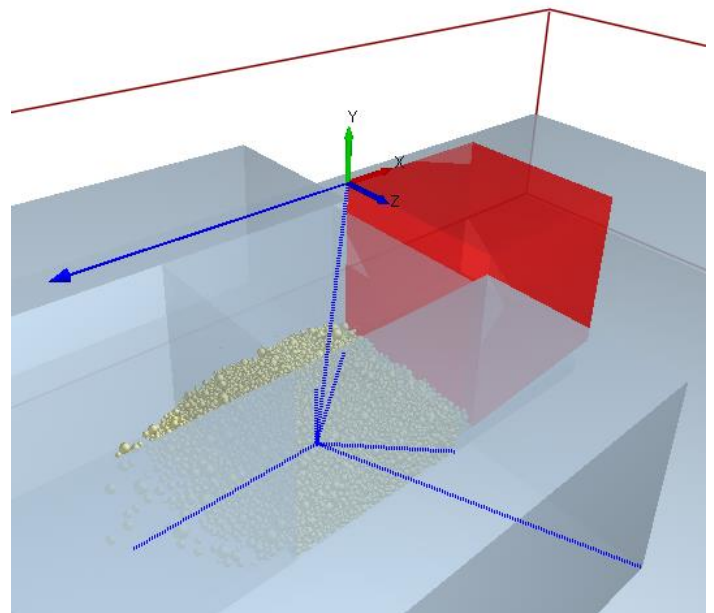
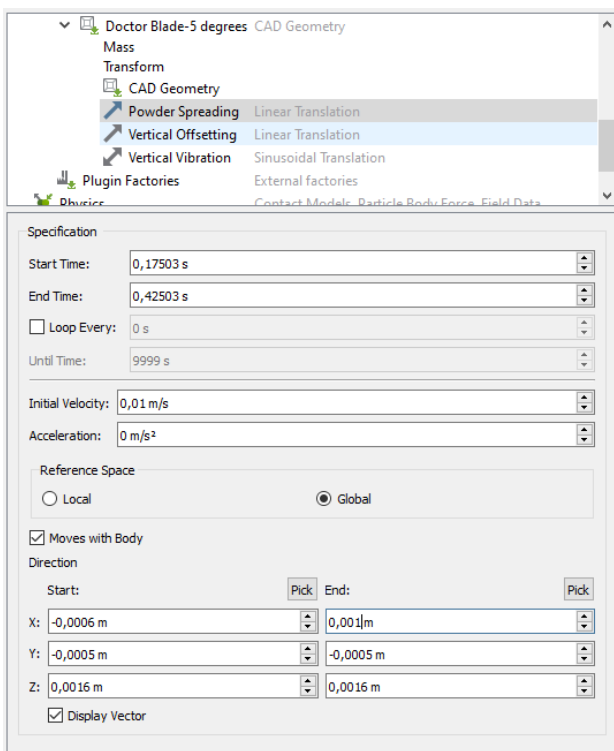
Αφού ολοκληρωθούν αυτά τα βήματα και οι ρυθμίσεις, η προσομοίωση είναι έτοιμη να εκτελεστεί και να υπολογίσει τα αποτελέσματα για την τρέχουσα δοκιμή εναπόθεσης σκόνης.



Σχήμα 4.11: (Αριστερά) Ρύθμιση κίνησης για τη αντιστάθμιση (offset)- (Δεξιά) Ο άξονας της μετατόπισης εμφανίζεται μέσω του μακρού μπλε διανύσματος.



Σχήμα 4.12: (Αριστερά) Ρύθμιση κίνησης για την ημιτονοειδή ταλάντωση- (Δεξιά) Ο άξονας της ταλάντωσης εμφανίζεται μέσω του μακρού μπλε διανύσματος.



Σχήμα 4.13: (Αριστερά) Ρύθμιση κίνησης για τη μεταφορική κίνηση της οδηγού λεπίδας- (Δεξιά) Ο άξονας της γραμμικής μετατόπισης εμφανίζεται μέσω του μακρού μπλε διανύσματος..

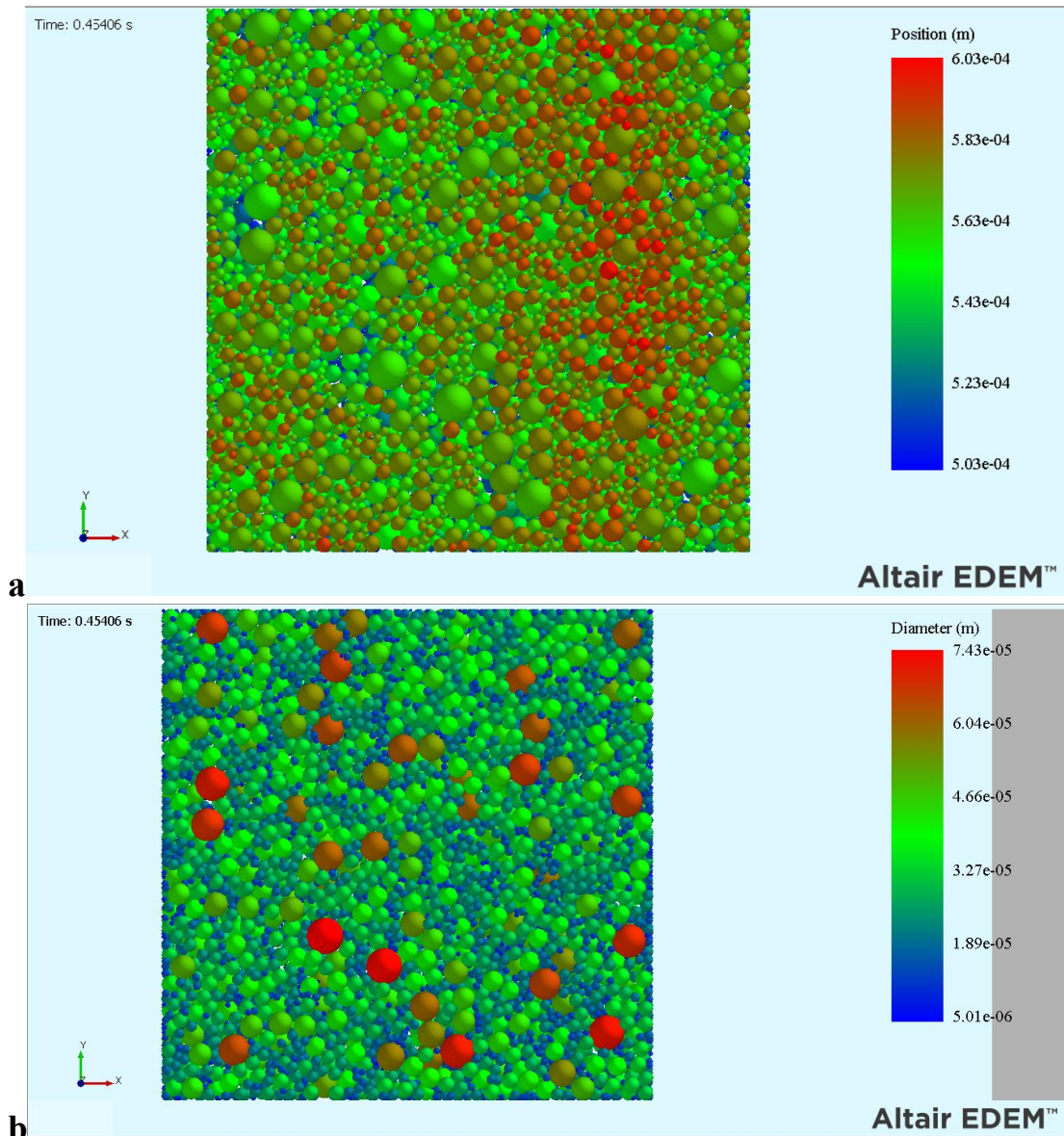
4.5 Αξιολόγηση Επιφάνειας και Κριτήρια Ποιότητας

Μετά το τέλος της προσομοίωσης εναπόθεσης της σκόνης, το αποτέλεσμα είναι ένα τετράγωνο στρώμα (1x1) (mm x mm), με θεωρητικό (ονομαστικό) πάχος 0,1 mm. Από το περιβάλλον EDEM, είναι δυνατή η εξαγωγή ενός αρχείου που περιέχει τις συντεταγμένες των κέντρων των σφαιρικών σωματιδίων, τη διάμετρο των σωματιδίων και το αναγνωριστικό των σωματιδίων. Το αναγνωριστικό σωματιδίου είναι ένας μοναδικός αριθμός για κάθε σωματίδιο, ο οποίος αποδίδεται στο σωματίδιο κατά τη διάρκεια του σταδίου δημιουργίας σωματιδίων, όπως αυτό εκτελείται από το εργοστάσιο που έχει οριστεί για τη δημιουργία της σκόνης στην προσομοίωση. Το ίδιο αρχείο περιέχει τη χρονική στιγμή της τελικής στιγμής της προσομοίωσης, η οποία είναι η στιγμή που αντιστοιχεί στα εξαγόμενα δεδομένα, καθώς και τη συνολική μάζα των σωματιδίων που αποτελούν το στρώμα, προκειμένου να αποφευχθεί η άθροιση των επιμέρους μαζών σε ένα λογιστικό φύλλο ή ο υπολογισμός τους μέσω του όγκου και της πυκνότητάς τους. Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζεται η μορφή των δεδομένων που εξαγονται από το λογισμικό EDEM μετά την προσομοίωση της εξάπλωσης της σκόνης.

Το Σχήμα 4.14 είναι μια κάτοψη του στρώματος της αποτιθέμενης σκόνης όταν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία διασποράς. Ο χρωματισμός των σωματιδίων γίνεται είτε μέσω της συντεταγμένης Z των κέντρων τους (Σχήμα 4.14(α)), είτε μέσω της διαμέτρου των σωματιδίων (Σχήμα 4.14(β)). Στα σωματίδια που είναι τοποθετημένα ψηλότερα ή έχουν μεγαλύτερη διάμετρο αποδίδονται χρώματα κόκκινης απόχρωσης, ενώ στα σωματίδια που είναι τοποθετημένα χαμηλότερα ή έχουν μικρότερη διάμετρο αποδίδονται χρώματα μπλε απόχρωσης αντίστοιχα, όπως εξηγεί το υπόμνημα στη δεξιά πλευρά του σχήματος.

Πίνακας 4.6: Δομή του εξαγόμενου αρχείου EDEM για τα σωματίδια που αποτελούν το στρώμα των δοκιμών προσομοίωσης.

<i>Particle ID</i>	<i>Diameter</i>	<i>X_{centre}</i>	<i>Y_{centre}</i>	<i>Z_{centre}</i>
1	1.39E-05	-0.0001	-0.00017	0.000507
3	1.98E-05	-0.00038	-0.0002	0.000531
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20609	3.51E-05	-0.00013	-0.00035	0.000531



Σχήμα 4.14: Κάτοψη δείγματος του στρώματος σκόνης που εναποτίθεται, με χρωματισμό των σωματιδίων μέσω: **(a)** κατακόρυφη θέση- **(b)** διάμετρος.

Το στρώμα όπως εξάγεται από το περιβάλλον EDEM είναι ένα αρχείο με τη μορφή που περιγράφεται στον Πίνακα 4.6. Ωστόσο, το αρχείο που εξάγεται περιλαμβάνει τα δεδομένα κάθε σωματιδίου που αποτελεί το στρώμα. Αυτό σημαίνει ότι, προκειμένου να υπολογιστεί το πραγματικό πάχος του στρώματος, είναι απαραίτητο να βρεθεί ένας τρόπος να οριστούν μαθηματικά μόνο τα σημεία που αποτελούν την κορυφή του εξαγόμενου στρώματος. Για να γίνει αυτό, προτείνεται η ακόλουθη μεθοδολογία.

Αρχικά, ορίζεται ένα πλέγμα εντός του τετραγώνου 1x1 (mm x mm) εντός του οποίου βρίσκεται η σκόνη. Το πλέγμα έχει βήμα κατά x 1 μm και βήμα κατά y επίσης 1 μm . Το μέγεθος του πλέγματος επιλέχθηκε έτσι ώστε να είναι 5 φορές μικρότερο από το μικρότερο σωματίδιο σκόνης (διάμετρος 5 μm). Θα μπορούσε να είναι ακόμη

μικρότερο, αλλά οι δοκιμές απέδειξαν ότι δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, ωστόσο αυξάνει κατά πολύ τον υπολογιστικό χρόνο και προκαλεί ακόμη και υπερχείλιση του κώδικα σε ορισμένες περιπτώσεις.

$$\Delta x = 1\mu m \quad (4.68)$$

$$\Delta y = 1\mu m \quad (4.69)$$

Αυτό σημαίνει ότι το τετράγωνο έχει 1001 τιμές x και 1001 τιμές y , οι αντίστοιχες γραμμές τέμνονται μεταξύ τους, αναπτύσσοντας ένα πλέγμα με $n_{\text{nodes}} = 1.002.001$ "κόμβους". Κάθε κόμβος έχει τετμημένη $x_{i,j}, i = 1, 2, \dots, n_x = 1001, j = 1, 2, \dots, n_y = 1001$ και τεταγμένη $y_{i,j}, i = 1, 2, \dots, n_x = 1001, j = 1, 2, \dots, n_y = 1001$. Το εύρος της τετμημένης και της τεταγμένης των κόμβων ορίζεται έτσι ώστε η αρχή του συστήματος συντεταγμένων να τοποθετείται στο κέντρο του τετραγώνου. Έτσι, η γενική μορφή των συντεταγμένων των κόμβων δίνεται από την εξίσωση (4.70).

$$\begin{cases} x_{i,j}, i = 1, 2, \dots, 1001, j = 1, 2, \dots, 1001, x_{i,j} \in [-500, 500] \\ y_{i,j}, i = 1, 2, \dots, 1001, j = 1, 2, \dots, 1001, y_{i,j} \in [-500, 500] \\ z_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (4.70)$$

Με μονάδα συντεταγμένων το μm .

Από κάθε κόμβο μπορεί να δημιουργηθεί μια κατακόρυφη "ακτίνα", με τη μορφή γραμμής, με εξίσωση

$$\begin{cases} x = x_{i,j} \\ y = y_{i,j} \\ z \in R \end{cases} \quad (4.71)$$

Αυτή η κάθετη γραμμή τέμνει ορισμένα σωματίδια του στρώματος. Για τον υπολογισμό των σημείων του στρώματος, ένας κώδικας σε γλώσσα C συγκρίνει τις συντεταγμένες z όλων των σημείων τομής κάθε "ακτίνας" με τα σωματίδια και κρατάει αυτό με την υψηλότερη συντεταγμένη z . Εάν μια "ακτίνα" δεν έχει καμία τομή με κανένα σωματίδιο, τότε το σημείο στρώματος που αναφέρεται σε αυτόν τον κόμβο είναι ο ίδιος ο κόμβος, δηλαδή η συντεταγμένη z του σημείου στρώματος μηδενίζεται. Ο κώδικας C που υπολογίζει την άνω επιφάνεια του στρώματος σκόνης βρίσκεται στην ενότητα 8.3 (Παράρτημα C-ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ). Ο κώδικας χρειάζεται 5 προκαθορισμένα αρχεία για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Τα αρχεία αυτά περιέχουν τα δεδομένα των σωματιδίων του στρώματος, δηλαδή το αναγνωριστικό των σωματιδίων ("PARTICLE_ID.txt"), τη διάμετρό τους

("PARTICLE_DIAMETER.txt") και τις συντεταγμένες x , y και z του κέντρου κάθε σωματιδίου ("PARTICLE_X.txt", "PARTICLE_Y.txt" και "PARTICLE_Z.txt" αντίστοιχα). Ο κώδικας ανοίγει τα αρχεία, διαβάζει τα δεδομένα, τα οποία βρίσκονται σε στήλες μέσα σε κάθε αρχείο και στη συνέχεια προχωρά στον υπολογισμό ενός σημείου στρώματος για κάθε κόμβο.

Οι συντεταγμένες του σημείου στρώματος αποθηκεύονται στο αρχείο με τίτλο "Surface_points_calculated_XYZ_coordinates_columns.txt".

Ο κώδικας λειτουργεί με πολύ απλό τρόπο, ο οποίος εξηγείται μέσω του διαγράμματος ροής του Σχήματος 4.15. Για κάθε κόμβο, εξετάζει αν η απόσταση μεταξύ της κατακόρυφης προβολής του κέντρου ενός σωματιδίου στο επίπεδο του κόμβου ($z=0$) και του κόμβου είναι μικρότερη, ίση ή μεγαλύτερη σε σύγκριση με την ακτίνα του εξεταζόμενου σωματιδίου. Εάν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη από την ακτίνα, τότε η "ακτίνα" έχει δύο σημεία τομής με το σωματίδιο. Εάν είναι ίση με την ακτίνα, έχει ένα σημείο τομής με τη σφαίρα, δηλαδή το σημείο επαφής, και, εάν η απόσταση αυτή είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα, τότε δεν υπάρχουν σημεία τομής μεταξύ της ακτίνας και της σφαίρας του σωματιδίου. Αφού υπολογιστούν τα σημεία τομής για όλα τα σωματίδια του στρώματος για την "ακτίνα" που εκτοξεύεται από έναν κόμβο, το σημείο με τη μεγαλύτερη συντεταγμένη z αποθηκεύεται σε ένα νέο αρχείο .txt. Αυτή η τιμή είναι το ύψος του στρώματος στον κόμβο ($z_{LAYER_{i,j}}$). Στη συνέχεια, ο κώδικας μετακινείται στον επόμενο κόμβο και επαναλαμβάνει τη διαδικασία. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα νέφος σημείων που αποτελούν την άνω επιφάνεια του στρώματος.

Η χωρική εξίσωση που δίνει την επιφάνεια των σφαιρικών σωματιδίων είναι

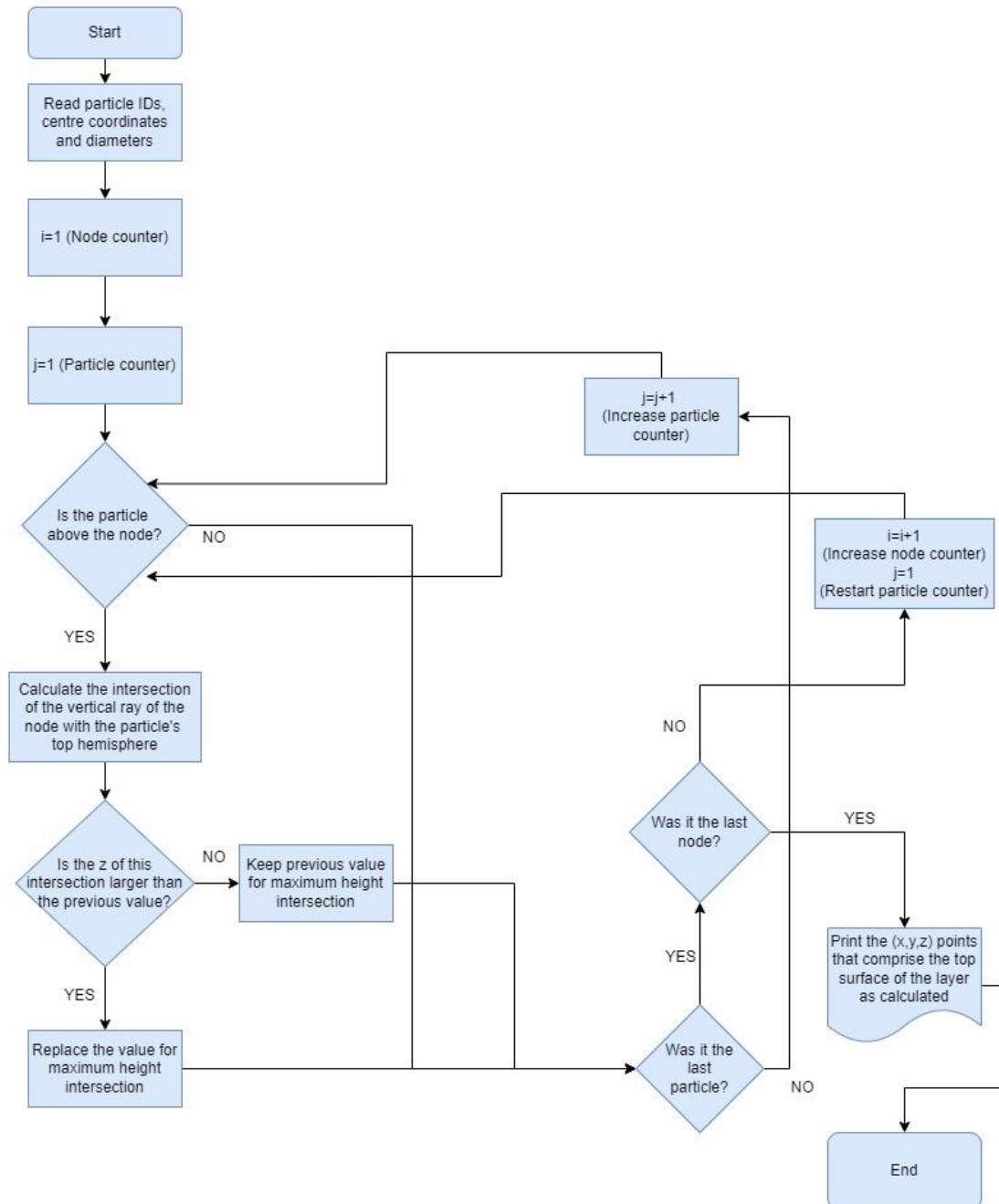
$$(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2 = \left(\frac{D_{particle}}{2}\right)^2 \quad (4.72)$$

όπου x_C , y_C , z_C είναι οι συντεταγμένες του κέντρου του σωματιδίου και $D_{particle}$ είναι η διάμετρος του σωματιδίου.

Το ύψος τομής "ακτίνας"-σωματιδίου στον κόμβο (i, j) για το k -οστό σωματίδιο μπορεί να υπολογιστεί αντικαθιστώντας την (4.71) στην (4.72), λαμβάνοντας:

$$z_{int_{k-(i,j)}} = z_{C_k} \pm \sqrt{\left(\frac{D_{k-particle}}{2}\right)^2 - (x_{i,j} - x_{C_k})^2 - (y_{i,j} - y_{C_k})^2} \quad (4.73)$$

η οποία ορίζεται για ένα σωματίδιο μόνο εάν η υπόρριζη ποσότητα είναι μη αρνητική, δηλαδή εάν ο έλεγχος της απόστασης που εξηγήθηκε προηγουμένως είναι επιτυχής. Ας σημειωθεί ότι $k = 1, 2, \dots, n_{particles}$.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα ροής του κώδικα υπολογισμού του ανώτερου επιφανειακού στρώματος.

Αφού ληφθούν τα σημεία που ορίζουν την άνω επιφάνεια του στρώματος $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{LAYER_{i,j}})$, το επόμενο βήμα είναι η πραγματική ποσοτικοποίηση της ποιότητας του στρώματος για τα πρότυπα της διαδικασίας ΕΠΛ/ΕΤΛ. Προκειμένου να αξιολογηθεί η επιφάνεια που παράγεται από κάθε δοκιμή, είναι απαραίτητα ορισμένα κριτήρια ποιότητας επιφάνειας. Για το σκοπό αυτό, ορίζονται τέσσερα κριτήρια ποιότητας, δηλαδή η απόκλιση πάχους στρώματος (Layer Thickness Deviation-LTD), ο λόγος κάλυψης επιφάνειας (Surface Coverage Ratio-SCR), η μέση τετραγωνική (Root mean square) επιφανειακή τραχύτητα (S_q -RMS) και η πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης σκόνης (Packing Density-PD ή PDtr). Τα κριτήρια αυτά θα εξεταστούν στις επόμενες ενότητες.

4.5.1 Απόκλιση Πάχους Στρώσης LTD και $|LTD|$ (μm)

Πρώτα απ' όλα, είναι σημαντικό να εξεταστεί πόσο κοντά πλησιάζει το πραγματικό πάχος στρώματος στο θεωρητικό πάχος στρώματος, το οποίο αντιστοιχεί στην κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του υποστρώματος και του επιπέδου που δημιουργεί το κάτω άκρο της λεπίδας καθώς κινείται οριζόντια κατά μήκος του άξονα x. Στις περισσότερες μελέτες θεωρείται ότι η κατακόρυφη μετατόπιση του εμβόλου κατασκευής είναι ίση με το ύψος στρώματος. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει. Το πραγματικό ύψος στρώματος είναι πάντα ελαφρώς μικρότερο, λόγω φαινομένων συνοχής μεταξύ σωματιδίων και συγκόλλησης μεταξύ σωματιδίων και επιστρώματος. Ο αντίκτυπος αυτών των φαινομένων ποικίλλει καθώς μεταβάλλονται βασικές παράμετροι εξάπλωσης, όπως η μεταφορική ταχύτητα του επιστρωτήρα ή το ύψος στρώματος.

Με βάση τα σημεία που είναι αποθηκευμένα στο αρχείο "Surface_points_calculated_XYZ_coordinates_columns.txt", το πραγματικό πάχος στρώματος υπολογίζεται ως η μέση τιμή του ύψους όλων των κόμβων. Επομένως, η τιμή αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$h_l = \frac{1}{n_{nodes}} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} z_{LAYER_{i,j}} \quad (4.74)$$

Και η απόκλιση μεταξύ του πραγματικού και του θεωρητικού πάχους στρώματος δίνεται από τη σχέση

$$(LTD) = (h_l - h_{l,th}) = \left(\frac{1}{n_{nodes}} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} z_{LAYER_{i,j}} \right) - h_{l,th} \quad (4.75)$$

$$|LTD| = |h_l - h_{l,th}| = \left| \left(\frac{1}{n_{nodes}} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} z_{LAYER_{i,j}} \right) - h_{l,th} \right| \quad (4.76)$$

Το πραγματικό πάχος του στρώματος αντιστοιχεί στο μέσο επίπεδο της επιφάνειας του στρώματος σκόνης. Αυτό σημαίνει ότι το μέσο επίπεδο της επιφάνειας του υπό εξέταση στρώματος σκόνης περιγράφεται από τη σχέση $z = h_l$. Για τον υπολογισμό της τραχύτητας και άλλων επιφανειακών παραμέτρων, όπως θα παρουσιαστεί στην ενότητα 4.5.3, ορίζεται μια νέα μεταβλητή ύψους Z ("κεφαλαίο- z "), η οποία αντιστοιχεί στο μέσο επίπεδο του στρώματος $z = h_l$, αντί του επιπέδου αναφοράς $z=0$. Έτσι, από εδώ και στο εξής:

$$Z_{i,j} = z_{LAYER_{i,j}} - h_l \quad (4.77)$$

4.5.2 Λόγος Κάλυψης Επιφανείας SCR (%)

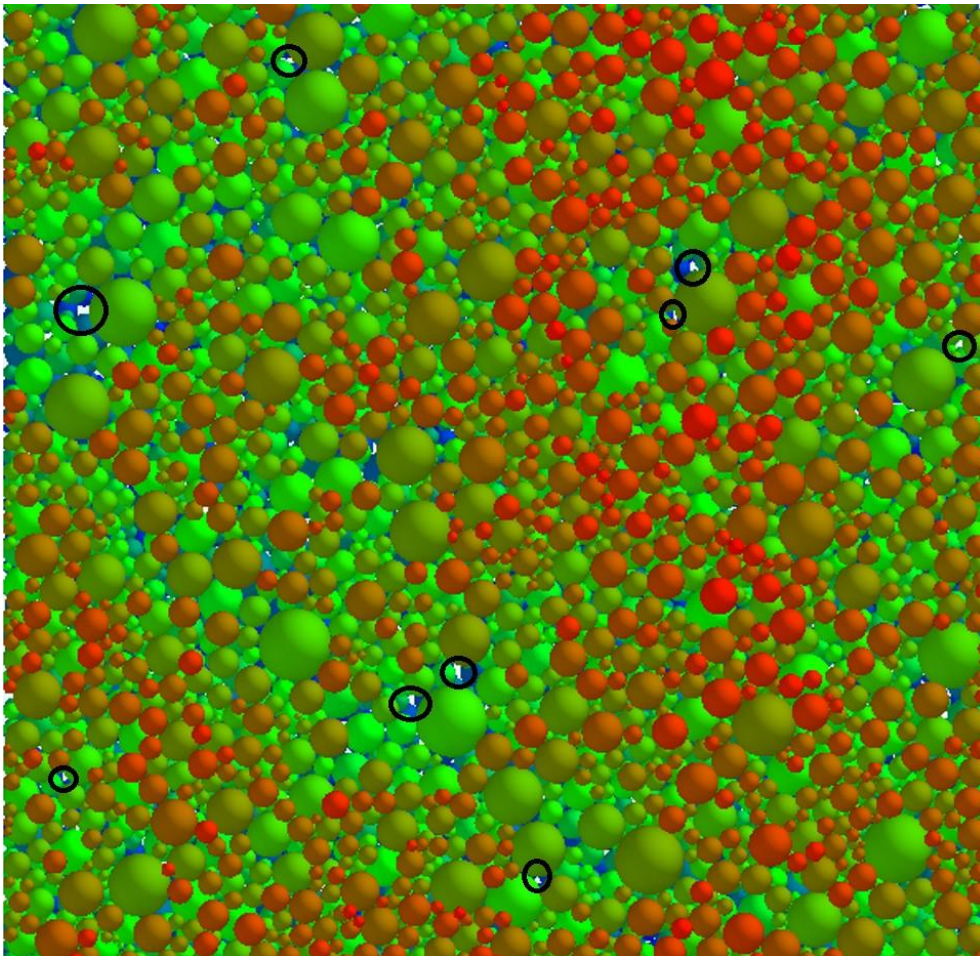
Εάν το στρώμα εξετάζεται από πάνω, δηλαδή όταν εξετάζεται η κάλυψη του στρώματος, είναι δυνατόν να είναι πλήρως καλυμμένο από σκόνη. Ωστόσο, υπάρχει επίσης η πιθανότητα ορισμένες περιοχές του τετραγώνου του δείγματος να μην έχουν καλυφθεί, καθιστώντας ορατό το υπόστρωμα. Στο *Σχήμα 4.16* παρουσιάζονται με μαύρους κύκλους ορισμένα ελαττώματα στρώματος. Στη βέλτιστη εναπόθεση, τα κενά γεμίζουν με σωματίδια μικρότερου μεγέθους, χωρίς να αφήνουν απολύτως καμία ακάλυπτη περιοχή. Πρακτικά, οι ερευνητές στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση αυτών των ατελειών κάλυψης.

Αυτές οι ακάλυπτες περιοχές μπορεί να είναι το αποτέλεσμα ενός μεγαλύτερου σωματιδίου ή ενός συσσωματώματος σωματιδίων που παρασύρεται κατά μήκος της επιφάνειας ή που ωθείται με τόσο μεγάλη ταχύτητα ώστε η αδράνειά του να του επιτρέπει να συνεχίσει να κινείται για μεγαλύτερη από την επιθυμητή απόσταση αφού χάσει την επαφή με τον επιστρωτήρα, προκαλώντας ένα κενό πίσω του. Για να έχουμε ένα στρώμα υψηλής ποιότητας, είναι υψίστης σημασίας να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότεροι ακάλυπτοι κόμβοι. Ένας "ακάλυπτος κόμβος" είναι ένας κόμβος για τον οποίο ο κώδικας c που περιγράφεται παραπάνω επέστρεψε μηδενικό αριθμό τομών

"ακτίνας"-σωματιδίων, πράγμα που σημαίνει ότι ο κόμβος αυτός έχει μηδέν σωματίδια που βρίσκονται πάνω από αυτόν. Ο λόγος κάλυψης επιφάνειας (SCR) υπολογίζεται διαιρώντας τον αριθμό των ακάλυπτων κόμβων με τον συνολικό αριθμό των κόμβων εντός του τετραγώνου του δείγματος (εξίσωση (4.78)).

$$SCR(\%) = \left(\frac{n_{uncovered}}{n_{nodes}} \right) \cdot 100\% \quad (4.78)$$

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει το SCR είναι 100%, οπότε επιτυγχάνεται τέλεια κάλυψη. Πρακτικά, όπως εκτιμάται από την εξέταση των δειγμάτων στρώματος που αναπτύχθηκαν από τις 27 δοκιμές διάστροφης που αποτελούν το σχεδιασμό πειραμάτων Taguchi, εάν η κάλυψη στρώματος είναι κάτω από 98,5%, η ποιότητα του στρώματος θεωρείται απαράδεκτη για τις διεργασίες ΕΠΛ/ΕΤΛ. Έχει παρατηρηθεί ότι η γενική ποιότητα της επιφάνειας γενικά επιδεινώνεται δραστικά όταν το SCR φτάνει σε τιμές ίσες ή και χαμηλότερες από 98,5%.

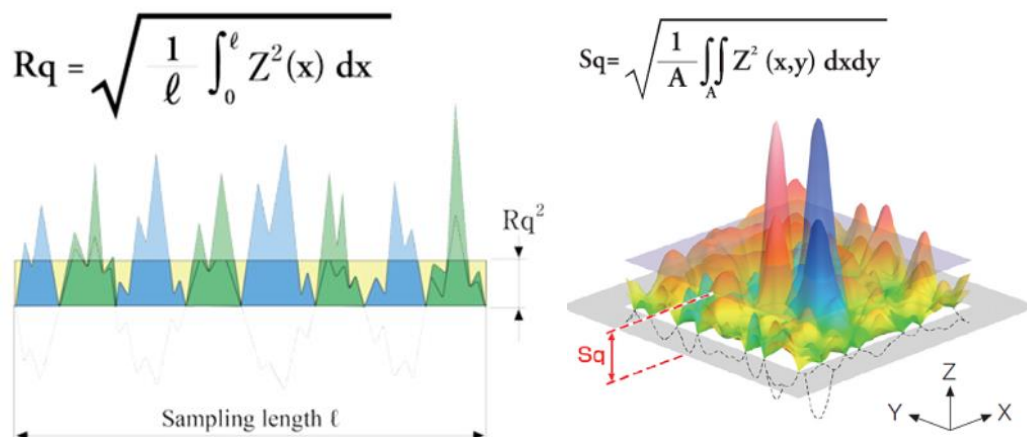


Σχήμα 4.16: Με μαύρους κύκλους, ακάλυπτες περιοχές όπου το υπόστρωμα είναι ορατό, υποδηλώνοντας ελαττώματα κάλυψης.

4.5.3 Μέση Τετραγωνική Επιφανειακή Τραχύτητα S_q -RMS (μm)

Η επιφανειακή τραχύτητα της υπολογισμένης άνω επιφάνειας του στρώματος σκόνης είναι πολύ σημαντική για την ποιότητα του τελικού προϊόντος, όπως έχει ήδη εξηγηθεί σε προηγούμενα κεφάλαια (βλέπε κεφάλαιο 2). Οι βαθιές κοιλάδες ή οι υψηλές κορυφές είναι επιζήμιες για την ποιότητα, καθώς μπορούν να κληρονομηθούν στα επόμενα στρώματα, επηρεάζοντας ακόμη και τη διαστασιακή ακρίβεια ενός τεμαχίου. Είναι κοινή πρακτική η εξαγωγή προφίλ από το εναποτιθέμενο στρώμα μέσω μεθόδων όπως η σάρωση λευκού φωτός [103] προκειμένου να αξιολογηθεί η τραχύτητα της επιφάνειας μέσω του δισδιάστατου ορισμού της. Ωστόσο, με τη μέθοδο αυτή, είναι δυνατόν να παραλείπεται η εξέταση προφίλ όπου υπάρχουν σημαντικές ατέλειες και να υπονοείται ότι ένα στρώμα είναι υψηλότερης ποιότητας από ό,τι είναι στην πραγματικότητα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, προτείνεται στην παρούσα εργασία η επιφανειακή μέθοδος (αντί του προφίλ) για τον υπολογισμό της επιφανειακής μέσης τετραγωνικής ρίζας της τραχύτητας της επιφάνειας ως κριτήριο που είναι γνωστό για τη στατιστική του σημασία.

Οι παράμετροι R_q και S_q (βλ. Σχήμα 4.17) είναι δύο από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες παραμέτρους και αναφέρονται επίσης ως τιμές RMS. Αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση της κατανομής του ύψους. Επιπλέον, παράγουν αξιόπιστα στατιστικά στοιχεία και επιτρέπουν σταθερά αποτελέσματα, δεδομένου ότι δεν επηρεάζονται σημαντικά από γρατζουνιές, επιμολύνσεις και θόρυβο μέτρησης.



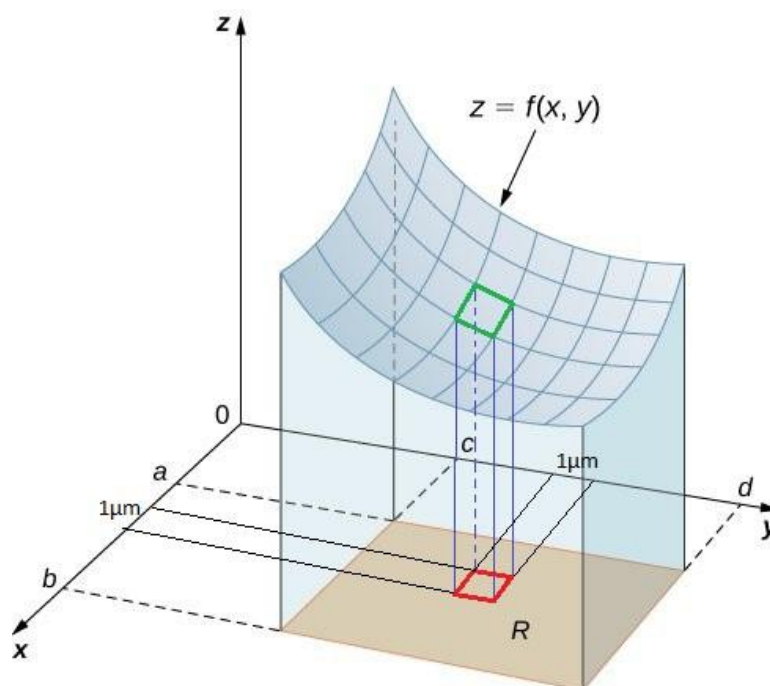
Σχήμα 4.17: Η μέθοδος του προφίλ (αριστερά) και της επιφάνειας (δεξιά) για τον υπολογισμό της μέσης τετραγωνικής ρίζας (RMS) της τραχύτητας μιας επιφάνειας [214].

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιφανειακής τραχύτητας RMS του στρώματος είναι η εξής

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x,y) dx dy} \quad (4.79)$$

όπου A είναι το εμβαδόν του δείγματος (στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, $A=1 \mu\text{m}^2$) και $Z(x,y)$ είναι η εξίσωση που δίνει την άνω επιφάνεια του στρώματος σκόνης σε αναλυτική μορφή, όπως συμβολίζεται στην εξίσωση (4.77). Είναι υψίστης σημασίας να σημειωθεί ότι, προκειμένου να υπολογιστούν οι όποιες επιφανειακές παράμετροι θα αναφερθούν από εδώ και πέρα, το ύψος $Z(x,y)$ που δηλώνει την άνω επιφάνεια του στρώματος αναφέρεται στο μέσο επίπεδο της επιφάνειας, δηλαδή στο επίπεδο $z=h_l$, όπου το h_l ορίζεται από την Εξίσωση (4.74). Έτσι, σε ολόκληρο το κεφάλαιο 4, όπου συναντάται ο όρος Z , αναφέρεται για λόγους σαφήνειας στο $(z_{LAYER} - h_l)$. Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να διατυπωθεί μια αναλυτική εξίσωση για την περιγραφή της άνω επιφάνειας του στρώματος σκόνης. Αντ' αυτού, έχει οριστεί ως ένα νέφος σημείων μέσω των συντεταγμένων των σημείων αυτών. Ως εκ τούτου, η εξίσωση (4.79) πρέπει να επιλυθεί αριθμητικά.

Το ολοκλήρωμα $I = \iint_A Z^2(x,y) dx dy$ είναι ο όγκος μεταξύ της επιφάνειας $Z^2(x,y)$ και του επιπέδου $Z = 0$. Ως εκ τούτου, το πρώτο βήμα προς τον υπολογισμό του είναι να υψώσουμε τις συντεταγμένες Z των σημείων που υπάρχουν στο αρχείο "Surface_points_calculated_XYZ_coordinates_columns.txt" στη δεύτερη δύναμη. Το αποτέλεσμα είναι μια στήλη σημείων με συντεταγμένες $P_{i,j}(x_{i,j}, y_{i,j}, Z_{i,j}^2)$. Το ολοκλήρωμα I αντιπροσωπεύει τον όγκο μεταξύ της επιφάνειας που περιγράφεται από τα σημεία P και του επιπέδου $Z = 0$. Ο όγκος αυτός μπορεί να διαιρεθεί σε πολλούς μικρότερους όγκους, καθένας από τους οποίους έχει τετραγωνική βάση $1 \mu\text{m}$, αφού τόσο το Δx όσο και το Δy είναι ίσα με $1 \mu\text{m}$. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ο κανόνας του τραπεζίου για τον αριθμητικό υπολογισμό καθενός από αυτούς τους απειροελάχιστους όγκους. Το γεωμετρικό σχήμα που συσχετίζεται με αυτόν τον απειροελάχιστο όγκο είναι ένα αποκομμένο ορθογώνιο πρίσμα με τετράγωνη βάση. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα πρίσμα με τετράγωνη βάση, με πλευρά $1 \mu\text{m}$, ωστόσο οι τέσσερις κάθετες ακμές έχουν διάφορα μήκη (ή ύψη), βλ. *Σχήμα 4.18*.



Σχήμα 4.18: Απεικόνιση απειροστού πρίσματος.

Ένα τυχαίο απειροελάχιστο τετράγωνο θα είναι αυτό που ορίζεται από τους κόμβους

$$\begin{aligned} &N_{i,j}(x_{i,j}, y_{i,j}) \\ &N_{i+1,j}(x_{i+1,j}, y_{i+1,j}) \\ &N_{i+1,j+1}(x_{i+1,j+1}, y_{i+1,j+1}) \\ &N_{i,j+1}(x_{i,j+1}, y_{i,j+1}) \end{aligned}$$

Οι κόμβοι αυτοί αναφέρονται αντίστοιχα στα ακόλουθα σημεία της άνω επιφάνειας του στρώματος σκόνης;

$$\begin{aligned} &P_{i,j}(x_{i,j}, y_{i,j}, Z_{i,j}^2) \\ &P_{i+1,j}(x_{i+1,j}, y_{i+1,j}, Z_{i+1,j}^2) \\ &P_{i+1,j+1}(x_{i+1,j+1}, y_{i+1,j+1}, Z_{i+1,j+1}^2) \\ &P_{i,j+1}(x_{i,j+1}, y_{i,j+1}, Z_{i,j+1}^2) \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του όγκου που απομονώνεται μεταξύ των 4 κόμβων ($N_{i,j}, N_{i+1,j}, N_{i+1,j+1}, N_{i,j+1}$) και των 4 σημείων ($P_{i,j}, P_{i+1,j}, P_{i+1,j+1}, P_{i,j+1}$), έχουμε:

$$\begin{aligned} \Delta V_{Z^2} &= \int_{y=y_j}^{y=y_{j+1}} \left(\int_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} Z^2(x, y) dx \right) dy = \int_{y=y_j}^{y=y_{j+1}} \left[\frac{\Delta x \cdot (Z^2(x_{i+1}, y) + Z^2(x_i, y))}{2} \right] dy = \\ &= \frac{\Delta x}{2} \cdot \int_{y=y_j}^{y=y_{j+1}} [(Z^2(x_{i+1}, y) + Z^2(x_i, y))] dy = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\Delta x}{2} \cdot \left\{ \frac{\Delta y \cdot [Z^2(x_{i+1}, y_{j+1}) + Z^2(x_i, y_{j+1})] + [Z^2(x_{i+1}, y_j) + Z^2(x_i, y_j)]}{2} \right\} = \\
&= \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{4} \cdot [Z^2(x_{i+1}, y_{j+1}) + Z^2(x_i, y_{j+1}) + Z^2(x_{i+1}, y_j) + Z^2(x_i, y_j)] = \\
&= \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{4} \cdot (Z_{i+1, j+1}^2 + Z_{i, j+1}^2 + Z_{i+1, j}^2 + Z_{i, j}^2) \Rightarrow \\
\Delta V_{Z^2} &= \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{4} \cdot \sum_{n=j}^{j+1} \sum_{m=i}^{i+1} Z_{m,n}^2 \quad (4.80)
\end{aligned}$$

Έτσι, ο όγκος κάθε ορθογώνιου πρίσματος με τετραγωνική βάση είναι ίσος με το άθροισμα των υψών των 4 κατακόρυφων ακμών, πολλαπλασιαζόμενο με τα βήματα κατά μήκος των αξόνων x και y και διαιρούμενο με το 4. Επομένως, για να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος μεταξύ της επιφάνειας που ορίζεται από τα σημεία $P_{i,j}$ και του επιπέδου $z = 0$, πρέπει να προστεθεί ο όγκος κάθε απειροστού πρίσματος.

Εάν ένας κόμβος βρίσκεται σε μία από τις 4 γωνίες του δειγματικού τετραγώνου, το μόνο απειροελάχιστο πρίσμα στο οποίο συμμετέχει είναι αυτό που βρίσκεται στη γωνία του δειγματικού τετραγώνου. Ωστόσο, εάν ένας κόμβος βρίσκεται σε μία από τις τέσσερις ακμές του τετραγωνικού δείγματος, αποτελεί μέρος δύο διαφορετικών απειροστικών πρισμάτων, επομένως συνεισφέρει δύο φορές στον συνολικό όγκο. Τέλος, εάν ένας κόμβος βρίσκεται στο εσωτερικό του τετραγώνου του δείγματος, δηλαδή δεν ανήκει ούτε σε ακμή ούτε σε γωνία του τετραγώνου του δείγματος, τότε ανήκει σε τέσσερα διαφορετικά απειροελάχιστα πρίσματα, συνεισφέροντας τέσσερις φορές στον συνολικό όγκο. Συνεπώς,

$$\begin{aligned}
V_{Z^2} &= \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{4} \cdot \left\{ [Z_{1,1}^2 + Z_{n_x,1}^2 + Z_{n_x, n_y}^2 + Z_{1, n_y}^2] \right. \\
&\quad + 2 \left(\sum_{j=2}^{n_y-1} Z_{1,j}^2 + \sum_{j=2}^{n_y-1} Z_{n_x, j}^2 + \sum_{i=2}^{n_x-1} Z_{i,1}^2 + \sum_{i=2}^{n_x-1} Z_{i, n_y}^2 \right) \\
&\quad \left. + 4 \left(\sum_{j=2}^{n_y-1} \sum_{i=2}^{n_x-1} Z_{i,j}^2 \right) \right\} \quad (4.81)
\end{aligned}$$

Και, μετά από αυτόν τον υπολογισμό, η τοπική επιφανειακή τραχύτητα RMS της επιφάνειας δίνεται από την Εξίσωση (4.82), ως:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} V_{Z^2}} \quad (4.82)$$

Με την ίδια μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του S_q , είναι δυνατόν να υπολογιστούν και άλλες επιφανειακές παράμετροι, όπως το αριθμητικό μέσο ύψος (S_a), η λοξότητα (S_{sk}) και η κύρτωση (S_{ku}), χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad (4.83)$$

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^3(x, y) dx dy \right] \quad (4.84)$$

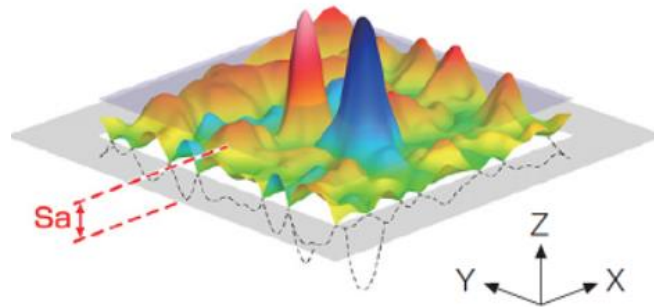
$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^4(x, y) dx dy \right] \quad (4.85)$$

Για να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις (4.83), (4.84) και (4.85), τα διπλά ολοκληρώματα υπολογίζονται με τη χρήση της εξίσωσης (4.81) και την αντικατάσταση των $Z_{i,j}^2$ με $|Z_{i,j}|$, $Z_{i,j}^3$ και $Z_{i,j}^4$ αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζεται η φυσική αναπαράσταση αυτών των επιφανειακών παραμέτρων.

Ο αριθμητικός μέσος όρος ύψους (S_a -μετρημένος σε μm) και η μέση τετραγωνική ρίζα τραχύτητας (S_q -μετρημένος σε μm) είναι αρκετά παρόμοια μεγέθη, που αντιπροσωπεύουν το μέσο όρο της μέσης διαφοράς ύψους για το μέσο επίπεδο και την τυπική απόκλιση της κατανομής του ύψους. Και οι δύο δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από βαθουλώματα, γρατζουνιές, μόλυνση και θόρυβο μέτρησης και παράγουν αξιόπιστα στατιστικά στοιχεία.

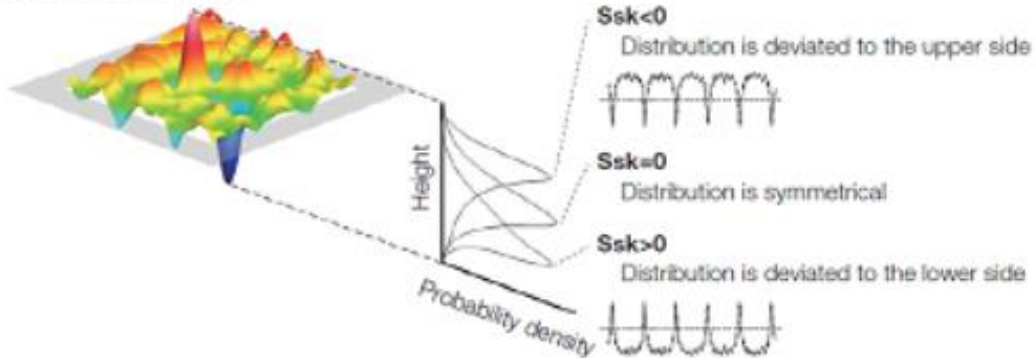
Η λοξότητα (S_{sk} -αδιάστατη παράμετρος) αντιπροσωπεύει το βαθμό συμμετρίας των επιφανειακών υψών γύρω από το μέσο επίπεδο. Το πρόσημο της λοξότητας δείχνει την υπεροχή των κορυφών ή των κοιλάδων μιας επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, οι αρνητικές τιμές λοξότητας υποδηλώνουν ότι η κατανομή αποκλίνει προς τα πάνω, επομένως η επιφάνεια παρουσιάζει βαθιές κοιλάδες, ενώ οι περιοχές που βρίσκονται πάνω από το μέσο επίπεδο είναι πιο ομαλές και ομοιόμορφες. Ομοίως, οι θετικές τιμές λοξότητας υποδηλώνουν μια κατανομή αποκλίνουσα προς τα κάτω, δηλαδή μια επιφάνεια με πολύ υψηλές δομές κορυφής, όπου οι περιοχές κάτω από το μέσο επίπεδο είναι πιο ομαλές και λιγότερο απότομες.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy$$



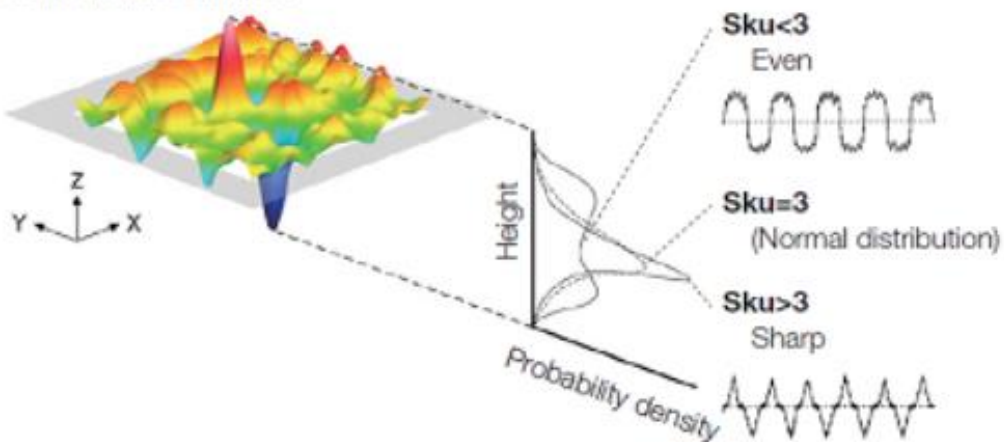
$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^3(x,y) dx dy \right]$$

Scale-limited surface



$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^4(x,y) dx dy \right]$$

Scale-limited surface



Σχήμα 4.19: (Πάνω) S_a ; (Μέση) S_{sk} ; (Κάτω) S_{ku} [214].

Η κύρτωση (αδιάστατη παράμετρος S_{ku}) χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της οξύτητας της κατανομής ύψους. Πιο συγκεκριμένα, η S_{ku} υποδεικνύει την παρουσία υπερβολικά υψηλών κορυφών/βαθέων κοιλάδων ($S_{ku} > 3$) ή την έλλειψή τους ($S_{ku} < 3$) που συνθέτουν την υφή. Εάν τα ύψη της επιφάνειας κατανέμονται κανονικά (δηλαδή καμπύλη καμπάνας), τότε το S_{sk} είναι 0 και το S_{ku} είναι 3. Οι επιφάνειες που περιγράφονται ως σταδιακά μεταβαλλόμενες, χωρίς ακραίες κορυφές ή κοιλάδες, τείνουν να έχουν $S_{ku} < 3$ [215].

Η λοξότητα είναι χρήσιμη όταν πρόκειται για την παρακολούθηση της επίδρασης της φθοράς σε μια επιφάνεια (π.χ. αξιολόγηση της τριβής και της απορροής λαδιού των λιπαντικών για τα επίπεδα ολίσθησης), ενώ η κύρτωση είναι ένας καλός τρόπος εντοπισμού της παρουσίας ελαττωμάτων είτε κορυφής είτε κοιλάδας που μπορεί να εμφανιστούν σε μια επιφάνεια [216], [214].

Υπάρχουν και άλλες επιφανειακές παράμετροι που μπορεί να είναι χρήσιμες, όπως η τραχύτητα κορυφής προς κοιλάδα (S_z), το μέγιστο ύψος κορυφής (S_p) και το μέγιστο βάθος κορυφής (S_v), ωστόσο εντοπίζουν κυρίως το μέγεθος των μεγαλύτερων ατελειών της επιφάνειας και αποτυγχάνουν να εξετάσουν τη συνοχή και την ομαλότητα της επιφάνειας, την οποία εξετάζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι παράμετροι που περιεγράφηκαν παραπάνω.

4.5.4 Πραγματική Πυκνότητα Συσσώρευσης PD (%)

Η πυκνότητα συσσώρευσης, που ονομάζεται επίσης λόγος συμπίεσης, είναι πολύ σημαντικό να μετρηθεί, καθώς συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα και τη μικροσκληρότητα των τελικών τεμαχίων, όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια.

Σε πολλές εργασίες, η πυκνότητα συσσώρευσης υπολογίζεται διαιρώντας τη μάζα ενός στρώματος με τον θεωρητικό όγκο του στρώματος. Αυτό σημαίνει ότι, ο όγκος του στρώματος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας απλώς τις συνοριακές διαστάσεις του κατά μήκος των τριών αξόνων, x , y και z [217], [218]. Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παρούσα ενότητα, το πραγματικό ύψος στρώματος είναι διαφορετικό από το θεωρητικό ύψος στρώματος, δηλαδή από την κατακόρυφη μετατόπιση προς τα κάτω του εμβόλου κατασκευής της μηχανής ΕΠΛ/ΕΤΛ. Ως εκ τούτου, αυτό μπορεί να είναι ένας δείκτης του πόσο καλά "γεμίζει" το στρώμα σκόνης, αλλά δεν είναι ένας πραγματικός δείκτης του πόσο καλά έχουν τα ίδια τα σωματίδια σκόνης τοποθετηθεί

μέσα στο στρώμα, ώστε να αυξηθεί ο ατομικός αριθμός συντονισμού τους και να ελαχιστοποιηθούν τα κενά μεταξύ τους. Στην παρούσα εργασία, η πραγματική πυκνότητα πλήρωσης υπολογίζεται, διαιρώντας τη μάζα της αποτιθέμενης σκόνης στο στρώμα με το πραγματικό πάχος του στρώματος, το οποίο αναφέρεται στη μέση γραμμή του προφίλ επιφανειακής τραχύτητας που αναφέρεται στην επιφάνεια του στρώματος. Στη συνέχεια, το ποσοστό υπολογίζεται διαιρώντας την πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης με τη χύδην πυκνότητα του υλικού της σκόνης.

$$PD \left(\text{Kg}/\text{m}^3 \right) = \frac{m_{LAYER}}{V_{LAYER}} = \frac{1}{V_Z} \sum_{i=1}^{n_{particles}} m_{particle,i} \quad (4.86)$$

$$PD(\%) = \left(\frac{PD \left(\text{Kg}/\text{m}^3 \right)}{\rho_{powder,BULK}} \right) \cdot 100\% \quad (4.87)$$

Όπου το V_Z υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης (4.81) και αντικαθιστώντας κάθε όρο $Z_{i,j}^2$ με $Z_{i,j}$.

4.6 Σχεδιασμός Taguchi για Εναπόθεση με Λεπίδα

Ο σχεδιασμός πειραμάτων (Design of Experiments-DoE) Taguchi είναι ένα στατιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την επίδραση διαφόρων παραγόντων στο αποτέλεσμα ενός πειράματος, σε σχέση με κάποιο ποιοτικό κριτήριο που έχει οριστεί εκ των προτέρων. Ο αριθμός των παραγόντων και ο αριθμός των επιπέδων του κάθε παράγοντα οδηγεί στην επιλογή μιας ορθογώνιας συστοιχίας (ΟΣ) κατάλληλης να φιλοξενήσει όλους τους απαραίτητους συνδυασμούς των επιπέδων των παραγόντων, ώστε να επιτευχθούν σωστά αποτελέσματα [219].

Εξετάζονται τέσσερις μεταβλητές, και συγκεκριμένα

1. Ταχύτητα μετατόπισης της οδηγού λεπίδας κατά μήκος του άξονα εναπόθεσης (x) (u_{tr}). Η μεταβλητή αυτή εξετάστηκε σε τρία επίπεδα:
 - a) 0.01 m/sec
 - b) 0.05 m/sec
 - c) 0.1 m/sec

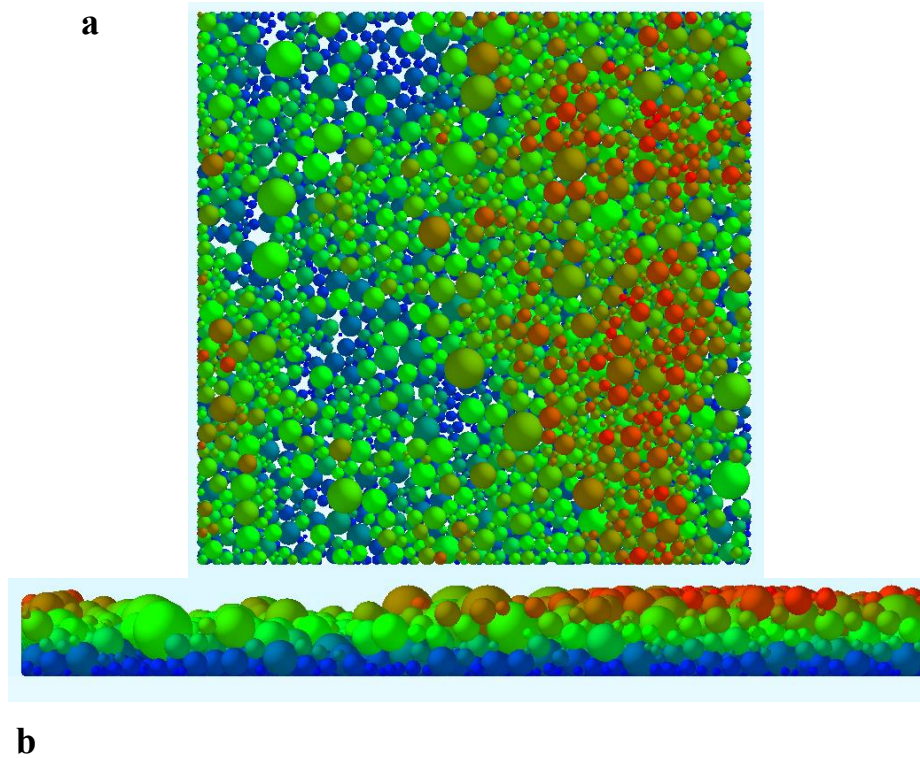
Τα επίπεδα αυτά επιλέχθηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ταχύτητας εναπόθεσης σκόνης που ισχύουν σήμερα στις βιομηχανικές μηχανές ΕΠΛ/ΕΤΛ. Αυτά επικυρώθηκαν τόσο στο πρωτότυπο σύστημα εναπόθεσης σκόνης ΕΠΛ/ΕΤΛ που σχεδιάστηκε [59], [103] όσο και μέσω διασταύρωσης με τη μεταφορική ταχύτητα του συστήματος εναπόθεσης σκόνης της βιομηχανικής μηχανής ΕΤΛ του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ (Z-rapid iSLM280).

2. Συχνότητα δόνησης της λεπίδας κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα (z) (f_{vib}).

Η μεταβλητή αυτή εξετάστηκε σε τρία επίπεδα:

- a) 500 Hz
- b) 1000 Hz
- c) 2000 Hz

Οι συχνότητες που επιλέχθηκαν ήταν σχετικά χαμηλές σε σύγκριση, για παράδειγμα, με τις συχνότητες των υπερήχων, δεδομένου ότι, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο μικρότερο είναι το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Επιπλέον, ο σκοπός των προσομοιώσεων ήταν να εξεταστεί κατά πόσον μια χαμηλής συχνότητας δονούμενη λεπίδα είναι προτιμότερη σε σύγκριση με την εξάπλωση της σκόνης χωρίς να εφαρμόζεται δόνηση στη λεπίδα, που είναι ο συνήθης τρόπος με τον οποίο εναποτίθεται η σκόνη στις βιομηχανικές μηχανές ΕΠΛ/ΕΤΛ. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι έχουν γίνει προκαταρκτικές δοκιμές της εναπόθεσης σκόνης μέσω επιστρωτήρα με λεπίδα χωρίς δόνηση, δεδομένου ότι σχεδόν κάθε εμπορική μηχανή ΕΤΛ/ΕΠΛ διαθέτει συστήματα εναπόθεσης σκόνης που δεν ταλαντώνουν τον επιστρωτήρα. Η προκαταρκτική δοκιμή εξέτασε την ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος για μια επίπεδη λεπίδα που δεν δονείται, σε δύο διαφορετικά επίπεδα μεταφορικής ταχύτητας, 0,1 και 0,01 m/sec. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 4.20. Το Σχήμα 4.20 και η διασταύρωση μεταξύ αυτού και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων σε περίπτωση δόνησης της λεπίδας (βλέπε Σχήμα 4.31) αποδεικνύουν ότι η δόνηση μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του στρώματος πούδρας όσον αφορά την ομοιογένεια και την ομαλότητα.



Σχήμα 4.20: Παράδειγμα εναπόθεσης σκόνης με μη ταλαντευόμενη λεπίδα. Ταχύτητα εναπόθεσης 0,08 m/sec, όπως αυτή που χρησιμοποιείται στις εμπορικές μηχανές.

3. Πλάτος ταλάντωσης της λεπίδας κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα (z) (A_{vib}). Η μεταβλητή αυτή εξετάστηκε σε τρία επίπεδα:
 - a) 1 μm
 - b) 2.5 μm
 - c) 5 μm

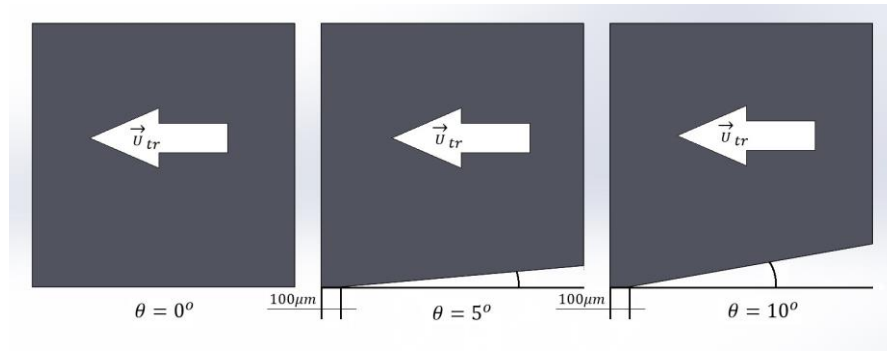
Οι τιμές του πλάτους επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ίσες ή μικρότερες από την ελάχιστη διάμετρο σωματιδίων σκόνης (5 μm). Με αυτή την παραδοχή, είναι αδύνατο να δημιουργηθεί ένα κενό μεταξύ της λεπίδας και της πλάκας οπίσθιου ορίου αρκετά μεγάλο ώστε να επιτραπεί στα σωματίδια σκόνης να διαφύγουν πίσω από τη λεπίδα καθώς ξεκινά η διαδικασία εναπόθεσης.

4. 4. Γωνία ελευθερίας της οδηγού λεπίδας (θ_{rel}). Η γεωμετρία της οδηγού λεπίδας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21. Η λεπίδα που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις έχει οιονεί κυβική σχεδίαση πλευράς 1 mm. Το μόνο χαρακτηριστικό της που τη διαφοροποιεί από έναν κύβο είναι η γωνία ελευθερίας που ξεκινά μετά από μια οριζόντια επίπεδη περιοχή 100 μm προς τα

πίσω, η οποία προβλέπεται προκειμένου η κάθετη δόνηση να δημιουργήσει αποτέλεσμα συμπίεσης στη σκόνη. Εάν δεν υπήρχε αυτή η οριζόντια περιοχή, στις λεπίδες με δόνηση 5 και 10 μοιρών, η συμπύκνωση του στρώματος μέσω δόνησης θα ήταν αδύνατη, αφού η εναπόθεση θα πραγματοποιούνταν μέσω μιας μόνο ακμής της λεπίδας. Επιπλέον, αυτό θα καθιστούσε την προσομοίωση μη ρεαλιστική, δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιούνται ακονισμένες λεπίδες για την εναπόθεση σκόνης. Το μέγεθος των 100 μm για αυτό το χαρακτηριστικό επιλέχθηκε σε σύγκριση με τη μεγαλύτερη επιτρεπόμενη διάμετρο σωματιδίων, η οποία έχει οριστεί στα 100 μm μέσω του περιβάλλοντος προσομοίωσης EDEM. Η μεταβλητή αυτή εξετάστηκε σε τρία επίπεδα:

- a) 0°
- b) 5°
- c) 10°

Οι γωνίες ελευθερίας επιλέχθηκαν με τρόπο που να μοιάζουν με τις σχετικά χοντρές, διαθέσιμες στο εμπόριο, οδηγούς λεπίδες. Η γεωμετρία των προφίλ των λεπίδων, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 4.21, δείχνει ότι, καθώς αυξάνεται η γωνία, μειώνεται η δευτερεύουσα επιφάνεια επαφής μεταξύ της λεπίδας και των σωματιδίων. Η κύρια (πρωτεύουσα) επιφάνεια επαφής ορίζεται ως η κάθετη επιφάνεια της λεπίδας που αναγκάζει τον λόφο της σκόνης να κινηθεί προς τη διεύθυνση του διανύσματος της μεταφορικής ταχύτητας. Η δευτερεύουσα επιφάνεια επαφής ορίζεται ως η περιοχή που ασκεί κατακόρυφη πίεση μέσω δόνησης στο στρώμα σκόνης, δηλαδή η λωρίδα πλάτους 100 μm και το κλάσμα της κεκλιμένης επιφάνειας πίσω από αυτή τη λωρίδα που αλληλεπιδρά με τα σωματίδια μέσω των δυνάμεων δόνησης και πρόσφυσης. Όταν η γωνία ελευθερίας ισούται με 0° , η δευτερεύουσα περιοχή επαφής είναι ίση με ολόκληρο το 1 mm^2 της κάτω επιφάνειας της λεπίδας του γιατρού, ενώ, όταν η γωνία ελευθερίας αυξάνεται, η δευτερεύουσα περιοχή επαφής μειώνεται σε 0,1 mm^2 συν τη φθίνουσα ζώνη επαφής της κεκλιμένης επιφάνειας εντός της οποίας εφαρμόζονται δυνάμεις συμπίεσης και πρόσφυσης μεταξύ της λεπίδας και των σωματιδίων.



Σχήμα 4.21: Πλευρική όψη της λεπίδας. Απεικόνιση της γωνίας ελευθερίας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μετώπου διασποράς της σκόνης.

Ο στόχος θα είναι η βελτιστοποίηση της απόκρισης των κριτηρίων ποιότητας, ταυτόχρονα. Ωστόσο, αυτό δεν είναι εύκολο, δεδομένου ότι κάθε μία από τις τέσσερις αποκρίσεις βελτιστοποιείται ξεχωριστά σε διαφορετικά επίπεδα. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια προσπάθεια να βρεθούν συνολικά βέλτιστα επίπεδα των μεταβλητών που εξετάζονται για όλα τα κριτήρια ποιότητας, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Αρχικά, εξετάζεται κάθε μία από τις τέσσερις αποκρίσεις ξεχωριστά.

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζεται η διάταξη των πειραμάτων σε ορθογώνια διάταξη L27 για το σχεδιασμό Taguchi των προσομοιώσεων εναπόθεσης σκόνης. Ο L27 παρέχει τη δυνατότητα εξέτασης 3 αλληλεπιδράσεων, η οποία είναι αρκετή για την παρούσα μελέτη. Η εξέταση περισσότερων αλληλεπιδράσεων θα περιέπλεκε υπερβολικά τον σχεδιασμό και θα οδηγούσε σε αριθμό δοκιμών συγκρίσιμο με τον πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό. Τα κριτήρια ποιότητας είναι τα 4 κριτήρια που περιεγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, δηλαδή η απόκλιση πάχους στρώματος, η μέση τετραγωνική ρίζα τραχύτητας στρώματος, η πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης στρώματος και ο λόγος κάλυψης επιφάνειας στρώματος. Η συνάρτηση απώλειας ποιότητας είναι «όσο χαμηλότερη τόσο καλύτερη» για τα LTD και RMS και «όσο υψηλότερη τόσο καλύτερη» για τα SCR και PD. Επιπλέον, παρουσιάζονται επίσης τα S_a , S_{sk} και S_{ku} , καθώς μέσω αυτών μπορούν να γίνουν χρήσιμες παρατηρήσεις.

4.7 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.22 και στο Σχήμα 4.23 και αφορούν τους μέσους όρους και το SNR (Λόγος Σήματος-Θορύβου) αντίστοιχα. Το διάγραμμα μέσων όρων απεικονίζει τη μέση απόκριση για κάθε συνδυασμό επιπέδων παραγόντων

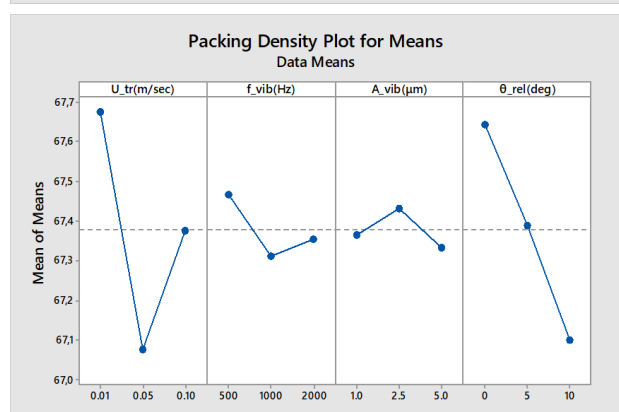
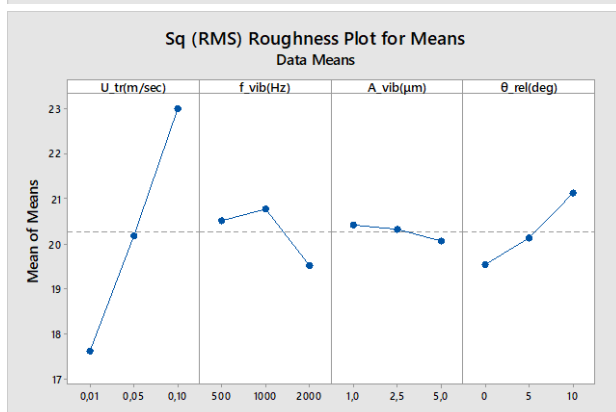
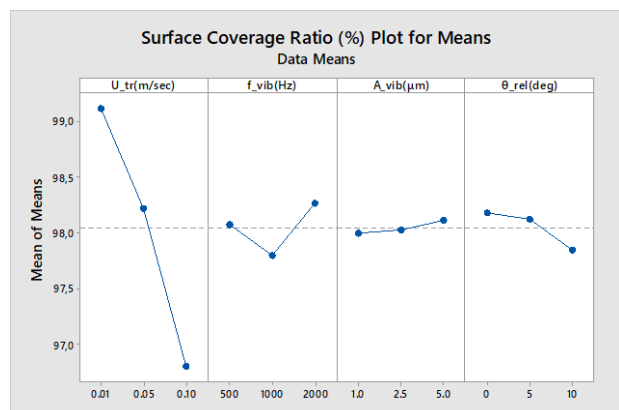
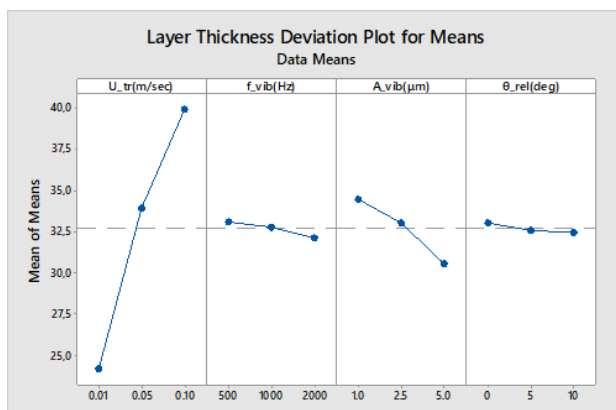
ελέγχου, ενώ το διάγραμμα SNR απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου (σήμα) προς την τυπική απόκλιση (θόρυβος). Αυτό σημαίνει ότι το διάγραμμα μέσων δείχνει τη μέση απόδοση, ενώ το διάγραμμα SNR δείχνει την απόκλιση από το σχεδιασμό. Επιπλέον, τα αποτελέσματα ANOVA παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8, τον Πίνακα 4.9 και τον Πίνακα 4.10 για το LTD, το SCR και το RMS αντίστοιχα.

Πίνακας 4.7: L27 Ορθογώνιος πίνακας του DoE Taguchi για την εναπόθεση σκόνης με λεπίδα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης.

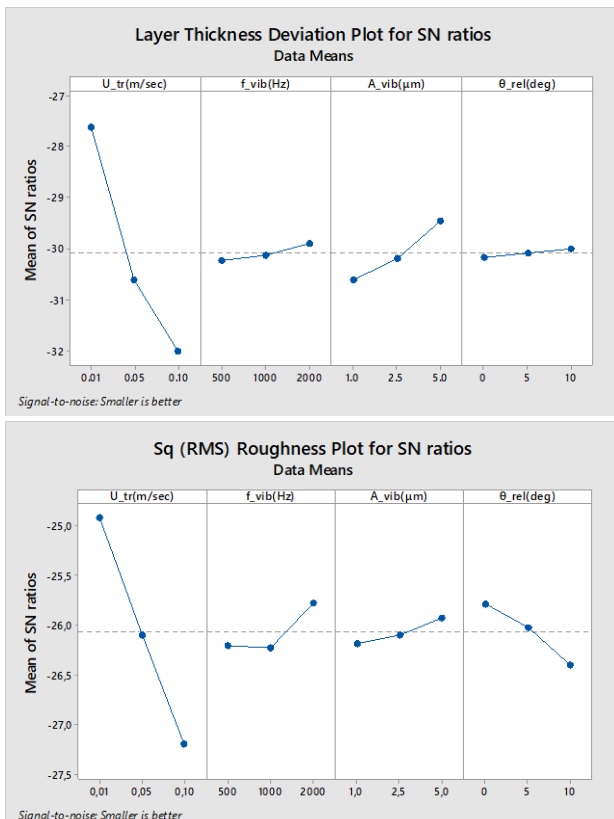
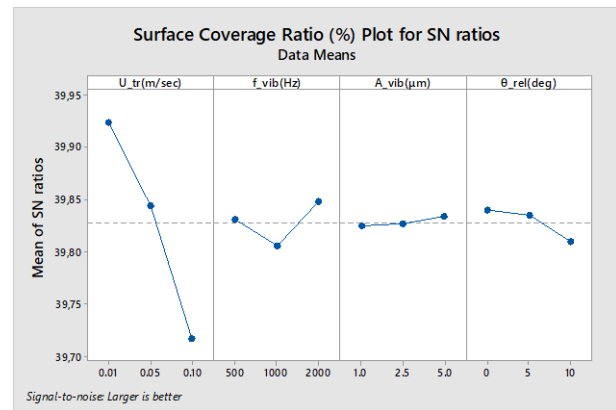
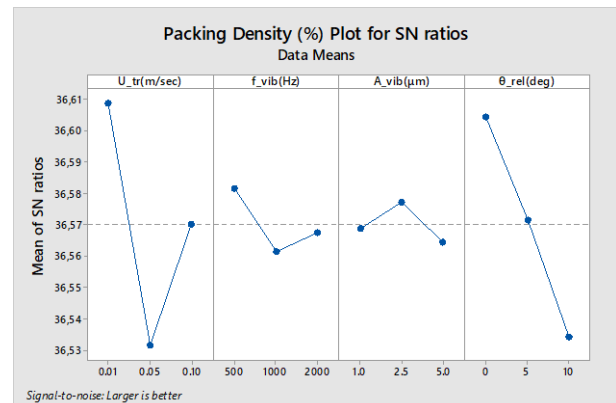
#	u_{tr} ($\frac{m}{sec}$)	f_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{rel} (deg.)	$(h_l - h_{th})$ (μm)	$ h_l - h_{th}|$ (μm)	SCR (%)	S_q (μm)	PD (%)	S_a (μm)	Ssk	Sku
1	0.01	500	1.0	0	-29.0	29.0	98.9	19.9	68.4	15.5	-0.672	3.889
2	0.01	500	2.5	5	-26.0	26.0	99.1	17.9	68.0	13.6	-0.906	4.852
3	0.01	500	5.0	10	-21.2	21.2	99.3	17.4	67.1	13.0	-1.179	5.572
4	0.01	1000	1.0	5	-26.7	26.7	99.1	18.1	67.6	13.8	-0.956	4.741
5	0.01	1000	2.5	10	-24.3	24.3	99.0	18.0	67.4	13.5	-1.351	5.626
6	0.01	1000	5.0	0	-22.2	22.2	99.3	16.1	68.0	12.1	-1.515	6.403
7	0.01	2000	1.0	10	-23.8	23.8	99.0	17.9	67.0	13.6	-1.338	5.570
8	0.01	2000	2.5	0	-23.0	23.0	99.1	17.0	67.8	12.8	-1.503	6.075
9	0.01	2000	5.0	5	-21.5	21.5	99.3	16.4	67.8	12.3	-1.431	6.232
10	0.05	500	1.0	5	-36.6	36.6	97.7	21.6	67.2	17.0	-0.685	3.347
11	0.05	500	2.5	10	-34.9	34.9	97.7	22.4	66.8	17.6	-0.577	3.362
12	0.05	500	5.0	0	-31.7	31.7	98.6	18.8	67.5	14.6	-1.042	4.358
13	0.05	1000	1.0	10	-36.9	36.9	97.9	20.4	66.8	16.1	-0.811	3.602
14	0.05	1000	2.5	0	-33.8	33.8	98.5	19.2	67.0	15.0	-0.926	3.993
15	0.05	1000	5.0	5	-32.1	32.1	98.4	19.9	67.1	15.5	-0.898	3.993
16	0.05	2000	1.0	0	-35.0	35.0	98.1	20.2	67.1	15.9	-0.869	3.698
17	0.05	2000	2.5	5	-32.4	32.4	98.6	19.2	67.1	14.9	-0.962	4.116
18	0.05	2000	5.0	10	-32.2	32.2	98.5	20.0	67.1	15.5	-0.815	3.956
19	0.10	500	1.0	10	-40.8	40.8	97.0	22.8	67.3	18.2	-0.399	3.051
20	0.10	500	2.5	0	-41.2	41.2	96.9	21.8	67.9	17.4	-0.597	3.059
21	0.10	500	5.0	5	-36.9	36.9	97.5	22.0	67.0	17.3	-0.596	3.310
22	0.10	1000	1.0	0	-41.4	41.4	97.0	21.7	67.6	17.3	-0.633	3.063
23	0.10	1000	2.5	5	-40.7	40.7	96.1	24.9	67.4	20.1	-0.323	2.732
24	0.10	1000	5.0	10	-37.0	37.0	94.9	28.7	66.9	22.9	-0.224	2.753
25	0.10	2000	1.0	5	-40.2	40.2	97.3	21.3	67.3	17.0	-0.622	3.169
26	0.10	2000	2.5	10	-41.1	41.1	97.3	22.5	67.5	18.0	-0.335	2.940
27	0.10	2000	5.0	0	-40.2	40.2	97.2	21.3	67.5	16.8	-0.558	3.604

Κρίνοντας από το Σχήμα 4.22 και το Σχήμα 4.23, συμπεραίνεται εύκολα ότι κανένας από τους τέσσερις παράγοντες δεν έχει στατιστικά σημαντική επίδραση στην πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης του στρώματος. Η πυκνότητα συσσώρευσης

κυμαίνεται από 66,8% (ελάχιστο, δοκιμές #11 και #13) έως 68,4% (μέγιστο, δοκιμή #1), ενώ ο αριθμός στο διάγραμμα μέσων κυμαίνεται μεταξύ περίπου 67% και 67,7%. Πράγματι, ο μηχανισμός συμπίεσης της σκόνης βασίζεται κυρίως στη βαρύτητα, αφού, ακόμη και η δονούμενη λεπίδα, ωθεί το στρώμα μόνο στιγμιαία προς τα κάτω και στη συνέχεια κινείται ξανά προς τα πάνω. Η λεπίδα δονείται έχοντας το χαμηλότερο σημείο της στο θεωρητικό πάχος του στρώματος, πράγμα που σημαίνει ότι δεν συμπιέζει το στρώμα κάτω από το επίπεδο του πραγματικού πάχους του στρώματος. Ωστόσο, η θεωρητική πυκνότητα συσσώρευσης, δηλαδή η πυκνότητα του στρώματος που υπολογίζεται μέσω της μάζας σκόνης εντός του στρώματος διαιρούμενη με τον θεωρητικό όγκο του στρώματος, μεταβάλλεται με αντιστρόφως ανάλογο τρόπο σε σχέση με την απόκλιση του πάχους του στρώματος. Συνοψίζοντας, η πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης δεν θα εξεταστεί από εδώ και στο εξής ως κριτήριο ποιότητας, δεδομένου ότι αποδείχθηκε ότι οι τέσσερις παράγοντες δεν την επηρεάζουν ουσιαστικά.



Σχήμα 4.22: Διαγράμματα μέσων όρων των τεσσάρων κριτηρίων ποιότητας της ανάλυσης Taguchi για την εναπόθεση της σκόνης; **(a)** LTD; **(b)** SCR; **(c)** RMS; **(d)** PD.

**a****b****c****d**

Σχήμα 4.23: Διαγράμματα SNR των τεσσάρων κριτηρίων ποιότητας της ανάλυσης Taguchi για την εναπόθεση σκόνης; **(a)** LTD; **(b)** SCR; **(c)** RMS; **(d)** PD.

4.7.1 Αποτελέσματα LTD

Αναφορικά με τον Πίνακα 4.8, η απόκλιση πάχους στρώματος $|h_l - h_{th}|$ επηρεάζεται κυρίως από τη μεταφορική ταχύτητα της λεπίδας και, σε πολύ μικρότερο βαθμό, από το πλάτος της δόνησης της λεπίδας. Είναι σαφές ότι, όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα πρόωσης της λεπίδας του επιστρωτήρα, τόσο περισσότερο το πραγματικό πάχος στρώματος πλησιάζει το θεωρητικό πάχος στρώματος. Ομοίως, όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της δόνησης, τόσο μικρότερη είναι η απόκλιση του πάχους στρώματος. Η συχνότητα της δόνησης και η γωνία ελευθερίας της λεπίδας επιδεικνύουν ασθενή επίδραση στην απόκλιση του πάχους στρώματος, όπως φαίνεται στη στήλη "Contribution" του Πίνακα 4.8.

Η ANOVA για την απόκλιση του πάχους στρώματος (Πίνακας 4.8) δείχνει ότι η ταχύτητα εναπόθεσης υπαγορεύει την απόκλιση του πάχους στρώματος κατά 87,49%, ενώ το πλάτος της δόνησης συμβάλλει κατά 5,70%. Η συμβολή των άλλων δύο παραγόντων (συχνότητα δόνησης και γωνία ελευθερίας της λεπίδας) είναι αμελητέα, με 0,36% και 0,12% αντίστοιχα.

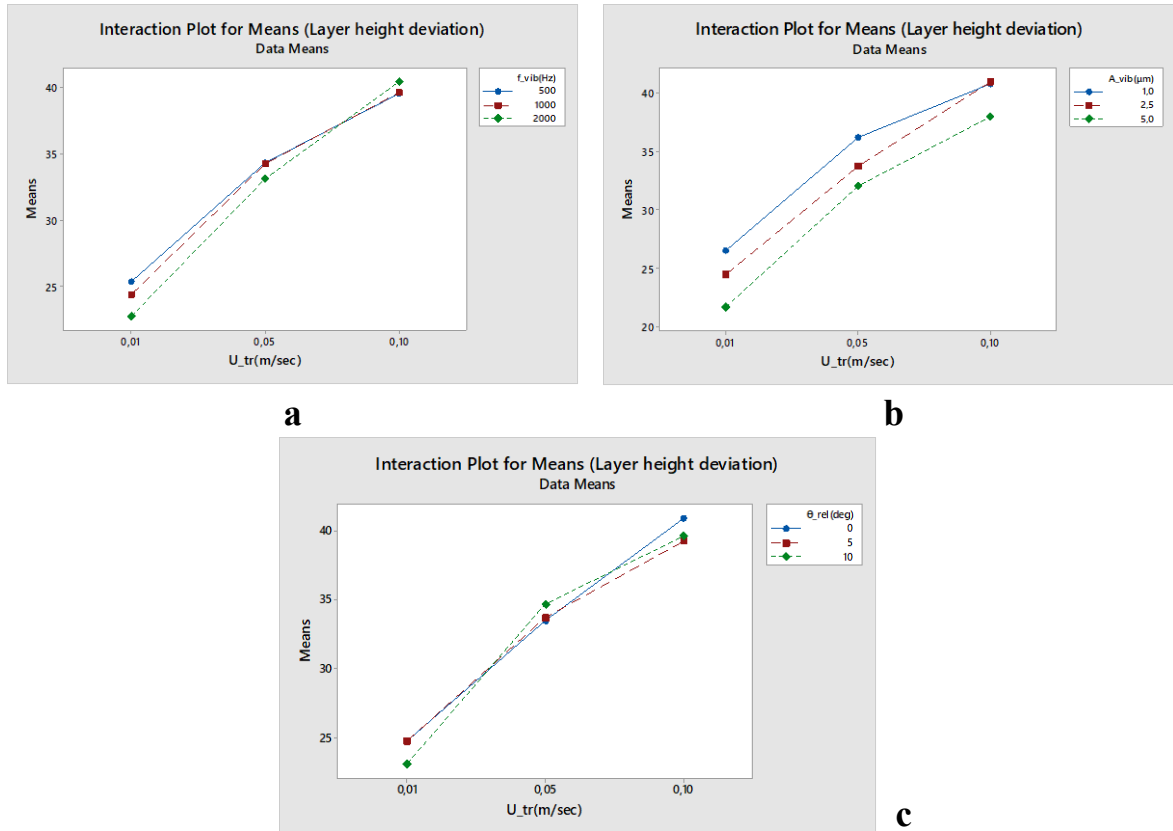
Πίνακας 4.8: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την απόκλιση πάχους στρώματος.

Source	DoF	SeqSS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Regression	7	1182.59	94.68%	1182.59	168.941	48.33	0.000
U_{tr} (m/sec)	1	1092.82	87.49%	65.78	65.783	18.82	0.000
f_{vib} (Hz)	1	4.51	0.36%	14.28	14.284	4.09	0.058
A_{vib} (μm)	1	71.25	5.70%	37.67	37.668	10.78	0.004
θ_{rel} (deg)	1	1.56	0.12%	0.65	0.653	0.19	0.670
U_{tr} (m/sec) *f_{vib} (Hz)	1	9.77	0.78%	9.77	9.772	2.80	0.111
U_{tr} (m/sec) *A_{vib} (μm)	1	2.66	0.21%	2.66	2.659	0.76	0.394
U_{tr} (m/sec) *θ_{rel} (deg)	1	0.01	0.00%	0.01	0.014	0.00	0.950
Error	19	66.42	5.32%	66.42	3.496		
Total	26	1249.01	100.00%				

Το ίδιο ισχύει και για την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων. Οι μόνες αλληλεπιδράσεις που εξετάστηκαν είναι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ταχύτητας της λεπίδας και των άλλων παραγόντων, δεδομένου ότι είναι προφανώς ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.24, η μεταφορική ταχύτητα της λεπίδας και το πλάτος της δόνησης έχουν σχετικά παράλληλες γραμμές, πράγμα που σημαίνει ότι επιδεικνύουν χαμηλό βαθμό αλληλεπίδρασης, ο οποίος είναι ανιχνεύσιμος μόνο σε υψηλότερες ταχύτητες. Το ίδιο ισχύει και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της ταχύτητας της λεπίδας και της συχνότητας της δόνησής της. Δεν επιδεικνύουν καμία αλληλεπίδραση σε χαμηλά και μεσαία επίπεδα ταχύτητας, ωστόσο, σε μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας γίνεται πιο επωφελής η διατήρηση χαμηλής συχνότητας, ενώ σε χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες συμβαίνει το αντίθετο. Όσον αφορά τη γωνία ελευθερίας της λεπίδας, η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτής και της ταχύτητας της λεπίδας αποκαλύπτει ότι, σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες οι αιχμηρότερες λεπίδες με μεγάλη γωνία ελευθερίας αποδίδουν καλύτερα, ωστόσο, σε μεσαίες ταχύτητες, η βέλτιστη απόδοση είναι αυτή της λεπίδας με επίπεδη κάτω επιφάνεια.

Η εξίσωση παλινδρόμησης της απόκλισης του πάχους του στρώματος δίνεται από τη σχέση (4.88);

$$|h_l - h_{th}| = 29.78 + 126.8u_{tr} - 0.00205f_{vib} - 1.26A_{vib} - 0.067\theta_{rel} + 0.0262u_{tr}f_{vib} + 5.17u_{tr}A_{vib} + 0.15u_{tr}\theta_{rel} \quad (4.88)$$



Σχήμα 4.24: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τους μέσους όρους της απόκλισης του πάχους του στρώματος; **(a)** u_{tr} - f_{vib} ; **(b)** u_{tr} - A_{vib} ; **(c)** u_{tr} - θ_{rel} .

Ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων είναι ο εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{tr} = 0.01 \text{ m/sec} \\ f_{vib} = 2000 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 5 \mu\text{m} \\ \theta_{rel} = 10^\circ \end{array} \right\}$$

Ο οποίος, σύμφωνα με την Εξίσωση (4.88), δίνει τη βέλτιστη απόκλιση πάχους στρώματος

$$|h_l - h_{th}|_{opt} = 20.8 \mu\text{m}$$

Μετά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης με τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων, επιτεύχθηκε η επικύρωση της αναμενόμενης απόκλισης του πάχους στρώματος, με την τιμή που προέκυψε να είναι

$$|h_l - h_{th}|_{opt,sim} = 20.4 \mu\text{m}$$

Έχοντας απόκλιση (-) 1.9% από την αναμενόμενη τιμή των 20.8 μm , το οποίο είναι μικρότερο από το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης, όπως υπολογίζεται από την ANOVA (5.32%).

4.7.2 Αποτελέσματα SCR

Όσον αφορά τον λόγο κάλυψης της επιφάνειας, τα Σχήματα 4.22 και 4.23 δείχνουν ότι αυτός, όπως και η απόκλιση του πάχους στρώματος, επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα εναπόθεσης (78,44% συμβολή, Πίνακας 4.9). Και πάλι, η αύξηση της ταχύτητας εναπόθεσης συνοδεύεται από μείωση του λόγου κάλυψης της επιφάνειας, πράγμα που σημαίνει ότι η ποιότητα του στρώματος επιδεινώνεται.

Πίνακας 4.9: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για τον λόγο κάλυψης επιφάνειας.

Source	DoF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Regression	7	264.644	84.48%	264.644	378.063	14.77	0.000
U_{tr} (m/sec)	1	245.720	78.44%	13.689	136.885	5.35	0.032
f_{vib} (Hz)	1	0.3201	1.02%	0.0051	0.00512	0.02	0.889
A_{vib} (μm)	1	0.0581	0.19%	0.6210	0.62098	2.43	0.136
θ_{rel} (deg)	1	0.5000	1.60%	0.0021	0.00213	0.01	0.928
U_{tr} (m/sec) *f_{vib} (Hz)	1	0.0922	0.29%	0.0922	0.09218	0.36	0.556
U_{tr} (m/sec) *A_{vib} (μm)	1	0.6259	2.00%	0.6259	0.62591	2.45	0.134
U_{tr} (m/sec) *θ_{rel} (deg)	1	0.2961	0.95%	0.2961	0.29611	1.16	0.296
Error	19	48.630	15.52%	48.630	0.25595		
Total	26	313.274	100.00%				

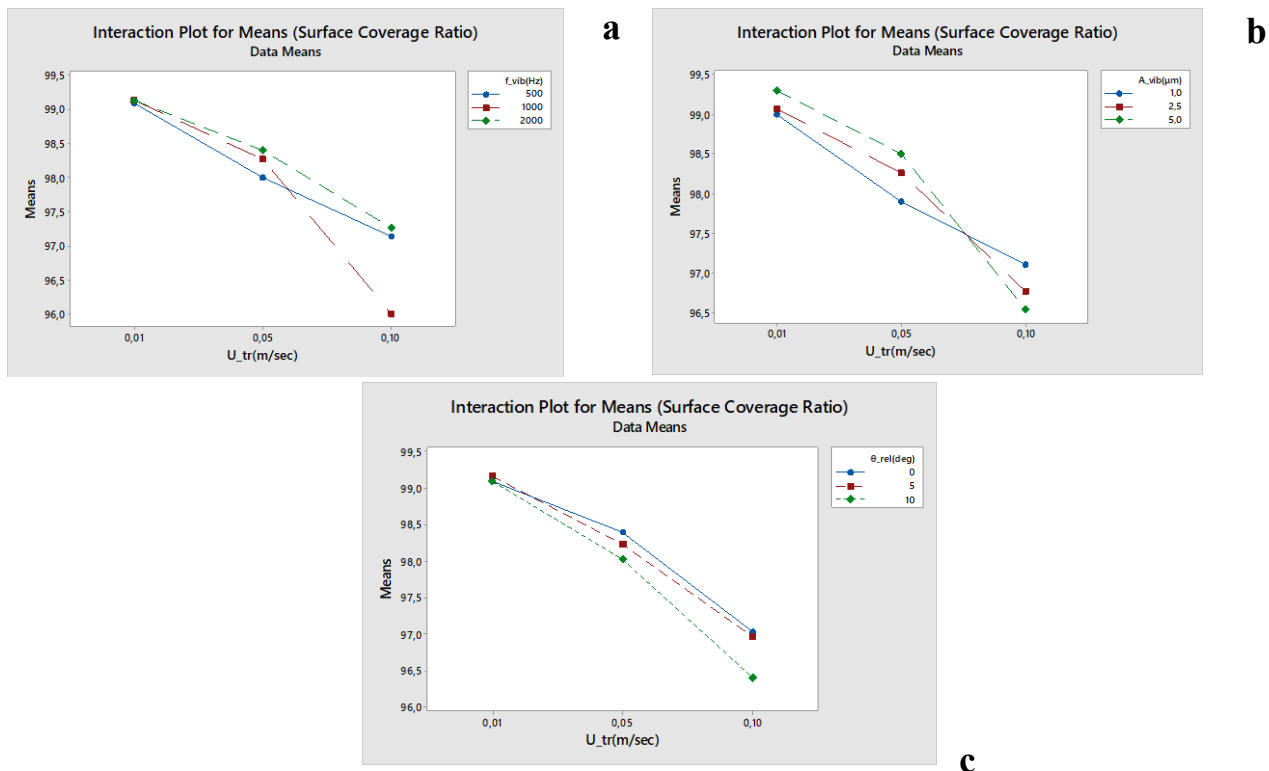
Από τον Πίνακα 4.9, γίνεται σαφές ότι η συχνότητα και το πλάτος της δόνησης, καθώς και η γωνία ελευθερίας της λεπίδας, παίζουν μικρό ρόλο (1,02%, 0,19% και 1,60% αντίστοιχα) όσον αφορά τον λόγο κάλυψης της επιφάνειας. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25, μπορεί να παρατηρηθεί ότι, όταν πρόκειται για το ζεύγος ταχύτητας εναπόθεσης-γωνίας ελευθερίας, υπάρχει αμελητέα αλληλεπίδραση, με τις λεπίδες με επίπεδη κάτω επιφάνεια να παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις ταχύτητες. Ωστόσο, και για τα δύο ζεύγη ταχύτητα εναπόθεσης-συχνότητα δόνησης και ταχύτητα εναπόθεσης-πλάτος δόνησης, μόνο στις χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες δεν υπάρχει αλληλεπίδραση και η κάλυψη της επιφάνειας επηρεάζεται θετικά με υψηλότερη συχνότητα και πλάτος. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας εναπόθεσης η τάση αυτή αντιστρέφεται πλήρως όσον αφορά το πλάτος και, μικρότερα πλάτη δίνουν καλύτερες αναλογίες κάλυψης στη μέγιστη ταχύτητα. Όσον αφορά τη συχνότητα, τα μεσαία επίπεδα συχνότητας επιφέρουν δραστική επιδείνωση της

κάλυψης της επιφάνειας στη μέγιστη ταχύτητα εναπόθεσης, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η φυσική συχνότητα του συστήματος βρίσκεται περίπου στα 1000 Hz. Η εξίσωση παλινδρόμησης του λόγου κάλυψης της επιφάνειας δίνεται από την εξίσωση (4.89),

$$SCR(\%) = 98.907 - 18.29u_{tr} + 0.000039f_{vib} + 0.162A_{vib} + 0.0038\theta_{rel} + 0.00254u_{tr}f_{vib} - 2.51u_{tr}A_{vib} - 0.697u_{tr}\theta_{rel} \quad (4.89)$$

Ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων είναι ο εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{tr} = 0.01 \text{ m/sec} \\ f_{vib} = 2000 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 5 \mu\text{m} \\ \theta_{rel} = 0^\circ \end{array} \right.$$



Σχήμα 4.25: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τους μέσους όρους του λόγου κάλυψης επιφάνειας; **(a)** u_{tr} - f_{vib} ; **(b)** u_{tr} - A_{vib} ; **(c)** u_{tr} - θ_{rel} .

Ο οποίος, σύμφωνα με την Εξίσωση (4.89), δίνει τη βέλτιστη αναλογία κάλυψης επιφάνειας

$$SCR_{opt} = 99.54\%$$

Μετά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης με τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων, επετεύχθη επικύρωση του αναμενόμενου λόγου κάλυψης επιφάνειας, με την τιμή να είναι

$$SCR_{opt,sim} = 99.3\%$$

με απόκλιση (-) 0,2% από την αναμενόμενη τιμή του 99,54%, η οποία είναι μικρότερη από το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης, όπως υπολογίζεται από την ANOVA (15,52%). Το σφάλμα της παλινδρόμησης είναι μεγαλύτερο από 10%, πιθανώς λόγω της υψηλής εγγενούς πολυπλοκότητας της διαδικασίας. Ωστόσο, αυτό δεν είναι αρκετό για να βλάψει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται από την υπολογιζόμενη απόκλιση μεταξύ της προσομοίωσης και της αναμενόμενης τιμής της παλινδρόμησης.

4.7.3 Αποτελέσματα S_q -RMS

Το διάγραμμα για τους μέσους όρους του S_q (RMS επιφανειακή τραχύτητα) δείχνει ότι, σε συμφωνία με τις προηγούμενες παραμέτρους ποιότητας, όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα εναπόθεσης, τόσο μικρότερη είναι η τραχύτητα, άρα τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της επιφάνειας. Παρά τις προηγούμενες παραμέτρους ποιότητας, οι οποίες επηρεάστηκαν ελάχιστα από τη γωνία ελευθερίας, η επιφανειακή τραχύτητα φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από αυτήν. Οι πιο επίπεδες λεπίδες τείνουν να δημιουργούν πιο ομαλές επιφάνειες, πιθανώς λόγω της αυξημένης ζώνης επαφής μεταξύ αυτών και της επιφάνειας. Και πάλι, τα υψηλά επίπεδα συχνότητας και πλάτους παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την τραχύτητα της επιφάνειας.

Πίνακας 4.10: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επιφανειακή RMS τραχύτητα.

Source	DoF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Regression	7	166.032	84.33%	166.032	237.188	14.60	0.000
U_{tr} (m/sec)	1	129.530	65.79%	0.514	0.5136	0.32	0.580
f_{vib} (Hz)	1	5.696	2.89%	1.853	18.529	1.14	0.299
A_{vib} (μm)	1	0.632	0.32%	11.329	113.287	6.97	0.016
θ_{rel} (deg)	1	11.045	5.61%	0.050	0.0504	0.03	0.862
U_{tr} (m/sec) *f_{vib} (Hz)	1	0.000	0.00%	0.000	0.0000	0.00	0.996
U_{tr} (m/sec) *A_{vib} (μm)	1	12.539	6.37%	12.539	125.390	7.72	0.012
U_{tr} (m/sec) *θ_{rel} (deg)	1	6.590	3.35%	6.590	65.902	4.06	0.058
Error	19	30.860	15.67%	30.860	16.242		
Total	26	196.892	100.00%				

Η ταχύτητα εναπόθεσης είναι και πάλι ο επικρατέστερος παράγοντας που επηρεάζει (65,79%), ωστόσο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.10 (ANOVA για το RMS), η γωνία ελευθερίας και η συχνότητα της δόνησης είναι επίσης σημαντικές (5,61% και 2,89% συνεισφορά αντίστοιχα). Επιπλέον, ενώ το πλάτος δεν φαίνεται να έχει ισχυρή επιρροή στην απόκριση (0,32%), η αλληλεπίδρασή του με την ταχύτητα εναπόθεσης είναι αρκετά σημαντική (6,37%).

Στο Σχήμα 4.26, είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι, παρόλο που σε χαμηλή ταχύτητα εναπόθεσης η επίδραση της διαφορετικής γωνίας ελευθερίας είναι αμελητέα στην απόκριση S_q , όσο αυξάνεται η ταχύτητα, τόσο χειρότερα είναι τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται μέσω των πιο αιχμηρών λεπίδων, όσον αφορά την παραγόμενη τραχύτητα επιφάνειας. Επιπλέον, ενώ στην περιοχή μεταξύ χαμηλών και μεσαίων ταχυτήτων δεν φαίνεται να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ ταχύτητας και συχνότητας δόνησης ή μεταξύ ταχύτητας και πλάτους δόνησης, η τάση αυτή αλλάζει μεταξύ μεσαίων και υψηλών ταχυτήτων. Είναι ενδιαφέρον ότι, ενώ στις χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες είναι επωφελές να εφαρμόζεται υψηλό πλάτος δόνησης, στις υψηλές ταχύτητες εναπόθεσης συμβαίνει το αντίστροφο και είναι πιο επωφελές να επιλέγεται χαμηλότερη τιμή πλάτους δόνησης. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην υψηλή ποσότητα κινητικής ενέργειας που τροφοδοτείται προς τα σωματίδια, ποσότητα που ξεπερνά ένα όριο και οδηγεί σε πιο ασταθή συμπεριφορά της κλίνης σκόνης, οδηγώντας σε περισσότερες επιφανειακές ατέλειες.

Η εξίσωση παλινδρόμησης της επιφανειακής RMS τραχύτητας δίνεται από την εξίσωση (4.90):

$$S_q = 20.02 + 11.2u_{tr} - 0.000739f_{vib} - 0.691A_{vib} - 0.019\theta_{rel} + 0.0001u_{tr}f_{vib} + 11.22u_{tr}A_{vib} + 3.29u_{tr}\theta_{rel} \quad (4.90)$$

Ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων είναι ο εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{tr} = 0.01 \text{ m/sec} \\ f_{vib} = 2000 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 5 \mu\text{m} \\ \theta_{rel} = 0^\circ \end{array} \right.$$

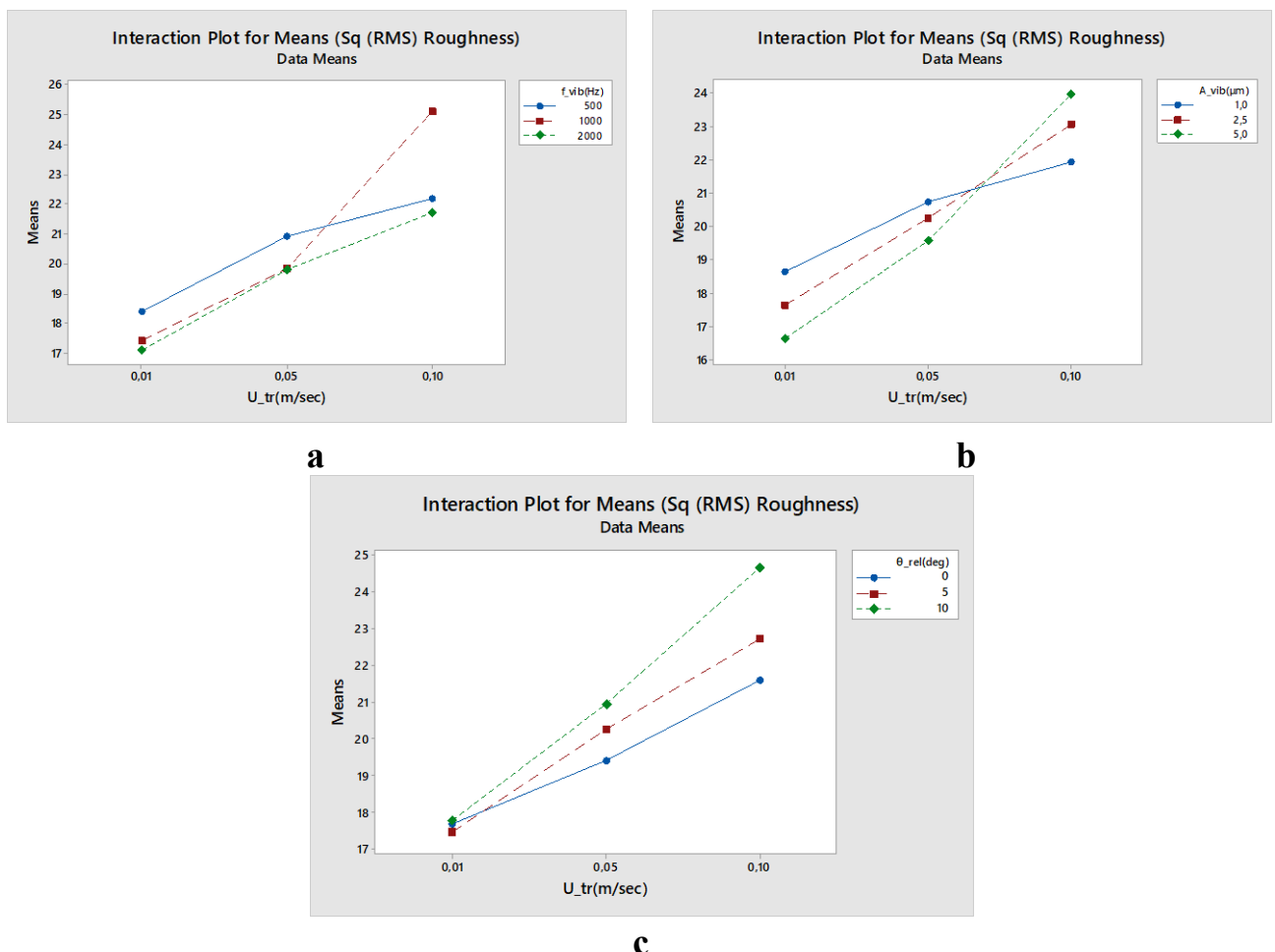
Ο οποίος, σύμφωνα με την Εξίσωση (4.90), δίνει τη βέλτιστη επιφανειακή τραχύτητα RMS

$$S_{q_{opt}} = 15.8 \mu m$$

Μετά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης με τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων, επιτεύχθηκε η επικύρωση της αναμενόμενης επιφανειακής τραχύτητας RMS, με την τιμή να είναι

$$S_{q_{opt,sim}} = 15.7 \mu m$$

με απόκλιση (-) 0,6% από την αναμενόμενη τιμή των 15,8 μm , η οποία είναι μικρότερη από το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης, όπως υπολογίστηκε από την ANOVA (15,67%). Και πάλι, το σφάλμα μπορεί να ξεπεράσει το 10% λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας, ωστόσο, αυτό δεν είναι αρκετό για να επηρεάσει αρνητικά την αξιοπιστία του πειράματος και την εγκυρότητα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.



c

Σχήμα 4.26: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τους μέσους όρους της επιφανειακής RMS τραχύτητας; **(a)** u_{tr} - f_{vib} ; **(b)** u_{tr} - A_{vib} ; **(c)** u_{tr} - θ_{rel} .

4.8 Συζήτηση

Ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι, στην περίπτωση που είναι απολύτως απαραίτητο να αυξηθεί κατά πολύ η ταχύτητα εναπόθεσης, το αρνητικό αποτέλεσμα όσον αφορά το S_q -RMS και το SCR μπορεί να αντισταθμιστεί σε κάποιο βαθμό με την επιλογή λεπίδων με επίπεδη κάτω επιφάνεια αντί για αιχμηρές και τη μείωση του πλάτους δόνησης, διατηρώντας παράλληλα υψηλή συχνότητα δόνησης. Αυτό οδηγεί σε ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση του πάχους του στρώματος, αλλά αυτό αντιμετωπίζεται ευκολότερα μέσω της ρύθμισης της καθοδικής κίνησης του εμβόλου κατασκευής, δηλαδή του θεωρητικού πάχους του στρώματος, ενώ μια κακή τιμή SCR και S_q -RMS σηματοδοτεί σημαντικές επιφανειακές ατέλειες που μπορούν να κληρονομηθούν στα επόμενα στρώματα.

Γενικά, το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων και για τα τρία κριτήρια ποιότητας είναι κατά $\frac{3}{4}$ το ίδιο (αναφορικά με τα u_{tr} , f_{vib} και A_{vib}), σε

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{tr} = 0.01 \text{ m/sec} \\ f_{vib} = 2000 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 5 \mu\text{m} \end{array} \right\}$$

με την παρατήρηση ότι μια λεπίδα με επίπεδη κάτω επιφάνεια προάγει τη βέλτιστη SCR και RMS, ενώ μια αιχμηρή λεπίδα προάγει μια καλύτερη LTD, συμβιβάζοντας τις άλλες δύο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11: Σύγκριση επιδόσεων των βέλτιστων ρυθμίσεων διασποράς LTD ,SCR και RMS.

OPTIMUM	u_{tr} (m/sec)	f_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{rel} (deg)	LTD_{reg} (LTD_{sim})	SCR_{reg} (SCR_{sim})	$S_{q_{reg}}$ ($S_{q_{sim}}$)	Ssk_{sim}	Sku_{sim}
LTD	0.01	2000	5	10	20.8 (20.4)	99.51 (99.29)	15.9 (16.5)	-1.412	6.304
SCR	0.01	2000	5	0	21.4 (22.1)	99.54 (99.33)	15.8 (15.7)	-1.543	6.530
RMS	0.01	2000	5	0	21.4 (22.1)	99.54 (99.33)	15.8 (15.7)	-1.543	6.530

(**Σημείωση:** Reg: “regression”, sim: “simulation”.)

Δεδομένου ότι η μέθοδος της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης διαφόρων κριτηρίων ποιότητας είναι πολύ δύσκολη και δεν δείχνει πάντα με σαφήνεια προς μια ορισμένη βέλτιστη λύση, η παρούσα εργασία περιλαμβάνει μια προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν η επιφανειακή λοξότητα και η κύρτωση ως ισοδύναμοι δείκτες της ποιότητας της επιφάνειας.

Αρχικά, προκειμένου να αξιολογηθούν ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια ποιότητας, τα LTD, SCR και RMS κανονικοποιούνται έτσι ώστε οι τιμές που παίρνουν να είναι μεταξύ 0 και 1 και για τις 27 δοκιμές του DoE Taguchi. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ένας σταθμισμένος μέσος όρος αυτών, χρησιμοποιώντας βελτιστοποιημένους συντελεστές βαρύτητας, όπως φαίνεται στον *Πίνακα 4.12* και στον *Πίνακα 4.13*.

Αυτοί οι σταθμισμένοι μέσοι όροι υπολογίζονται με το άθροισμα των κανονικοποιημένων τιμών LTD, RMS και (100-SCR), ώστε όλες τους να βελτιστοποιούν τη διαδικασία όταν ελαχιστοποιούνται. Ωστόσο, η σύνδεση μεταξύ αυτών των σταθμισμένων μέσων και του πειράματος πραγματοποιείται μέσω της γραφικής παράστασης των σταθμισμένων μέσων σε σχέση με τις τιμές Ssk και Sku, καθώς είναι γενική παρατήρηση ότι η απόδοση των δοκιμών γίνεται καλύτερη όσο μικρότερες (αρνητικές) είναι οι τιμές Ssk και όσο μεγαλύτερες (θετικές) οι τιμές Sku.

Εξετάζοντας προσεκτικά τον *Πίνακα 4.7*, παρατηρούμε ότι η κύρτωση όλων των δοκιμών έχει αρνητική τιμή, κάτι που είναι αναμενόμενο, καθώς οι άνω επιφάνειες των σφαιρικών σωματιδίων δημιουργούν επιφάνειες που διαθέτουν πιο ομαλές, στρογγυλές κορυφές και βαθύτερες, πιο οξείες κοιλάδες, με κατανομή που αποκλίνει προς τα πάνω. Επιπλέον, σχεδόν όλες οι δοκιμές παρουσιάζουν τιμές κύρτωσης μεγαλύτερες από 3 (εκτός από τις δοκιμές #23 και #24), κάτι που είναι επίσης αναμενόμενο, καθώς υποδηλώνει την ύπαρξη υπερβολικά βαθιών κοιλάδων, αφού, όπως ήδη αναφέρθηκε, οι κορυφές είναι αρκετά ομοιόμορφες, διαμορφωμένες σαν άνω ημισφαίρια.

Αφού τακτοποιήσουμε τις γραμμές του *Πίνακα 4.7* με αύξουσα σειρά για (i) Ssk και (ii) Sku, σχεδιάζουμε τα τρία κριτήρια ποιότητας σε σχέση με τα Ssk και Sku αντίστοιχα, στα *Σχήματα 4.27* και *4.28*. Το διάγραμμα της λοξότητας αποκαλύπτει μια σαφή τάση. Καθώς η ποιότητα του στρώματος επιδεινώνεται (αύξηση των LTD και RMS, μείωση του SCR), η τιμή της λοξότητας τείνει να γίνει μεγαλύτερη, πλησιάζοντας το μηδέν από την αρνητική πλευρά. Ομοίως, το διάγραμμα της κύρτωσης αποκαλύπτει παρόμοια τάση. Καθώς η ποιότητα του στρώματος επιδεινώνεται (αύξηση

των LTD και RMS, μείωση του SCR), η τιμή της κύρτωσης τείνει να γίνεται μικρότερη, πλησιάζοντας το μηδέν από τη θετική πλευρά. Τα δύο προαναφερθέντα σχήματα παρέχουν τη γραμμική προσέγγιση των γραφικών παραστάσεων των τριών κριτηρίων ποιότητας σε σχέση με τα Ssk και Sku, με τις εξισώσεις τους και το R^2 .

Πίνακας 4.12: L27 Ορθογώνιος πίνακας του DoE Taguchi για την εναπόθεση σκόνης (με αποτελέσματα). Γραμμές ταξινομημένες κατά αύξουσα τιμή Ssk.

#	u_{tr} ($\frac{m}{sec}$)	f_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{rel} (deg.)	$|h_l - h_{th}|$ (μm)	$\frac{(100 - SCR)}{100}$ (%)	S_q (μm)	LTD _n	$\frac{(100 - SCR)_n}{100}$	S_{q_n}	WM	Ssk	Sku
6	0.01	1000	5	0	22.2	0.7	16.1	0.050	0.000	0.000	0.017	-1.515	6.403
8	0.01	2000	2.5	0	23	0.9	17	0.089	0.045	0.071	0.076	-1.503	6.075
9	0.01	2000	5	5	21.5	0.7	16.4	0.015	0.000	0.024	0.019	-1.431	6.232
5	0.01	1000	2.5	10	24.3	1	18	0.153	0.068	0.151	0.148	-1.351	5.626
7	0.01	2000	1	10	23.8	1	17.9	0.129	0.068	0.143	0.134	-1.338	5.57
3	0.01	500	5	10	21.2	0.7	17.4	0.000	0.000	0.103	0.062	-1.179	5.572
12	0.05	500	5	0	31.7	1.4	18.8	0.520	0.159	0.214	0.318	-1.042	4.358
17	0.05	2000	2.5	5	32.4	1.4	19.2	0.554	0.159	0.246	0.350	-0.962	4.116
4	0.01	1000	1	5	26.7	0.9	18.1	0.272	0.045	0.159	0.193	-0.956	4.741
14	0.05	1000	2.5	0	33.8	1.5	19.2	0.624	0.182	0.246	0.375	-0.926	3.993
2	0.01	500	2.5	5	26	0.9	17.9	0.238	0.045	0.143	0.171	-0.906	4.852
15	0.05	1000	5	5	32.1	1.6	19.9	0.540	0.205	0.302	0.380	-0.898	3.993
16	0.05	2000	1	0	35	1.9	20.2	0.683	0.273	0.325	0.448	-0.869	3.698
18	0.05	2000	5	10	32.2	1.5	20	0.545	0.182	0.310	0.385	-0.815	3.956
13	0.05	1000	1	10	36.9	2.1	20.4	0.777	0.318	0.341	0.493	-0.811	3.602
10	0.05	500	1	5	36.6	2.3	21.6	0.762	0.364	0.437	0.547	-0.685	3.347
1	0.01	500	1	0	29	1.1	19.9	0.386	0.091	0.302	0.321	-0.672	3.889
22	0.1	1000	1	0	41.4	3	21.7	1.000	0.523	0.444	0.643	-0.633	3.063
25	0.1	2000	1	5	40.2	2.7	21.3	0.941	0.455	0.413	0.600	-0.622	3.169
20	0.1	500	2.5	0	41.2	3.1	21.8	0.990	0.545	0.452	0.645	-0.597	3.059
21	0.1	500	5	5	36.9	2.5	22	0.777	0.409	0.468	0.573	-0.596	3.31
11	0.05	500	2.5	10	34.9	2.3	22.4	0.678	0.364	0.500	0.556	-0.577	3.362
27	0.1	2000	5	0	40.2	2.8	21.3	0.941	0.477	0.413	0.601	-0.558	3.604
19	0.1	500	1	10	40.8	3	22.8	0.970	0.523	0.532	0.685	-0.399	3.051
26	0.1	2000	2.5	10	41.1	2.7	22.5	0.985	0.455	0.508	0.672	-0.335	2.94
23	0.1	1000	2.5	5	40.7	3.9	24.9	0.965	0.727	0.698	0.793	-0.323	2.732
24	0.1	1000	5	10	37	5.1	28.7	0.782	1.000	1.000	0.924	-0.224	2.753

Αν και έχει καταστεί προφανές ότι, σε γενικές γραμμές, οι μικρότερες αρνητικές τιμές λοξότητας και οι μεγαλύτερες θετικές τιμές κύρτωσης υποδηλώνουν καλύτερη ποιότητα της επιφάνειας του στρώματος μέσω συσχέτισης και με τα τρία κριτήρια

ποιότητας που χρησιμοποιήθηκαν, είναι απαραίτητο να βρεθεί ένας κανόνας που να συνδέει αυτά τα τρία κριτήρια με τις δύο αδιάστατες επιφανειακές παραμέτρους. Για το σκοπό αυτό, είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι κάθε αδιάστατη παράμετρος συνδέεται γραμμικά με έναν σταθμισμένο μέσο όρο των τριών κριτηρίων ποιότητας, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (4.91) και (4.92).

$$WM_{Ssk} = w_{|LTD|_n-Ssk} \cdot |LTD|_n + w_{(100-SCR)_n-Ssk} \cdot (100 - SCR)_n + w_{S_{q_n}-Ssk} \cdot S_{q_n} \quad (4.91)$$

$$WM_{Sku} = w_{|LTD|_n-Sku} \cdot |LTD|_n + w_{(100-SCR)_n-Sku} \cdot (100 - SCR)_n + w_{S_{q_n}-Sku} \cdot S_{q_n} \quad (4.92)$$

Μπορούμε να κάνουμε αλγοριθμικά συνδυασμούς των τριών συντελεστών βαρύτητας, έχοντας ως δεδομένο ότι το άθροισμά τους πρέπει πάντα να είναι ίσο με 1, με στόχο να αναπτύξουμε μια καμπύλη, η γραμμική προσέγγιση της οποίας έχει την καλύτερη προσαρμογή μεταξύ όλων των πιθανών καμπυλών που μπορούμε να δημιουργήσουμε μεταβάλλοντας το συνδυασμό συντελεστών βαρύτητας. Η καλύτερη προσαρμογή είναι αυτή με την υψηλότερη τιμή R^2 , δηλαδή αυτή που προσεγγίζει καλύτερα μια ευθεία.

Ο αλγόριθμος έχει βήμα 0,05 και το χρησιμοποιεί για να αυξάνει και να μειώνει τους συντελεστές βαρύτητας για κάθε επανάληψη. Στη συνέχεια, υπολογίζει τα σημεία της καμπύλης και τέλος χρησιμοποιεί τη γραμμική προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων για τον υπολογισμό της γραμμικής προσαρμογής και της τιμής R^2 . Ο συνδυασμός συντελεστών βαρύτητας που οδηγεί στην καλύτερη γραμμική προσέγγιση είναι ο ακόλουθος:

$$\begin{cases} w_{LTD-Ssk} = 0.35 \\ w_{SCR-Ssk} = 0.05 \\ w_{RMS-Ssk} = 0.60 \end{cases} \quad WM_{Ssk} = 0.6449 \cdot Ssk + 0.9549 \quad R^2 = 0.8869$$

$$\begin{cases} w_{LTD-Sku} = 0.40 \\ w_{SCR-Sku} = 0.20 \\ w_{RMS-Sku} = 0.40 \end{cases} \quad WM_{Sku} = -0.1497 \cdot Sku + 1.1224 \quad R^2 = 0.9499$$

Η γραμμή που απεικονίζει τον σταθμισμένο μέσο όρο των κριτηρίων ποιότητας σε σχέση με το Ssk είναι μια αύξουσα συνάρτηση του Ssk, βλέπε Σχήμα 4.29. Δεδομένου ότι η ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος επιδεινώνεται με την αύξηση των (αρνητικών) τιμών Ssk, είναι ασφαλές να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι, όσο μικρότερη είναι η ποσότητα $(0,35 \cdot LTD + 0,05 \cdot SCR + 0,60 \cdot RMS)$, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του στρώματος, σύμφωνα με το Ssk.

Πίνακας 4.13: L27 Ορθογώνιος πίνακας του DoE Taguchi για την εναπόθεση σκόνης (με αποτελέσματα). Γραμμές ταξινομημένες κατά αύξουσα τιμή S_{ku} .

#	u_{tr} ($\frac{m}{sec}$)	f_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{rel} (deg.)	$|h_l - h_{th}|$ (μm)	$\frac{100 - SCR}{(\%)}$	S_q (μm)	LTD_n	$(\frac{100 - SCR}{})_n$	S_{q_n}	WM	Ssk	S_{ku}
23	0.1	1000	2.5	5	40.7	3.9	24.9	0.965	0.727	0.698	0.811	-0.323	2.732
24	0.1	1000	5	10	37	5.1	28.7	0.782	0.000	1.000	0.713	-0.224	2.753
26	0.1	2000	2.5	10	41.1	2.7	22.5	0.985	0.545	0.508	0.706	-0.335	2.94
19	0.1	500	1	10	40.8	3	22.8	0.970	0.477	0.532	0.696	-0.399	3.051
20	0.1	500	2.5	0	41.2	3.1	21.8	0.990	0.455	0.452	0.668	-0.597	3.059
22	0.1	1000	1	0	41.4	3	21.7	1.000	0.477	0.444	0.673	-0.633	3.063
25	0.1	2000	1	5	40.2	2.7	21.3	0.941	0.545	0.413	0.650	-0.622	3.169
21	0.1	500	5	5	36.9	2.5	22	0.777	0.591	0.468	0.616	-0.596	3.31
10	0.05	500	1	5	36.6	2.3	21.6	0.762	0.636	0.437	0.607	-0.685	3.347
11	0.05	500	2.5	10	34.9	2.3	22.4	0.678	0.636	0.500	0.599	-0.577	3.362
13	0.05	1000	1	10	36.9	2.1	20.4	0.777	0.682	0.341	0.584	-0.811	3.602
27	0.1	2000	5	0	40.2	2.8	21.3	0.941	0.523	0.413	0.646	-0.558	3.604
16	0.05	2000	1	0	35	1.9	20.2	0.683	0.727	0.325	0.549	-0.869	3.698
1	0.01	500	1	0	29	1.1	19.9	0.386	0.909	0.302	0.457	-0.672	3.889
18	0.05	2000	5	10	32.2	1.5	20	0.545	0.818	0.310	0.505	-0.815	3.956
14	0.05	1000	2.5	0	33.8	1.5	19.2	0.624	0.818	0.246	0.512	-0.926	3.993
15	0.05	1000	5	5	32.1	1.6	19.9	0.540	0.795	0.302	0.496	-0.898	3.993
17	0.05	2000	2.5	5	32.4	1.4	19.2	0.554	0.841	0.246	0.488	-0.962	4.116
12	0.05	500	5	0	31.7	1.4	18.8	0.520	0.841	0.214	0.462	-1.042	4.358
4	0.01	1000	1	5	26.7	0.9	18.1	0.272	0.955	0.159	0.363	-0.956	4.741
2	0.01	500	2.5	5	26	0.9	17.9	0.238	0.955	0.143	0.343	-0.906	4.852
7	0.01	2000	1	10	23.8	1	17.9	0.129	0.932	0.143	0.295	-1.338	5.57
3	0.01	500	5	10	21.2	0.7	17.4	0.000	1.000	0.103	0.241	-1.179	5.572
5	0.01	1000	2.5	10	24.3	1	18	0.153	0.932	0.151	0.308	-1.351	5.626
8	0.01	2000	2.5	0	23	0.9	17	0.089	0.955	0.071	0.255	-1.503	6.075
9	0.01	2000	5	5	21.5	0.7	16.4	0.015	1.000	0.024	0.215	-1.431	6.232
6	0.01	1000	5	0	22.2	0.7	16.1	0.050	1.000	0.000	0.220	-1.515	6.403

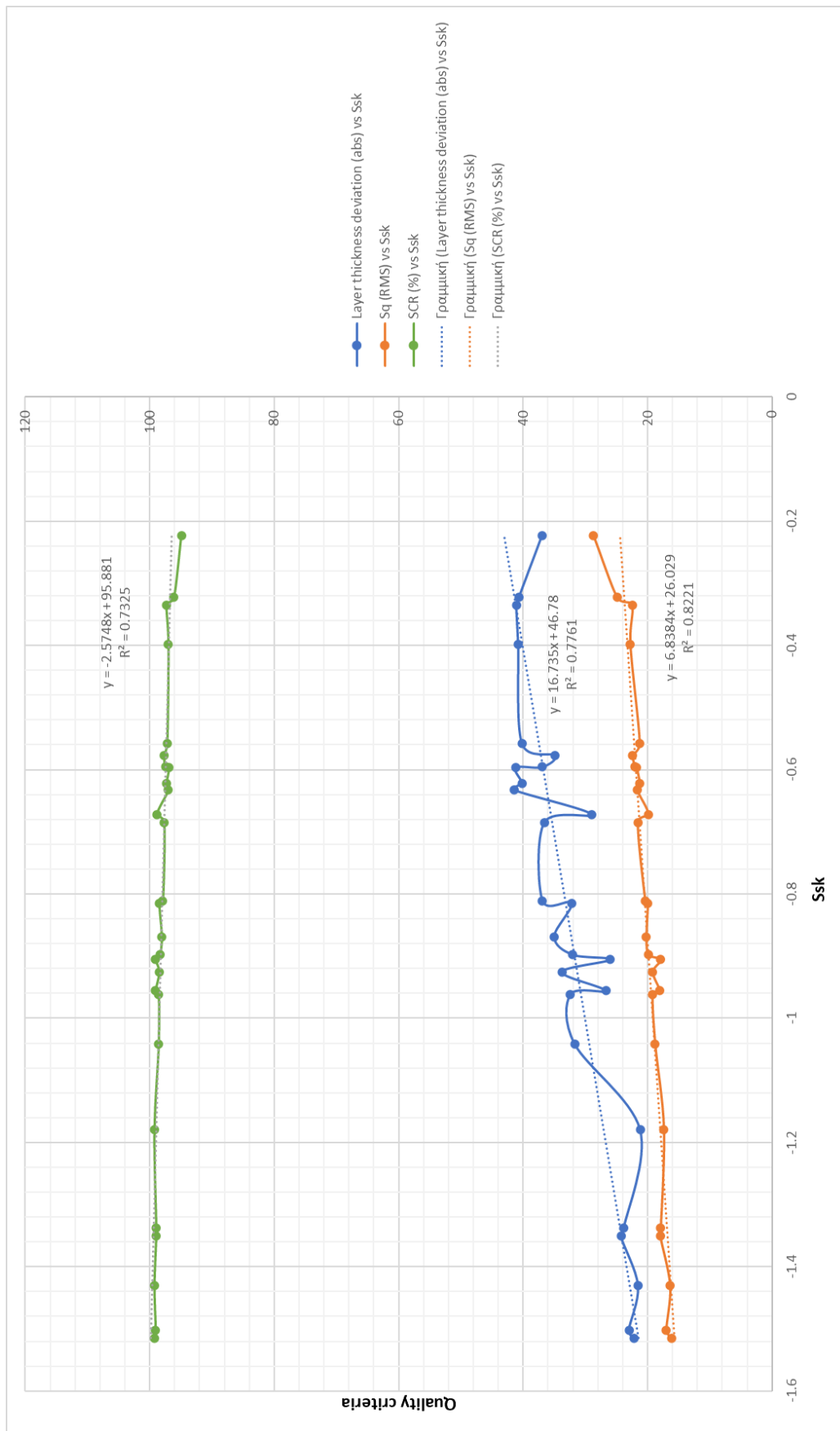
Ομοίως, η γραμμή που απεικονίζει τον σταθμισμένο μέσο όρο των κριτηρίων ποιότητας σε σχέση με το S_{ku} είναι φθίνουσα συνάρτηση του S_{ku} , βλέπε Σχήμα 4.30. Δεδομένου ότι η ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος επιδεινώνεται με φθίνουσες (θετικές) τιμές S_{ku} , είναι ασφαλές να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι, όσο μικρότερη είναι η ποσότητα ($0,40 \cdot LTD + 0,20 \cdot SCR + 0,40 \cdot RMS$), τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του στρώματος, σύμφωνα με το S_{ku} .

Τόσο το Ssk όσο και το S_{ku} οδηγούν σε πολύ παρόμοιες παρατηρήσεις όσον αφορά τον σταθμισμένο μέσο όρο των LTD, SCR και RMS που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του στρώματος. Τα βάρη που υπολογίζονται είναι πολύ παρόμοια με τη σημασία των κριτηρίων ποιότητας που θα τους απέδιδε ένας εμπειρογνώμονας στον τομέα της προσθετικής κατασκευής. Ο λόγος κάλυψης

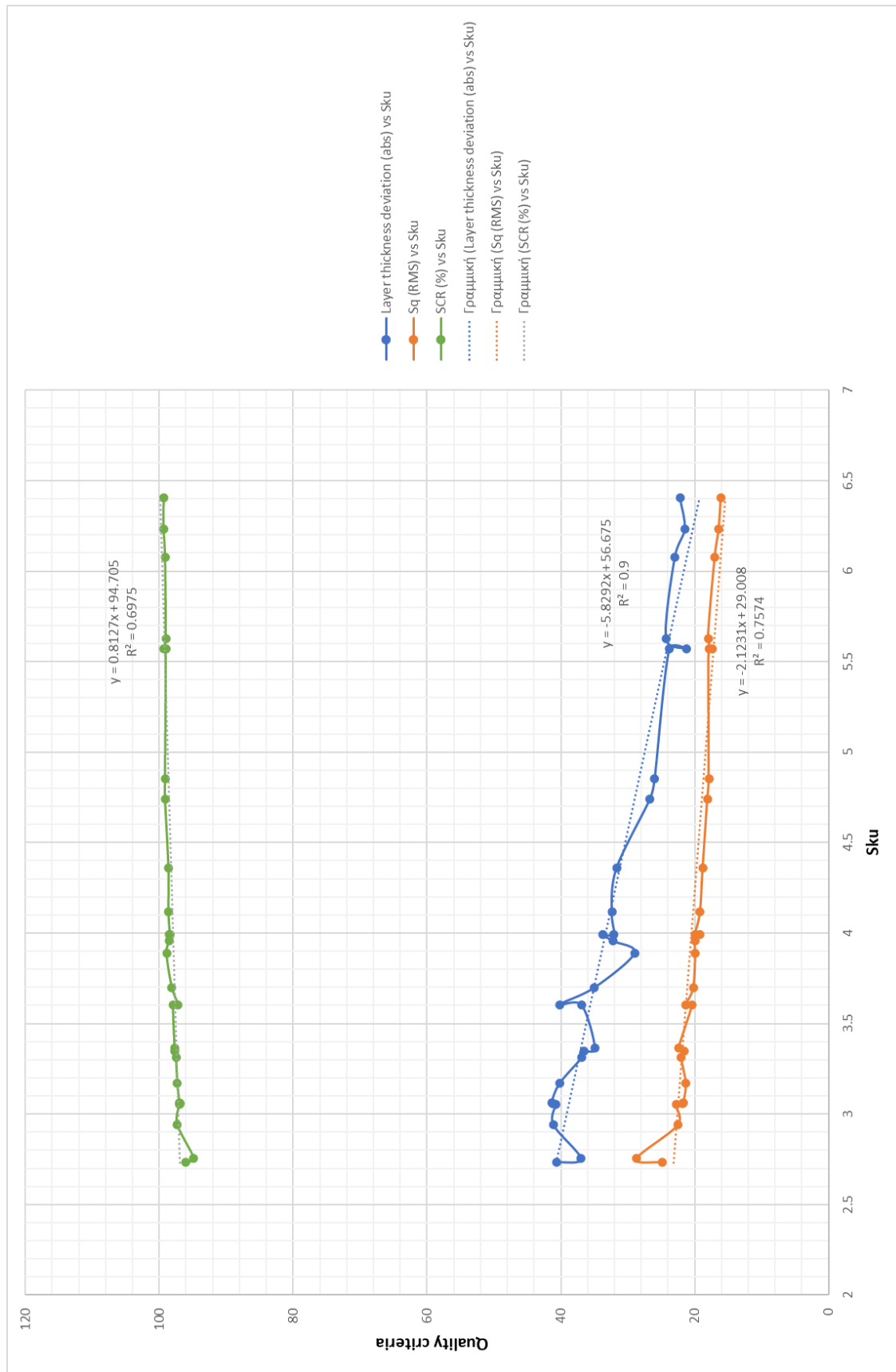
επιφάνειας είναι ο λιγότερο σημαντικός, καθώς ανιχνεύει τον βαθμό στον οποίο υπάρχουν μεγάλα επιφανειακά ελαττώματα εντός του στρώματος. Τέτοια ελαττώματα μπορεί να προκληθούν από την παράσυρση ενός συσσωματώματος κατά μήκος της επιφάνειας, δημιουργώντας μια γραμμή που αφήνει το υπόστρωμα ορατό, μειώνοντας δραστικά το SCR. Ωστόσο, τα ελαττώματα αυτά μπορούν εύκολα να αποφευχθούν μέσω της εφαρμογής κατάλληλου κοσκινίσματος της σκόνης πριν από την επανεπίστρωση. Παρά την πιθανότητα τα ελαττώματα αυτά να είναι καταστροφικά για την ποιότητα της επιφάνειας, δεδομένου ότι συνήθως κληρονομούνται από στρώμα σε στρώμα και προκαλούν σοβαρά ελαττώματα στη διαστασιακή ακρίβεια ή ακόμη και στη γεωμετρία των χαρακτηριστικών του τελικού τεμαχίου, η ευκολία στην αποφυγή τους τα καθιστά αρκετά ασυνήθιστα. Γι' αυτό και τους αποδίδεται η μικρότερη βαρύτητα, με 0,05 και 0,2 για την αξιολόγηση Ssk και Sku αντίστοιχα.

Δεύτερον, η απόκλιση του πάχους του στρώματος δείχνει πόσο χαμηλότερη είναι η μέση γραμμή της επιφάνειας του στρώματος σε σύγκριση με το επίπεδο του θεωρητικού πάχους του στρώματος. Η τιμή αυτή είναι σημαντική, καθώς συνδέεται άμεσα με τη θεωρητική πυκνότητα πλήρωσης του στρώματος, όπως υπολογίζεται στις περισσότερες εργασίες. Παρά το γεγονός ότι είναι σημαντική, αντιμετωπίζεται εύκολα με την κατάλληλη προσαρμογή (αύξηση) του θεωρητικού πάχους στρώματος με την αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης του εμβόλου κατασκευής προς τα κάτω, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό πραγματικό ύψος στρώματος. Ως εκ τούτου, της αποδίδεται μέτρια βαρύτητα, με 0,35-0,4 για την αξιολόγηση Ssk και Sku αντίστοιχα.

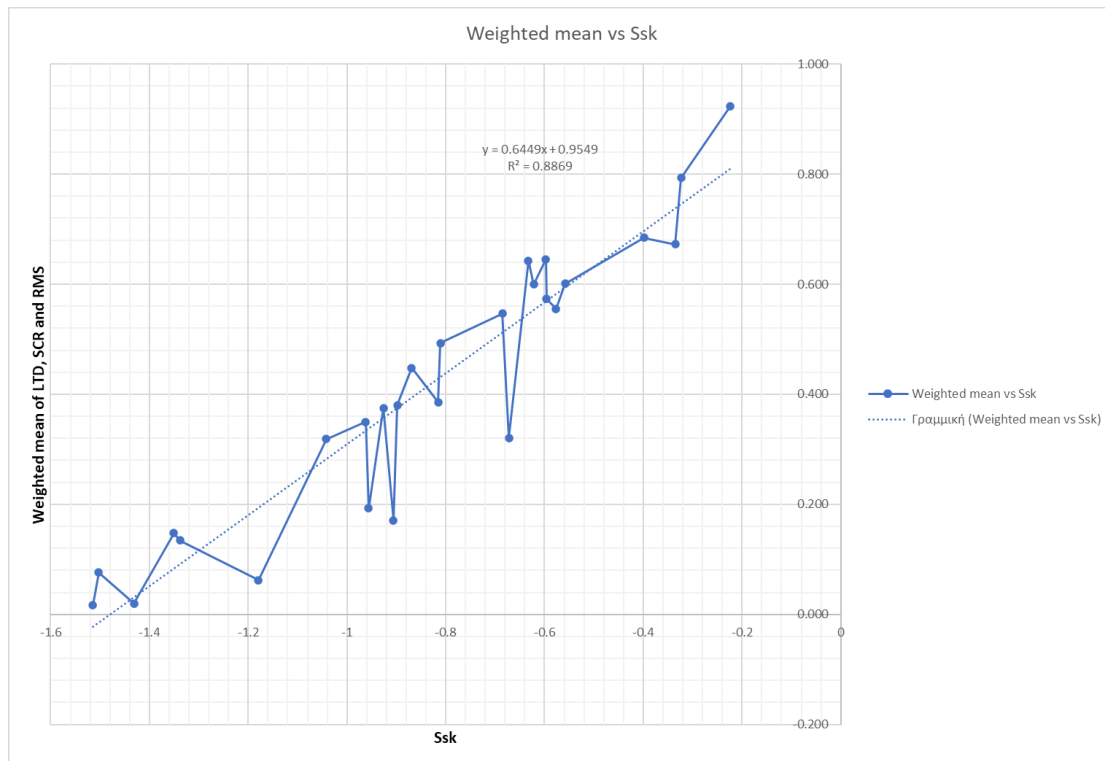
Τέλος, η τραχύτητα αποτελεί δείκτη της ομαλότητας και της ομοιογένειας του εναποτιθέμενου στρώματος. Αυτό δείχνει αν η τελική επιφάνεια του τεμαχίου θα έχει υψηλή ή χαμηλή τιμή τραχύτητας. Μια υψηλή τιμή τραχύτητας δεν μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές κληρονομούμενες ατέλειες σε όλα τα στρώματα- ωστόσο, μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της επιφάνειας του τελικού τεμαχίου, καθιστώντας αναγκαία τη μετεπεξεργασία του προκειμένου να καταστεί έτοιμο προς χρήση. Επιπλέον, η RMS επιφανειακή τραχύτητα είναι το πιο σταθερό κριτήριο ποιότητας, καθώς εντοπίζει οπωσδήποτε μεγάλες περιοχές όπου η επιφάνεια του στρώματος βρίσκεται κάτω ή πάνω από τη μέση γραμμή, εντοπίζοντας έντονες διακυμάνσεις εξάπλωσης κατά την αλληλεπίδραση πούδρας-υποστρώματος. Ως εκ τούτου, της αποδίδεται η μεγαλύτερη βαρύτητα, με 0,6 και 0,4 για την αξιολόγηση Ssk και Sku αντίστοιχα.



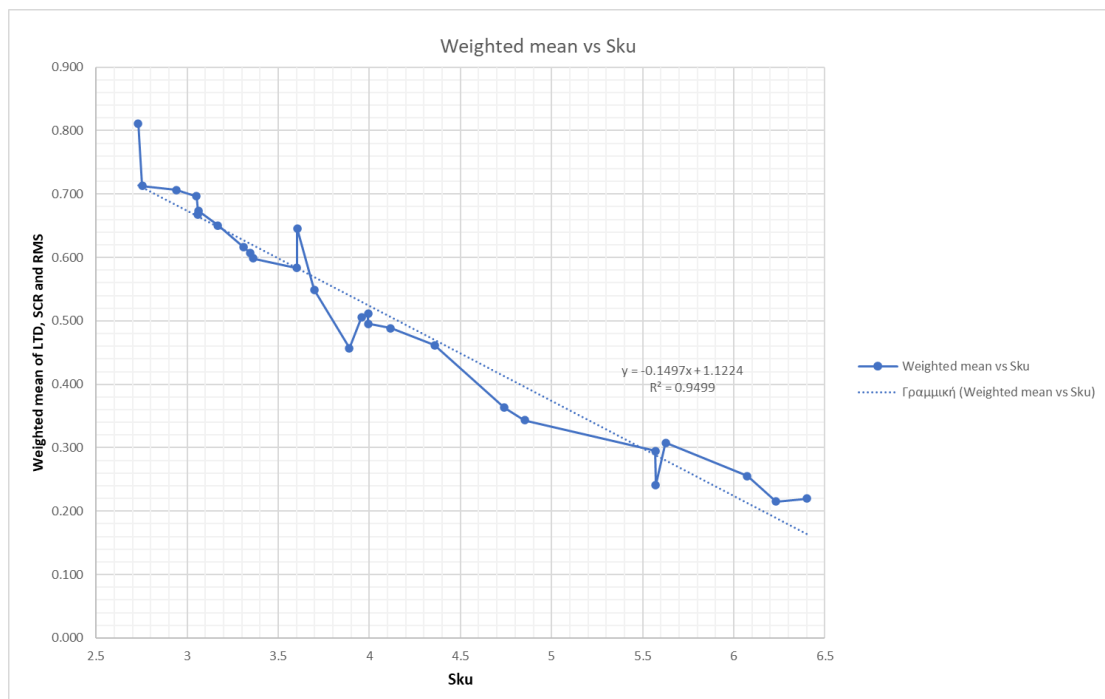
Σχήμα 4.27: Κριτήρια ποιότητας έναντι Ssk.



Σχήμα 4.28: Κριτήρια ποιότητας έναντι Sku.



Σχήμα 4.29: Σταθμισμένος μέσος όρος των LTD, SCR και RMS (συντελεστές βαρύτητας 0,35, 0,05 και 0,60 αντίστοιχα) έναντι Ssk.



Σχήμα 4.30: Σταθμισμένος μέσος όρος των LTD, SCR και RMS (συντελεστές βαρύτητας 0,4, 0,2 και 0,4 αντίστοιχα) έναντι του Sku.

Συμπερασματικά, η εμπειρική προσέγγιση της μεθόδου βρίσκεται σε συμφωνία με τα υπολογισμένα αναλυτικά αποτελέσματα μετά τη στατιστική ανάλυση. Τα Ssk και Sku

μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά σε συνδυασμό με τους σταθμισμένους μέσους όρους των τριών κριτηρίων ποιότητας προκειμένου να εξεταστεί η γενική ποιότητα του στρώματος. Η εξέταση των S_{sk} ή S_{ku} ισοδυναμεί με την εξέταση του σταθμισμένου μέσου των τριών κριτηρίων ποιότητας, δηλαδή της απόκλισης πάχους στρώματος (LTD), του λόγου κάλυψης επιφάνειας (SCR) και της μέσης τετραγωνικής επιφανειακής τραχύτητας του στρώματος (RMS). Οι συντελεστές βαρύτητας συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με αυτούς που θα είχαν επιλέξει οι ειδικοί του τομέα. Από τις προσομοιώσεις επικύρωσης που εκτελέστηκαν για τον έλεγχο της εγκυρότητας των εξισώσεων παλινδρόμησης, λαμβάνουμε τις τιμές του Πίνακα 4.11. Τόσο οι τιμές S_{sk} όσο και οι τιμές S_{ku} δείχνουν ότι ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων παραμέτρων για τις τιμές SCR και RMS οδηγεί σε υψηλότερη ποιότητα στρώματος από αυτή που δημιουργείται από τον συνδυασμό παραμέτρων που βελτιστοποιεί το LTD. Ως εκ τούτου, ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων παραμέτρων είναι:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{tr} = 0.01 \text{ m/sec} \\ f_{vib} = 2000 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 5 \mu\text{m} \\ \theta_{rel} = 0^\circ \end{array} \right.$$

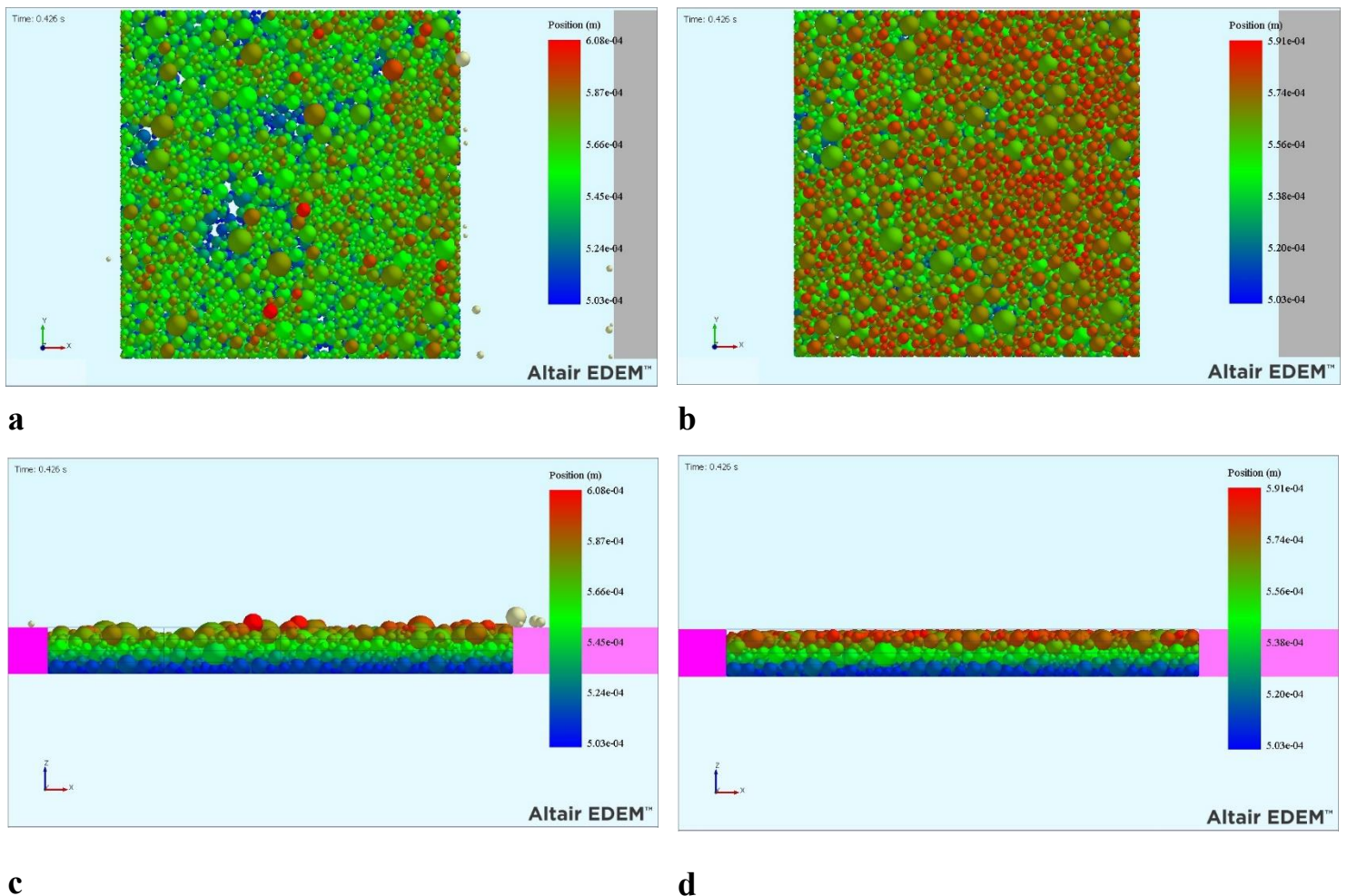
Ως απόδειξη της θετικής επίδρασης της δόνησης στο αποτέλεσμα της εναπόθεσης, μια σύγκριση μεταξύ του υπολογισμένου συνδυασμού των βέλτιστων επιπέδων κατά Taguchi με μια δοκιμή όπου επιλέγονται η βέλτιστη ταχύτητα εναπόθεσης και η γωνία ελευθερίας, αλλά συνδυάζονται με μηδενική δόνηση. Η οπτική σύγκριση παρατίθεται στο Σχήμα 4.31, ενώ στον Πίνακα 4.14 παρατίθεται η σύγκριση των δεικτών ποιότητας μεταξύ των παραγόμενων στρώσεων.

Πίνακας 4.14: Απόδοση εναπόθεσης χωρίς δόνηση έναντι με υποβοήθηση δόνησης.

	u_{tr} (m/sec)	f_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{rel} (deg)	LTD_{reg} (LTD_{sim})	SCR_{reg} (SCR_{sim})	$S_{q_{reg}}$ ($S_{q_{sim}}$)	$S_{sk_{sim}}$	$S_{ku_{sim}}$
NO VIB.	0.01	0	0	0	- (28.9)	- (98.56)	- (20.9)	-0.716	3.962
OPTIMUM	0.01	2000	5	0	21.4 (22.1)	99.54 (99.33)	15.8 (15.7)	-1.543	6.530

(Σημείωση: Reg: “regression”, sim: “simulation”. Στη δοκιμή μηδενικής δόνησης δεν μπορούν να υπολογιστούν τιμές παλινδρόμησης, δεδομένου ότι το επίπεδο αυτό δεν περιλαμβάνεται στο σχεδιασμό Taguchi.)

Είναι προφανές ότι ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων που υπολογίστηκε με την ανάλυση Taguchi είναι ανώτερος σε σύγκριση με την ισοδύναμη δοκιμή μηδενικών δονήσεων σε κάθε κριτήριο ποιότητας, συμπεριλαμβανομένων των S_{sk} και S_{ku} , τα οποία λειτουργούν ως γενικοί δείκτες ποιότητας στρώματος, όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Επιπλέον, εξετάζοντας τις κατόψεις του εναποτιθέμενου στρώματος, είναι προφανές ότι το στρώμα μηδενικής δόνησης διαθέτει πολλαπλά επιφανειακά ελαττώματα, όπως έχει ήδη δείξει η SCR. Οι ατέλειες αυτές βρίσκονται πίσω από τα γενικά μεγαλύτερα σωματίδια, αποκαλύπτοντας τη δυσμενή επίδραση που έχει η παράσυρση των μεγάλων σωματιδίων στην ποιότητα του στρώματος. Η δόνηση τείνει να αμβλύνει την παράσυρση των μεγάλων σωματιδίων και των συσσωματωμάτων, ή ακόμη και να διασπά τα συσσωματώματα σε κάποιο βαθμό, οδηγώντας σε λιγότερες μεγάλες περιοχές ατελειών.



Σχήμα 4.31: Σύγκριση ποιότητας επιφάνειας **(a)** Χωρίς δόνηση (κάτοψη)- **(b)** με δόνηση-βέλτιστος συνδυασμός ανάλυσης Taguchi (κάτοψη)- **(c)** Χωρίς δόνηση (πλάγια όψη)- **(d)** με δόνηση-βέλτιστος συνδυασμός ανάλυσης Taguchi (πλάγια όψη) (Σημείωση: Ματζέντα: οπίσθια οριακή πλάκα, Ροζ: εμπρόσθια οριακή πλάκα).

Είναι σαφές ότι, στη δοκιμή μηδενικών δονήσεων, το ύψος των σωματιδίων παρουσιάζει μεγαλύτερη τυχαιότητα και πολλά σωματίδια βρίσκονται πάνω από το θεωρητικό ύψος του στρώματος, όπως φαίνεται στο υπόμνημα στη δεξιά πλευρά της εικόνας. Αντίθετα, στη βέλτιστη δοκιμή ανάλυσης Taguchi, τα σωματίδια έχουν πολύ ομοιόμορφο ύψος, με το χρώμα να παρουσιάζει πολύ μικρότερη διακύμανση, ενώ η κορυφή των περισσότερων σωματιδίων αγγίζει μόλις το θεωρητικό ύψος στρώματος, όπως φαίνεται καθαρά και στην πλευρική άποψη κάθε στρώματος. Η θετική επίδραση της δόνησης, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η θεωρητική πυκνότητα συσσώρευσης του στρώματος αυξάνεται με την εφαρμοζόμενη δόνηση, η οποία προκύπτει αποκλειστικά από τη μείωση της απόκλισης του πάχους του στρώματος και όχι από την αυξημένη πλήρωση του στρώματος από σωματίδια, η οποία αποδεικνύεται αμελητέα, έρχονται σε συμφωνία με τα ευρήματα της εργασίας [220], η οποία τα απέδειξε μέσω προσομοιώσεων DEM τόσο για δονούμενο κύλινδρο όσο και για δονούμενη λεπίδα ως μηχανισμό επανεπίστρωσης.

Δεδομένου ότι έχει αποδειχθεί ότι οι δείκτες S_{sk} και S_{ku} χρησιμεύουν ως γενικοί δείκτες ποιότητας στρώματος, είναι απαραίτητο να διεξαχθεί ανάλυση παλινδρόμησης για την εκτίμηση αυτών των δεικτών με βάση τις παραμέτρους εναπόθεσης. Ο Πίνακας 4.15 και ο Πίνακας 4.16 παρέχουν την ανάλυση, ενώ οι εξισώσεις (4.93) και (4.94) παρέχουν τις εξισώσεις παλινδρόμησης.

Πίνακας 4.15: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για τη λοξότητα στην εναπόθεση σκόνης.

Source	DoF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Regression	7	314.077	90.74%	314.077	0.448681	26.61	0.000
U_{tr} (m/sec)	1	238.472	68.90%	0.00401	0.004008	0.24	0.631
f_{vib} (Hz)	1	0.16578	4.79%	0.29422	0.294217	17.45	0.001
A_{vib} (μm)	1	0.09149	2.64%	0.33803	0.338033	20.05	0.000
θ_{rel} (deg)	1	0.09188	2.65%	0.01437	0.014371	0.85	0.367
U_{tr} (m/sec) *f_{vib} (Hz)	1	0.15900	4.59%	0.14302	0.143016	8.48	0.009
U_{tr} (m/sec) *A_{vib} (μm)	1	0.14879	4.30%	0.14879	0.148786	8.82	0.008
U_{tr} (m/sec) *θ_{rel} (deg)	1	0.09911	2.86%	0.09911	0.099110	5.88	0.025
Error	19	0.32040	9.26%	0.32040	0.016863		
Total	26	346.117	100.00%				

Πίνακας 4.16: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την κύρτωση στην εναπόθεση σκόνης.

Source	DoF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Regression	7	301.817	91.23%	301.817	43.117	28.25	0.000
U_{tr} (m/sec)	1	243.774	73.69%	0.4860	0.4860	3.18	0.090
f_{vib} (Hz)	1	11.329	3.42%	14.524	14.524	9.52	0.006
A_{vib} (μm)	1	20.368	6.16%	34.737	34.737	22.76	0.000
θ_{rel} (deg)	1	0.1624	0.49%	0.3852	0.3852	2.52	0.129
U_{tr} (m/sec) *f_{vib} (Hz)	1	0.6266	1.89%	0.5332	0.5332	3.49	0.077
U_{tr} (m/sec) *A_{vib} (μm)	1	0.9391	2.84%	0.9391	0.9391	6.15	0.023
A_{vib} (μm) *θ_{rel} (deg)	1	0.9064	2.74%	0.9064	0.9064	5.94	0.025
Error	19	28.999	8.77%	28.999	0.1526		
Total	26	330.816	100.00%				

$$|Ssk| = 0.587 - 0.90u_{tr} + 0.000295f_{vib} + 0.1455A_{vib} + 0.0112\theta_{rel} - 0.00318u_{tr}f_{vib} - 1.222u_{tr}A_{vib} - 0.00901A_{vib}\theta_{rel} \quad (4.93)$$

$$Sku = 3.498 - 9.95u_{tr} + 0.000656f_{vib} + 0.4665A_{vib} + 0.0582\theta_{rel} - 0.00613u_{tr}f_{vib} - 3.07u_{tr}A_{vib} - 0.0273A_{vib}\theta_{rel} \quad (4.94)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις παλινδρόμησης υπολογίστηκαν προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα της ANOVA. Πιο συγκεκριμένα, οι αλληλεπιδράσεις επιλέχθηκαν έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το άθροισμα της στήλης συνεισφοράς του πίνακα ANOVA, άρα να ελαχιστοποιείται το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις παλινδρόμησης, διαπιστώνουμε ότι, πράγματι, ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων των παραμέτρων είναι αυτός που φαίνεται στον Πίνακα 4.14, δηλαδή ο συνδυασμός

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{tr} = 0.01 \text{ m/sec} \\ f_{vib} = 2000 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 5 \text{ } \mu\text{m} \\ \theta_{rel} = 0^\circ \end{array} \right\}$$

Οι βέλτιστες τιμές λοξότητας και κύρτωσης της παλινδρόμησης υπολογίζονται ως εξής:

$$Ssk_{opt,reg} = -1.771$$

$$Sku_{opt,reg} = 6.766$$

Οι βέλτιστες τιμές Ssk και Sku που υπολογίστηκαν με προσομοίωση είναι οι εξής

$$Ssk_{opt,sim} = -1.543$$

$$Sku_{opt,sim} = 6.530$$

Η απόκλιση μεταξύ των βέλτιστων τιμών που υπολογίστηκαν με προσομοίωση και των τιμών που υπολογίστηκαν με παλινδρόμηση είναι (-) 12,9% και (-) 3,5% για τη λοξότητα και την κύρτωση αντίστοιχα. Η τιμή κύρτωσης βρίσκεται εντός του σφάλματος 8,77% που προβλέπει η ANOVA, ενώ η λοξότητα υπερβαίνει ελαφρώς το 9,26% που προβλέπει η ANOVA. Ωστόσο, το σφάλμα αυτό δεν είναι πολύ σημαντικό, αν και είναι ενδεικτικό του γεγονότος ότι η κύρτωση μπορεί να είναι πιο αξιόπιστος δείκτης της ποιότητας του στρώματος.

5 Προσομοιώσεις Κοσκινίσματος Σκόνης

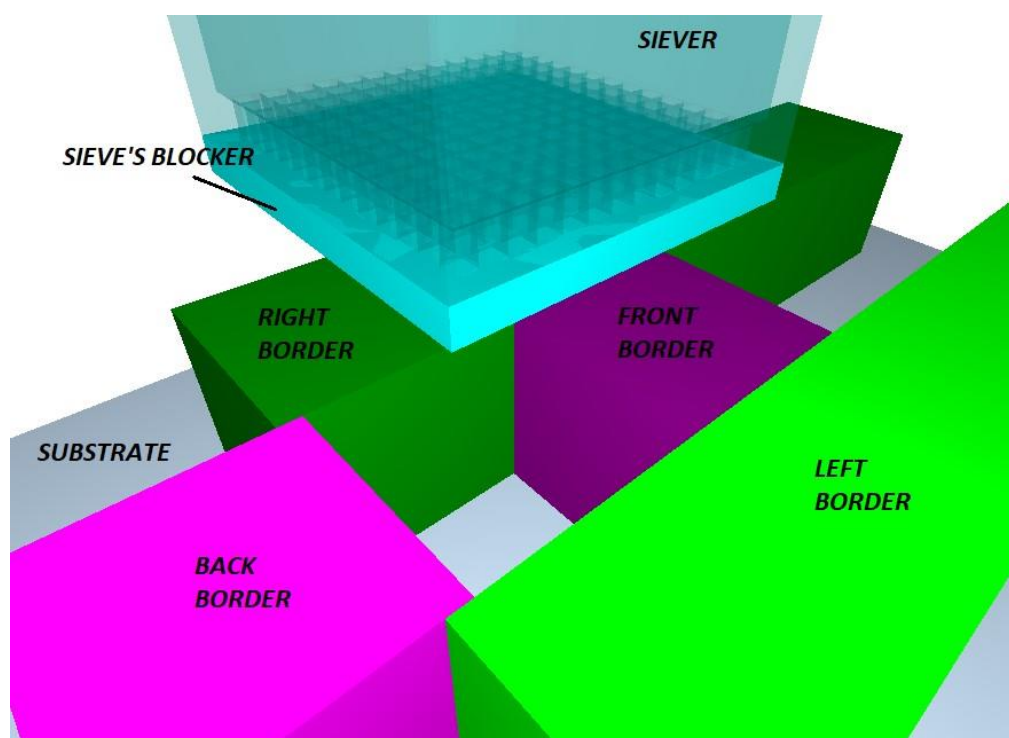
Το κοσκίνισμα είναι μια διεργασία που, εξ όσων γνωρίζει ο συγγραφέας, δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς ή δεν έχει μοντελοποιηθεί μέσω προσομοιώσεων ΜΔΣ για εφαρμογή στην εναπόθεση στρώματος για διεργασίες ΣΚΠ. Είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς μπορεί να περιορίσει τον αριθμό των συσσωματωμάτων και των υπερμεγέθων σωματιδίων στο στρώμα, τα οποία μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ποιότητα του στρώματος μετά την εναπόθεσή του. Το κοσκίνισμα μπορεί επίσης να διασπάσει τα συσσωματώματα μέσω της δονητικής κίνησής του, οδηγώντας σε υψηλότερη οικονομία σκόνης.

Προκειμένου να εναποτίθεται η σωστή ποσότητα πούδρας ακριβώς στη σωστή περιοχή, η παρούσα εργασία προτείνει το κοσκίνισμα της πούδρας στην επιθυμητή περιοχή ως πρώτο βήμα πριν αναλάβει η οδηγός λεπίδα (ή ο κύλινδρος), ή ακόμη και ως μέθοδο εναπόθεσης πούδρας χωρίς επιστρωτήρα, εάν είναι σωστά βαθμονομημένη. Έχει αποδειχθεί ότι, με τις λεπίδες ή τους κυλίνδρους, τα μικρότερα σωματίδια συμπιέζονται και εναποτίθενται ταχύτερα, στην αρχή του στρώματος, ενώ, καθώς ο επιστρωτήρας κινείται προς το τέλος του στρώματος, τα μεγαλύτερα σωματίδια παρασύρονται από αυτόν [8], [96], [99], οδηγώντας σε μια διαφορά όσον αφορά την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων κατά μήκος του ίδιου του στρώματος, φαινόμενο γνωστό ως διαχωρισμός σκόνης. Ωστόσο, αυτό αποτελεί πρόβλημα μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται έμβολο τροφοδοσίας. Εάν η σκόνη διασκορπιστεί ομοιόμορφα στην επιφάνεια από πάνω μέσω ενός δονούμενου κόσκινου και στη συνέχεια ο επιστρωτήρας χρησιμοποιείται μόνο για την εξομάλυνση της κορυφής του παραγόμενου στρώματος, τότε το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται [59], [137]. Ωστόσο, δεδομένου ότι αυτό είναι ένα ακόμη βήμα που προσθέτει στο συνολικό χρόνο παραγωγής, είναι απαραίτητο να βελτιστοποιηθεί το κοσκίνισμα και να γίνει όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικό. Για το λόγο αυτό, στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιείται η ανάλυση Taguchi.

Ας σημειωθεί ότι οι ιδιότητες του υλικού της σκόνης, η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και οι μέθοδοι προσδιορισμού της συνοχής/προσκόλλησης είναι ακριβώς οι ίδιες με εκείνες που εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις σχετικά με τη διαδικασία εναπόθεσης της σκόνης στο κεφάλαιο 4, επομένως ο αναγνώστης παραπέμπεται στις σχετικές ενότητες 4.1 έως 4.3.

5.1 Γεωμετρία και Περιγραφή της Προσομοίωσης

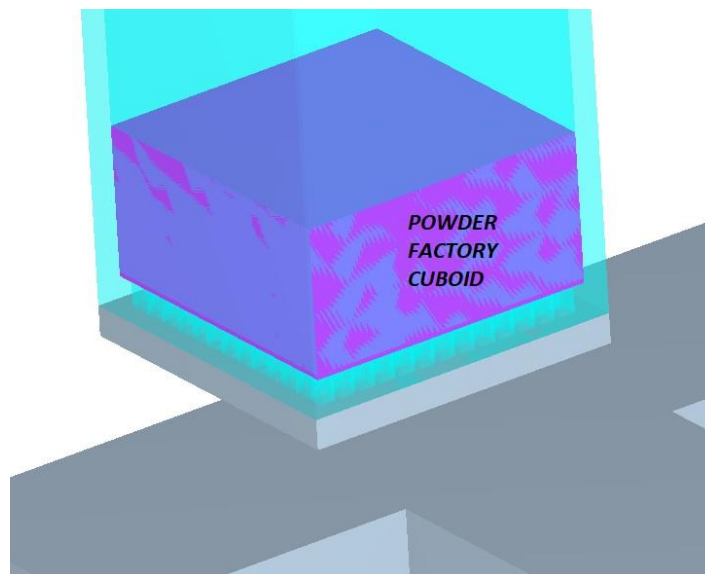
Η προσομοίωση κοσκινίσματος σκόνης διαθέτει επτά (7) σώματα. Αυτά είναι η πλάκα εναπόθεσης, τα τέσσερα όρια που ορίζουν την περιοχή στην οποία πέφτει η κοσκινισμένη σκόνη (μπροστινό, πίσω, αριστερό και δεξί όριο), το κόσκινο και ο φραγέας του κόσκινου, ο οποίος είναι μια πλάκα που μπλοκάρει τον πυθμένα των ανοιγμάτων του κόσκινου, έτσι ώστε η σκόνη στο κόσκινο να αρχίσει να πέφτει μόνο όταν ο φραγέας απομακρύνεται. Τα όρια δημιουργούν μια τετράγωνη περιοχή δείγματος με πλευρά 1 mm. Το ύψος των πλακών οριοθέτησης είναι επίσης ίσο με 1 mm, ενώ το πάχος της πλάκας αποκλεισμού είναι ίσο με 100 μm (βλ. Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: Τα φυσικά σώματα της προσομοίωσης κοσκινίσματος σκόνης.

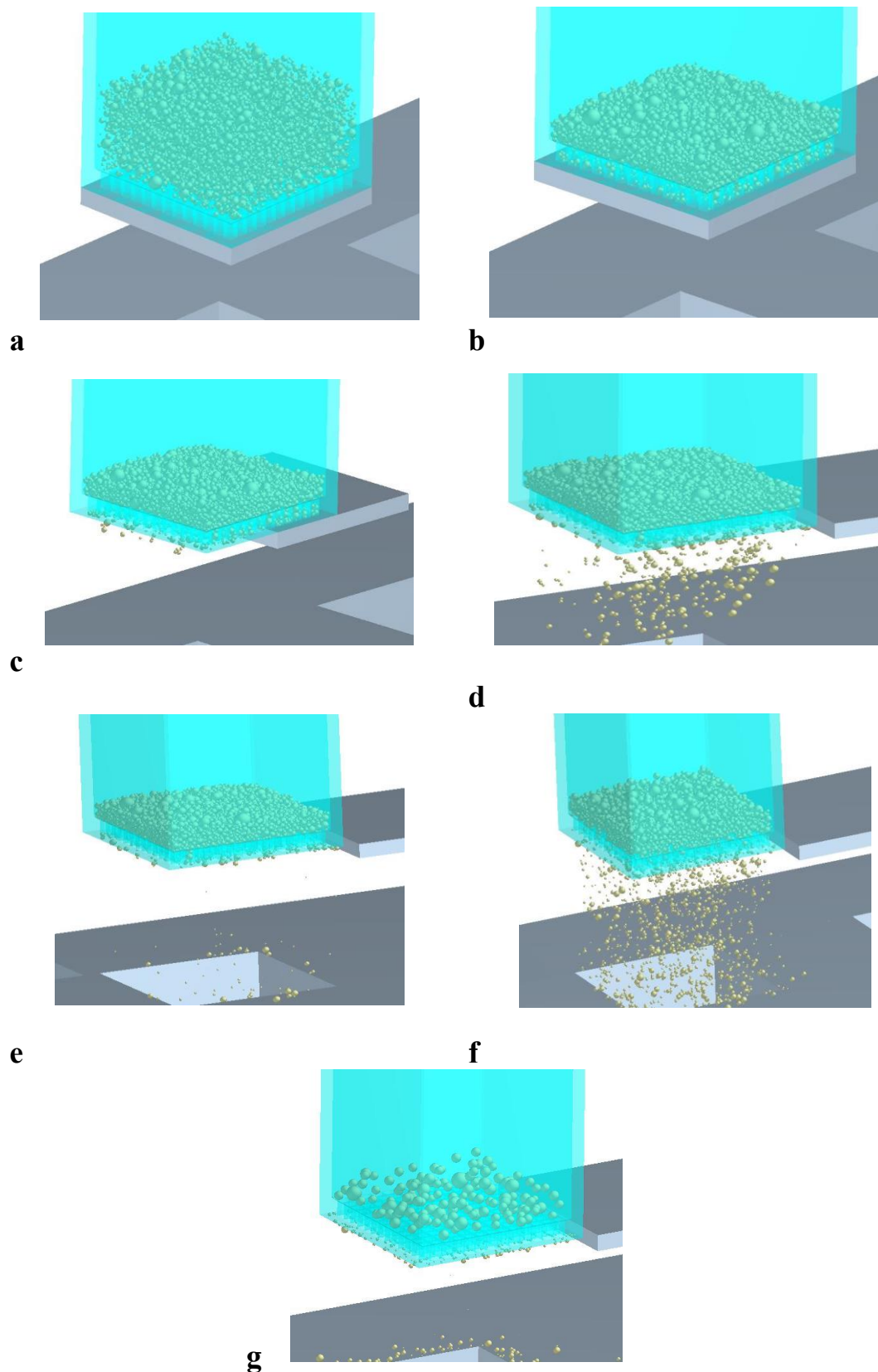
Υπάρχει επίσης ένα εικονικό σώμα, απαραίτητο για χρήση ως εργοστάσιο σκόνης. Αυτό έχει το σχήμα ενός κυβοειδούς με πλευρά 1 mm, που περιβάλλεται από το

κόσκινο, έτσι ώστε όταν ενεργοποιείται, η σκόνη να γεμίζει αμέσως το κόσκινο (βλ. *Σχήμα 5.2*). Το ύψος του ποικίλλει, ανάλογα με τη δοκιμή του DoE Taguchi, όπως θα εξηγηθεί στην επόμενη ενότητα. Τα στάδια της διαδικασίας κοσκινίσματος φαίνονται στο *Σχήμα 5.3*.

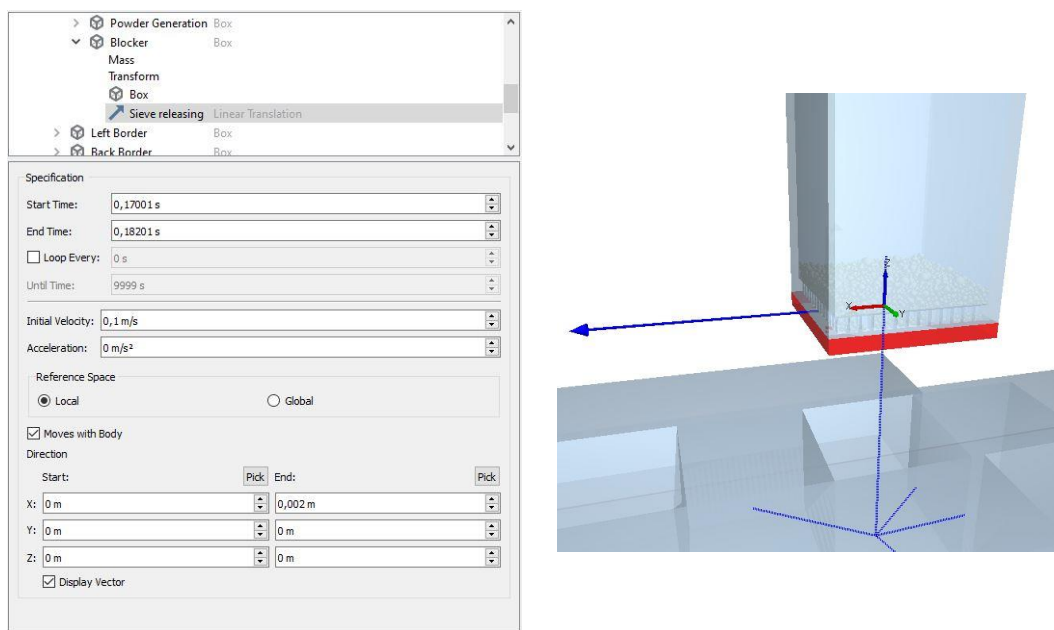


Σχήμα 5.2: Εργοστάσιο σκόνης κοσκινίσματος.

Παρόμοια με την προσομοίωση εναπόθεσης, η προσομοίωση κοσκίνισης ξεκινά με το γέμισμα του εικονικού σώματος του κυβοειδούς που λειτουργεί ως εργοστάσιο. Όλα τα σωματίδια σκόνης δημιουργούνται ταυτόχρονα, κατά την αρχική στιγμή της προσομοίωσης, με την πλήρωση του κυβοειδούς του εργοστασίου σκόνης (*Σχήμα 5.2*) με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η φυσική επαφή μεταξύ των σωματιδίων μέχρις ότου κανένα άλλο σωματίδιο δεν μπορεί να χωρέσει στο εν λόγω εικονικό σώμα. Τότε, αυτά πέφτουν ελεύθερα μέσα στο κόσκινο, ενώ η πλάκα φραγής του κόσκινου βρίσκεται ακριβώς κάτω από το κόσκινο, εμποδίζοντας την πτώση οποιουδήποτε σωματιδίου στο υπόστρωμα. Τα σωματίδια που πέφτουν ελεύθερα καταλαμβάνουν εν μέρει τους αγωγούς του κόσκινου, ενώ τελικά τους φράζουν. Όταν τα σωματίδια φτάσουν σε μια πολύ χαμηλή τιμή κινητικής ενέργειας, την οποία το περιβάλλον προσομοίωσης αναγνωρίζει ως κατάσταση ακινησίας ("παγωμένα" σωματίδια), η πλάκα φραγής ολισθαίνει προς την πλευρά του κόσκινου, απελευθερώνοντας τα ανοίγματα του κόσκινου και επιτρέποντας στα σωματίδια να πέσουν ελεύθερα στο υπόστρωμα (βλ. *Σχήμα 5.4*).



Σχήμα 5.3: Στάδια προσομοίωσης κοσκίνισης: *(a)* Δημιουργία σκόνης- *(b)* Σωματίδια σε ακινησία με μπλοκαρισμένο κόσκινο- *(c)* Απομάκρυνση φραγέα- *(d)* Αρχικό «σύνεφο» σκόνης- *(e)* Φραγμένες οπές κόσκινου- *(f)* Κανονικό κοσκίνισμα-δόνηση κόσκινου- *(g)* Ολοκλήρωση διαχωρισμού σκόνης.



Σχήμα 5.4: Ρύθμιση απελευθέρωσης κόσκινου: (Αριστερά) Ρύθμιση κίνησης προς απομάκρυνση του φραγέα - (Δεξιά) Άξονας κίνησης: μπλε διάνυσμα.

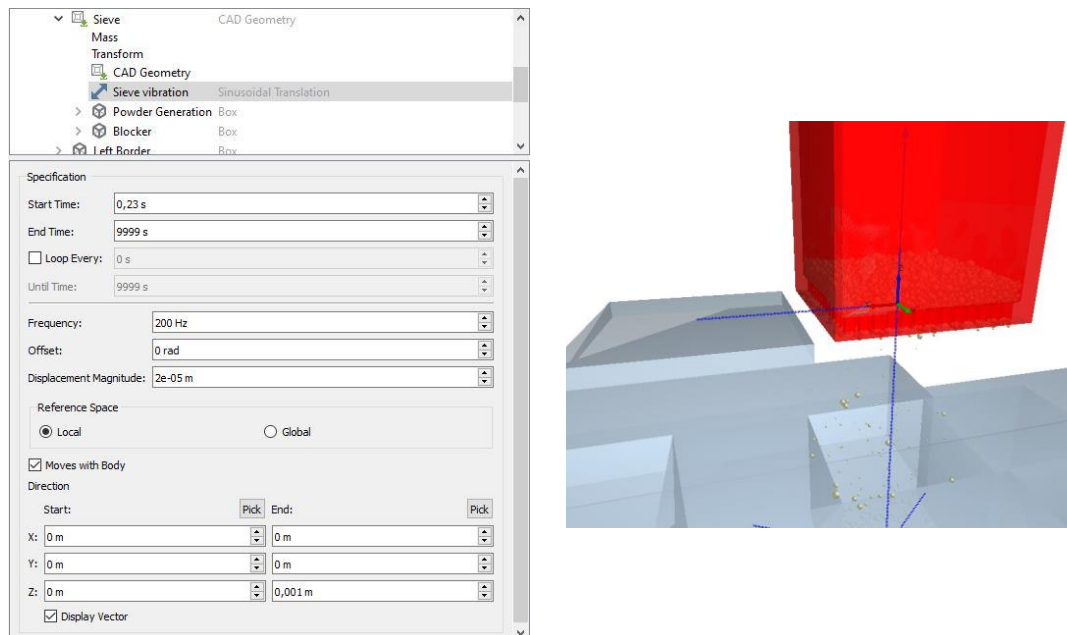
Μόλις ο φραγέας φτάσει στη θέση του στο πλάι του κόσκινου, το κόσκινο αρχίζει να δονείται κάθετα, με πλάτος και συχνότητα που καθορίζονται από το DoE Taguchi (βλ. επόμενη ενότητα).

Παρόμοια με την προσομοίωση εναπόθεσης, το μοντέλο διαθέτει φυσική βαρύτητα, μοντέλο αντίστασης Schiller-Naumann με τις ίδιες ιδιότητες του αέρα όπως είδαμε στην προηγούμενη Ενότητα. Όλα τα φυσικά σώματα είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα 304.

Η προσομοίωση κοσκίνισης ολοκληρώνεται μόνο όταν δεν απομένουν πλέον σωματίδια στο κόσκινο που είναι φυσικά δυνατό να περάσουν από τους αγωγούς του κόσκινου, δηλαδή όταν τα μόνα σωματίδια που απομένουν στο κόσκινο έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από το άνοιγμα του κόσκινου. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι ρυθμίσεις για τη δόνηση του κόσκινου.

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση, εξάγονται δεδομένα σχετικά με τη συνολική μάζα των σωματιδίων που έχουν περάσει από το κόσκινο με την πάροδο του χρόνου και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που παραμένουν στο κόσκινο με την πάροδο του χρόνου. Μπορούν να καθοριστούν συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας για το DoE

Taguchi που χρησιμοποιούν αυτά τα δεδομένα. Η επόμενη ενότητα καλύπτει αυτά τα κριτήρια.



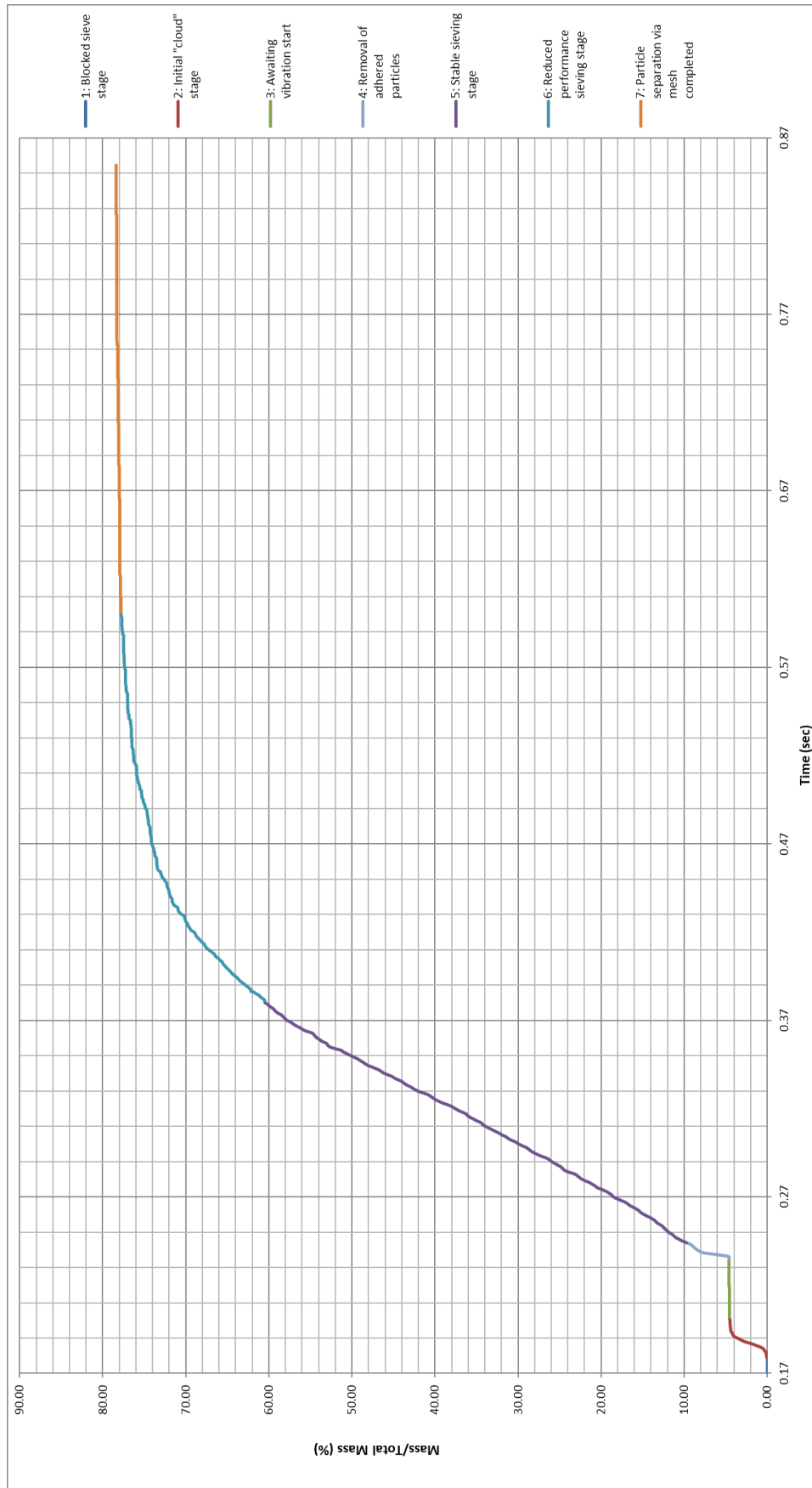
Σχήμα 5.5: Διάταξη δόνησης κόσκινου- (Αριστερά) Διάταξη κίνησης για την ημιτονοειδή ταλάντωση του κόσκινου- (Δεξιά) Άξονας ταλάντωσης: μπλε διάνυσμα.

5.2 Προσδιορισμός της φάσης κοσκίνισης και κριτήρια ποιότητας

Η διαδικασία κοσκίνισης βελτιστοποιείται σύμφωνα με τέσσερα ποιοτικά κριτήρια, ήτοι: παροχή μάζας σκόνης, συνολική μάζα σκόνης που κοσκινίζεται κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας, διάρκεια γραμμικότητας και λόγος τελικού μεγέθους γραμμικότητας (LESR). Τα κριτήρια αυτά θα οριστούν και θα εξηγηθούν στις ακόλουθες υποενότητες.

5.2.1 Παροχή μάζας σκόνης κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας Q (mg/sec)

Πρώτα απ' όλα, είναι πολύ σημαντικό η παροχή μάζας μέσω του κόσκινου να είναι σταθερή, ώστε να προσαρμόζεται εύκολα η ποσότητα της σκόνης που θα εναποτεθεί σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια έμμεσα, ρυθμίζοντας τη διάρκεια του κοσκίνισματός της.



Σχήμα 5.6: Καμπύλη μάζας σε συνάρτηση με το χρόνο. Το διάγραμμα αναφέρεται στη δοκιμή #1 από το σχεδιασμό πειραμάτων Taguchi για κοσκίνισμα.

Επιθυμητή είναι η γραμμικότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, που σημαίνει ότι, η κοσκινισμένη μάζα και ο χρόνος πρέπει να συνδέονται μέσω μιας γραμμικής εξίσωσης. Η γενική μορφή της καμπύλης της κοσκινισμένης μάζας σε σχέση με το χρόνο μπορεί να φανεί στο *Σχήμα 5.6*.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, μπορούν να προσδιοριστούν επτά (7) στάδια κοσκίνισης που συμβολίζονται με διαφορετικά χρώματα.

1. Κατά τη διάρκεια του σταδίου 1, το κόσκινο είναι φραγμένο από την πλάκα φραγής, επομένως τα σωματίδια της σκόνης είναι "παγωμένα" μέσα στο κόσκινο. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της παραγωγής σκόνης και της ελεύθερης πτώσης των σωματιδίων μέχρι να επιτευχθεί αυτή η παγωμένη κατάσταση, ορισμένα σωματίδια κατάφεραν να εισέλθουν στους αγωγούς του κόσκινου πριν αυτοί φράξουν από τις δυνάμεις Van der Waals που δρουν μεταξύ των σωματιδίων.
2. Όταν η πλάκα αποκλεισμού αποσύρεται, τα σωματίδια που γέμιζαν τους αγωγούς του κόσκινου πέφτουν στο υπόστρωμα, δημιουργώντας ένα αρχικό "σύννεφο" (Στάδιο 2).
3. Στη συνέχεια, μετά την πτώση αυτών των σωματιδίων, κανένα άλλο σωματίδιο δεν μπορεί να ταξιδέψει μέσω των αγωγών και στο υπόστρωμα, ενώ το κόσκινο παραμένει ακίνητο. Αυτό είναι το στάδιο 3, όπου το κόσκινο περιμένει τη δόνηση προκειμένου να αρχίσει το κοσκίνισμα. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, πολλά μικρά σωματίδια κρέμονται από τον πυθμένα του κόσκινου, λόγω των μικροσκοπικών δυνάμεων πρόσφυσης που υπερβαίνουν τη βαρύτητα.
4. Όταν αρχίζει η δόνηση, στην πρώτη κιάλας ταλάντωση, αυτά τα ελεύθερα αιωρούμενα σωματίδια πέφτουν στο υπόστρωμα, δημιουργώντας ένα δεύτερο "σύννεφο" σωματιδίων. Αυτό είναι το στάδιο 4.
5. Στη συνέχεια, υπό την προϋπόθεση ότι η δόνηση είναι επαρκούς συχνότητας και πλάτους ώστε να επιβάλλει την ανάδευση της σκόνης στο κόσκινο και να διευκολύνει την απόφραξη των αγωγών, η σκόνη αρχίζει να διέρχεται από το κόσκινο και να πέφτει στο υπόστρωμα με σταθερό ρυθμό ροής. Αυτό είναι το στάδιο 5, όπου επιτυγχάνεται η επιθυμητή γραμμικότητα. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, όλο και λιγότερα από τα λεπτόκοκκα σωματίδια

παραμένουν στο κόσκινο, ενώ τα μεγαλύτερα τείνουν να παραμένουν στο κόσκινο, αφού δεν μπορούν να περάσουν από τους αγωγούς τόσο εύκολα.

6. Τελικά, ο ρυθμός ροής μειώνεται και η γραμμικότητα του σταθερού σταδίου κοσκίνισης χάνεται, καθώς η διαδικασία κοσκίνισης εισέρχεται στο στάδιο 6. Στο στάδιο 6, η κοσκίνιση συνεχίζεται, παρόλο που η απόδοσή της μειώνεται. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, τα σωματίδια που διέρχονται από τους αγωγούς είναι απειροελάχιστα μικρότερα σε σύγκριση με τα ανοίγματα του κόσκινου. Αυτό συνεχίζεται έως ότου η σκόνη διαχωριστεί πλήρως και τα μόνα σωματίδια που παραμένουν στο κόσκινο είναι αυτά με μέγεθος μεγαλύτερο από το μέγεθος του ανοίγματος.
7. Ακολουθεί το στάδιο 7, όπου δεν περνούν πλέον σωματίδια από το κόσκινο και ο διαχωρισμός της σκόνης έχει ολοκληρωθεί..

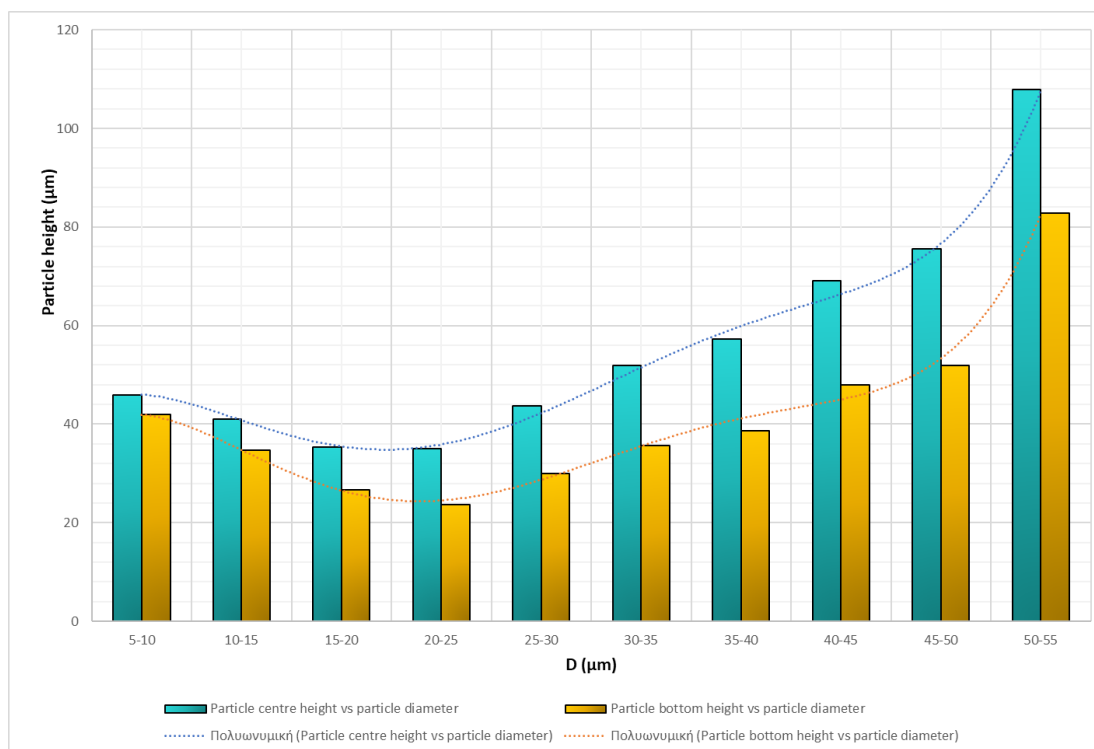
Η γραμμικότητα είναι επιθυμητή και εξασφαλίζεται στα πειράματα με την παραδοχή μιας ελάχιστης τιμής $R^2=0,995$ (99,5%). Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με οπτική επιθεώρηση του σχήματος της καμπύλης. Παρατηρήθηκε ότι, κατά τη χρονική στιγμή που η τιμή R^2 υπερέβη το 99,5%, το στάδιο 5 (στάδιο σταθερού κοσκινίσματος) είχε ήδη τελειώσει και η γραφική παράσταση είχε εισέλθει στο στάδιο 6 (στάδιο μειωμένης απόδοσης κοσκινίσματος), βλέπε *Σχήμα 5.6*. Ως εκ τούτου, η τιμή αυτή επιλέχθηκε με δοκιμή και σφάλμα, προκειμένου να εντοπίζεται με συνέπεια το τέλος του σταθερού σταδίου κοσκίνισης με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, το αν είναι επιθυμητή μια μεγάλη ή μικρή ροή μάζας εξαρτάται από την εφαρμογή.

Στην περίπτωση εναπόθεσης πολλαπλών υλικών, όπου για κάθε στρώμα πρέπει να εκτελεστούν πολλαπλές διαδικασίες κοσκίνισης (ανατρέξτε στο κεφάλαιο 5 για περισσότερες λεπτομέρειες), είναι επιτακτική ανάγκη να μεγιστοποιηθεί η ροή μάζας κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας, ώστε η διαδικασία να είναι όσο το δυνατόν πιο αποδοτική σε χρόνο. Ωστόσο, στην περίπτωση που το κοσκίνισμα χρησιμοποιείται για την ομοιόμορφη διασπορά της σκόνης και τη δημιουργία στρώσεων που είναι έτοιμες για ΣΚΠ χωρίς τη χρήση επιστρωτήρα, είναι πιο χρήσιμο το κοσκίνισμα της σκόνης να εκτελείται αργά, με ελεγχόμενο και ομοιογενή τρόπο, με ανεκτά χαμηλό ρυθμό ροής μάζας.

Επιπλέον, όταν το κοσκίνισμα ξεπεράσει τη σταθερή φάση και περάσει στο στάδιο 6 ή και στο στάδιο 7, η ροή μάζας της σκόνης που περνάει από το κόσκινο μειώνεται

δραστικά, ενώ το μέσο μέγεθος των αποτιθέμενων σωματιδίων αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι, στις χαμηλότερες περιοχές του στρώματος βρίσκονται τα μικρότερα και μεσαίου μεγέθους σωματίδια, ενώ στις ανώτερες περιοχές του στρώματος τα μεγάλα σωματίδια γίνονται όλο και περισσότερα, όπως αποδεικνύεται από το Σχήμα 5.7. Αυτό δείχνει το μέσο ύψος του κέντρου των σωματιδίων στο στρώμα που παράγεται από κοσκίνισμα για διάφορες κατηγορίες διαμέτρων σωματιδίων. Όσο μεγαλύτερα είναι τα σωματίδια, τόσο υψηλότερη είναι η θέση τους στο στρώμα, τόσο κατά το κέντρο του σωματιδίου όσο και κατά την αξιολόγηση του πυθμένα του σωματιδίου.

Αυτό δημιουργεί προβλήματα σε όλες τις περιπτώσεις, δεδομένου ότι, εάν το στρώμα πρόκειται στη συνέχεια να επιπεδοποιηθεί με μηχανισμό επανεπίστρωσης, τα μεγάλα σωματίδια που βρίσκονται στην κορυφή του στρώματος θα παρασυρθούν κατά μήκος του στρώματος, φθάνοντας σε κατάσταση υψηλής κινητικής ενέργειας λόγω της άμεσης επαφής τους με τον επιστρωτήρα, οδηγώντας σε επιφανειακές ατέλειες. Εάν το στρώμα που δημιουργείται από το κοσκίνισμα πρόκειται να παγιωθεί αμέσως με δέσμη λέιζερ, τότε τα μεγάλα σωματίδια που παραμένουν στην κορυφή θα προκαλέσουν επιφανειακές ατέλειες του πυροσυσσωματωμένου/λιωμένου τεμαχίου και μπορούν ακόμη και να δημιουργήσουν πιτσιλιές μεγάλου μεγέθους στην περίπτωση της ΕΤΛ. "Όσο μεγαλύτερα είναι τα σωματίδια, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να λιώσουν μερικώς και να προσκολληθούν σε σωματίδια κοντά στο όριο του τεμαχίου προκαλώντας έτσι μεγαλύτερη επιφανειακή τραχύτητα του τελικού τεμαχίου" (Ali et al, 2019) [221]. Ως εκ τούτου, η διατήρηση σταθερής ροής μάζας σκόνης καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας κοσκίνισης θα διασφαλίσει ότι η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων θα είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη σε σχέση με το ύψος του στρώματος, γεγονός που θα οδηγήσει σε υψηλής ποιότητας τελικά εξαρτήματα με ομοιογενή πυκνότητα και μηχανικές ιδιότητες.



Σχήμα 5.7: Το ύψος της θέσης των σωματιδίων σε σχέση με τη διάμετρο των σωματιδίων στο κοσκινισμένο στρώμα.

(Σημείωση: Το διάγραμμα αναφέρεται στη δοκιμή #1 από το DoE Taguchi του κοσκινίσματος.)

5.2.2 Συνολική μάζα σκόνης που κοσκινίζεται κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας m (mg)

Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι, για το στρώμα που πρέπει να εναποτεθεί, έχει κοσκινιστεί επαρκής ποσότητα σκόνης στην επιφάνεια. Για να γίνει αυτό, είναι απαραίτητο να μεγιστοποιηθεί η μάζα της σκόνης που διέρχεται από το κόσκινο κατά τη σταθερή φάση του, δηλαδή κατά το στάδιο της γραμμικής ροής μάζας σε σύγκριση με τις άλλες φάσεις. Στην περίπτωση που ένας επιστρωτήρας θα επιπεδοποιήσει την επιφάνεια μετά το τέλος του κοσκινίσματος, η ποσότητα αυτή της σκόνης πρέπει να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ποσότητα σκόνης που θα αποτελέσει το τελικό στρώμα, δεδομένου ότι η απόξεση της κορυφής του στρώματος αναπόφευκτα αποβάλλει κάποιο υλικό από την επιφάνεια.

5.2.3 Λόγος Τελικού Μεγέθους Γραμμικότητας *LESR* (*D₉₀/A.S.*)

Είναι επιτακτική ανάγκη να εντοπίζεται πότε το κόσκινο πρέπει να αδειάσει και να ξαναγεμίσει ή πότε πρέπει να γεμίζεται με ακατέργαστη σκόνη χωρίς να αδειάζεται προηγουμένως. Για να γίνει αυτό, εισάγεται η "αναλογία τελικού μεγέθους γραμμικότητας". Ο λόγος τελικού μεγέθους γραμμικότητας (Linearity End Size Ratio-*LESR*) υποδηλώνει τον λόγο του D_{90} των σωματιδίων που παραμένουν στο κόσκινο τη στιγμή που τελειώνει η γραμμικότητα, διαιρούμενο με το μέγεθος του ανοίγματος των αγωγών του κόσκινου, βλέπε εξίσωση (5.1). Το D_{90} επιλέγεται επειδή δίνει μια εκτίμηση της μέσης διαμέτρου των χονδρόκοκκων σωματιδίων, αντί των D_{10} και D_{50} που αντιστοιχούν στη μέση διάμετρο των λεπτόκοκκων και στο μέσο μέγεθος των σωματιδίων του δείγματος αντίστοιχα. Ο ρυθμός ροής εξαρτάται από το ποσοστό των χονδρόκοκκων σωματιδίων στο δείγμα, γεγονός που δικαιολογεί την επιλογή αυτή. Το D_{90} διαιρείται με το μέγεθος του ανοίγματος, ώστε να παρέχεται μια κανονικοποιημένη παράμετρος.

$$LESR = \frac{D_{90} \text{ (in-sieve, at lin.end)}}{A.S.} \quad (5.1)$$

Η *LESR* συνδέει την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων μέσα στο κόσκινο με τη στιγμή που τελειώνει η γραμμική συμπεριφορά του κοσκινίσματος. Ως εκ τούτου, το *LESR* αποτελεί ένδειξη του βαθμού του επιτευχθέντος διαχωρισμού του δείγματος σκόνης στο τέλος του σταδίου του γραμμικού κοσκινίσματος. Είναι χρήσιμο να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο οι παράμετροι κοσκίνισης αλληλεπιδρούν με αυτό το μέγεθος, προκειμένου να προσδιοριστεί πότε είναι απαραίτητο να ξαναγεμίσει ή να αδειάσει το κόσκινο. Η αξιολόγηση αυτή οδηγεί σε οικονομία σκόνης, δεδομένου ότι, σε υψηλότερες τιμές *LESR* (κοντά ή και μεγαλύτερες από 1) η συντριπτική πλειοψηφία των σωματιδίων που παραμένουν στο κόσκινο στο τέλος της γραμμικότητας είναι αυτά που φυσικά δεν μπορούν να περάσουν από τα ανοίγματα του κόσκινου, οπότε η εναπομείνασα σκόνη μπορεί να απορριφθεί και το κόσκινο να ξαναγεμίσει με νέα παρτίδα σκόνης.

Ας σημειωθεί ότι η επαναπλήρωση του κόσκινου τη στιγμή του τέλους της γραμμικότητας χωρίς να αδειάσει η υπόλοιπη σκόνη μπορεί να έχει αμελητέα επίδραση

στην κινηματική της σκόνης αν γίνει μερικές φορές, αλλά μπορεί να αλλάξει σημαντικά την αρχική κατανομή μεγέθους των σωματιδίων όταν γίνεται πολλές φορές, καθώς τα μεγάλα σωματίδια από κάθε παρτίδα επαναπλήρωσης αθροίζονται, μετακινώντας την κατανομή προς τα δεξιά. Προτείνεται ανεπιφύλακτα να αδειάζει η υπόλοιπη σκόνη μετά από κάθε κοσκίνισμα ή, για λόγους αποδοτικότητας του χρόνου, τουλάχιστον μετά την πλήρη εναπόθεση κάθε στρώματος (σε εναπόθεση πολλαπλών υλικών).

5.2.4 Διάρκεια Γραμμικότητας t_{lin} (sec)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ανάλογα με τη φύση της διεργασίας, είναι σημαντικό να καθοριστεί η διάρκεια της γραμμικής φάσης κοσκίνισης, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις είναι προτιμότερη μια μεγαλύτερη γραμμική φάση με μικρότερη ροή μάζας και σε άλλες μια μικρότερη γραμμική φάση με μεγαλύτερη ροή μάζας.

Ωστόσο, το κριτήριο αυτό συνδέεται άμεσα με τα δύο πρώτα κριτήρια (ροή μάζας Q και συνολική μάζα m), αφού, στη γραμμικότητα, ισχύει η εξίσωση (5.2):

$$Q = \frac{m}{t_{lin}} \quad (5.2)$$

πράγμα που σημαίνει ότι είναι απαραίτητο να εξεταστούν μόνο δύο από αυτές τις τρεις παραμέτρους για να προσδιοριστεί επαρκώς η διαδικασία κοσκίνισης και η συμπεριφορά της κατά τη γραμμική, σταθερή φάση της.

5.3 Σχεδιασμός Πειραμάτων Taguchi για Κοσκίνιση

Εξετάζονται τέσσερις μεταβλητές διεργασίας, και συγκεκριμένα:

1. Συχνότητα δόνησης του κόσκινου στην κατακόρυφη κατεύθυνση, f_{vib} (Hz). Η μεταβλητή αυτή εξετάστηκε σε τρία επίπεδα:
 - a) 200 Hz
 - b) 350 Hz
 - c) 500 Hz

Οι συχνότητες αυτές επιλέχθηκαν να είναι πολύ χαμηλότερες σε σύγκριση με το κοσκίνισμα με υπερήχους, δεδομένου ότι, σε πολύ υψηλές συχνότητες, η συνεχής προσφορά πολύ υψηλών τιμών ενέργειας στη σκόνη οδηγεί σε

υπερβολική πτητικότητα των σωματιδίων, τα οποία σχηματίζουν μια κατάσταση "μικρο-αιώρησης" στο κόσκινο [222]. Για να εξεταστεί αυτό, θα ήταν απαραίτητη μια πολύ μεγάλη περιοχή σε συνδυασμό με σφραγισμένα κόσκινα, ώστε να αποτραπεί η διαφυγή των σωματιδίων από το κόσκινο. Τα επιλεγμένα επίπεδα επιτυγχάνονται αρκετά εύκολα με μηχανικά μέσα. Το ελάχιστο επίπεδο (200 Hz) επιλέχθηκε αφού οι προκαταρκτικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι συχνότητες κάτω των 150 Hz δεν ήταν σε θέση να δημιουργήσουν την απαραίτητη ανάδευση της σκόνης για την εκτέλεση του κοσκινίσματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το κόσκινο θα ταλαντωνόταν κάθετα και θα παρέσυρε τη σκόνη μαζί του, αφήνοντας τα σωματίδια ακίνητα σε σχέση με το κόσκινο.

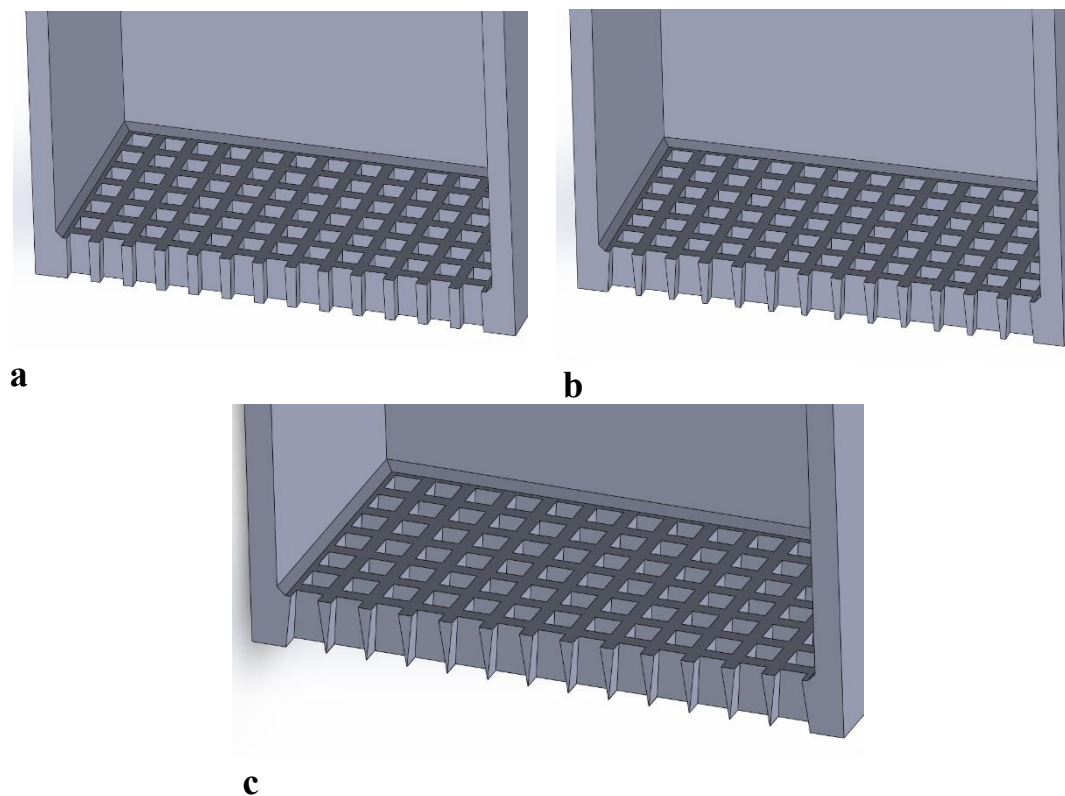
2. *Πλάτος δόνησης του κόσκινου, A_{vib} (μm)*. Η μεταβλητή αυτή εξετάστηκε σε τρία επίπεδα:
- 20 μm
 - 35 μm
 - 50 μm

Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν με προκαταρκτικές δοκιμές. Αποδείχθηκε ότι πλάτη μικρότερα από 10 μm δεν ήταν σε θέση να δημιουργήσουν την απαραίτητη ανάδευση της σκόνης, ενώ πλάτη μεγαλύτερα από 70 μm θα προκαλούσαν την έξοδο της σκόνης από το κόσκινο ύψους 2 mm, άρα την έξοδο από το πεδίο της προσομοίωσης. Αυτά τα όρια πρέπει να ελέγχονται πριν από προσομοιώσεις για διαφορετικά υλικά σκόνης και κατανομές μεγέθους σωματιδίων, καθώς θα επηρεαστούν οι δυνάμεις συνοχής και θα χρειαστούν διαφορετικά επίπεδα διέγερσης για να προκληθεί ανάδευση.

3. *Γωνία κωνικότητας των αγωγών κόσκινου, θ_{iap} (degrees)*. Η μεταβλητή αυτή εξετάστηκε σε τρία επίπεδα:
- 1°
 - 4°
 - 7°

Το κόσκινο είναι ανοιχτό στο πάνω μέρος, ορθογώνιο, με τετράγωνα ανοίγματα. Η πλευρά του κόσκινου είναι 1 mm και το ύψος του είναι 2 mm (αναφορικά με τις εσωτερικές διαστάσεις του κόσκινου - η χωρητικότητα του όγκου του κόσκινου είναι 2 mm³). Το πάχος του κόσκινου είναι 100 μm και

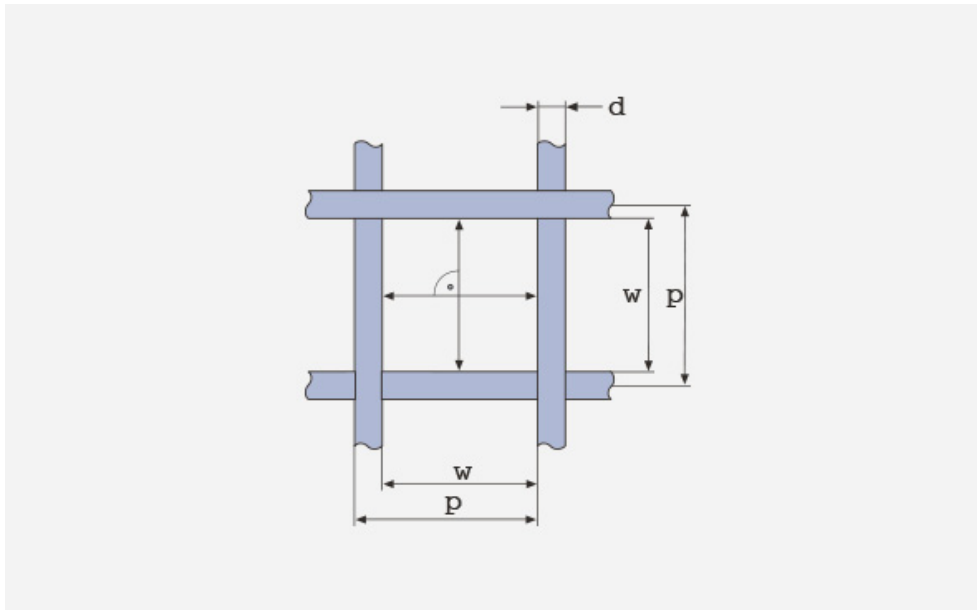
διατηρείται σταθερό για όλες τις προσομοιώσεις. Ωστόσο, οι αγωγοί διαμορφώνονται μέσω ανεστραμμένης κωνικότητας, πράγμα που σημαίνει ότι το άνοιγμα αποκλίνει (δηλ. το εμβαδόν του ανοίγματος αυξάνεται) ενώ κινείται προς τα κάτω (βλ. Σχήμα 5.8). Αυτή η μεταβλητή αποσκοπεί να εξετάσει κατά πόσον οι δυνάμεις πρόσφυσης και η απόφραξη των αγωγών από σωματίδια σκόνης διαφέρουν με διάφορες τιμές κωνικότητας. Οι τιμές που επιλέχθηκαν ήταν σύμφωνες με τα βιομηχανικά πρότυπα κατασκευής [223].



Σχήμα 5.8: Τομή των κόσκινων τετραγωνικού ανοίγματος με διαφορετική γωνία κωνικότητας **(a)** 1°, **(b)** 4°, **(c)** 7°.

Πιο συγκεκριμένα, η πλάκα κοσκινίσματος σχεδιάζεται με τη διαδικασία της ηλεκτροδιαμόρφωσης ενός λεπτού μεταλλικού φύλλου πάχους 100 μm , ώστε να δημιουργηθούν ανοίγματα με ανεστραμμένη κωνικότητα σε όλο το φύλλο. Η γεωμετρία του τετράγωνου πλέγματος περιγράφεται στο Σχήμα 5.9. Το σχήμα αναφέρεται σε πλεγμένο συρματόπλεγμα, αλλά η ίδια ορολογία και οι ίδιοι ορισμοί ισχύουν και για ένα πλέγμα μορφής φύλλου [224]. Το κόσκινο που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις έχει σχεδιαστεί να είναι mesh 325 (325 γραμμές/ιντσών) με πλάτος ανοίγματος 50 μm ($w=50 \mu\text{m}$) και βήμα πλέγματος 78,2 μm ($p=78,2 \mu\text{m}$). Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών

ανοιγμάτων είναι ίση με $d=p-w \Rightarrow d=28,2 \mu\text{m}$. Οι υπολογισμοί είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές που παρέχονται στο [223], όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1.



Σχήμα 5.9: Γεωμετρία πλέγματος τετραγωνικού ανοίγματος: d -διάμετρος σύρματος ή απόσταση ανοίγματος, w -πλάτος ανοίγματος, p - βήμα πλέγματος.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να υπάρχουν εξαγωνικά (κυψελωτά) ή κυκλικά (στρογγυλά) ανοίγματα. Πιθανές διαφορές στη συμπεριφορά τους θα εξεταστούν σε σχέση με τα βέλτιστα επίπεδα που ορίζει ο Taguchi για το κόσκινο με τετράγωνο άνοιγμα, για οικονομία στον υπολογιστικό χρόνο, δεδομένου ότι οι προσομοιώσεις κοσκίνισης είναι δαπανηρές.

Πίνακας 5.1: Προδιαγραφές πλέγματος τετραγωνικού ανοίγματος.

Lines (Line/inch)	Mesh pitch (μm)	Maximum sheet size (mm)	Aperture accuracy guaranteed area		Min. to Max. aperture size (μm)
325	78.2	380	± 2	$\leq \Phi 180$	8-62
			± 4	$\leq \Phi 300$	

4. Ύψος κυβοειδούς «εργοστασίου» σκόνης, h_{bf} (mm). Η μεταβλητή αυτή εξετάστηκε σε τρία επίπεδα:

- 0.5 mm
- 1.0 mm
- 1.5 mm

Αυτή η μεταβλητή καθορίζει την ποσότητα της σκόνης που γεμίζει το κόσκινο στην αρχή της προσομοίωσης. Καθώς όλο και περισσότερα σωματίδια σκόνης στοιβάζονται στο κόσκινο, το ύψος της στοίβας σκόνης αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι περισσότερα σωματίδια στοιβάζονται πάνω σε αυτά που βρίσκονται ακριβώς πάνω από τους αγωγούς, μεταφέροντας το βάρος τους σε αυτούς. Ως εκ τούτου, θα είναι απαραίτητη μια ισχυρότερη δονητική διέγερση για να προκληθεί η ανάδευση της σκόνης που απαιτείται για την εκτέλεση του κοσκινίσματος. Αυτή η μεταβλητή αποσκοπεί να εξετάσει πόση σκόνη μπορεί να τροφοδοτηθεί στο κόσκινο πριν το συσσωρευμένο βάρος των σωματιδίων σκόνης εμποδίσει την εκτέλεση του κοσκινίσματος με αποδεκτά συνεπή και γρήγορο τρόπο. Τα επίπεδα αυτά επιλέχθηκαν ώστε να συμφωνούν με το επιλεγμένο ύψος του κόσκινου (2 mm) που αντιστοιχεί στο 25%, 50% και 75% του ύψους του κόσκινου.

5.4 Αποτελέσματα σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi

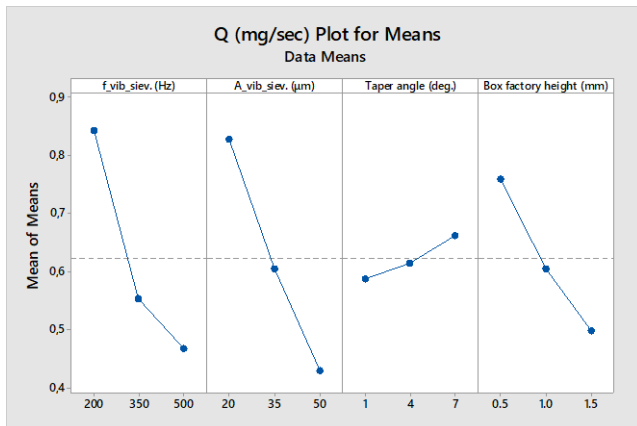
Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζεται ο ορθογώνιος πίνακας L27 Taguchi για τη διαδικασία κοσκίνισης της σκόνης και τα αποτελέσματα σχετικά με τα τέσσερα καθορισμένα κριτήρια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στα Σχήματα 5.10 και 5.11.

Πίνακας 5.2: L27 Ορθογώνιος πίνακας Taguchi DoE για κοσκίνισμα σκόνης, συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων.

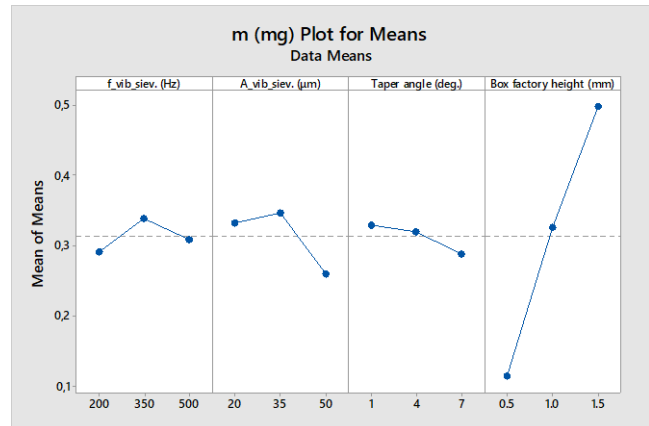
TRIAL #	F _{vib} (Hz)	A _{vib} (μm)	θ _{tap} (deg.)	h _{bf} (mm)	Q (mg/sec)	m (mg)	LESR	t _{lin} (sec)
1	200	20	1	0.5	1.141	0.183	1.190	0.171
2	200	20	4	1.0	0.888	0.238	0.886	0.271
3	200	20	7	1.5	0.900	0.218	0.760	0.243
4	200	35	1	1.0	0.844	0.429	1.243	0.523
5	200	35	4	1.5	0.737	0.659	1.298	0.923
6	200	35	7	0.5	1.082	0.152	1.056	0.145
7	200	50	1	1.5	0.576	0.296	0.829	0.501
8	200	50	4	0.5	0.750	0.110	0.915	0.147
9	200	50	7	1.0	0.673	0.341	1.112	0.523
10	350	20	1	1.0	0.771	0.427	1.242	0.578
11	350	20	4	1.5	0.584	0.664	1.331	1.183
12	350	20	7	0.5	1.075	0.146	1.041	0.140
13	350	35	1	1.5	0.404	0.566	1.179	1.388
14	350	35	4	0.5	0.594	0.102	0.932	0.176
15	350	35	7	1.0	0.536	0.334	1.111	0.640
16	350	50	1	0.5	0.372	0.083	0.914	0.233
17	350	50	4	1.0	0.334	0.269	1.039	0.811
18	350	50	7	1.5	0.307	0.462	1.072	1.525
19	500	20	1	1.5	0.408	0.648	1.304	1.622
20	500	20	4	0.5	0.983	0.111	0.910	0.115
21	500	20	7	1.0	0.696	0.359	1.140	0.535
22	500	35	1	0.5	0.496	0.076	0.880	0.159
23	500	35	4	1.0	0.421	0.282	1.051	0.681
24	500	35	7	1.5	0.338	0.522	1.128	1.523
25	500	50	1	1.0	0.278	0.265	0.991	0.969
26	500	50	4	1.5	0.239	0.452	1.042	2.025
27	500	50	7	0.5	0.347	0.065	0.847	0.205

Κρίνοντας από το Σχήμα 5.10, αρχικά γίνεται φανερό ότι η συνολική μάζα της σκόνης που διέρχεται από το κόσκινο κατά τη διάρκεια της σταθερής φάσης αυξάνεται με την αύξηση του ύψους του κυβοειδούς του εργοστασίου. Η επίδραση των άλλων τριών μεταβλητών είναι αμελητέα σε σύγκριση με το h_{bf}. Φαίνεται ότι το βέλτιστο είναι να υπάρχει μια μικρή γωνία κωνικότητας και μια μεσαία συχνότητα και πλάτος ως

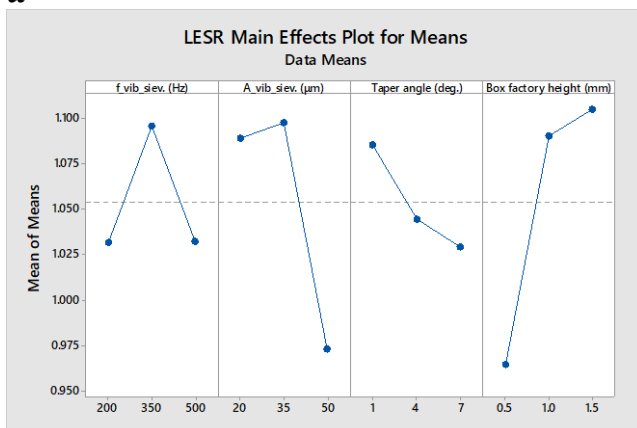
ρυθμίσεις δόνησης. Ωστόσο, όσον αφορά τη ροή μάζας, η ταχύτερη διαδικασία κοσκίνισης πραγματοποιείται με την εφαρμογή χαμηλής συχνότητας και πλάτους δόνησης, μεγάλης γωνίας κωνικότητας και ελάχιστου επιπέδου ύψους κυβοειδούς εργοστασίου. Αυτό αποδεικνύει ότι, όσο πιο γεμάτο γίνεται το κόσκινο, τόσο περισσότερο επιβραδύνεται η διαδικασία κοσκίνισης, καθώς το συσσωρευμένο βάρος των σωματιδίων σκόνης εμποδίζει την επαρκή δονητική ανάδευση.



a



b



c



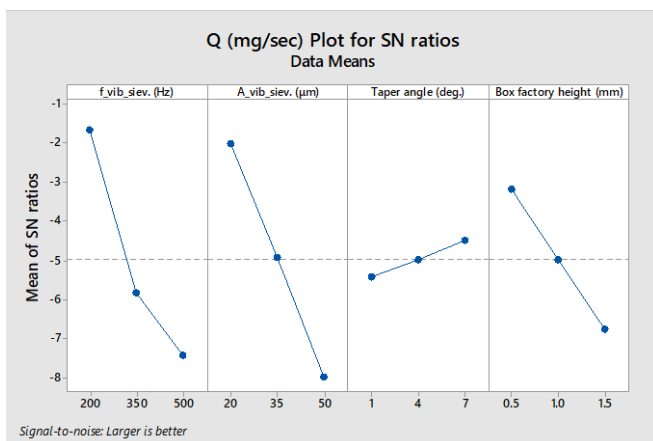
d

Σχήμα 5.10: Διαγράμματα μέσω όρων των τεσσάρων κριτηρίων ποιότητας της ανάλυσης Taguchi για το κόσκίνισμα σκόνης.

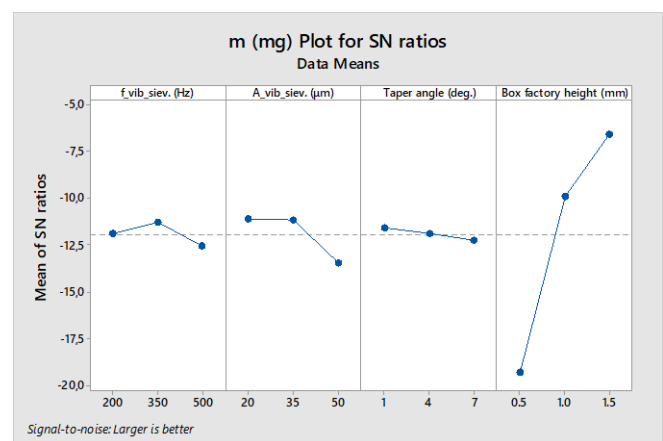
Ο συνδυασμός των δύο προαναφερθέντων παρατηρήσεων έρχεται σε συμφωνία με το διάγραμμα για τη χρονική διάρκεια του γραμμικού σταδίου της κοσκίνισης. Πράγματι, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα και το πλάτος δόνησης και όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του εργοστασίου του κιβωτίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια του γραμμικού σταδίου κοσκίνισης. Συνεπώς, για να είναι μια διαδικασία κοσκίνισης ταχεία, πρέπει να επιλέγονται χαμηλές συχνότητες και πλάτη και το κόσκινο να γεμίζει με τη μικρότερη δυνατή ποσότητα σκόνης, ενώ, αν είναι επιθυμητή μια ομαλή και

μακράς διάρκειας διαδικασία κοσκίνισης, το κόσκινο πρέπει να γεμίζει με άφθονη σκόνη και να επιλέγονται υψηλά επίπεδα συχνότητας και πλάτους. Τέλος, η LESR επιτυγχάνει μέγιστη τιμή για μεσαία επίπεδα συχνότητας και πλάτους, μικρή γωνία κωνικότητας και υψηλά επίπεδα ύψους κυβοειδούς «εργοστασίου» σκόνης.

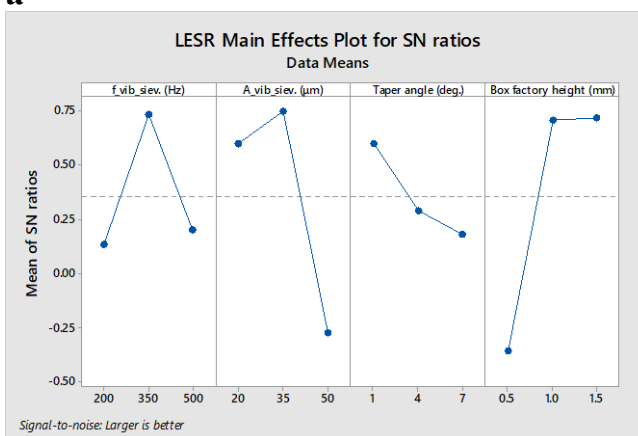
Όσο υψηλότερη είναι η τιμή LESR στο τέλος της γραμμικότητας, τόσο υψηλότερη οικονομία σκόνης επιτυγχάνεται, δεδομένου ότι προτείνεται να αδειάζει και να ξαναγεμίζει το κόσκινο στο τέλος κάθε περάσματος κοσκίνισης, προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους σωματιδίων στο στρώμα (ή στα στρώματα) και/ή στις υποστρώσεις που εναποτίθενται. Μια μικρότερη γωνία κωνικότητας θα μπορούσε να σημαίνει ότι οι δυνάμεις πρόσφυσης είναι ισχυρότερες στους αγωγούς, δεδομένου ότι τα σωματίδια βρίσκονται πιο κοντά στο τοίχωμα του αγωγού καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής τους από την κορυφή προς τον πυθμένα του ανοίγματος. Αυτό θα προωθούσε την ταχύτερη απόφραξη των αγωγών, οδηγώντας στον τερματισμό της φάσης γραμμικότητας και σε βραδύτερο, μη γραμμικό ρυθμό κοσκίνισης.



a



b



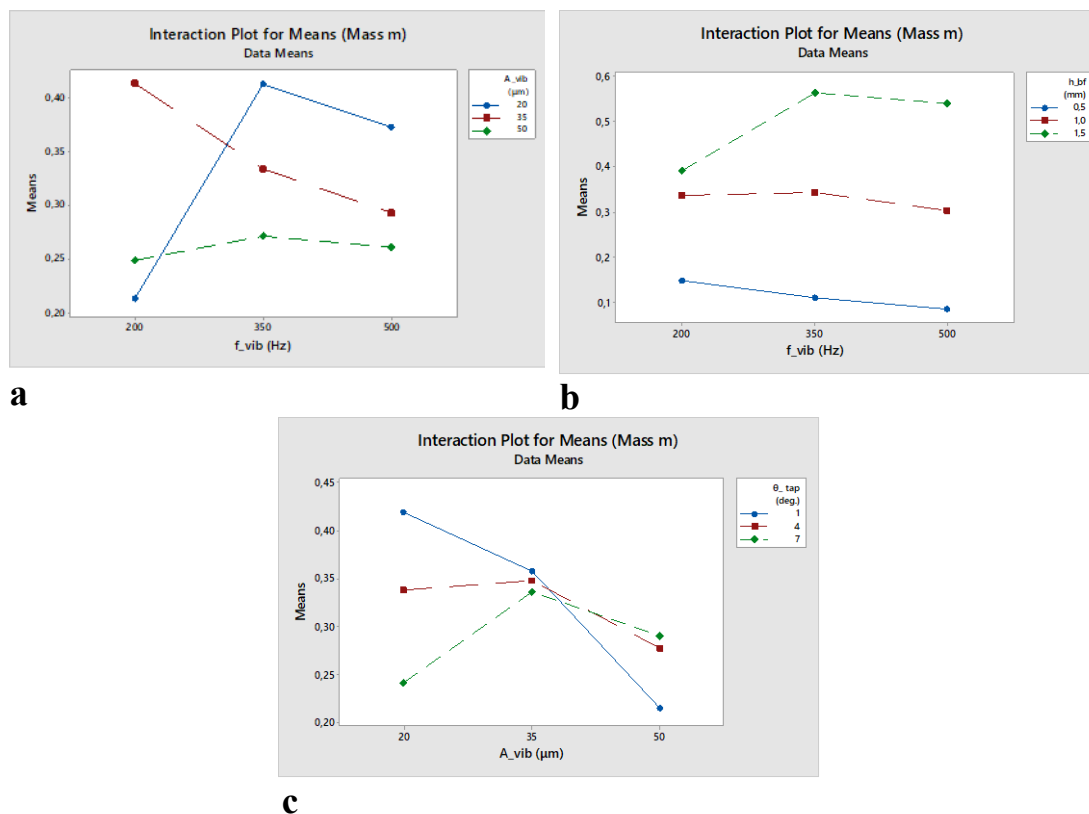
c



d

Σχήμα 5.11: Διαγράμματα λόγου σήματος προς θόρυβο των τεσσάρων κριτηρίων ποιότητας της ανάλυσης Taguchi για το κοσκίνισμα σκόνης.

5.4.1 Αποτελέσματα Ολικής Μάζας στη Γραμμικότητα (m)



Σχήμα 5.12: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τους μέσους όρους της συνολικής κοσκινισμένης μάζας κατά το στάδιο του γραμμικού κοσκινίσματος.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12, το ύψος του κυβοειδούς εργοστασίου και η συχνότητα δόνησης παρουσιάζουν σχετικά παράλληλες γραμμές, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μικρή αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για τις άλλες δύο αλληλεπιδράσεις. Το γράφημα αλληλεπίδρασης συχνότητας-πλάτους δείχνει ότι, στο μικρότερο επίπεδο συχνότητας, τόσο τα υψηλά όσο και τα μικρά επίπεδα πλάτους έχουν παρόμοια, σχετικά κακά, αποτελέσματα. Ωστόσο, ένα μεσαίο επίπεδο πλάτους αντιστοιχεί σε εξαιρετικά βελτιωμένα αποτελέσματα, υποδεικνύοντας ότι προσεγγίζεται μια συχνότητα συντονισμού. Ωστόσο, για μεσαία και υψηλά επίπεδα συχνότητας, το μικρότερο πλάτος δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Επιπλέον, όσον αφορά την αλληλεπίδραση πλάτους-γωνίας κωνικότητας, ακόμη και για χαμηλά πλάτη, όσο μικρότερη είναι η γωνία κωνικότητας, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα, η τάση αυτή αντιστρέφεται πλήρως για μεγαλύτερα επίπεδα πλάτους. Αυτό ενδεχομένως προκύπτει από το γεγονός ότι τα υψηλά πλάτη οδηγούν σε μεγαλύτερη αντίστροφη αναπήδηση των σωματιδίων που είναι ήδη τοποθετημένα μέσα στους αγωγούς κατά την καθοδική κίνηση της ταλάντωσης του κόσκινου. Αυτό οδηγεί σε εντονότερα

φαινόμενα απόφραξης στους στενότερους αγωγούς, ενώ οι ευρύτεροι μπορούν εύκολα να ξεβουλώσουν κατά την ανοδική κίνηση του κόσκινου.

Από τον Πίνακα 5.3 προκύπτει ότι το ύψος του κυβοειδούς εργοστασίου κυριαρχεί στην απόκριση της κοσκινισμένης μάζας κατά τη γραμμικότητα, σε ποσοστό 72,09%. Είναι ενδιαφέρον ότι οι αλληλεπιδράσεις συμβάλλουν περισσότερο από ό,τι οι άλλοι παράγοντες από μόνοι τους.

Πίνακας 5.3: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για τη συνολική μάζα που κοσκινίζεται στη γραμμικότητα.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	0.779953	84.58%	0.779953	0.111422	14.89	0.000
f_{vib} (Hz)	1	0.001318	0.14%	0.000243	0.000243	0.03	0.859
A_{vib} (μm)	1	0.023544	2.55%	0.000646	0.000646	0.09	0.772
θ_{tap} (deg.)	1	0.007771	0.84%	0.038923	0.038923	5.20	0.034
h_{bf} (mm)	1	0.664705	72.09%	0.017935	0.017935	2.40	0.138
f_{vib} (Hz) *A_{vib} (μm)	1	0.016428	1.78%	0.016428	0.016428	2.20	0.155
f_{vib} (Hz) *h_{bf} (mm)	1	0.034347	3.72%	0.018180	0.018180	2.43	0.136
A_{vib} (μm) *θ_{tap} (deg.)	1	0.031840	3.45%	0.031840	0.031840	4.26	0.053
Error	19	0.142149	15.42%	0.142149	0.007482		
Total	26	0.922102	100.00%				

Η εξίσωση (5.3) δείχνει την παλινδρόμηση της συνολικής μάζας που κοσκινίζεται κατά τη γραμμικότητα.

$$\begin{aligned}
 m = & 0.173 + 0.000097f_{vib} - 0.00138A_{vib} - 0.0483\theta_{tap} + 0.197h_{bf} \\
 & - 0.000016f_{vib}A_{vib} + 0.000536f_{vib}h_{bf} \\
 & + 0.001182A_{vib}\theta_{tap}
 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων που μεγιστοποιεί τη μάζα που κοσκινίζεται κατά τη γραμμικότητα έχει ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{vib} = 500 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 20 \text{ } \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 1^\circ \\ h_{bf} = 1.5 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Η οποία, σύμφωνα με την Εξίσωση (5.3), δίνει τη βέλτιστη κοσκινισμένη μάζα ως

$$m_{opt} = 0.701 \text{ mg}$$

Μετά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης με τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων, επετεύχθη επικύρωση της αναμενόμενης κοσκινισμένης μάζας, η τιμή της οποίας είναι

$$m_{opt,sim} = 0.648 \text{ mg}$$

με απόκλιση (-) 7,6% από την αναμενόμενη τιμή των 0,701 mg, η οποία είναι μικρότερη από το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης, όπως υπολογίστηκε με ANOVA (15,42%).

Σημειώνεται στον Πίνακα 5.2 ότι οι δοκιμές #5 και #11 παρουσιάζουν υψηλότερη τιμή μάζας από την εκτιμώμενη βέλτιστη (δηλαδή 0,659 και 0,664 mg αντίστοιχα). Αυτό συμβαίνει λόγω του σφάλματος της παλινδρόμησης. Ωστόσο, δεδομένου ότι η απόκλιση μεταξύ αυτών των τιμών είναι μικρότερη από 2,5 %, είναι ασφαλές να διατηρηθεί το υπολογισμένο από την παλινδρόμηση βέλτιστο επίπεδο παραμέτρων.

5.4.2 Αποτελέσματα Ροής Μάζας κατά τη Γραμμικότητα (Q)

Ο Πίνακας 5.4 δείχνει ότι η συχνότητα και το πλάτος της δόνησης έχουν μεγάλη επίδραση στην παροχή, με 33,49% και 37,25% συνεισφορά αντίστοιχα. Ακολουθεί το ύψος του κυβοειδούς εργοστασίου, με ποσοστό 16,10%. Υπάρχει ισχυρή επιρροή της αλληλεπίδρασης μεταξύ πλάτους και ύψους κυβοειδούς εργοστασίου, σε ποσοστό 4,04%.

Πίνακας 5.4: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για τη ροή μάζας κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	176.532	92.86%	176.532	0.252189	35.32	0.000
f_{vib} (Hz)	1	0.63657	33.49%	0.03887	0.038869	5.44	0.031
A_{vib} (μm)	1	0.70805	37.25%	0.11374	0.113745	15.93	0.001
θ_{tap} (deg.)	1	0.02449	1.29%	0.01715	0.017145	2.40	0.138
h_{bf} (mm)	1	0.30602	16.10%	0.12230	0.122304	17.13	0.001
f_{vib} (Hz) *A_{vib} (μm)	1	0.00715	0.38%	0.00386	0.003864	0.54	0.471
A_{vib} (μm) *h_{bf} (mm)	1	0.07680	4.04%	0.07680	0.076800	10.75	0.004
θ_{tap} (deg.) *h_{bf} (mm)	1	0.00623	0.33%	0.00623	0.006230	0.87	0.362
Error	19	0.13568	7.14%	0.13568	0.007141		
Total	26	190.100	100.00%				

Η Εξίσωση (5.4) δείχνει την παλινδρόμηση της ροής μάζας του γραμμικού σταδίου κοσκίνισης.

$$Q = 1.944 - 0.000965f_{vib} - 0.02101A_{vib} + 0.028\theta_{tap} - 0.571h_{bf} - 0.000008f_{vib}A_{vib} + 0.01067A_{vib}h_{bf} - 0.0157\theta_{tap}h_{bf} \quad (5.4)$$

Ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων που μεγιστοποιεί τη ροή μάζας της γραμμικότητας έχει ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{vib} = 200 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 20 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 7^\circ \\ h_{bf} = 0.5 \text{ mm} \end{array} \right.$$

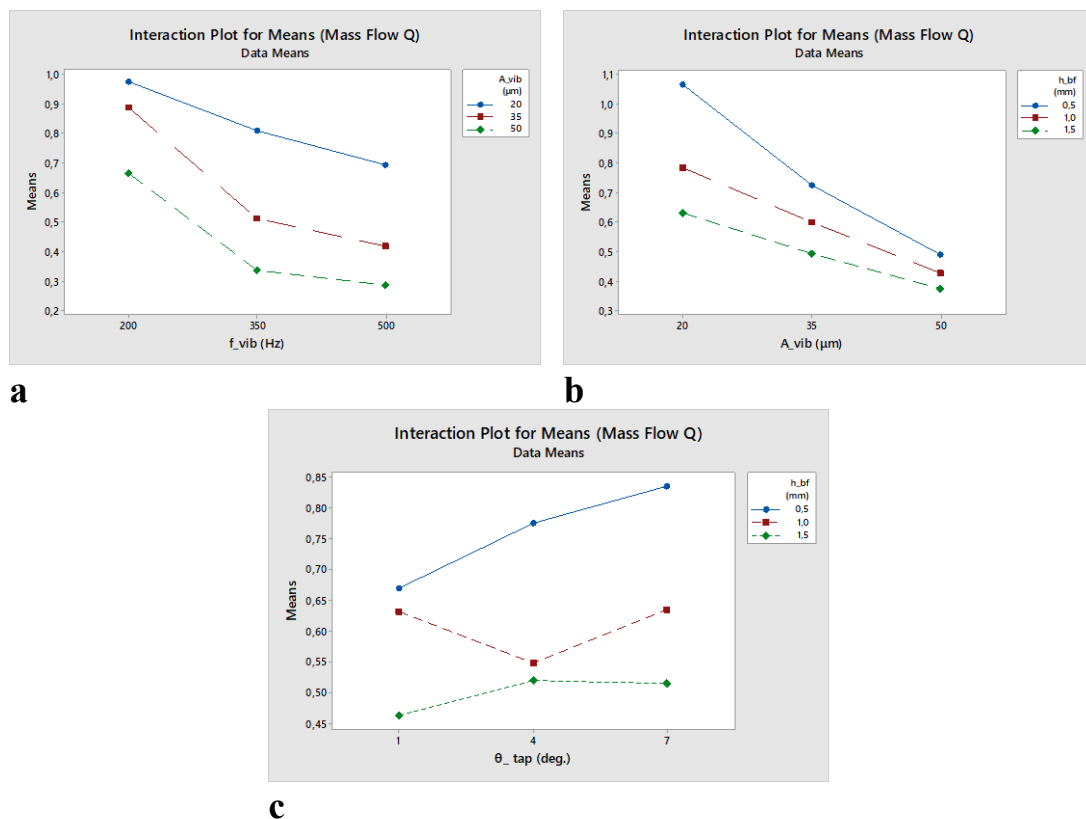
Ο οποίος, σύμφωνα με την Εξίσωση (5.4), δίνει τη βέλτιστη ροή μάζας

$$Q_{opt} = 1.261 \text{ mg/sec}$$

Μετά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης με τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων, επιτεύχθηκε η επικύρωση της αναμενόμενης ροής μάζας, η τιμή της οποίας ήταν:

$$Q_{opt,sim} = 1.181 \text{ mg/sec}$$

με απόκλιση (-) 6,3% από την αναμενόμενη τιμή 1,164 mg/sec, η οποία είναι μικρότερη από το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης που υπολογίστηκε με ANOVA (7,14%).



Σχήμα 5.13: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τα μέσα της ροής μάζας κατά το στάδιο του γραμμικού κοσκινίσματος.

Το διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για τη ροή μάζας, βλέπε Σχήμα 5.13, δείχνει ότι υπάρχει ελάχιστη αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων, καθώς οι γραμμές είναι σχετικά παράλληλες και στα τρία διαγράμματα.

5.4.3 Αποτελέσματα Διάρκειας Γραμμικότητας (t_{lin})

Ο Πίνακας 5.5 δείχνει ότι το ύψος του κυβοειδούς εργοστασίου (πρωτίστως) και η συχνότητα δόνησης (δευτερευόντως) έχουν μεγάλη επίδραση στη διάρκεια της γραμμικότητας του κοσκίνισμα, με 62,75% και 13,55% συνεισφορά αντίστοιχα. Η αλληλεπίδρασή τους παρουσιάζει επίσης υψηλή επιρροή, με ποσοστό 12,84%. Η συμβολή των άλλων παραμέτρων και των αλληλεπιδράσεων είναι ασήμαντη, οπότε είναι ασφαλές να δηλωθεί ότι η συχνότητα και η ποσότητα της ακατέργαστης σκόνης που τροφοδοτείται στο κόσκινο είναι οι παράγοντες που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη διάρκεια της γραμμικής φάσης κοσκίνισης.

Η εξίσωση (5.5) δείχνει την παλινδρόμηση της χρονικής διάρκειας της γραμμικής φάσης.

$$t = 0.707 - 0.001914f_{vib} - 0.01061A_{vib} - 0.0905\theta_{tap} - 0.518h_{bf} + 0.003539f_{vib}h_{bf} + 0.002235A_{vib}\theta_{tap} + 0.00938A_{vib}h_{bf} \quad (5.5)$$

Πίνακας 5.5: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για τη συνολική διάρκεια του σταδίου του γραμμικού κοσκίνισματος.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	747.360	94.69%	747.360	106.766	48.40	0.000
f_{vib} (Hz)	1	106.921	13.55%	0.20059	0.20059	9.09	0.007
A_{vib} (μm)	1	0.24059	3.05%	0.04630	0.04630	2.10	0.164
θ_{tap} (deg.)	1	0.02457	0.31%	0.13670	0.13670	6.20	0.022
h_{bf} (mm)	1	495.285	62.75%	0.06750	0.06750	3.06	0.096
f_{vib} (Hz) *h_{bf} (mm)	1	101.326	12.84%	0.79268	0.79268	35.93	0.000
A_{vib} (μm) *θ_{tap} (deg.)	1	0.11375	1.44%	0.11375	0.11375	5.16	0.035
A_{vib} (μm) *h_{bf} (mm)	1	0.05936	0.75%	0.05936	0.05936	2.69	0.117
Error	19	0.41913	5.31%	0.41913	0.02206		
Total	26	789.272	100.00%				

Ο συνδυασμός επιπέδων που μεγιστοποιεί τη διάρκεια της γραμμικότητας έχει ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{vib} = 500 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 50 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 7^\circ \\ h_{bf} = 1.5 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Ο οποίος, σύμφωνα με την Εξίσωση (5.5), δίνει τη μέγιστη διάρκεια γραμμικότητας κοσκίνισης

$$t_{max} = 1.948 \text{ sec}$$

Μετά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης με τα προηγούμενα επίπεδα παραμέτρων, επιτεύχθηκε η επικύρωση της αναμενόμενης μέγιστης διάρκειας γραμμικότητας, η τιμή της οποίας είναι:

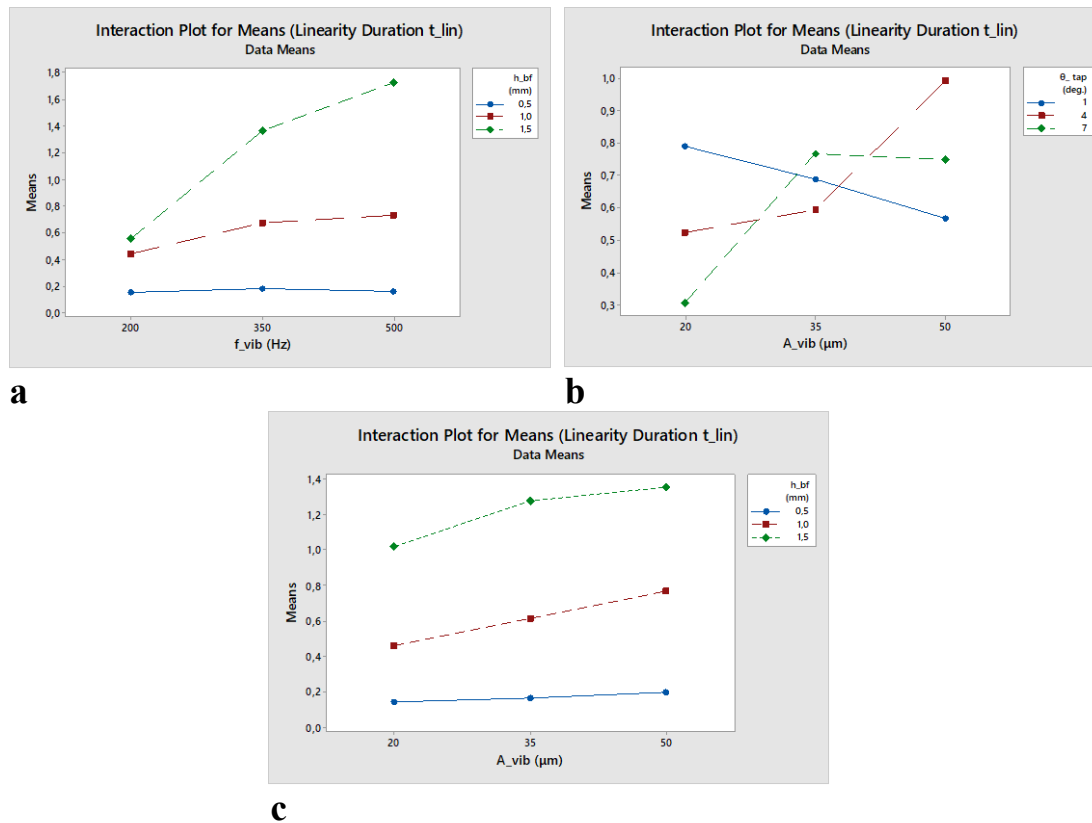
$$t_{max,sim} = 1.905 \text{ sec}$$

με απόκλιση (-) 2,2% από την αναμενόμενη τιμή των 1,948 sec, η οποία είναι μικρότερη από το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης που υπολογίστηκε με ANOVA (5,31%).

Και πάλι, υπάρχει μια δοκιμή, συγκεκριμένα η #26 που έχει μεγαλύτερη διάρκεια γραμμικότητας, στα 2,025 sec. Ωστόσο, αυτή η απόκλιση (+4%) είναι μικρότερη από το σφάλμα της παλινδρόμησης, οπότε μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι έχει επιλεγεί ο σωστός συνδυασμός παραμέτρων. Αυτές οι αποκλίσεις δείχνουν ότι υπάρχουν περισσότερες παράμετροι που ενδεχομένως επηρεάζουν το χρόνο κοσκίνισης, οι οποίες δεν έχουν ληφθεί υπόψη, ωστόσο η απόκλιση από το αναμενόμενο σφάλμα είναι αρκετά μικρή ώστε να είναι αποδεκτή.

Μπορεί να σημειωθεί ότι, με βάση τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης στο Σχήμα 5.14, το πλάτος και η ποσότητα σκόνης που τροφοδοτείται στο κόσκινο δεν φαίνεται να έχουν σημαντική αλληλεπίδραση, ενώ, αντίθετα, η αλληλεπίδραση πλάτους και γωνίας κωνικότητας φαίνεται να είναι πιο σημαντική, καθώς οι γραμμές τέμνονται μεταξύ τους στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης.

Τέλος, καθώς αυξάνεται η συχνότητα δόνησης, όσο περισσότερη σκόνη τροφοδοτείται στο κόσκινο, τόσο περισσότερο διαρκεί η σταθερή φάση. Εάν το ελάχιστο επίπεδο σκόνης τροφοδοτείται στο κόσκινο, η σταθερή φάση θα διαρκέσει περίπου το ίδιο ανεξάρτητα από τη μεταβολή της συχνότητας, ενώ, σε μεσαία και υψηλά επίπεδα ύψους κυβοειδούς εργοστασίου, η διάρκεια της γραμμικότητας αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας, ενώ η κλίση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η αρχική ποσότητα ακατέργαστης σκόνης.



Σχήμα 5.14: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τους μέσους όρους της διάρκειας του γραμμικού σταδίου κοσκίνισης.

5.4.4 Αποτελέσματα LESR

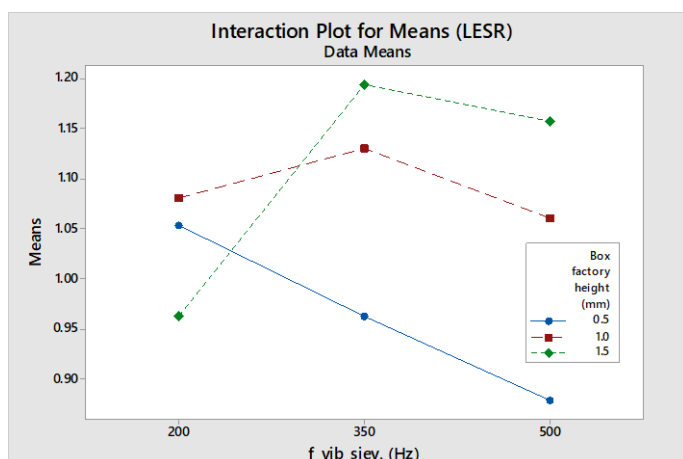
Πίνακας 5.6: Ανάλυση διακύμανσης για την παράμετρο LESR στο τέλος του σταδίου γραμμικότητας.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	0.344655	53.75%	0.344655	0.049236	3.15	0.022
f_{vib} (Hz)	1	0.000001	0.00%	0.003211	0.003211	0.21	0.655
A_{vib} (μm)	1	0.060436	9.43%	0.00511	0.00511	0.33	0.574
θ_{tap} (deg.)	1	0.014168	2.21%	0.071888	0.071888	4.61	0.045
h_{bf} (mm)	1	0.08792	13.71%	0.020017	0.020017	1.28	0.272
f_{vib} (Hz) *A_{vib} (μm)	1	0.020336	3.17%	0.020336	0.020336	1.3	0.268
f_{vib} (Hz) *h_{bf} (mm)	1	0.10286	16.04%	0.062422	0.062422	4	0.06
A_{vib} (μm) *θ_{tap} (deg.)	1	0.058934	9.19%	0.058934	0.058934	3.78	0.067
Error	19	0.296567	46.25%	0.296567	0.015609		
Total	26	0.641223	100.00%				

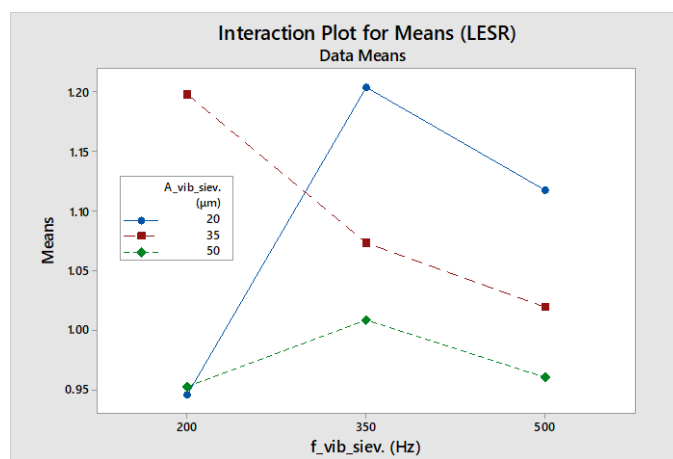
Τέλος, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα από την ANOVA όσον αφορά την παράμετρο LESR, δεδομένου ότι το ελάχιστο σφάλμα της παλινδρόμησης είναι ίσο

με 46,25%. Αυτό δείχνει σαφώς ότι η διαδικασία είναι πιο σύνθετη και ότι περισσότερες μεταβλητές που δεν εξετάζονται εδώ παίζουν ρόλο στην απόκριση αυτού του κριτηρίου ποιότητας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.6.

Ωστόσο, τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τις παραμέτρους LESR παρέχουν κάποια ενδιαφέρουσα εικόνα. Δεδομένου ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή του LESR, τόσο πληρέστερος διαχωρισμός του δείγματος ισχύος επιτυγχάνεται, παρατηρείται ότι, υψηλότερο αρχικό επίπεδο σκόνης στο κόσκινο απαιτεί υψηλότερη συχνότητα κοσκίνισης, βλέπε Σχήμα 5.15a. Το χαμηλότερο επίπεδο σκόνης επιτυγχάνει πολύ χαμηλό διαχωρισμό σε υψηλές συχνότητες και η τιμή LESR αυξάνεται σε χαμηλότερες συχνότητες. Το υψηλότερο επίπεδο σκόνης επιτυγχάνει φτωχό διαχωρισμό μέσω του μικρότερου επιπέδου συχνότητας, το υψηλότερο μέσω του μεσαίου επιπέδου και ένα αποδεκτό επίπεδο σε υψηλή συχνότητα δόνησης. Το μεσαίο επίπεδο σκόνης επιτυγχάνει το υψηλότερο επίπεδο διαχωρισμού μέσω των μεσαίων συχνοτήτων, ενώ οι υψηλές και οι χαμηλές συχνότητες έχουν παρόμοια αποτελέσματα.



a



b

Σχήμα 5.15: Γραφήματα αλληλεπίδρασης για τιμές LESR: (a) $f_{\text{vib-hbf}}$, (b) $f_{\text{vib-Avib}}$.

Επιπλέον, οι υψηλές και μεσαίες συχνότητες λειτουργούν καλύτερα όσον αφορά την επιτευχθείσα τιμή LESR όσο μικρότερο γίνεται το πλάτος δόνησης. Ωστόσο, οι χαμηλές συχνότητες λειτουργούν καλά μόνο σε συνδυασμό με μεσαία επίπεδα πλάτους δόνησης, βλέπε Σχήμα 5.15b.

Το Σχήμα 5.10c δείχνει ότι το LESR στο τέλος του σταδίου γραμμικότητας παίρνει γενικά τιμές πολύ κοντά στο 1, στο εύρος μεταξύ 0,95 και 1,1.

Στη βιβλιογραφία μπορεί να σημειωθεί ότι το ξηρό κοσκίνισμα είναι δυνατό για σκόνη με μέση διάμετρο τόσο μικρή όσο 30 μm [225], [226]. Ωστόσο, όπως αποδείχθηκε στην παρούσα εργασία, το ξηρό κοσκίνισμα μπορεί να λειτουργήσει και για μικρότερα σωματίδια με ελάχιστο φράξιμο των ανοιγμάτων, εφόσον παρέχεται επαρκής δόνηση για την αντιμετώπιση των δυνάμεων πρόσφυσης και συνοχής και τη διάσπαση των συσσωματωμάτων. Βέβαια, αυτό ισχύει μόνο μέχρι ενός ορίου, αφού η διάμετρος των σωματιδίων στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας ήταν τουλάχιστον 5 μm και κατά μέσο όρο 21 μm , δηλαδή όχι πολύ μικρότερη σε σχέση με το όριο των 30 μm που συναντάται στη βιβλιογραφία, οπότε τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τους τεχνολογικούς περιορισμούς της μεθόδου. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι οι συχνότητες δόνησης που επιλέχθηκαν ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με τις συνήθως χρησιμοποιούμενες (200, 350 και 500 Hz αντί για τα συνήθως χρησιμοποιούμενα 10-50 Hz των βιομηχανικών μηχανημάτων κοσκίνισης [227]), προκειμένου να αποφευχθεί η απόφραξη των ανοιγμάτων χωρίς να αυξηθεί δραστικά η πτητικότητα της σκόνης, κάτι που συμβαίνει στις συχνότητες υπερήχων (περίπου 36000 Hz) [222].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην περίπτωση κοσκίνισης ως προπαρασκευαστικό βήμα για την εναπόθεση σκόνης μέσω μηχανισμού επανεπίστρωσης, όπως είναι η λεπίδα ή ο κύλινδρος με αντίθετη περιστροφή, είναι επιτακτική ανάγκη η αναγκαία ποσότητα σκόνης να κοσκινίζεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα για την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου κατασκευής. Σε αυτή την περίπτωση, το κοσκίνισμα λειτουργεί μόνο ως μέθοδος για την αποτροπή της εναπόθεσης συσσωματωμάτων και μεγάλων σωματιδίων σκόνης στο στρώμα.

Ωστόσο, είναι δυνατόν το κοσκίνισμα να λειτουργεί ως μηχανισμός εναπόθεσης σκόνης. Σε αυτή την περίπτωση, είναι επιτακτική ανάγκη η εναπόθεση σκόνης να είναι αργή και ελεγχόμενη, καθώς πρέπει να σταματήσει ακριβώς τη σωστή στιγμή, δηλαδή όταν το πάχος του στρώματος είναι το επιθυμητό. Στην παρούσα εργασία θα εξετασθεί η ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος για στρώματα που παράγονται αποκλειστικά με κοσκίνισμα και αυτά θα συγκριθούν ποιοτικά με τα βελτιστοποιημένα στρώματα με και χωρίς δόνηση λεπίδας που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.5 Αξιολόγηση Σχήματος Οπής

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση του σχήματος του ανοίγματος (τετράγωνο, εξαγωνικό ή κυκλικό) στα προαναφερθέντα κριτήρια απόδοσης κοσκίνισης, αποφασίζεται ότι, για λόγους οικονομίας χρόνου, η επίδραση του σχήματος θα εξεταστεί μόνο στα τρία βέλτιστα σύνολα παραμέτρων κοσκίνισης, δηλαδή σε εκείνο που μεγιστοποιεί τη ροή μάζας, σε εκείνο που μεγιστοποιεί τη κοσκινισμένη μάζα και σε εκείνο που μεγιστοποιεί τη διάρκεια του γραμμικού σταδίου κοσκίνισης.

Τα ιδανικά σύνολα επιπέδων παραμέτρων κοσκίνισης είναι τα ακόλουθα, βλ. Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Ιδανικά σύνολα παραμέτρων κοσκίνισης με βάση διαφορετικά κριτήρια ποιότητας.

Maximum mass sieved in linearity	Maximum mass flow in linearity	Maximum linearity duration
$(\Sigma_1): \begin{cases} f_{vib} = 500 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 20 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 1^\circ \\ h_{bf} = 1.5 \text{ mm} \end{cases}$	$(\Sigma_2): \begin{cases} f_{vib} = 200 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 20 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 7^\circ \\ h_{bf} = 0.5 \text{ mm} \end{cases}$	$(\Sigma_3): \begin{cases} f_{vib} = 500 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 50 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 7^\circ \\ h_{bf} = 1.5 \text{ mm} \end{cases}$

Προκειμένου να εξεταστεί αποκλειστικά η επίδραση του σχήματος, το σχεδιασμένο (κανονικό) εξαγωνικό άνοιγμα (βλ. Σχήμα 5.16) έχει απόσταση μεταξύ των απέναντι ακμών ίση με την πλευρά του τετραγωνικού ανοίγματος (50 μm).

Πίνακας 5.8: Ενεργός περιοχή κοσκίνισης για διαφορετικό σχήμα ανοίγματος.

	# of Apertures N_a	Characteristic dimension	Aperture area formula	Aperture area (mm^2)	Total aperture area (mm^2)
Square	169	Side: $a_s = 50 \mu\text{m}$	$A_s = a_s^2$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	0.4225
Hexagonal	188	Side: $a_h = 28.868 \mu\text{m}$	$A_h = \frac{3\sqrt{3}}{2} a_h^2$	$2.17 \cdot 10^{-3}$	0.4080 (-3.4%)
Circular	188	Diameter: $D_c = 50 \mu\text{m}$	$A_c = \pi \left(\frac{D_c}{2}\right)^2$	$1.963 \cdot 10^{-3}$	0.3690 (-12.7%)

Αυτό οδηγεί σε μια πλευρά ίση με 28,868 μm . Ομοίως, η διάμετρος του κυκλικού ανοίγματος (βλέπε Σχήμα 5.17) είναι ίση με την πλευρά του τετραγωνικού ανοίγματος.

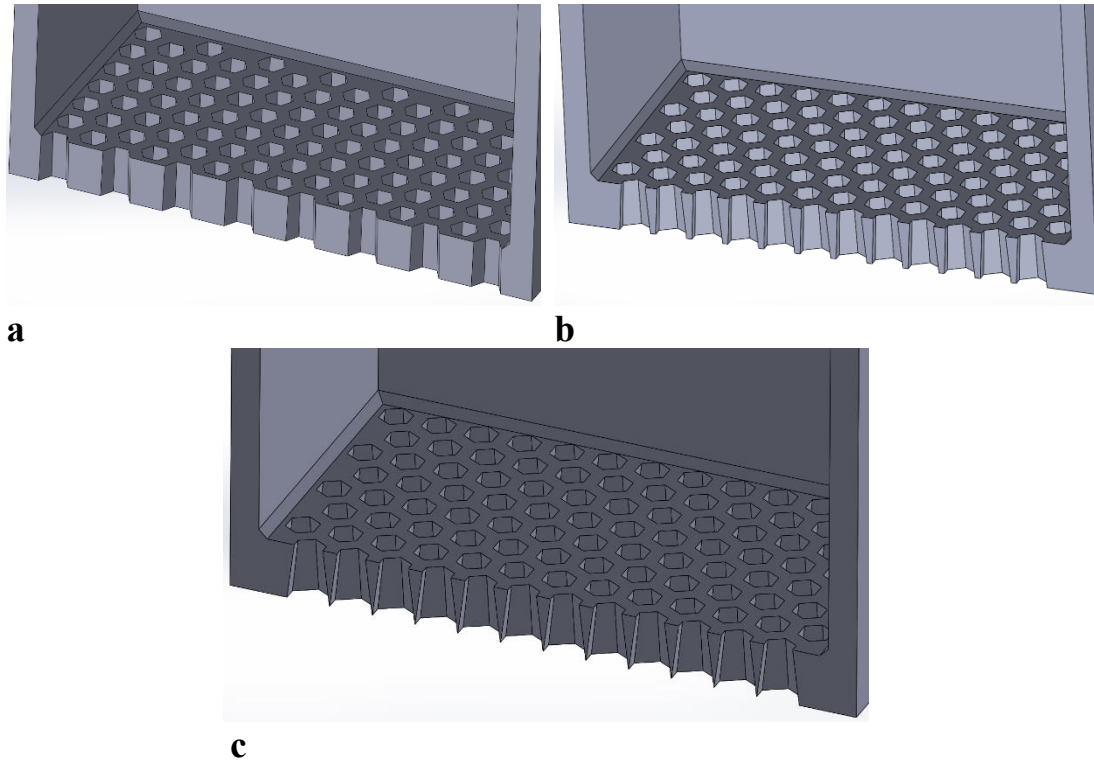
Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όλα τα σχεδιασμένα κόσκινα επιτρέπουν σε σωματίδια του ίδιου μέγιστου μεγέθους να περάσουν από τους αγωγούς τους.

Ένας εναλλακτικός σχεδιασμός θα ήταν να επιλεγούν ανοίγματα διαφορετικού σχήματος, αλλά να καθοριστεί η χαρακτηριστική τους διάσταση εξασφαλίζοντας ότι τα ανοίγματα διατηρούν σταθερή επιφάνεια. Ωστόσο, κατά την εναπόθεση σκόνης για στρώματα έτοιμα για ΣΚΠ, είναι υψίστης σημασίας να ελέγχεται η μέγιστη διάμετρος των σωματιδίων και να διασφαλίζεται ότι είναι μικρότερη από το θεωρητικό πάχος του στρώματος. Ως εκ τούτου, ο συγγραφέας επέλεξε τη μέθοδο σχεδιασμού των ανοιγμάτων που παρέχει ακριβές "φιλτράρισμα" του μεγέθους των σωματιδίων.

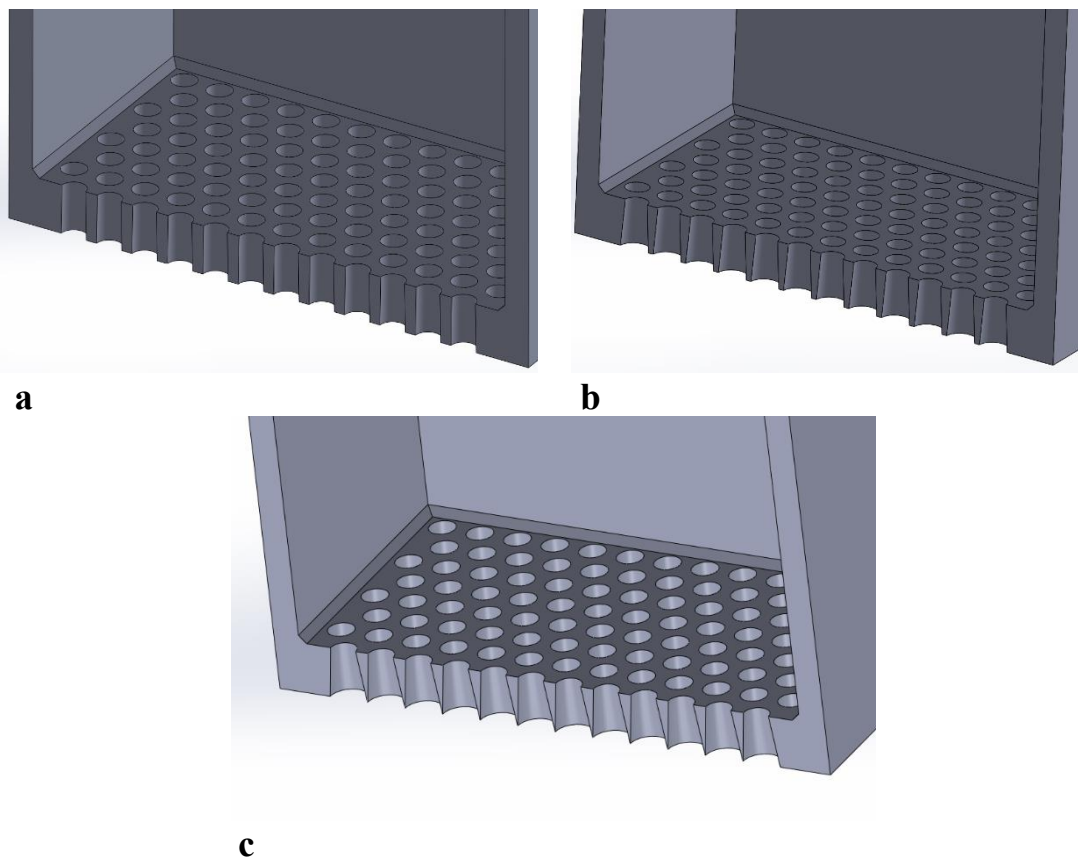
Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ γειτονικών ανοιγμάτων διατηρείται η ίδια, ανεξάρτητα από το σχήμα του ανοίγματος. Επιλέχθηκε μια σταθερή απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων προκειμένου να διατηρηθεί η ίδια ποσότητα παρεμβολής μεταξύ γειτονικών ανοιγμάτων για όλα τα διαφορετικά σχέδια κόσκινων. Η μείωση της απόστασης θα αύξανε την παρεμβολή από γειτονικά ανοίγματα και αντίστροφα. Με τον τρόπο αυτό, ο υπολογιζόμενος λόγος ανοίγματος προς συνολική επιφάνεια είναι 42,25% για το κόσκινο με τετράγωνο άνοιγμα, 40,8% για το κόσκινο με εξαγωνικό άνοιγμα και 36,9% για το κόσκινο με κυκλικό άνοιγμα, δεδομένου ότι η συνολική επιφάνεια του κόσκινου είναι ίση με 1 mm^2 . Οι λεπτομέρειες αυτού του υπολογισμού φαίνονται στον Πίνακα 5.8.

Στα Σχήματα 5.16 και 5.17 παρουσιάζεται η γεωμετρία των κόσκινων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Εάν ένα σφαιρικό σωματίδιο διαμέτρου $50 \mu\text{m}$ προσπαθούσε να περάσει μέσα από τα καθορισμένα ανοίγματα, στην περίπτωση του τετράγωνου ανοίγματος, θα είχε 4 σημεία επαφής με αυτό, στην περίπτωση του εξαγώνου τα σημεία επαφής θα ήταν 6, ενώ στην περίπτωση του κυκλικού ανοίγματος, το σωματίδιο θα ερχόταν σε πλήρη επαφή με το άνω άκρο του ανοίγματος.



Σχήμα 5.16: Τομή των κόσκινων με εξαγωνικό άνοιγμα. Το πάχος του κόσκινου είναι 100 μm . Γωνία ανεστραμμένης κωνικότητας: (a) 1° ; (b) 4° ; (c) 7° .



Σχήμα 5.17: Τομή των κόσκινων με κυκλικό άνοιγμα. Το πάχος του κόσκινου είναι 100 μm . Γωνία ανεστραμμένης κωνικότητας: (a) 1° ; (b) 4° ; (c) 7° .

Όσο περισσότερα είναι τα σημεία επαφής, τόσο πιο έντονα είναι τα φαινόμενα τριβής όταν το σωματίδιο προσπαθεί να περάσει μέσα από το άνοιγμα. Ως εκ τούτου, τα κυκλικά ανοίγματα δεν θα επέτρεπαν τη διέλευση των μεγαλύτερων σωματιδίων. Αναμένεται μια κατανομή μεγέθους σωματιδίων της σκόνης στο εναποτιθέμενο στρώμα ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα αριστερά καθώς μετακινούμαστε από τετράγωνα προς εξαγωνικά και κυκλικά κόσκινα. Για τον ίδιο λόγο, το LESR της σκόνης μέσα στο κόσκινο στο τέλος της γραμμικότητας θα μειωνόταν ελαφρώς, καθώς ορισμένα μικρότερα σωματίδια με διάμετρο λίγο μικρότερη από 50 μm θα δυσκολεύονταν περισσότερο να περάσουν από τα εξαγωνικά και κυκλικά ανοίγματα. Η κοσκινισμένη μάζα και η ροή μάζας αναμένεται επίσης να μειωθούν.

Στον Πίνακα 5.9, συγκρίνονται οι κύριοι δείκτες ποιότητας για τη διαδικασία κοσκίνισης για διαφορετικό σχήμα ανοίγματος στις τρεις δοκιμές με συνδυασμούς παραμέτρων που μεγιστοποιούν τη κοσκινισμένη μάζα, τη ροή μάζας και τη διάρκεια γραμμικότητας. Αυτοί υπολογίστηκαν μετά την εκτέλεση προσομοιώσεων ΜΔΣ κοσκίνισης χρησιμοποιώντας τα σύνολα μεταβλητών επιπέδων του Πίνακα 5.9. Τα ποσοστά υπολογίζονται σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του ίδιου συνόλου παραμέτρων για το τετράγωνο άνοιγμα. Μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις.

Πίνακας 5.9: Σύγκριση επίδρασης σχήματος οπής.

TRIAL	TRIAL SETTINGS	APERTURE TYPE	Q (mg/sec)	m (mg)	LESR	t _{lin} (sec)	Q _n (Q/N _a) [mg/(sec·aperture)]
Σ_1 (max m)	$(\Sigma_1): \begin{cases} f_{vib} = 500 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 20 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 1^\circ \\ h_{bf} = 1.5 \text{ mm} \end{cases}$	SQUARE	0.408	0.648	1.304	1.622	0.002414
		HEXAGONAL	0.468 (+14.7%)	0.636 (-1.9%)	1.334 (+2.3%)	1.405 (-13.4%)	0.002489
		CIRCULAR	0.435 (+6.6%)	0.661 (+2.0%)	1.303 (-0.8%)	1.595 (-1.7%)	0.002314
Σ_2 (max Q)	$(\Sigma_2): \begin{cases} f_{vib} = 200 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 20 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 7^\circ \\ h_{bf} = 0.5 \text{ mm} \end{cases}$	SQUARE	1.121	0.193	1.177	0.185	0.006633
		HEXAGONAL	1.150 (+2.6%)	0.180 (-6.7%)	1.192 (+1.3%)	0.165 (-10.8%)	0.006117
		CIRCULAR	1.089 (-2.9%)	0.194 (-0.5%)	1.194 (+1.4%)	0.185 (\equiv)	0.005793
Σ_3 (max t _{lin})	$(\Sigma_3): \begin{cases} f_{vib} = 500 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 50 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 7^\circ \\ h_{bf} = 1.5 \text{ mm} \end{cases}$	SQUARE	0.226	0.426	1.045	1.905	0.001337
		HEXAGONAL	0.207 (-8.4%)	0.431 (+1.2%)	1.020 (-2.4%)	2.113 (+10.9%)	0.001101
		CIRCULAR	0.193 (-14.6%)	0.355 (-16.7%)	0.978 (-6.4%)	1.845 (-3.1%)	0.001027

Στην περίπτωση μεγιστοποίησης της μάζας της σκόνης που έχει περάσει από το κόσκινο στη γραμμικότητα, η ίδια η μάζα παραμένει σχετικά αμετάβλητη, περίπου στα 0,636-0,661 mg. Το ίδιο ισχύει και για το LESR, σε 1,303-1,334. Ωστόσο, η διάρκεια της γραμμικότητας μειώνεται κατά 13,4 % κατά τη μετάβαση από το τετράγωνο στο εξαγωνικό και στη συνέχεια επανέρχεται σε παρόμοια τιμή με εκείνη του τετραγωνικού διαφράγματος για τη δοκιμή με κυκλικό διάφραγμα. Φυσικά, δεδομένου ότι η μάζα είναι σχετικά σταθερή, ισχύει το αντίθετο όσον αφορά τη διάρκεια γραμμικότητας για τη ροή μάζας. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το αναμενόμενο αποτέλεσμα που αναφέρθηκε παραπάνω. Το πείραμα δείχνει ότι δεν υπάρχει ισχυρή στατιστική διαφορά μεταξύ της απόδοσης του κόσκινου με τετράγωνο άνοιγμα και του κόσκινου με κυκλικό άνοιγμα (βλέπε Πίνακα 5.9), όπως μπορεί να κριθεί από τα ποσοστά που παρέχονται, αλλά η απόδοση του εξαγωνικού κόσκινου παρουσιάζει υψηλότερη ροή μάζας και μειωμένη διάρκεια γραμμικότητας.

Στην περίπτωση της μεγιστοποίησης της ροής σκόνης της γραμμικής φάσης κοσκίνισης, δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές σε κανέναν από τους καθορισμένους δείκτες ποιότητας, δηλαδή στη ροή μάζας, στη μάζα, στη διάρκεια γραμμικότητας και στο LESR. Τυχόν αποκλίσεις μεταξύ αυτών μπορούν να αποδοθούν σε μικρές διαφορές κατά τη φάση παραγωγής σκόνης, καθώς τα σωματίδια παράγονται τυχαία από μια λογαριθμοκανονική κατανομή, όπως εξηγείται στο σχετικό με την εναπόθεση σκόνης με λεπίδα κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Η παραγωγή σκόνης συμβαίνει ξανά στην αρχή κάθε δοκιμής και έχουν παρατηρηθεί διαφορές περίπου 2,9% στη συνολική μάζα σκόνης μεταξύ των τριών δοκιμών του σετ μεγιστοποίησης της ροής μάζας.

Στην περίπτωση της μεγιστοποίησης της διάρκειας της γραμμικότητας, κατά τη μετάβαση από ένα κόσκινο με τετράγωνο άνοιγμα σε ένα κόσκινο με εξαγωνικό άνοιγμα, η ροή μάζας μειώνεται κατά 8,4%. Ωστόσο, η συνολική κοσκινισμένη μάζα παραμένει σχεδόν η ίδια, όπως και η LESR. Αυτό σημαίνει ότι, η μειωμένη ροή μάζας είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει τη διάρκεια της γραμμικότητας, η οποία αυξάνεται κατά 10,9%. Ωστόσο, η συνολική επιφάνεια ανοίγματος του κόσκινου με εξαγωνικό άνοιγμα είναι μόνο 3,4% μικρότερη σε σχέση με εκείνη του κόσκινου με τετραγωνικό άνοιγμα. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση της ροής μάζας αναμένεται μέχρι 3,4% και το υπόλοιπο 5% μπορεί να αποδοθεί στη μειωμένη πιθανότητα διέλευσης των μεγαλύτερων σωματιδίων από τους αγωγούς του κόσκινου. Όταν μεταβαίνουμε

από το εξαγωνικό στο κυκλικό κόσκινο, η ροή μάζας μειώνεται περαιτέρω κατά 6,2% σε σχέση με το τετράγωνο κόσκινο.

Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, η διάρκεια γραμμικότητας μειώνεται επίσης σε σχέση με την τετραγωνική κατά 3,1%. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι, όταν σταματά η γραμμικότητα, η τιμή LESR είναι κατά 6,4% χαμηλότερη σε σχέση με το τετράγωνο κόσκινο. Αυτό κάνει τη συνολική κοσκινισμένη μάζα να μειώνεται επίσης κατά 16,7%, ενώ το εξαγωνικό κόσκινο επέτρεψε περίπου την ίδια μάζα με το τετράγωνο. Συνεπώς, όσο περισσότερο το σχήμα του ανοίγματος αποκλίνει από το τετράγωνο σχήμα και κινείται προς κανονικά πολύγωνα με αυξανόμενο αριθμό πλευρών, αρχικά η κοσκινισμένη μάζα δεν επηρεάζεται και οι μόνες τιμές που επηρεάζονται είναι η ροή μάζας και η διάρκεια γραμμικότητας, αλλά μετά από έναν κρίσιμο αριθμό πλευρών αυτό το μοτίβο παύει να υφίσταται και η τιμή LESR μειώνεται, προκαλώντας ακόμη και μείωση της διάρκειας γραμμικότητας.

Οι διαφορές στις παρατηρήσεις μεταξύ των τριών δοκιμών δείχνουν σαφώς ότι το σχήμα του ανοίγματος είναι ένας σημαντικός παράγοντας που παρουσιάζει αλληλεπίδραση με τις 4 μεταβλητές του πειράματος.

Η τελευταία στήλη του Πίνακα 5.9 παρέχει μια σημαντική παρατήρηση. Εάν η ροή μάζας κανονικοποιηθεί με βάση τον αριθμό των ανοιγμάτων για κάθε δοκιμή κοσκίνισης, τότε γίνεται σαφές ότι, ανεξάρτητα από τα επίπεδα των μεταβλητών κοσκίνισης, καθώς μετακινούμαστε από τα τετράγωνα προς τα κυκλικά ανοίγματα, η ροή μάζας ανά άνοιγμα μειώνεται. Αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με την πρόβλεψη, δεδομένου ότι

- i. Είναι ολοένα και πιο δύσκολο για τα σωματίδια που περνούν οριακά (δηλ. σωματίδια με διάμετρο 50 μm) να διαπεράσουν τα ανοίγματα και να κινηθούν μέσα από αυτά, και
- ii. Τα τετράγωνα ανοίγματα, ενώ ένα σωματίδιο οριακού μεγέθους διέρχεται οριακά μέσα από αυτά, αφήνουν κάποιο χώρο στις γωνίες για να περάσουν τα λεπτά σωματίδια. Ο χώρος αυτός γίνεται μικρότερος για εξαγωνικά ανοίγματα και καθίσταται ανύπαρκτος για κυκλικά ανοίγματα.

Ως εκ τούτου, για τα κόσκινα που διαθέτουν ανοίγματα που αντιστοιχούν σε οριακά διερχόμενα σωματίδια του ίδιου μεγέθους, είναι σημαντικό να αυξηθεί ο αριθμός των

ανοιγμάτων κατά τη μετάβαση από το τετράγωνο σχήμα ανοιγμάτων προς το κυκλικό σχήμα ανοιγμάτων, προκειμένου να επιτευχθεί η ίδια ροή μάζας.

5.6 Ποιότητα Στρώσης μέσω Εναπόθεσης Κοσκίνισης

Είναι πολύ σημαντικό να εξεταστεί κατά πόσον το ελεγχόμενο κοσκίνισμα είναι σε θέση να παράγει στρώματα σκόνης κατάλληλα για ΣΚΠ, δεδομένου ότι αυτή θα ήταν μια πολύ αποδοτική μέθοδος εναπόθεσης σκόνης που θα προωθούσε την οικονομία της σκόνης. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται ο ίδιος σχεδιασμός Taguchi με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην ενότητα 5.3, ωστόσο, τα κριτήρια ποιότητας θα είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο DoE Taguchi εναπόθεσης, δηλαδή LTD, SCR, PD και S_q -RMS, βλέπε κεφάλαιο 4.5. Το εναποτιθέμενο στρώμα θα θεωρηθεί έτοιμο για αξιολόγηση τη στιγμή ακριβώς που η μάζα στο εσωτερικό του τετραγώνου του δείγματος θα είναι ίση με τη βέλτιστη μάζα στρώματος διασποράς μέσω μιας λεπίδας (SCR-RMS), δηλαδή ίση με 0,205 mg. Συγκρίνοντας την πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης των στρωμάτων που δημιουργήθηκαν για τον σχεδιασμό Taguchi εναπόθεσης στο κεφάλαιο 4 με τις τιμές της πραγματικής πυκνότητας συσσώρευσης του Πίνακα 5.10, γίνεται φανερό ότι παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της μεθόδου εναπόθεσης (με επιστρωτήρα με λεπίδα ή χωρίς επιστρωτήρα, μέσω κοσκίνισματος). Ως εκ τούτου, το πραγματικό πάχος στρώματος αναμένεται να είναι παρόμοιο διατηρώντας μια σταθερή συνολική μάζα στρώματος, στα 0,205 mg. Ο σχεδιασμός και τα αποτελέσματα της DoE Taguchi για την εναπόθεση σκόνης μέσω κοσκίνισματος φαίνονται στον Πίνακα 5.10. Τα επίπεδα των μεταβλητών κοσκίνισης διατηρήθηκαν τα ίδια όπως είχαν οριστεί στην ενότητα 5.3, προκειμένου να γίνουν συνεπείς παρατηρήσεις που συνδέουν τα κριτήρια απόδοσης κοσκίνισης με την ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος.

Αφού αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 4 ότι η λοξότητα (Ssk) και η κύρτωση (Sku) είναι γενικοί δείκτες ποιότητας της επιφάνειας του στρώματος που λαμβάνουν υπόψη τα LTD, SCR και S_q -RMS, τα δύο αυτά μεγέθη θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της ποιότητας των στρώσεων σκόνης που δημιουργούνται μέσω κοσκίνισης.

Τα στρώματα που αναπτύσσονται έχουν αρνητική λοξότητα, δεδομένου ότι τα σφαιρικά σωματίδια σκόνης δημιουργούν κατανομές που αποκλίνουν προς την άνω πλευρά σε σχέση με τη μέση γραμμή. Οι επιφάνειες που αναπτύσσονται είναι επίσης συνήθως λεπτοκυρτικές, δηλαδή με τιμή κύρτωσης μεγαλύτερη από 3, αφού η μόνη

οξύτητα του προφίλ αναπτύσσεται από τις κοιλάδες, οι οποίες είναι πιο απότομες και στενές όσο υψηλότερη είναι η ποιότητα του στρώματος. Όσο πιο απότομες και στενές είναι οι κοιλάδες, τόσο υψηλότερη είναι η τιμή S_{ku} . Επιπλέον, όσο πιο επίπεδα και μεγαλύτερα είναι τα "οροπέδια" της επιφάνειας, τόσο μικρότερη είναι η (αρνητική) τιμή S_{sk} . Αυτό σημαίνει ότι, όσο πιο πυκνά πακεταρισμένα είναι τα σωματίδια στην κορυφή του στρώματος, τόσο πιο επίπεδα φαίνονται τα πλατώματα και τόσο μικρότερη είναι η (αρνητική) τιμή της επιφανειακής λοξότητας. Το Σχήμα 4.19 παρέχει μια οπτική επεξήγηση των παραμέτρων S_{sk} και S_{ku} [214].

Πίνακας 5.10: L27 Ορθογώνιος πίνακας του DoE Taguchi για την εναπόθεση σκόνης μέσω κοσκίνισματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης.

TRIAL #	F_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{tap} (deg.)	h_{bf} (mm)	(LTD) (μm)	SCR (%)	S_q (μm)	PD_{tr} (%)	PD_{th} (%)	S_a (μm)	S_{sk}	S_{ku}
1	200	20	1	0.5	-21.0	99.3	19.0	67.8	53.7	14.8	-0.788	4.269
2	200	20	4	1.0	-20.2	99.3	18.2	67.5	54.0	14.0	-0.786	4.583
3	200	20	7	1.5	-20.5	99.3	18.1	67.4	53.7	14.1	-0.794	4.571
4	200	35	1	1.0	-20.4	99.3	18.5	67.3	53.7	14.5	-0.745	4.312
5	200	35	4	1.5	-20.7	99.3	18.7	67.4	53.5	14.5	-0.747	4.338
6	200	35	7	0.5	-21.3	99.3	18.5	68.1	53.7	14.5	-0.732	4.293
7	200	50	1	1.5	-20.6	99.4	18.1	67.5	53.7	14.1	-0.682	4.372
8	200	50	4	0.5	-21.4	99.3	19.2	68.1	53.7	15.1	-0.650	3.948
9	200	50	7	1.0	-20.3	99.4	17.4	67.4	53.8	13.4	-0.800	4.719
10	350	20	1	1.0	-20.4	99.4	18.4	67.6	53.9	14.2	-0.834	4.476
11	350	20	4	1.5	-19.9	99.4	18.1	67.4	54.0	14.0	-0.770	4.499
12	350	20	7	0.5	-19.8	99.4	19.9	67.9	54.6	15.5	-0.400	3.884
13	350	35	1	1.5	-20.2	99.3	17.9	67.4	53.9	13.8	-0.832	4.666
14	350	35	4	0.5	-20.5	99.3	20.5	68.3	54.4	16.1	-0.455	3.701
15	350	35	7	1.0	-20.6	99.4	17.0	67.5	53.7	13.1	-0.809	4.924
16	350	50	1	0.5	-22.0	99.3	21.4	68.4	53.4	17.0	-0.482	3.385
17	350	50	4	1.0	-19.9	99.4	16.4	67.0	53.8	12.6	-0.864	5.165
18	350	50	7	1.5	-20.5	99.3	18.0	67.4	53.7	13.9	-0.873	4.643
19	500	20	1	1.5	-20.7	99.3	19.0	67.8	53.8	14.8	-0.784	4.286
20	500	20	4	0.5	-19.8	99.3	20.1	67.9	54.6	15.7	-0.421	3.896
21	500	20	7	1.0	-20.3	99.3	18.1	67.6	54.0	14.1	-0.802	4.517
22	500	35	1	0.5	-21.8	99.3	21.0	68.5	53.6	16.5	-0.536	3.559
23	500	35	4	1.0	-19.9	99.4	17.0	66.9	53.7	13.1	-0.851	4.965
24	500	35	7	1.5	-20.5	99.4	17.4	67.4	53.7	13.5	-0.865	4.792
25	500	50	1	1.0	-20.0	99.5	16.2	67.0	53.7	12.5	-0.839	5.074
26	500	50	4	1.5	-20.0	99.4	16.2	67.1	53.8	12.4	-0.951	5.550
27	500	50	7	0.5	-29.6	99.2	20.3	68.7	48.5	16.1	-0.430	3.316

Ας σημειωθεί ότι, δεδομένου ότι όλες οι τιμές της λοξότητας είναι αρνητικές, όπως επιβάλλει η γεωμετρία των σφαιρικών σωματιδίων, ο πίνακας ANOVA και οι εξισώσεις

παλινδρόμησης που ακολουθούν αναφέρονται στην απόλυτη τιμή της λοξότητας, για λόγους ευκολίας στον υπολογισμό.

Ο Πίνακας 5.11 και ο Πίνακας 5.12 δείχνουν πόσο συμβάλλουν οι παράμετροι κοσκίνισης στις τιμές κύρτωσης και λοξότητας του στρώματος που παράγεται μέσω κοσκίνισης σκόνης.

Πίνακας 5.11: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την τιμή της κύρτωσης (Sku) του στρώματος που παράγεται από κοσκίνισμα.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	486.145	63.86%	486.145	0.69449	4.80	0.003
f_{vib} (Hz)	1	0.01681	0.22%	0.75909	0.75909	5.24	0.034
A_{vib} (μm)	1	0.07880	1.04%	0.55630	0.55630	3.84	0.065
θ_{tap} (deg.)	1	0.08820	1.16%	0.08820	0.08820	0.61	0.445
h_{bf} (mm)	1	309.673	40.68%	0.49812	0.49812	3.44	0.079
f_{vib} (Hz) * A_{vib} (μm)	1	0.22005	2.89%	0.22005	0.22005	1.52	0.233
f_{vib} (Hz) * h_{bf} (mm)	1	0.79362	10.43%	0.79362	0.79362	5.48	0.030
A_{vib} (μm) * h_{bf} (mm)	1	0.56724	7.45%	0.56724	0.56724	3.92	0.062
Error	19	275.095	36.14%	275.095	0.14479		
Total	26	761.240	100.00%				

Πίνακας 5.12: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την απόλυτη τιμή της λοξότητας ($|Ssk|$) του στρώματος που παράγεται από κοσκίνισμα.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	0.461942	69.81%	0.461942	0.065992	6.28	0.001
f_{vib} (Hz)	1	0.003335	0.50%	0.094560	0.094560	8.99	0.007
A_{vib} (μm)	1	0.002048	0.31%	0.001111	0.001111	0.11	0.749
θ_{tap} (deg.)	1	0.000016	0.00%	0.018258	0.018258	1.74	0.203
h_{bf} (mm)	1	0.321068	48.52%	0.025997	0.025997	2.47	0.132
f_{vib} (Hz) * h_{bf} (mm)	1	0.112133	16.95%	0.094761	0.094761	9.01	0.007
A_{vib} (μm) * θ_{tap} (deg.)	1	0.004302	0.65%	0.004302	0.004302	0.41	0.530
θ_{tap} (deg.) * h_{bf} (mm)	1	0.019040	2.88%	0.019040	0.019040	1.81	0.194
Error	19	0.199767	30.19%	0.199767	0.010514		
Total	26	0.661709	100.00%				

Οι Εξισώσεις (5.6) και (5.7) δείχνουν την παλινδρόμηση της κύρτωσης και της λοξότητας του στρώματος που παράγεται από κοσκίνισμα αντίστοιχα.

$$Sku = 6.2 - 0.00533f_{vib} - 0.0456A_{vib} + 0.0233\theta_{tap} - 1.385h_{bf} + 0.00006f_{vib}A_{vib} + 0.00343f_{vib}h_{bf} + 0.029A_{vib}h_{bf} \quad (5.6)$$

$$|Ssk| = 1.059 - 0.001314f_{vib} - 0.00103A_{vib} - 0.0421\theta_{tap} - 0.267h_{bf} + 0.001224f_{vib}h_{bf} + 0.000435A_{vib}\theta_{tap} + 0.0266\theta_{tap}h_{bf} \quad (5.7)$$

Ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων για τη βελτιστοποίηση τόσο της κύρτωσης όσο και της λοξότητας του στρώματος είναι ο εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{vib} = 500 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 50 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 7^\circ \\ h_{bf} = 1.5 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Ο οποίος, σύμφωνα με τις Εξισώσεις (5.6) και (5.7), δίνει τις βέλτιστες τιμές της λοξότητας και της κύρτωσης ως εξής:

$$Sku_{opt} = 5.588$$

$$Ssk_{opt} = -1.005$$

Μετά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης με τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων, επιτεύχθηκε επικύρωση της αναμενόμενης κύρτωσης και λοξότητας, οι τιμές των οποίων είναι

$$Sku_{opt,sim} = 5.161$$

$$Ssk_{opt,sim} = -0.838$$

Η κύρτωση έχει απόκλιση (-) 7,6% από την αναμενόμενη τιμή, η οποία είναι μικρότερη από το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης, όπως υπολογίζεται από την ANOVA (36,14%). Ομοίως, η λοξότητα έχει απόκλιση (-) 16,6% από την αναμενόμενη τιμή, η οποία είναι μικρότερη από το σφάλμα της εξίσωσης παλινδρόμησης, όπως υπολογίζεται από την ANOVA (30,19%). Ας σημειωθεί ότι, τα σφάλματα των εξισώσεων παλινδρόμησης είναι αρκετά μεγάλα, καθώς υπάρχουν πιθανώς περισσότερες παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα του στρώματος πέραν αυτών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Αναλυτικότερα, το σφάλμα αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε δύο παράγοντες. Πρώτον, τα αριστερά, δεξιά, κάτω και πάνω

συνοριακά σώματα της πλάκας της προσομοίωσης δημιουργούν ένα σχήμα τετραγωνικού δακτυλίου ελαφρώς μειωμένου πάχους στρώματος κοντά στις άκρες του τετράγωνου δείγματος, το οποίο ενδέχεται να επηρεάζει διαφορετικά τη λοξότητα και την κύρτωση για κάθε δοκιμή, δεδομένου ότι το πλάτος αυτού του τετραγωνικού δακτυλίου εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία τα σωματίδια πέφτουν μετά την ολίσθηση από τα ανοίγματα του κόσκινου. Δεύτερον, τα δεδομένα για την αξιολόγηση του δείγματος στρώματος λαμβάνονται τη στιγμή της προσομοίωσης κατά την οποία επιτυγχάνεται ο στόχος μάζας 0,205 mg. Ωστόσο, ορισμένα σωματίδια αναπηδούν έξω από το πλαίσιο υπολογισμού αυτή τη στιγμή, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει μικρή μεταβολή των Ssk και Sku, με βάση την ταχύτητα αυτών των σωματιδίων. Τέλος, για την τελευταία δοκιμή (#27), ο στόχος μάζας δεν μπορούσε να επιτευχθεί φυσικά, προκαλώντας μια ακραία τιμή που επηρεάζει το σφάλμα των παλινδρομήσεων. Ωστόσο, οι υπολογισμένες από την παλινδρόμηση τιμές των Sku και Ssk αποδείχθηκαν αρκετά κοντά στις υπολογισμένες από την προσομοίωση τιμές τους.

Παρά την ακρίβεια της εκτίμησης, ελέγχοντας τον Πίνακα 5.10, γίνεται φανερό ότι η δοκιμή #26 έχει καλύτερες τιμές τόσο για τη λοξότητα όσο και για την κύρτωση σε σύγκριση με τις βέλτιστες τιμές που υπολογίστηκαν με παλινδρόμηση. Πιο συγκεκριμένα, έχει

$$Sku_{\#26,sim} = 5.550$$

$$Ssk_{\#26,sim} = -0.951$$

Με έναν γρήγορο έλεγχο στις εξισώσεις παλινδρόμησης, αποδεικνύεται ότι ο συνδυασμός επιπέδων παραμέτρων

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{vib} = 500 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 50 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 4^\circ \\ h_{bf} = 1.5 \text{ mm} \end{array} \right.$$

που αντιστοιχεί στη δοκιμή #26 είναι ο δεύτερος καλύτερος συνδυασμός παραμέτρων σύμφωνα με τις εξισώσεις παλινδρόμησης, με

$$Sku_{\#26,reg} = 5.518$$

$$Ssk_{\#26,reg} = -0.946$$

Οι τιμές κύρτωσης και λοξότητας της προσομοίωσης της δοκιμής #26 έχουν μόνο (+) 0,6% και (+) 0,5% απόκλιση από τις τιμές που υπολογίστηκαν με παλινδρόμηση. Οι βέλτιστες τιμές που υπολογίστηκαν με παλινδρόμηση διαφέρουν λόγω του υψηλού σφάλματος παλινδρόμησης. Ως εκ τούτου, ο αποδεκτός συνδυασμός επιπέδων που

παράγει το καλύτερο στρώμα μέσω κοσκίνισματος θα είναι ο συνδυασμός παραμέτρων της δοκιμής #26.

Στον Πίνακα 5.13, παρουσιάζεται μια σύγκριση της εναπόθεσης σκόνης μέσω της διασποράς με επιστρωτήρα λεπίδας και του ελεγχόμενου κοσκίνισματος. Από αυτήν, μπορεί να συναχθεί ότι, παρά το γεγονός ότι η εναπόθεση σκόνης με τη βοήθεια κοσκίνισης οδηγεί σε ποιότητα στρώματος κατώτερη από εκείνη που επιτυγχάνεται μέσω ενός επιστρωτήρα με δονούμενη λεπίδα, η ποιότητα του στρώματος ωστόσο είναι ανώτερη από εκείνη που επιτυγχάνεται μέσω ενός επιστρωτήρα με μη δονούμενη λεπίδα. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα σημαντική παρατήρηση, δεδομένου ότι τα περισσότερα βιομηχανικά συστήματα εναπόθεσης σκόνης που έχουν σχεδιαστεί για ΣΚΠ δεν χρησιμοποιούν δονητική λεπίδα, αλλά μια απλή που κινείται μόνο γραμμικά πάνω στο υπόστρωμα, παράλληλα με το έμβολο κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή, θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί απλώς ένα δονούμενο κόσκινο, αφού με τον κατάλληλο έλεγχο της συχνότητας δόνησης, του πλάτους και του επιπέδου σκόνης στο εσωτερικό του, θα επιτυγχανόταν καλύτερη ποιότητα επιφάνειας, σε πολύ μικρότερο χρόνο εναπόθεσης. Η οπτική αναπαράσταση των στρωμάτων που περιγράφονται στον Πίνακα 5.13 φαίνεται στο Σχήμα 5.18.

Πίνακας 5.13: Σύγκριση της εναπόθεσης του στρώματος μέσω λεπίδας με το στρώμα που παράγεται από κοσκίνισμα.

	u_{tr} (m/sec)	f_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{rel} (deg)	LTD_{reg} (LTD_{sim})	SCR_{reg} (SCR_{sim})	$S_{q_{reg}}$ ($S_{q_{sim}}$)	Ssk_{reg} (Ssk_{sim})	Sku_{reg} (Sku_{sim})
DOCTOR BLADE - NO-VIB.	0.01	0	0	0	- (28.9)	- (98.56)	- (20.9)	- (-0.716)	- (3.962)
VIB. DOCTOR BLADE - OPTIMUM	0.01	2000	5	0	21.4 (22.1)	99.54 (99.33)	15.8 (15.7)	-1.771 (-1.543)	6.766 (6.530)
	f_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{tap} (deg)	h_{bf} (mm)	LTD_{sim}	SCR_{sim}	$S_{q_{sim}}$	Ssk_{reg} (Ssk_{sim})	Sku_{reg} (Sku_{sim})
SIEVING - OPTIMUM SKU-SSK	500	50	4	1.5	20.0	99.47	16.2	-0.946 (-0.951)	5.518 (5.550)

(Σημείωση: ‘reg’: “regression”, ‘sim’: “simulation”. Η δοκιμή μηδενικής δόνησης δεν διαθέτει τιμές παλινδρόμησης, καθώς δεν συμπεριλήφθηκε στο σχεδιασμό Taguchi.)

Γενικά, η ποιότητα των στρώματων που εναποτίθενται μέσω κοσκίνισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εναπόθεση της απαραίτητης μάζας σκόνης κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας, δηλαδή πριν τα μικρά σωματίδια εξαντληθούν σε μεγάλο βαθμό και η ροή μάζας γίνει πολύ μικρότερη. Γενικά, σε όλες τις δοκιμές που έχουν ύψος κυβοειδούς εργοστασίου σκόνης 0,5 mm η μάζα σκόνης που εναποτίθεται κατά τη γραμμικότητα είναι μικρότερη από τα απαραίτητα 0,205 mg (βλ. Πίνακα 5.2). Αυτό σημαίνει ότι, προκειμένου να εναποτεθεί η απαραίτητη ποσότητα σκόνης, θα πρέπει να συνεχιστεί η κοσκίνιση κατά τη διάρκεια του σταδίου μη γραμμικής κοσκίνισης. Αυτό θα οδηγούσε στον πασπαλισμό της κορυφής του στρώματος με σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες κορυφές. Αυτό θα μείωνε ενδεχομένως το LTD, αφού πολλά σωματίδια θα υπερέβαιναν το επιθυμητό ύψος που ορίζεται από το θεωρητικό πάχος στρώματος, αλλά η επιφανειακή τραχύτητα θα αυξανόταν. Επιπλέον, η τιμή της κύρτωσης θα μειωνόταν, καθώς θα μειωνόταν και η οξύτητα της επιφάνειας. Οι κοιλάδες θα γίνονταν ευρύτερες και τα οροπέδια όχι τόσο εκτεταμένα, αμβλύνοντας το λεπτοκυρτικό στοιχείο της επιφάνειας. Η λοξότητα θα αυξανόταν (σε αρνητικές τιμές), αφού η επιφάνεια δεν θα απέκλινε πλέον τόσο πολύ προς την επάνω πλευρά.

Στον Πίνακα 5.14 γίνεται σύγκριση μεταξύ της ποιότητας του κοσκινισμένου στρώματος για τις διάφορες περιπτώσεις συνδυασμού παραγόντων ελέγχου, όπως εξετάζονται μέσω των Ssk, Sku και της σχέσης μεταξύ της διάρκειας γραμμικότητας και του χρόνου που απαιτείται για την απόθεση της απαραίτητης μάζας σκόνης (0,205 mg) με τη ροή μάζας γραμμικότητας κάθε δοκιμής.

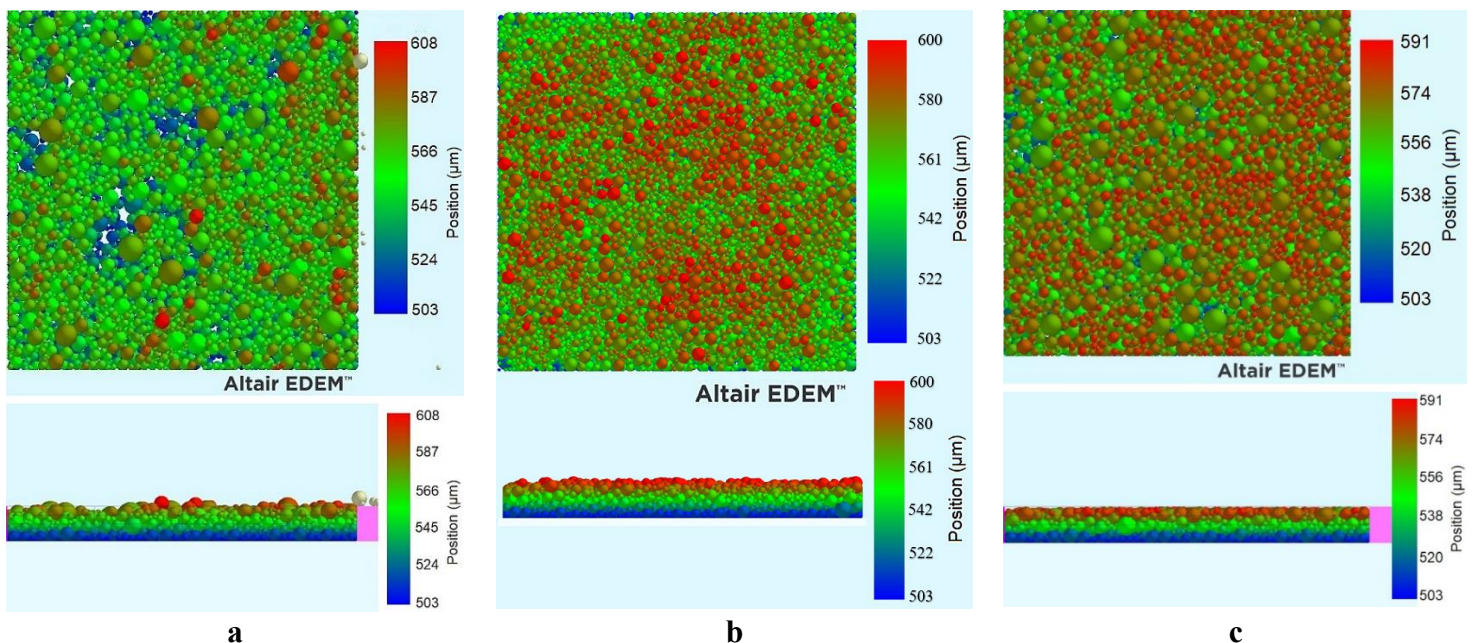
Κρίνοντας από τον Πίνακα 5.14, γίνεται φανερό πώς, για να επιτευχθεί η καλύτερη ποιότητα του στρώματος κοσκινισμένης σκόνης, είναι επιτακτική ανάγκη να διασφαλιστεί ότι η διάρκεια του γραμμικού σταδίου κοσκίνισματος, σε συνδυασμό με τη ροή μάζας κατά τη γραμμικότητα, είναι ικανή να παρέχει την απαραίτητη μάζα σκόνης πριν από το τέλος του γραμμικού σταδίου. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι εναποτίθεται στρώμα καλής ποιότητας μέσω κοσκίνισης, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει παραμέτρους κοσκίνισης που εξασφαλίζουν μια κοσκινισμένη μάζα κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας μεγαλύτερη από τη μάζα του ιδανικού στρώματος που απλώνεται μέσω μιας δονούμενης λεπίδας.

Στα προηγούμενα κεφάλαια, ο συγγραφέας υπέθεσε ότι η πιο αργή κοσκίνιση μπορεί να είναι επωφελής για την ανάπτυξη καλής ποιότητας, έτοιμων για ΣΚΠ στρώσεων σκόνης χωρίς την ανάγκη επιπεδοποίησης μέσω μηχανισμού επανεπίστρωσης. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώθηκε, καθώς, οι συνδυασμοί παραμέτρων κοσκίνισης που προωθούν μεγαλύτερη διάρκεια γραμμικότητας συνδέονται γενικά με καλύτερη ποιότητα εναποτιθέμενου στρώματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: Σημασία της γραμμικότητας της κοσκίνισης για την ποιότητα του παραγόμενου στρώματος- κόκκινο: χειρότερες επιδόσεις, πράσινο: καλύτερες επιδόσεις.

<i>TRIAL</i> #	F_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{tap} (deg.)	h_{bf} (mm)	Q (mg/sec)	m (mg)	t_{lin} (sec)	$t_{0.205}$	$t_{lin}-t_{0.205}$	$m-m_{des}$	Ssk	Sk _u	Ssk _{DB- No-vib}	Sk _{u- DB- No-vib}
1	200	20	1	0.5	1.141	0.183	0.171	0.180	-0.009	-0.022	-0.788	4.269	-0.072	0.307
2	200	20	4	1	0.888	0.238	0.271	0.231	0.040	0.033	-0.786	4.583	-0.070	0.621
3	200	20	7	1.5	0.9	0.218	0.243	0.228	0.015	0.013	-0.794	4.571	-0.078	0.609
4	200	35	1	1	0.844	0.429	0.523	0.243	0.280	0.224	-0.745	4.312	-0.029	0.350
5	200	35	4	1.5	0.737	0.659	0.923	0.278	0.645	0.454	-0.747	4.338	-0.031	0.376
6	200	35	7	0.5	1.082	0.152	0.145	0.189	-0.044	-0.053	-0.732	4.293	-0.016	0.331
7	200	50	1	1.5	0.576	0.296	0.501	0.356	0.145	0.091	-0.682	4.372	0.034	0.410
8	200	50	4	0.5	0.75	0.11	0.147	0.273	-0.126	-0.095	-0.650	3.948	0.066	-0.014
9	200	50	7	1	0.673	0.341	0.523	0.305	0.218	0.136	-0.800	4.719	-0.084	0.757
10	350	20	1	1	0.771	0.427	0.578	0.266	0.312	0.222	-0.834	4.476	-0.118	0.514
11	350	20	4	1.5	0.584	0.664	1.183	0.351	0.832	0.459	-0.770	4.499	-0.054	0.537
12	350	20	7	0.5	1.075	0.146	0.14	0.191	-0.051	-0.059	-0.400	3.884	0.316	-0.078
13	350	35	1	1.5	0.404	0.566	1.388	0.507	0.881	0.361	-0.832	4.666	-0.116	0.704
14	350	35	4	0.5	0.594	0.102	0.176	0.345	-0.169	-0.103	-0.455	3.701	0.261	-0.261
15	350	35	7	1	0.536	0.334	0.64	0.382	0.258	0.129	-0.809	4.924	-0.093	0.962
16	350	50	1	0.5	0.372	0.083	0.233	0.551	-0.318	-0.122	-0.482	3.385	0.234	-0.577
17	350	50	4	1	0.334	0.269	0.811	0.614	0.197	0.064	-0.864	5.165	-0.148	1.203
18	350	50	7	1.5	0.307	0.462	1.525	0.668	0.857	0.257	-0.873	4.643	-0.157	0.681
19	500	20	1	1.5	0.408	0.648	1.622	0.502	1.120	0.443	-0.784	4.286	-0.068	0.324
20	500	20	4	0.5	0.983	0.111	0.115	0.209	-0.094	-0.094	-0.421	3.896	0.295	-0.066
21	500	20	7	1	0.696	0.359	0.535	0.295	0.240	0.154	-0.802	4.517	-0.086	0.555
22	500	35	1	0.5	0.496	0.076	0.159	0.413	-0.254	-0.129	-0.536	3.559	0.180	-0.403
23	500	35	4	1	0.421	0.282	0.681	0.487	0.194	0.077	-0.851	4.965	-0.135	1.003
24	500	35	7	1.5	0.338	0.522	1.523	0.607	0.916	0.317	-0.865	4.792	-0.149	0.830
25	500	50	1	1	0.278	0.265	0.969	0.737	0.232	0.06	-0.839	5.074	-0.123	1.112
26	500	50	4	1.5	0.239	0.452	2.025	0.858	1.167	0.247	-0.951	5.550	-0.235	1.588
27	500	50	7	0.5	0.347	0.065	0.205	0.591	-0.386	-0.14	-0.430	3.316	0.286	-0.646

Οι δύο τελευταίες στήλες του Πίνακα 5.14 συγκρίνουν την ποιότητα του εξεταζόμενου στρώματος με την ποιότητα που επιτυγχάνεται με τη διασπορά σκόνης με μη δονούμενη λεπίδα (βλέπε Πίνακα 5.13). Σε 7 από τις 9 δοκιμές με ύψος κυβοειδούς εργοστασίου πούδρας 0,5 mm, το αποτέλεσμα τόσο με την αξιολόγηση Ssk όσο και με την αξιολόγηση Sku είναι χειρότερο από αυτό που επιτυγχάνεται με μη δονούμενη λεπίδα. Οι μόνες δοκιμές με $h_{bf}=0,5$ mm που παρείχαν αποδεκτή ποιότητα στρώματος ήταν οι δοκιμές #1 και #6, στις οποίες το χαμηλό επίπεδο σκόνης συνδυάστηκε με χαμηλό επίπεδο συχνότητας δόνησης, συνδυασμός που παρέχει την υψηλότερη μάζα σκόνης κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας για αυτό το επίπεδο h_{bf} . Ωστόσο, η απαραίτητη μάζα εξακολουθούσε να μην επιτυγχάνεται, έστω και κατά ένα μικρό ποσοστό, οπότε ούτε αυτός ο συνδυασμός ρυθμίσεων θα ήταν αποδεκτός. Συμπερασματικά, προκειμένου να παραχθούν στρώματα συγκρίσιμα με εκείνα μέσω μη δονούμενων λεπίδων, είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται το κόσκινο με αρκετή σκόνη, αλλά να διασφαλίζεται η ταλάντωσή του σε κατάλληλο επίπεδο, ώστε να διευκολύνεται η κίνηση των σωματιδίων και να αποφεύγεται το φράξιμο. Επιπλέον, η χρονική ρύθμιση της δόνησης και το μπλοκάρισμα-απομπλοκάρισμα του κάτω μέρους του κόσκινου μέσω μιας πλάκας στο σωστό χρόνο είναι υψίστης σημασίας για την επίτευξη του επιθυμητού ύψους στρώματος.



Σχήμα 5.18: Οπτική σύγκριση των βέλτιστων στρωμάτων που αναπτύσσονται με: **(a)** λεπίδα χωρίς δόνηση; **(b)** ελεγχόμενη κοσκίνιση; **(c)** δονούμενη λεπίδα.

Για να εξασφαλιστεί ότι παρέχεται η ελάχιστη αναγκαία ποσότητα σκόνης, μπορεί να υπολογιστεί η συνολική μάζα των σωματιδίων που μπορούν φυσικά να περάσουν από

τους αγωγούς του κόσκινου, μέσω της κοκκομετρικής κατανομής της σκόνης και της συνολικής μάζας σκόνης που τροφοδοτείται στο κόσκινο.

Για να εκτιμηθεί η ποιότητα του στρώματος, υπολογίζεται η μέση βαθμολογία της τιμής Ssk και της τιμής Sku, με την υψηλότερη βαθμολογία (100%) να αποδίδεται στο καλύτερο στρώμα και τη χαμηλότερη (0%) στο χειρότερο στρώμα. Τα αποτελέσματα, μαζί με τις τιμές κάθε κριτηρίου ποιότητας που περιγράφεται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.15. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται κατά αύξουσα σειρά της μέσης βαθμολογίας αυτών που υπολογίστηκαν για τα Ssk και Sku.

Ο Πίνακας 5.15 συμβάλλει στην εξαγωγή των ακόλουθων συμπερασμάτων:

1. Οι δοκιμές με μεγαλύτερες τιμές ($t_{in}-t_{0,205}$) και ($m-m_{des}$) είναι ανώτερες από άποψη ποιότητας. Ως εκ τούτου, οι δοκιμές με $h_{bf}=0,5$ mm είναι οι λιγότερο υποσχόμενες, εκτός εάν διαθέτουν χαμηλά επίπεδα διέγερσης κόσκινου ($f_{vib}=200$ Hz και $A_{vib}=20$ ή 35 μm), βλέπε δοκιμές #6 και #1). Αντίστροφα, οι δοκιμές με $h_{bf}=1,5$ ή 1 mm και χαμηλά επίπεδα διέγερσης κόσκινου ($f_{vib}=200$ Hz και $A_{vib}=20$ ή 35 μm) δημιουργούν στρώματα μέτριας ποιότητας, σε σύγκριση με αυτά της ίδιας αρχικής ποσότητας σκόνης ($h_{bf}=1,5$ ή 1 mm) σε συνδυασμό με υψηλά επίπεδα διέγερσης κόσκινου ($f_{vib}=500$ ή 350 Hz και $A_{vib}=50$ ή 35 μm).
2. Σε συνέχεια του 1, τα βέλτιστα στρώματα είναι εκείνα που αναπτύσσονται από το συνδυασμό κοσκίνισης που προάγει την υψηλότερη μάζα κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας σε συνδυασμό με τη χαμηλότερη ροή μάζας, πράγμα που σημαίνει ότι όσο πιο αργός είναι ο ρυθμός κοσκίνισης, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του στρώματος που αποτίθεται από κοσκίνισμα.
3. Το SCR παραμένει πρακτικά αμετάβλητο για κάθε δοκιμή ($99,3\pm 0,1$ % για το δείγμα των 27 δοκιμών), υποδεικνύοντας ότι ο λόγος κάλυψης αποτελεί εγγενή ιδιότητα της μεθόδου κοσκίνισης όσον αφορά την απόθεση κοσκίνισης.
4. Η πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη για κάθε δοκιμή ($67,6\pm 0,5$ % για το δείγμα των 27 δοκιμών), όπως αναμενόταν. Ωστόσο, μικρές μεταβολές δείχνουν την αντίθετη τάση από την αναμενόμενη, δηλαδή υψηλότερη πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης για τα στρώματα χαμηλότερης ποιότητας. Αυτό μπορεί και πάλι να εξηγηθεί από την παρουσία υπερμεγέθων σωματιδίων στην κορυφή του στρώματος. Τα υπερμεγέθη

σωματίδια καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο, οδηγώντας σε ελαφρά αύξηση της πραγματικής πυκνότητας συσσώρευσης, όπως αυτή ορίστηκε στην ενότητα 4.5.4.

Πίνακας 5.15: Ποιότητα στρώματος για κάθε δοκιμή με αύξουσα σειρά. Προσθήκη χρωματικού κώδικα για κάθε κριτήριο ποιότητας.

<i>TRIAL</i> #	F_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{tap} (deg.)	h_{bf} (mm)	t_{in-} $t_{0.205}$ (sec)	$m-$ m_{des} (mg)	LTD (μm)	SCR (%)	S_q (μm)	PD_{tr} (%)	Ssk- Ssk _{DB-} No-vib	Sku- Sku _{DB-} No-vib	Rating (%)
27	500	50	7	0.5	-0.386	-0.14	-29.6	99.2	20.3	68.7	0.286	-0.646	2.7
16	350	50	1	0.5	-0.318	-0.122	-22	99.3	21.4	68.4	0.234	-0.577	9.0
12	350	20	7	0.5	-0.051	-0.059	-19.8	99.4	19.9	67.9	0.316	-0.078	12.7
14	350	35	4	0.5	-0.169	-0.103	-20.5	99.3	20.5	68.3	0.261	-0.261	13.6
20	500	20	4	0.5	-0.094	-0.094	-19.8	99.3	20.1	67.9	0.295	-0.066	14.9
22	500	35	1	0.5	-0.254	-0.129	-21.8	99.3	21	68.5	0.18	-0.403	17.8
8	200	50	4	0.5	-0.126	-0.095	-21.4	99.3	19.2	68.1	0.066	-0.014	36.8
7	200	50	1	1.5	0.145	0.091	-20.6	99.4	18.1	67.5	0.034	0.41	49.2
6	200	35	7	0.5	-0.044	-0.053	-21.3	99.3	18.5	68.1	-0.016	0.331	52.0
4	200	35	1	1	0.28	0.224	-20.4	99.3	18.5	67.3	-0.029	0.35	53.6
5	200	35	4	1.5	0.645	0.454	-20.7	99.3	18.7	67.4	-0.031	0.376	54.4
1	200	20	1	0.5	-0.009	-0.022	-21	99.3	19	67.8	-0.072	0.307	56.5
19	500	20	1	1.5	1.12	0.443	-20.7	99.3	19	67.8	-0.068	0.324	56.6
11	350	20	4	1.5	0.832	0.459	-19.9	99.4	18.1	67.4	-0.054	0.537	60.1
21	500	20	7	1	0.24	0.154	-20.3	99.3	18.1	67.6	-0.086	0.555	63.4
2	200	20	4	1	0.04	0.033	-20.2	99.3	18.2	67.5	-0.07	0.621	63.4
3	200	20	7	1.5	0.015	0.013	-20.5	99.3	18.1	67.4	-0.078	0.609	63.8
10	350	20	1	1	0.312	0.222	-20.4	99.4	18.4	67.6	-0.118	0.514	65.3
9	200	50	7	1	0.218	0.136	-20.3	99.4	17.4	67.4	-0.084	0.757	67.7
13	350	35	1	1.5	0.881	0.361	-20.2	99.3	17.9	67.4	-0.116	0.704	69.4
18	350	50	7	1.5	0.857	0.257	-20.5	99.3	18	67.4	-0.157	0.681	72.6
15	350	35	7	1	0.258	0.129	-20.6	99.4	17	67.5	-0.093	0.962	73.1
24	500	35	7	1.5	0.916	0.317	-20.5	99.4	17.4	67.4	-0.149	0.83	75.2
23	500	35	4	1	0.194	0.077	-19.9	99.4	17	66.9	-0.135	1.003	77.8
25	500	50	1	1	0.232	0.06	-20	99.5	16.2	67	-0.123	1.112	79.2
17	350	50	4	1	0.197	0.064	-19.9	99.4	16.4	67	-0.148	1.203	83.5
26	500	50	4	1.5	1.167	0.247	-20	99.4	16.2	67.1	-0.235	1.588	100.0
AVERAGE					-	-	-20.8	99.3	18.5	67.6	-0.007	0.434	-
STANDARD DEVIATION					-	-	1.8	0.1	1.4	0.5	-	-	-
STANDARD DEVIATION (%)					-	-	8.8	0.1	7.6	0.7	-	-	-

5. Σε ορισμένες δοκιμές (#12 και #20), η τιμή LTD φαίνεται να υποδεικνύει υψηλότερη ποιότητα στρώματος, παρόλο που τα άλλα κριτήρια δείχνουν το αντίθετο. Αυτό οφείλεται, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, στο γεγονός ότι το μέσο ύψος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ακραίες τιμές. Και στις δύο αυτές δοκιμές, προκειμένου να κοσκινιστεί η επιθυμητή μάζα σκόνης (0,205 mg), το κοσκίνισμα έπρεπε να συνεχιστεί μετά το πέρας του γραμμικού

σταδίου. Αυτό προκάλεσε τη συσσώρευση υπερμεγέθων σωματιδίων στην κορυφή του στρώματος, δημιουργώντας υψηλές κορυφές που μειώνουν την τιμή |LTD|, αλλά ταυτόχρονα υποβαθμίζουν την ποιότητα του στρώματος, όπως απεικονίζεται από το S_q .

6. Τα S_{ku} και S_{sk} αποδεικνύονται και πάλι ακριβείς δείκτες ποιότητας στρώματος, ικανοί να εντοπίσουν αν μια αύξηση του LTD (μείωση του |LTD|), όπως στις δοκιμές #12 και #20, υποδεικνύει πραγματική ή ψευδή αύξηση της ποιότητας του στρώματος.

5.7 Διάρκεια Εναπόθεσης μέσω Κοσκίνισης

Ο χρόνος που απαιτείται για το κοσκίνισμα θα είναι ίσος με 0,858 δευτερόλεπτα, δεδομένου ότι

$$t_{siev} = \frac{m_{opt}}{Q_{\#26}} = \frac{0.205 \text{ mg}}{0.239 \text{ mg/sec}} = 0.858 \text{ sec} < t_{lin,\#26} = 2.025 \text{ sec}$$

Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εναπόθεσης ενός στρώματος θα περιλαμβάνει το χρόνο κοσκίνισης και το χρόνο επαναφόρτωσης του κοσκίνου και επιπεδοποίησης της σκόνης εντός του μπλοκαρισμένου κόσκινου με δόνηση. Το κόσκινο θα επαναφορτιζόταν από ένα κατακόρυφο σιλό πάνω από αυτό, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.4.1 [59], [137]. Ένας κυλιόμενος κύλινδρος δοσομέτρησης θα εξασφάλιζε την ακριβή τροφοδοσία της απαραίτητης ποσότητας σκόνης στο κόσκινο, ενώ το κόσκινο θα μπλοκαριζόταν από μια πλάκα που θα βρισκόταν ακριβώς από κάτω του, σε επαφή με αυτό για να σφραγίσει τα ανοίγματα. Ο κυλινδρικός δοσομετρητής που περιγράφεται στις προαναφερθείσες πηγές διαθέτει μια ελικοειδή σειρά τυφλών, ημισφαιρικών οπών, οι οποίες παγιδεύουν τη σκόνη και την τροφοδοτούν στο κόσκινο. Κάθε ημισφαιρικό άνοιγμα έχει διάμετρο 9 mm. Ο κύλινδρος διαθέτει 19 ανοίγματα. Η χωρητικότητα κάθε ανοίγματος υπολογίζεται ως εξής

$$V_{ap} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) = 191 \text{ mm}^3$$

Δεδομένου ότι η πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης της σκόνης είναι περίπου ίση με 67,5%, ο όγκος της καθαρής σκόνης κάθε ανοίγματος δίνεται από τη σχέση

$$V_{powder,ap} = 0.675 \cdot V_{ap} = 129 \text{ mm}^3$$

Και, δεδομένου ότι η πυκνότητα της α -αλουμίνας είναι ίση με $3820 \text{ Kg/m}^3 = 3,82 \text{ mg/mm}^3$, η μάζα της σκόνης μέσα σε ένα μόνο άνοιγμα δίνεται από τη σχέση

$$m_{powder,ap} = \rho_{\alpha-Al_2O_3} \cdot V_{powder,ap} = 492 \text{ mg}$$

Η απαιτούμενη μάζα ανά mm^2 εναποτιθέμενου στρώματος είναι $0,205 \text{ mg}$. Το ενεργό μήκος του κυλίνδρου δοσομέτρησης (δηλαδή η απόσταση που περικλείει όλα τα ανοίγματα διανομής) είναι 200 mm . Για μία επιφάνεια δείγματος $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ (40000 mm^2), το εναποτιθέμενο στρώμα θα αποτελείται από 8200 mg . Ωστόσο, για να συμβεί αυτό, η στάθμη της σκόνης μέσα στο κόσκινο θα πρέπει να αντιστοιχεί σε ύψος κυβοειδούς εργοστασίου σκόνης $1,5 \text{ mm}$. Εάν επιτραπεί στη σκόνη να ηρεμήσει μετά τη δημιουργία της, αυτό θα οδηγούσε σε ένα ύψος κατακάθισης της σκόνης ίσο με $410 \mu\text{m} = 0,41 \text{ mm}$ (βλέπε Πίνακα 6.2). Για επίπεδο σκόνης $0,41 \text{ mm}$ με οριζόντιες διαστάσεις $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ και πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης $67,5\%$, ο πραγματικός όγκος σκόνης είναι ίσος με

$$V_{pow,total} = 0.675 \cdot (200 \cdot 200 \cdot 0.41) \text{ mm}^3 = 11070 \text{ mm}^3$$

Ο οποίος αντιστοιχεί σε συνολική μάζα σκόνης

$$m_{pow,total} = \rho_{\alpha-Al_2O_3} \cdot V_{pow,total} = 42287 \text{ mg}$$

Αυτή η μάζα σκόνης αντιστοιχεί σε ορισμένο αριθμό ανοιγμάτων κυλίνδρου δοσομέτρησης, ίσο με

$$N_{DR,ap} = \frac{m_{pow,total}}{m_{powder,ap}} \cong 85,931$$

Το οποίο αντιστοιχεί σε $(85,931/19) \cong 4,523$ στροφές.

Ως εκ τούτου, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι, προκειμένου να διανεμηθεί η απαραίτητη ποσότητα σκόνης, ο σχεδιασμένος κυλινδρικός διανομέας θα πρέπει να εκτελέσει $4,523$ περιστροφές, οι οποίες, σε ταχύτητα 60 RPM (στροφών ανά λεπτό), θα απαιτούσαν μόνο $4,523$ δευτερόλεπτα. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν να συμπεριληφθούν περισσότερες έλικες στον ίδιο κύλινδρο. Ο κύλινδρος έχει διάμετρο 39 mm , που σημαίνει ότι η περιφέρεια του είναι ίση με $2\pi R \cong 122,5 \text{ mm}$, η οποία μπορεί να φιλοξενήσει το πολύ 13 έλικες, αφού (περιφέρεια κυλίνδρου)/(διάμετρος ανοίγματος) = $(122,5/9) = 13,61$. Με την προσθήκη τριών ακόμη ελίκων, ο απαραίτητος χρόνος θα

μειωθεί σε $(4,523/4) \cong 1,13$ sec, που είναι αποδεκτός χρόνος, αφού θα μπορούσε εύκολα να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια της επιλεκτικής στερεοποίησης (πυροσυσσωμάτωσης/ τήξης) με λέιζερ του προηγούμενου στρώματος.

Η επιφανειακή ισοπέδωση της σκόνης μέσα στο κόσκινο, ενώ το κόσκινο είναι φραγμένο, είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση ομοιογενούς επιπέδου σκόνης στο κόσκινο και για την εξασφάλιση ομοιογενούς κοσκίνισης σε όλη την επιφάνεια του κόσκινου. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με την εφαρμογή δόνησης στο κόσκινο κατά τη διάρκεια της διανομής της σκόνης, οπότε αυτό δεν θα αύξανε καθόλου τον συνολικό χρόνο που απαιτείται για την εναπόθεση ενός στρώματος.

Επιπλέον, η φόρτωση του κόσκινου θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ενώ η δέσμη λέιζερ εκτελεί την τήξη/συσσωμάτωση του προηγούμενου στρώματος, η οποία διαρκεί μόνο για περίπου 2 δευτερόλεπτα, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του τεμαχίου, καθώς και με τις ρυθμίσεις της μηχανής, όπως η ταχύτητα σάρωσης και η απόσταση μεταξύ των καταπακτών. Αυτό σημαίνει ότι η μόνη στιγμή κατά την οποία η φόρτωση θα λειτουργούσε ως καθυστέρηση στη διαδικασία θα ήταν η εναπόθεση του πρώτου στρώματος, εφόσον ο χρήστης διασφαλίζει ότι η φόρτωση εκτελείται ταχύτερα σε σύγκριση με το χρόνο σάρωσης του στρώματος με λέιζερ.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 5.16 παρακάτω.

Πίνακας 5.16: Δεδομένα κοσκίνισματος δοκιμής #26.

<i>TRIAL</i> #	F_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{tap} (deg.)	h_{bf} (mm)	Q (mg/sec)	m (mg)	LESR	t_{lin} (sec)
26	500	50	4	1.5	0.239	0.452	0.788	2.025

6 *Εναπόθεση Στρωμάτων Πούδρας Πολλαπλών Υλικών*

Ως εναπόθεση πολλαπλών υλικών ορίζεται η εναπόθεση ενός στρώματος σκόνης, όπου ο τύπος της σκόνης που εφαρμόζεται από το σύστημα επανεπίστρωσης μπορεί να διαφέρει, με βάση τις συντεταγμένες της θέσης της κλίνης σκόνης στην οποία εφαρμόζεται η σκόνη. Εναλλακτικά, με απλή διατύπωση, στην εναπόθεση πολλαπλών υλικών, θα πρέπει να μπορεί να δημιουργηθεί ένα στρώμα με μωσαϊκό μοτίβο από διάφορα διαφορετικά είδη σκονών. Η εναπόθεση στρώματος πούδρας πολλαπλών υλικών παραμένει ένα γενικά άλυτο ζήτημα στον τομέα των διεργασιών προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing-AM) με βάση τη σκόνη (Powder Based-PB) και η σημαντικότερη πρόκληση της κατασκευής PBF-LB (Powder Bed Fusion-Laser Based) πολλαπλών υλικών.

Η ΠΚ πολλαπλών υλικών περιορίζεται κυρίως σε στρώματα εναλλασσόμενων υλικών, είτε πρόκειται για εντελώς διαφορετικά υλικά είτε για μείγμα σκονών δύο συγκεκριμένων υλικών σε διαφορετικά ποσοστά, προκειμένου να δημιουργηθούν λειτουργικά διαβαθμισμένα εξαρτήματα. Ωστόσο, αρκετά συχνά οι μηχανικοί αντιμετωπίζουν την ανάγκη να δημιουργήσουν εξαρτήματα κατασκευασμένα από περισσότερα από ένα διαφορετικά υλικά σε συνδυασμό, όπου είναι αδύνατο να δημιουργηθούν τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών υλικών με απλή εναλλαγή του υλικού μεταξύ των στρώσεων. Έτσι, η ανάγκη παραγωγής ακριβών, συνεπών στρωμάτων σκόνης πολλαπλών υλικών είναι υψίστης σημασίας.

Στη βιβλιογραφία έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες σύντηξης στρωμάτων κλίνης πούδρας πολλαπλών υλικών. Ένα εμπορικό σύστημα εναπόθεσης σκόνης διπλού υλικού έχει παραχθεί από την AerosintTM [228]. Το σύστημα αυτό βασίζεται στην εναπόθεση σε μοτίβο γραμμή προς γραμμή μέσω ενός συστήματος διπλού κυλίνδρου που, σε συνδυασμό με ηλεκτρονικά, ελέγχει τη ροή της σκόνης [229]. Πιο συγκεκριμένα, τα τύμπανα δοσομέτρησης εναποθέτουν λεπτά ογκομετρικά εικονοστοιχεία (voxels) σκόνης χωρίς επαφή με το στρώμα, με τρόπο γραμμής-προς-γραμμή [228]. Παρόλο που το προτεινόμενο σύστημα είναι συγκριτικά γρήγορο σε

σχέση με τους απλούς επιστρωτήρες μονοϋλικής σκόνης τύπου κυλίνδρου/λεπίδας, είναι ασαφές κατά πόσον είναι δυνατή η δημιουργία ενός ουσιαστικά και σταθερά ομοιόμορφου στρώματος σκόνης όσον αφορά την τραχύτητα της επιφάνειας του στρώματος και την πυκνότητα συσσώρευσης σκόνης. Επίσης, προκειμένου να προστεθεί ένα νέο υλικό, είναι απαραίτητο να προστεθεί άλλος ένας κύλινδρος, περιπλέκοντας περαιτέρω τον σχεδιασμό. Επιπλέον, δεν έχει εξεταστεί και καθοριστεί η ακρίβεια των ορίων μεταξύ των υποπεριοχών του ενιαίου υλικού. Τέλος, οι λεπτομέρειες του συστήματος δεν έχουν διατεθεί στην επιστημονική κοινότητα, καθώς πρόκειται για πρωτότυπο και η εταιρεία διατηρεί όλα τα πνευματικά δικαιώματα του πατενταρισμένου σχεδίου.

Μια άλλη προσπάθεια έγινε από τη Fraunhofer IGCV [230]. Η μέθοδός τους βασίζεται στην εναπόθεση στρωμάτων διαφορετικών τύπων σκόνης διαδοχικά. Αρχικά, εναποτίθεται ένα πλήρες στρώμα του πρώτου τύπου σκόνης (τύπος Α) (στρώμα Ν) και επιτυγχάνεται επιλεκτική παγίωση της πρώτης σκόνης. Στη συνέχεια, με ελεγχόμενη άντληση κενού απομακρύνεται η μη παγιωμένη σκόνη του πρώτου τύπου. Στη συνέχεια, εναποτίθεται ένα στρώμα του δεύτερου τύπου σκόνης (τύπος Β) και ενοποιείται επιλεκτικά επίσης (στρώμα Ν). Η μη παγιωμένη σκόνη του δεύτερου τύπου παραμένει για να χρησιμεύσει ως υποστήριγμα για την επόμενη στρώση (στρώση Ν+1) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Παρά την ακρίβεια της διαδικασίας, η ακριβής απομάκρυνση μόνο του τελευταίου στρώματος δεν είναι ακόμη εφικτή με την τρέχουσα τεχνολογία και η διαδικασία είναι χρονοβόρα, αφού απαιτεί διπλάσιο χρόνο από αυτόν που θα χρειαζόταν η εναπόθεση ενός υλικού. Επιπλέον, τα παγιωμένα τμήματα του πρώτου τύπου σκόνης ενδέχεται να έχουν προεξοχές, οι οποίες, εάν έρθουν σε επαφή με τον επιστρωτήρα, θα μπορούσαν ενδεχομένως να τον καταστρέψουν ή να εισάγουν διαστασιακή ανακρίβεια στο τελικό τμήμα [231]. Το γεγονός ότι η εναπόθεση σκόνης πολλαπλών υλικών δεν έχει ακόμη εφαρμοστεί, παρόλο που ο συνδυασμός διαφορετικών υλικών σε αντικείμενα για τη βελτιστοποίηση των μηχανικών και άλλων ιδιοτήτων έχει συμβεί σε διάφορες άλλες μεθόδους κατασκευής, αποδεικνύει την ανάγκη να αναπτυχθεί μια ισχυρή, ακριβής και καθολική μέθοδος για την εναπόθεση ενός στρώματος σκόνης από πολλούς διαφορετικούς τύπους σκόνης και οποιουδήποτε επιθυμητού γεωμετρικού σχεδίου, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι το παραγόμενο στρώμα πληροί ορισμένα κριτήρια ποιότητας.

Έχει αποδειχθεί (βλέπε κεφάλαιο 2) ότι η ομοιογένεια της σκόνης είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα του τελικού τεμαχίου στην επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λείζερ (ΕΠΛ) και στην επιλεκτική τήξη με λείζερ (ΕΤΛ). Οι μέθοδοι εναπόθεσης σκόνης προσδιορίστηκαν και κατηγοριοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκε στατιστική ανάλυση, δηλαδή Μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης (ΑΗΡ), για να προσδιοριστεί ποια μέθοδος είναι συνολικά η πιο αποτελεσματική για την εναπόθεση σκόνης από ένα υλικό, δηλαδή την εναπόθεση σκόνης όπου ένα στρώμα αποτελείται πλήρως από έναν τύπο σκόνης, για ΕΠΛ/ΕΤΛ [137]. Η πιο αποτελεσματική και ευρέως αποδεκτή διαδικασία αποδείχθηκε ότι είναι ένας κύλινδρος κύλισης ή/και μια λεπίδα σε διάφορους συνδυασμούς σχεδίων (που ονομάστηκε "μηχανική εναπόθεση σκόνης") [137]. Ωστόσο, παρόλο που αυτή η μέθοδος είναι επαρκής, απλή, εύκολα ελεγχόμενη και παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για εναπόθεση σκόνης από ένα υλικό, είναι ανεφάρμοστη για εναπόθεση πολλαπλών υλικών. Αυτό οφείλεται στην τριβή μεταξύ του επιστρωτήρα και των διαφορετικών ειδών σκόνης που αναπόφευκτα οδηγεί σε ανεπιθύμητη ανάμιξη των σκονών και παραμόρφωση των ορίων μεταξύ των μονοϋλικών υποπεριοχών του στρώματος. Η ηλεκτροστατική εναπόθεση παραμένει μια ιδέα, ωστόσο δεν είναι εφαρμόσιμη για μεταλλικές σκόνες, ενώ άλλες εναλλακτικές λύσεις που έχουν εξεταστεί, όπως οι συστοιχίες ακροφυσίων υπερήχων, είναι πολύ αργές όσον αφορά την ταχύτητα εναπόθεσης και απαιτούν εξαιρετικά καλή λεπτή ρύθμιση και έλεγχο των δονητικών ερεθισμάτων που θα εφαρμοστούν σε κάθε ακροφύσιο. Επιπλέον, είναι εξαιρετικά δύσκολο να απομονωθούν τέλεια τα ακροφύσια μεταξύ τους, χωρίς να αποκλείεται έτσι η πιθανότητα να διεγερθούν κατά λάθος γειτονικά ακροφύσια και να εναποτεθεί λάθος ποσότητα ή είδος σκόνης σε λάθος θέση της κλίνης σκόνης. Τέλος, τα ακροφύσια μπορούν να εναποθέσουν πολύ λεπτόκοκκες σκόνες με πολύ καλή ακρίβεια όσον αφορά την ποσότητα και τη θέση, ωστόσο το επίπεδο συμπίεσης και η τραχύτητα της επιφάνειας του στρώματος που προκύπτει δεν ανταποκρίνεται στα πρότυπα που επιτυγχάνονται από ένα σύστημα επανεπίστρωσης με κύλινδρο/λεπίδα.

Στη συνέχεια, προτείνεται ένα σύστημα εναπόθεσης στρωμάτων σκόνης πολλαπλών υλικών που βασίζεται στην αρχή του μετρητή περιγράμματος και σε μια μαθηματικά καθορισμένη μέθοδο τμηματοποίησης της επιφάνειας. Χρησιμοποιείται ένα λογισμικό τεμαχισμού για την παροχή των τμημάτων του στρώματος σκόνης και την ανάθεση τύπων σκόνης σε ορισμένες θέσεις, με βάση τις συντεταγμένες της κλίνης σκόνης.

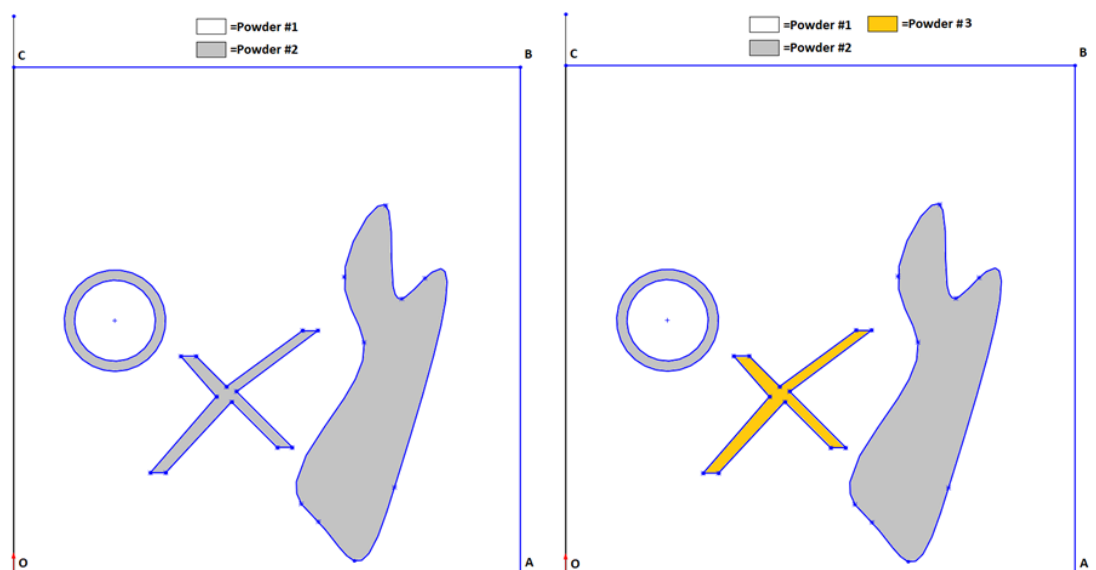
6.1 Γεωμετρικός Ορισμός του Προβλήματος

6.1.1 Βήμα 1: Δεδομένα Λογισμικού Τεμαχισμού

Το λογισμικό τεμαχισμού εκτελεί τον τεμαχισμό του τρισδιάστατου μοντέλου του σχεδιαζόμενου εξαρτήματος (σε μορφή CAD, όπως: SWD, STL, IGES κ.λπ.) χρησιμοποιώντας επάλληλα οριζόντια στρώματα («φέτες») σε απόσταση ίση με το πραγματικό πάχος του στρώματος. Με βάση τη διαφορά μεταξύ του ονομαστικού (αποκαλούμενου επίσης ως θεωρητικού) και του πραγματικού πάχους στρώματος (βλέπε ενότητα 2.2.7), το λογισμικό τεμαχισμού προσδιορίζει το πραγματικό πάχος στρώματος του αποτιθέμενου στρώματος σκόνης και, στη συνέχεια, με βάση τις συντεταγμένες, ποιο σημείο (ή voxel) της κλίνης σκόνης θα καλυφθεί από ποιον τύπο σκόνης. Η κλίνη πούδρας είναι ένα προς τα κάτω κινούμενο έμβολο ή τραπέζι κατασκευής και η κάτω αριστερή γωνία της είναι η αφετηρία του συτήματος συντεταγμένων. Προκειμένου να προσδιοριστεί αποτελεσματικά πού θα εναποθεθεί κάθε τύπος σκόνης, το λογισμικό τεμαχισμού πρέπει να δημιουργήσει περιοχές μονοϋλικών και να προσδιορίσει τα όρια μεταξύ τους. Τα δεδομένα του τεμαχιστή περιλαμβάνουν επίσης τον αριθμό των διαφορετικών τύπων σκόνης που χρησιμοποιούνται και διατάσσονται σε ένα διάνυσμα (PT) κατά σειρά εμφάνισης, βλέπε εξίσωση (6.1), αφού αριθμηθούν οι καμπύλες των συνόρων (βλέπε ενότητα 6.1.2). Ο αριθμός των διαφορετικών τύπων σκόνης που χρησιμοποιήθηκαν συμβολίζεται με $n_{p.t.}$.

$$PT = [PT_1 \quad PT_2 \quad \dots \quad PT_k \quad \dots \quad PT_{n_{p.t.}}]^T \quad (6.1)$$

Στο Σχήμα 6.1, παρουσιάζονται μια επιφάνεια διπλού υλικού (αριστερά) και μια επιφάνεια τριπλού υλικού (δεξιά). Αυτή η διαφορά επηρεάζει τη διαδικασία εναπόθεσης όσον αφορά τον διαχωρισμό των υποπεριοχών και τη σειρά εναπόθεσης, όπως θα εξηγηθεί λεπτομερώς στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 6.1: Τυπικά παραδείγματα στρώματος πολλαπλών υλικών; (Αριστερά) Στρώμα δύο υλικών (Δεξιά) Στρώμα τριών υλικών.

6.1.2 Βήμα 2: Αναγνώριση, Ορισμός και Αρίθμηση των Συνοριακών Καμπύλων

Ο όρος "συνοριακή καμπύλη" ορίζει κάθε κλειστή καμπύλη όπου οι σκόνης διαφορετικών υλικών έρχονται σε επαφή εντός του στρώματος, συμπεριλαμβανομένων των εξωτερικών ορίων της κλίνης σκόνης [(OABC) ορθογώνιο, βλέπε Σχήμα 6.2]. Οι συνοριακές καμπύλες είναι εξ ορισμού κλειστές καμπύλες. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, δεν υπάρχει μία μόνο συνάρτηση $x=f(y)$ για την αναπαράσταση μιας καμπύλης ορίου. Κάθε καμπύλη ορίου μπορεί να αναπαρασταθεί στο λογισμικό είτε με έναν αριθμό συναρτήσεων $x=f(y)$ είτε με έναν αριθμό σημείων μέσω των συντεταγμένων κάθε σημείου που ανήκει στην καμπύλη. Κάθε μία από αυτές τις δύο αναπαραστάσεις έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά την προτεινόμενη μέθοδο τμηματοποίησης επιφάνειας. Μια συνάρτηση είναι πολύ πιο ακριβής, αλλά μια κλειστή καμπύλη δεν μπορεί να ερμηνευθεί ως μια απλή συνάρτηση, οπότε υπάρχει ανάγκη να διαιρεθεί σε περισσότερες συναρτήσεις. Αντίθετα, τα σημεία στερούνται ακρίβειας στην απεικόνιση μιας καμπύλης, ωστόσο είναι ευκολότερο να αντιμετωπιστεί μια συνοριακή καμπύλη ως πίνακας συντεταγμένων x και y και να επιλυθούν αριθμητικά οι εξισώσεις τμηματοποίησης επιφάνειας, χωρίς να χρειάζεται να διαιρεθεί η καμπύλη σε υποσυναρτήσεις.

Ο τρόπος ορισμού μιας συνοριακής καμπύλης (της i -οστής καμπύλης) με συντεταγμένες σημείου φαίνεται στην εξίσωση (6.2).

$$BC_i: \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_k & \dots & x_{N_{p_i}} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_k & \dots & y_{N_{p_i}} \end{bmatrix}^T \quad (6.2)$$

όπου N_{p_i} είναι ο αριθμός των σημείων της (i -οστής) καμπύλης.

Κάθε συνοριακή καμπύλη είναι μια κλειστή καμπύλη, οπότε μπορεί να περιβληθεί από ένα ορθογώνιο πλαίσιο. Το πλαίσιο (OABC) που δηλώνει το όριο της κλίνης σκόνης ορίζεται από τα σημεία, βλέπε Σχήμα 6.2,

$$\begin{aligned} &O(0,0) \\ &A(x_{max}, 0) \\ &B(x_{max}, y_{max}) \\ &C(0, y_{max}) \end{aligned}$$

με τις διαστάσεις της κλίνης σκόνης να ορίζονται ως x_{max}, y_{max} . Στην ανάλυση και το παράδειγμα που ακολουθούν, θεωρείται τετράγωνη κλίνη σκόνης πλευράς 100 mm ($x_{max}=y_{max}=100$ mm). Αυτό το πλαίσιο είναι εξ ορισμού το πρώτο πλαίσιο ορίου του στρώματος. Όλα τα επόμενα πλαίσια προσδιορίζονται και αριθμούνται με σάρωση της περιοχής με μια κάθετη γραμμή $x=x_0$ που ξεκινά από τη θέση $x_0=0$ και καταλήγει στη θέση $x_0=x_{max}$. Μια συνοριακή καμπύλη αναγνωρίζεται όταν η κάθετη γραμμή σάρωσης τέμνει ή έρχεται σε επαφή με μια τέτοια καμπύλη.

Η αρίθμηση των συνοριακών καμπυλών αρχίζει από τα αριστερά του άξονα x . Το πρώτο σύνορο που συναντά η κάθετη γραμμή σάρωσης $x=x_0$ καθώς σαρώνει το σύνορο (OABC) ονομάζεται "σύνορο 2", το επόμενο "σύνορο 3" κ.λπ.

Στην περίπτωση που η κατακόρυφη γραμμή σάρωσης θα συναντήσει ταυτόχρονα δύο συνοριακές καμπύλες (στην ίδια συντεταγμένη $x=x_0$), οι καμπύλες αυτές αριθμούνται ξεκινώντας από εκείνη με τη μικρότερη τιμή συνάντησης $y=y_0$, καθώς το πλαίσιο (OABC) σαρώνεται από την οριζόντια γραμμή $y=y_0$, κατά τη σάρωση προς τα πάνω. Ωστόσο, είναι επίσης δυνατόν δύο καμπύλες συνόρων να συναντηθούν από την κατακόρυφη γραμμή σάρωσης στο ίδιο ακριβώς σημείο. Αυτές οι ειδικές περιπτώσεις και ο κανόνας αρίθμησης που ακολουθείται εξηγούνται στο Σχήμα 6.5. Εντοπίζονται τρεις περιπτώσεις:

1. Περίπτωση 1: Ίδιο x_0 συνάντησης, αλλά διαφορετικό y_0 . Η αρίθμηση αρχίζει από τη μικρότερη τιμή y_0 .
2. Περίπτωση 2: Ίδια τιμή x_0 και y_0 συνάντησης. Η αρίθμηση αρχίζει με τη συνοριακή καμπύλη που τέμνεται σε χαμηλότερη τιμή y_0 όταν η κάθετη γραμμή σάρωσης κινείται σε $x=x_0+dx$.
3. Περίπτωση 3: Το ίδιο με την περίπτωση 2, αλλά με εμφωλευμένες χαρακτηριστικές περιοχές (δηλ. πολλαπλών υλικών).

Ως γενικός και καθολικός κανόνας, οι συνοριακές καμπύλες που βρίσκονται πιο κοντά στους άξονες ($x=0$ πρωτίστως και $y=0$ δευτερευόντως) αριθμούνται πριν από αυτές που βρίσκονται πιο μακριά από τους άξονες. Στο τέλος της διαδικασίας αρίθμησης των συνοριακών καμπυλών, καταλήγουμε να έχουμε N_b συνοριακές καμπύλες. Δύο συνοριακές καμπύλες μπορεί να βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους, αλλά είναι αδύνατον να τέμνονται μεταξύ τους.

Κάθε συνοριακή καμπύλη πρέπει να είναι κλειστή καμπύλη, ώστε να ορίζει μία "χαρακτηριστική περιοχή" ή απλά «χαρακτηριστικό» (feature), δηλαδή μια μικρότερη περιοχή εντός του πλαισίου ορίου (OABC). Ένα χαρακτηριστικό ορίζεται ως μια μονοϋλική ή πολυϋλική περιοχή που περιβάλλεται από μια συνοριακή καμπύλη. Ας σημειωθεί ότι ένα πολυ-υλικό χαρακτηριστικό εμφωλεύει περαιτέρω χαρακτηριστικά, τα οποία μπορεί επίσης να είναι πολυ-υλικά. Αντίθετα, ένα μονοϋλικό χαρακτηριστικό δεν μπορεί εξ ορισμού να εμφωλεύσει κανένα χαρακτηριστικό. Ένα χαρακτηριστικό, σύμφωνα με τον περιορισμό που ισχύει για τις καμπύλες ορίου, μπορεί ενδεχομένως να εμφωλεύεται μέσα σε ένα άλλο ή να βρίσκεται σε επαφή με ένα άλλο. Μια περίπτωση μονοϋλικού χαρακτηριστικού είναι αυτό που ορίζεται από το όριο 4 ή αυτό που ορίζεται από το όριο 5, βλέπε *Σχήμα 6.2*. Μια περίπτωση πολυ-υλικού χαρακτηριστικού είναι αυτό που ορίζεται από το όριο 2, βλέπε *Σχήμα 6.2*. Κάθε συνοριακή καμπύλη και, στη συνέχεια, κάθε χαρακτηριστικό, περιβάλλεται από ένα πλαίσιο, βλέπε *Σχήμα 6.2*. Το λογισμικό τεμαχισμού είναι υπεύθυνο για την ανάθεση ενός υλικού σε κάθε μονοϋλικό χαρακτηριστικό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένας τύπος υλικού αποδίδεται και στα πολυ-υλικά χαρακτηριστικά, δεδομένου ότι υπάρχουν περιοχές εντός ενός πολυ-υλικού χαρακτηριστικού που δεν ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο μονο-υλικό χαρακτηριστικό (δηλ. δεν περιβάλλεται από μια κλειστή καμπύλη ορίου). Αυτό μπορεί να απεικονιστεί από τα σημεία του κυκλικού δακτυλίου

που ορίζεται από τις καμπύλες ορίου 2 και 3, βλέπε *Σχήμα 6.2*. Τα σημεία αυτά ανήκουν στο χαρακτηριστικό 2, αλλά όχι στο χαρακτηριστικό 3. Ως εκ τούτου, δεν ανήκουν σε ένα μονοϋλικό χαρακτηριστικό, ωστόσο πρέπει και αυτά να καλύπτονται από ένα υλικό σε μορφή σκόνης. Γι' αυτό το λόγο ένα υλικό αποδίδεται και στο χαρακτηριστικό 2, παρά το γεγονός ότι είναι πολυ-υλικό.

Στο *Σχήμα 6.2* απεικονίζεται η αρίθμηση των 5 συνοριακών καμπυλών του μοτίβου που παρουσιάστηκε στο *Σχήμα 6.1*. Κάθε συνοριακή καμπύλη περικλείεται σε ένα πλαίσιο, στο οποίο αποδίδεται ο ίδιος αριθμός με αυτόν που προσδιορίζει την συνοριακή καμπύλη. Κάθε πλαίσιο ορίζεται από τα όριά του (δηλ. τις γωνιακές συντεταγμένες) ως εξής:

Για το i -οστό πλαίσιο:

$$x_{i,L} \rightarrow x_{i,R}$$

$$y_{i,D} \rightarrow y_{i,U}$$

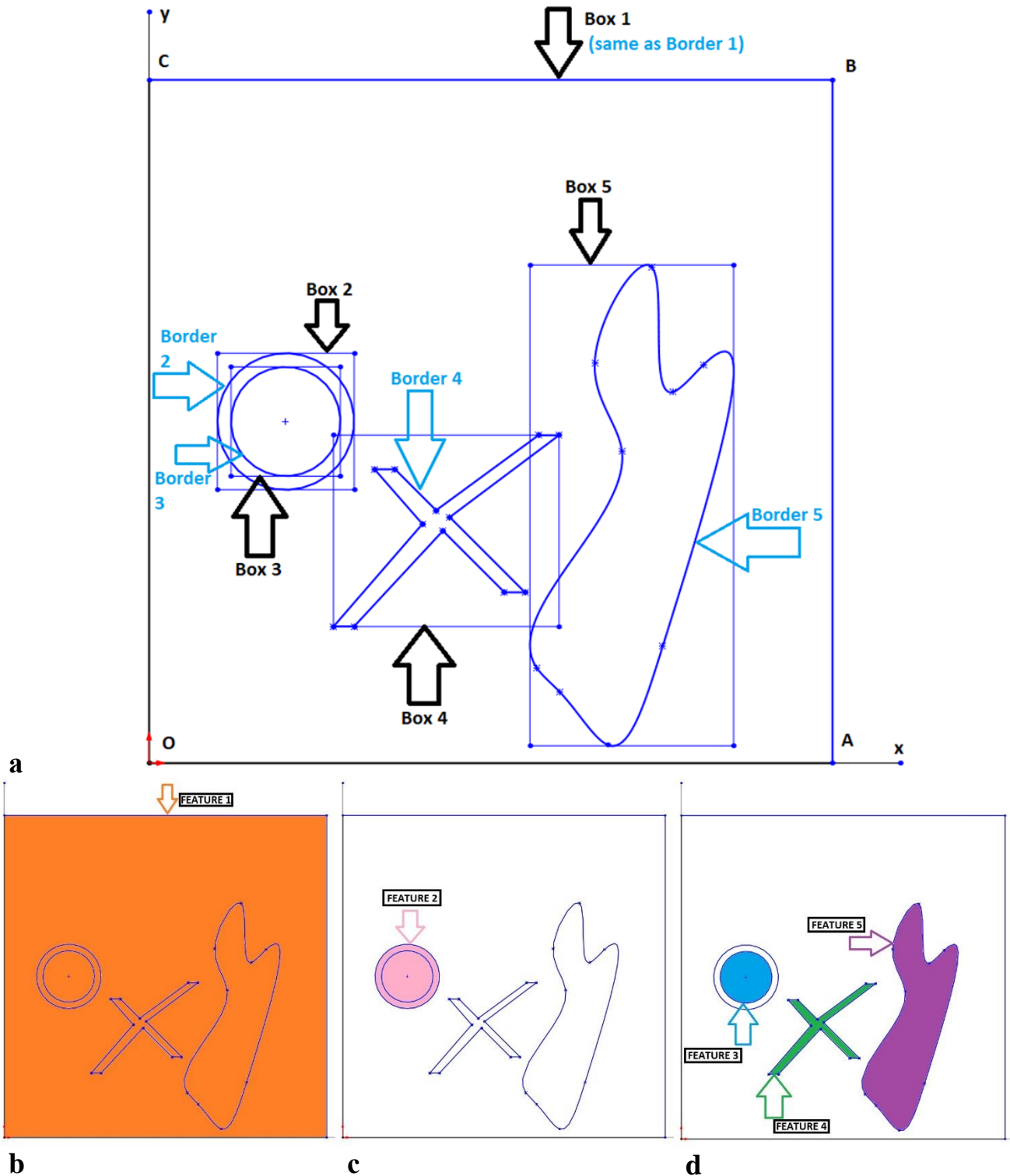
Όπου (L, R, D και U) σημαίνει (Left-Αριστερά, Right-Δεξιά, Down-Κάτω και Up-Πάνω) αντίστοιχα. Στο *Σχήμα 6.3* απεικονίζονται οι οριακές συντεταγμένες των πλαισίων.

Γενικά, ο αλγεβρικός ορισμός μιας συνοριακής καμπύλης είναι ακριβέστερος, δεδομένου ότι η ακρίβεια απεικόνισης της καμπύλης δεν εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων που συνδέονται μέσω γραμμικών τμημάτων στην αριθμητική μέθοδο. Ωστόσο, είναι πολύ πιο δύσκολο να οριστεί κάθε συνοριακή καμπύλη μέσω αλγεβρικών εξισώσεων, καθώς, τις περισσότερες φορές, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται θα είναι πολύ πολύπλοκες, όπως οι b-splines ή οι καμπύλες Bezier, γεγονός που αυξάνει δραστικά τον υπολογιστικό χρόνο, καθώς οι εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν για την ανάπτυξη των μετώπων (βλ. επόμενο κεφάλαιο) είναι πολύ πιο περίπλοκες. Η σημειακή απεικόνιση των συνοριακών καμπυλών παρέχει εύκολα επιλύσιμες εξισώσεις, με τη μορφή τεμνουσών γραμμικών εξισώσεων, προκειμένου να καθοριστούν τα μέτωπα, ενώ είναι επίσης πολύ πιο εύκολο να εξαχθούν δεδομένα σε αριθμητική μορφή μέσω οποιουδήποτε τεμαχισμού προερχόμενου από λογισμικά 3D/2D CAD. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η αριθμητική απεικόνιση των συνοριακών καμπυλών στην παρούσα εργασία.

Για κάθε χαρακτηριστικό ορίζεται μια τάξη πολυπλοκότητας n_{com} . Για μονοϋλικά χαρακτηριστικά, αυτή είναι ίση με 1, ενώ, για πολυϋλικά χαρακτηριστικά, είναι ίση με

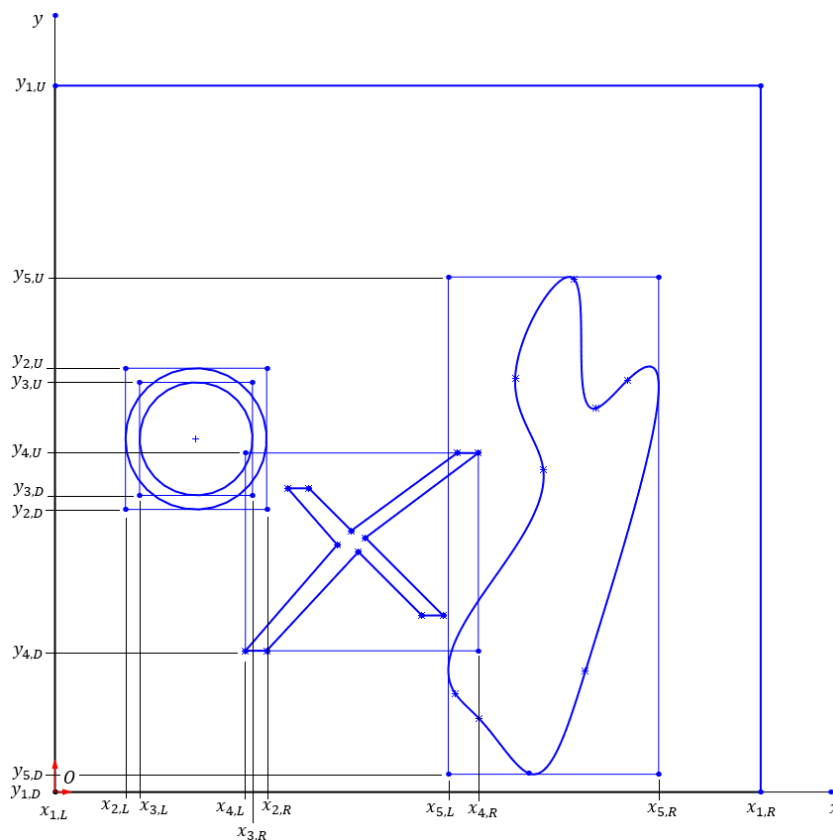
τον αριθμό των εμφωλευμένων χαρακτηριστικών εντός του εξωτερικού χαρακτηριστικού (n_{nested}), συν ένα.

$$n_{com} = n_{nested} + 1$$



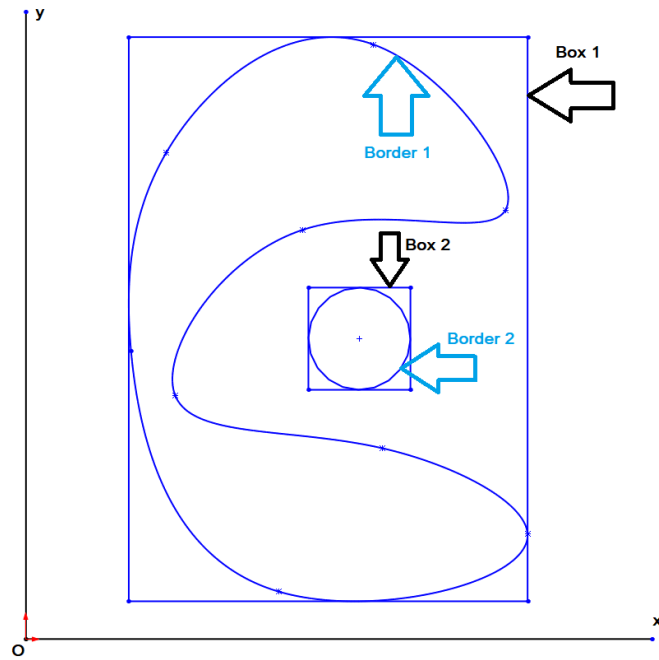
Σχήμα 6.2: (a) Αρίθμηση συνοριακών καμπυλών και ορισμός των περιβαλλόντων οριακών πλαισίων; (b)- (c) πολυϊλικά χαρακτηριστικά του μοτίβου; (d) μονοϊλικά χαρακτηριστικά του μοτίβου.

Έτσι, η σειρά πολυπλοκότητας του 2ου χαρακτηριστικού του Σχήματος 6.2 είναι 2, επειδή το χαρακτηριστικό 2 εμφωλεύει το χαρακτηριστικό 3, ενώ η πολυπλοκότητα των χαρακτηριστικών 3, 4 και 5 είναι 1, επειδή κανένα από αυτά τα χαρακτηριστικά δεν έχει εμφωλευμένα χαρακτηριστικά. Ας σημειωθεί ότι, είναι δυνατόν ένα πλαίσιο να εμφωλεύει ένα άλλο, αλλά τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά να έχουν και τα δύο τάξη πολυπλοκότητας 1. Στο Σχήμα 6.4, το πλαίσιο 1 εμφωλεύει το πλαίσιο 2, αλλά και τα δύο χαρακτηριστικά 1 και 2 είναι μονοϋλικά χαρακτηριστικά (δηλαδή, έχουν και τα δύο τάξη πολυπλοκότητας ίση με 1). Αυτό συμβαίνει επειδή το χαρακτηριστικό 1 δεν εμφωλεύει το χαρακτηριστικό 2. Εάν ένα χαρακτηριστικό είναι πολυ-υλικό, το πλαίσιο του εμφωλεύει και άλλα πλαίσια, ωστόσο, είναι δυνατόν το πλαίσιο ενός μονο-υλικού χαρακτηριστικού να εμφωλεύει και άλλα κουτιά. Επιπλέον, ένα πολυ-υλικό χαρακτηριστικό μπορεί να εμφωλεύει άλλα πολυ-υλικά ή μονο-υλικά χαρακτηριστικά.

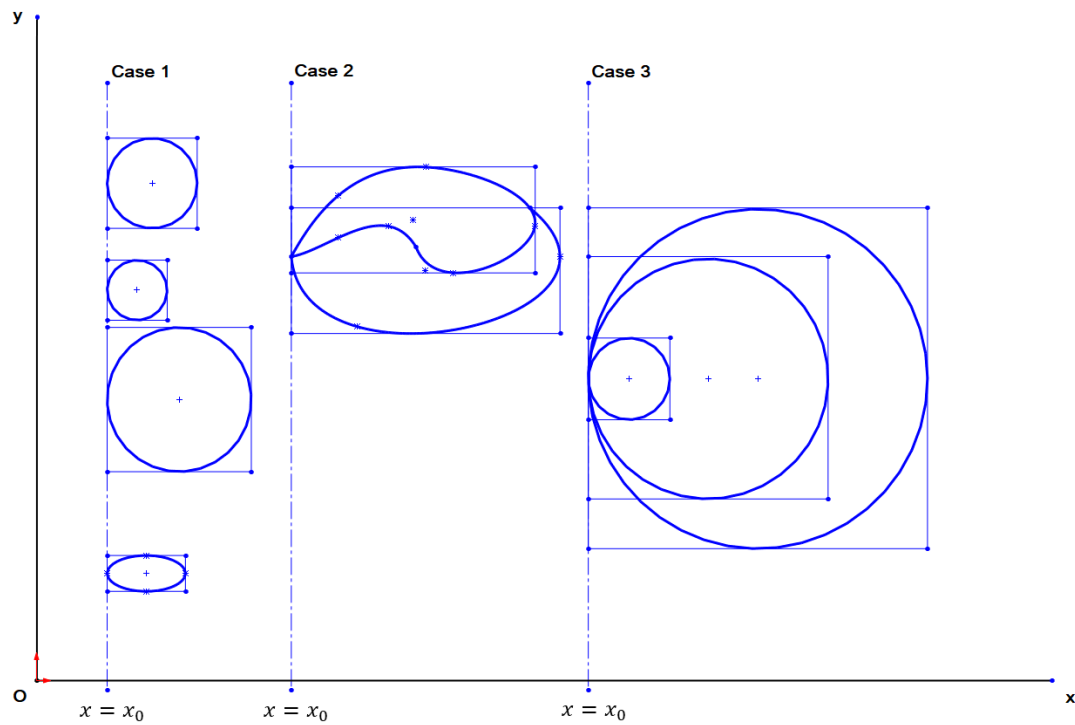


Σχήμα 6.3: Οριακές συντεταγμένες πλαισίων συνόρων.

Μετά τον ορισμό και την αρίθμηση των πλαισίων, συμπληρώνεται το διάνυσμα τύπων σκόνης, κατά σειρά εμφάνισης, όπως φαίνεται στα δύο παραδείγματα του Σχήματος 6.2.



Σχήμα 6.4: Ειδική περίπτωση πολυπλοκότητας χαρακτηριστικών.



Σχήμα 6.5: Ειδικές περιπτώσεις αρίθμησης συνοριακών καμπυλών.

6.1.3 Βήμα 3: Δημιουργία Αριστερού και Δεξιού Μετώπου (Τμηματοποίηση κατά άξονα x)

Ως βασικό βήμα της μεθόδου, πρέπει να απομονωθούν συγκεκριμένες μονοϋλικές υποπεριοχές. Αυτές οι υποπεριοχές δεν πρέπει να συγχέονται με τα χαρακτηριστικά. Ένα χαρακτηριστικό είναι η περιοχή που περικλείεται από μια συννοριακή καμπύλη και μπορεί να είναι μονοϋλικό ή πολυϋλικό. Οι υποπεριοχές που ορίζονται από αυτό το βήμα της μεθόδου είναι αυστηρά μονοϋλικές και περικλείονται από τμήματα πολλαπλών καμπυλών ορίου. Η απομόνωση αυτών των μονοϋλικών υποπεριοχών γίνεται μέσω δύο "μετώπων", δηλαδή του αριστερού και του δεξιού μετώπου. Για την ανάπτυξη αυτών των μετώπων, γίνεται η παραδοχή ότι όλες οι καμπύλες συνόρων συμπεριφέρονται ως αδιαφανείς τοίχοι, άρα αδιαπέραστες από το φως. Για την αρχικοποίηση της μεθόδου, το πρώτο αριστερό μέτωπο ορίζεται ως η γραμμή (ΑΟCB), βλέπε Σχήμα 6.2. Υποθέτουμε ότι κάθε σημείο του αριστερού μετώπου εκπέμπει μια ακτίνα φωτός, παράλληλη προς τον άξονα Ox , που εκτείνεται προς τη δεξιά πλευρά. Κάθε ακτίνα φωτός κινείται μόνο μέσω του 1ου τύπου σκόνης, μέχρι να συναντήσει μια αδιαφανή επιφάνεια, δηλαδή μέχρι να "συγκρουστεί" πάνω σε ένα χαρακτηριστικό. Στο σημείο αυτό, η ακτίνα φωτός σταματά. Ο τόπος αυτών των σημείων ορίζει το "δεξιό μέτωπο".

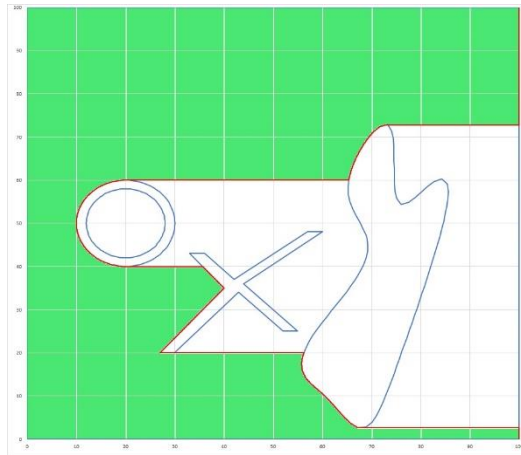
Στη δεύτερη επανάληψη, το δεξί μέτωπο της πρώτης επανάληψης γίνεται τώρα το αριστερό μέτωπο της δεύτερης επανάληψης. Οι ακτίνες φωτός εκπέμπονται από το νέο αριστερό μέτωπο. Και πάλι, οι ακτίνες φωτός λειτουργούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως στην προηγούμενη επανάληψη, αλλά τώρα κινούνται ελεύθερα μόνο μέσα στον 2ο τύπο σκόνης. Οι άλλοι τύποι σκόνης θεωρούνται "αδιαφανείς" και δεν επιτρέπουν στις ακτίνες φωτός να περάσουν μέσα από αυτούς. Οι ακτίνες φωτός σταματούν και πάλι όταν συναντήσουν ένα χαρακτηριστικό, ορίζοντας ένα σημείο του δεξιού μετώπου της δεύτερης επανάληψης. Η διαδικασία συνεχίζεται, έως ότου καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνεια.

Η τρίτη επανάληψη πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο, αλλά επιτρέπει τη μετάδοση των ακτίνων φωτός μέσω του 3ου τύπου σκόνης, εάν υπάρχει. Εάν υπάρχουν μόνο δύο τύποι σκόνης, τότε η τρίτη επανάληψη επιτρέπει και πάλι τη διέλευση ακτίνων φωτός μέσω του 1ου τύπου σκόνης. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ισούται με τον αριθμό

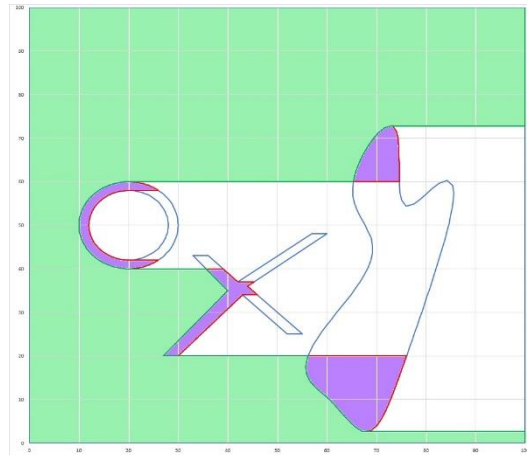
των διαφορετικών τύπων σκόνης ($n_{p.t.}$) επί τον μέγιστο αριθμό τομών (n_{\max_int}) που μπορεί να έχει μια οριζόντια γραμμή ($y=y_0, y_0 \in [0, y_{\max}]$) με τις συνοριακές καμπύλες.

Αυτή η διαδικασία θα ονομάζεται στο εξής "τμηματοποίηση επιφάνειας κατά τον x-άξονα". Το αριστερό και το δεξί μέτωπο κάθε επανάληψης απομονώνουν μια υποπεριοχή μονοϋλικού που θα καλυφθεί από τον προκαθορισμένο τύπο σκόνης πριν προχωρήσουν στην απομόνωση της επόμενης υποπεριοχής μονοϋλικού. Η σύγκριση μεταξύ των Σχημάτων 6.6 και 6.7 καταδεικνύει πώς η τμηματοποίηση της επιφάνειας κατά τον άξονα x διαφέρει μεταξύ ενός μοτίβου δύο και ενός μοτίβου τριών υλικών, ακόμη και όταν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στρώματος είναι πανομοιότυπα. Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται κάθε βήμα της τμηματοποίησης επιφάνειας κατά τον x-άξονα διπλού υλικού του μοτίβου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1 (Αριστερά). Ο 1ος τύπος σκόνης απεικονίζεται με πράσινο χρώμα, ενώ ο 2ος τύπος σκόνης με μοβ χρώμα. Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται κάθε βήμα της τμηματοποίησης της επιφάνειας κατά τον x-άξονα τριπλού υλικού του μοτίβου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1 (Δεξιά). Ο 1ος τύπος σκόνης απεικονίζεται με πράσινο χρώμα, ο 2ος τύπος σκόνης με μοβ χρώμα και ο 3ος τύπος σκόνης με μπλε χρώμα. Τόσο στο Σχήμα 6.6 όσο και στο Σχήμα 6.7 η σκόνη που εναποτίθεται στο τρέχον βήμα απεικονίζεται με βαθύτερες αποχρώσεις, ενώ η σκόνη που έχει εναποτεθεί σε προηγούμενα βήματα απεικονίζεται με ανοιχτότερες αποχρώσεις.

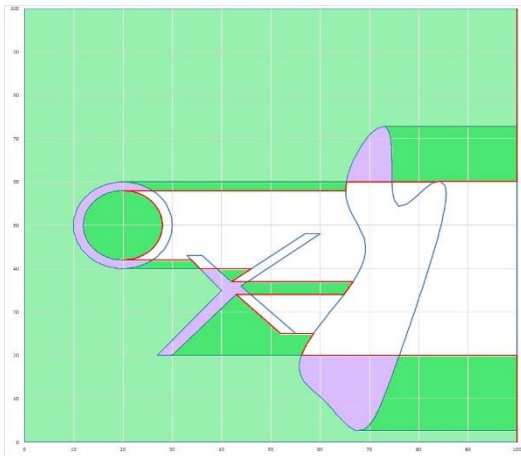
Τόσο στο Σχήμα 6.6 όσο και στο Σχήμα 6.7, τα αριστερά μέτωπα απεικονίζονται με πράσινο χρώμα και τα δεξιά μέτωπα με κόκκινο χρώμα. Οι περιοχές όπου το αριστερό και το δεξί μέτωπο συμπίπτουν απεικονίζονται επίσης με κόκκινο χρώμα.



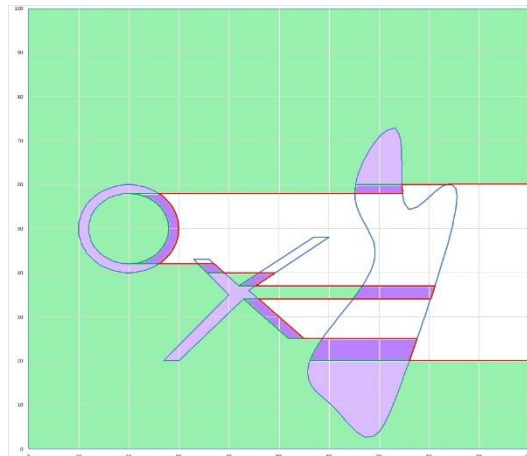
a



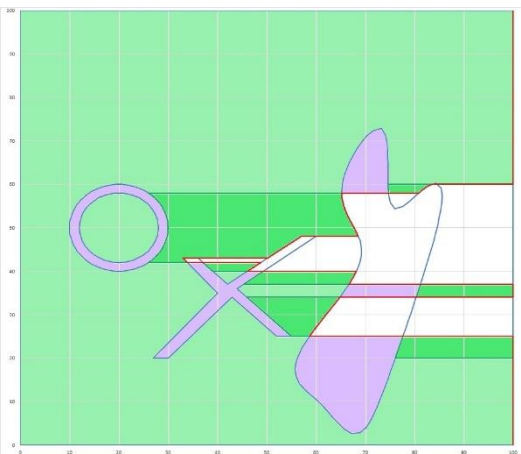
b



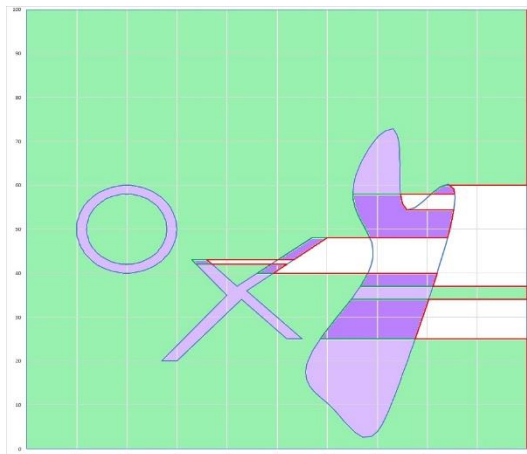
c



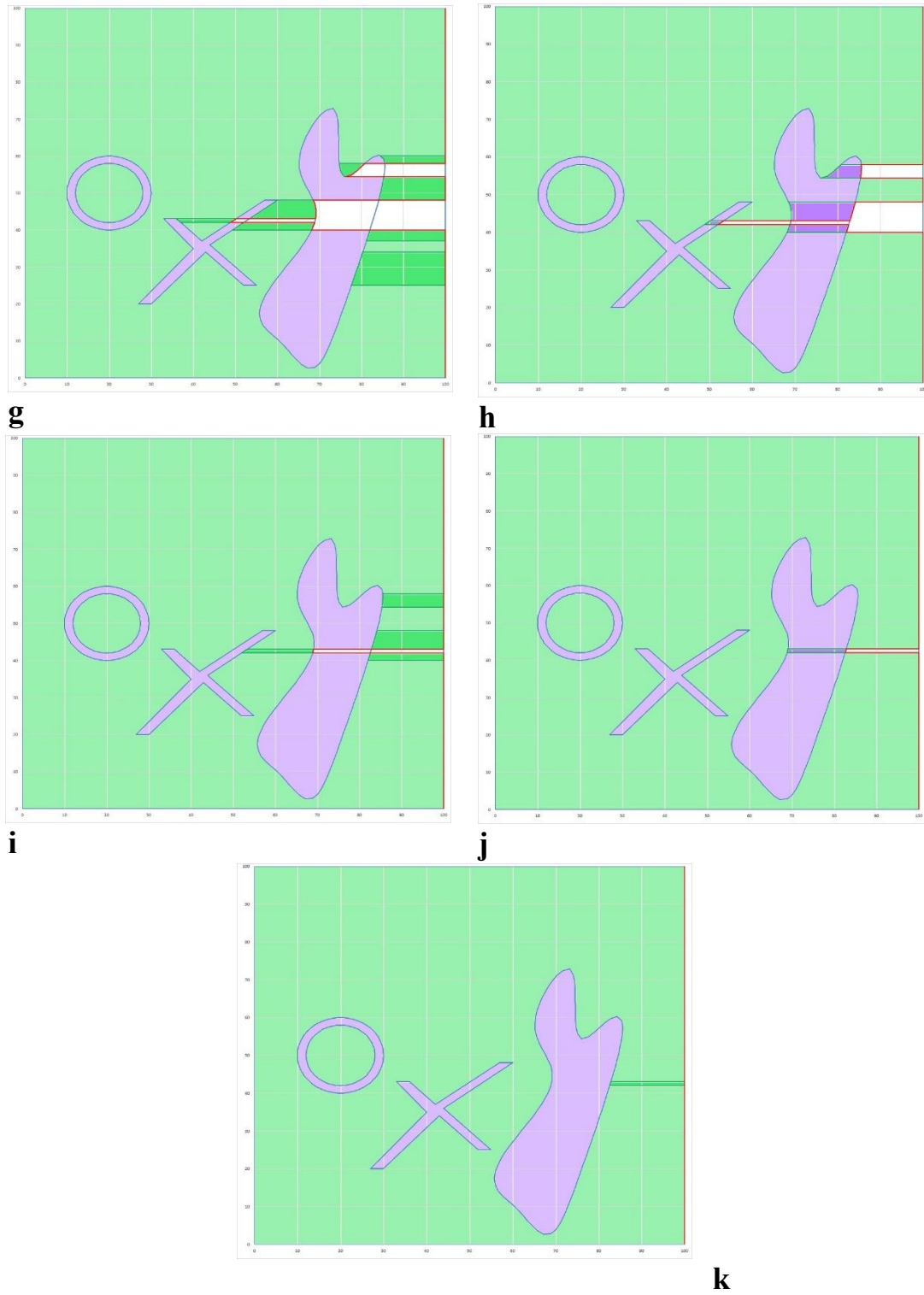
d



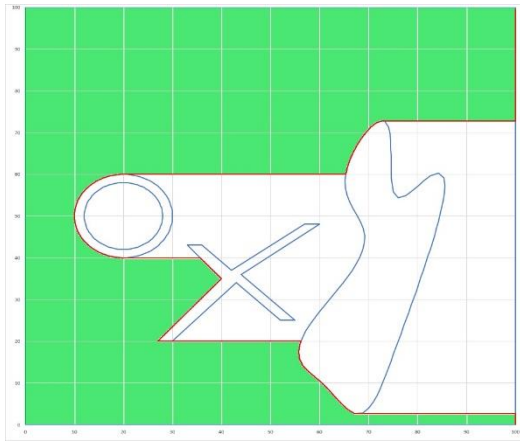
e



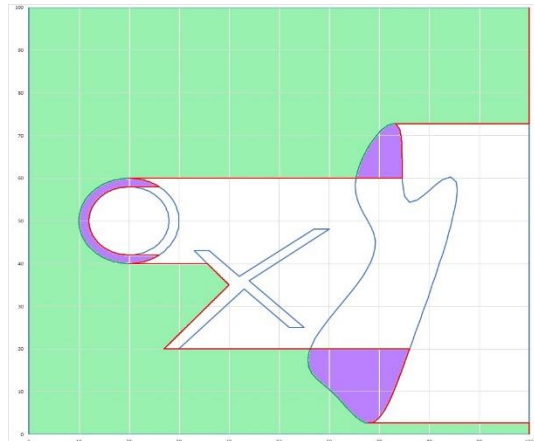
f



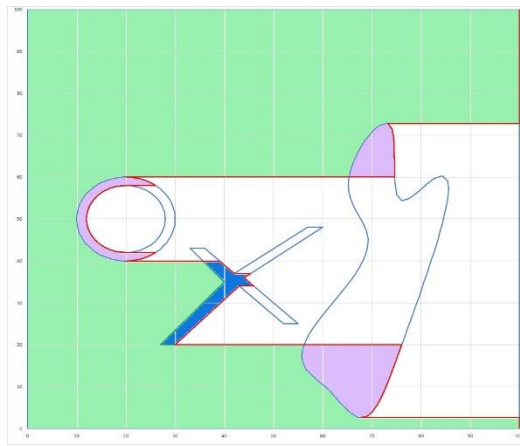
Σχήμα 6.6: Παράδειγμα τμηματοποίησης κατά τον x-άξονα μοτίβου 2 υλικών: (a)-(k): επαναλήψεις της μεθόδου.



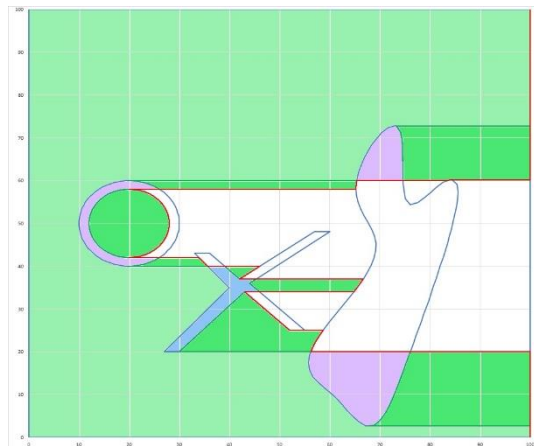
a



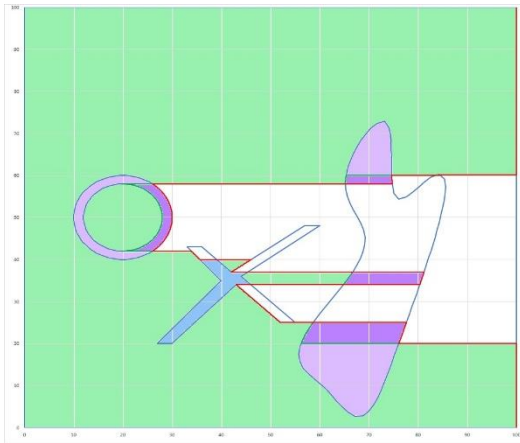
b



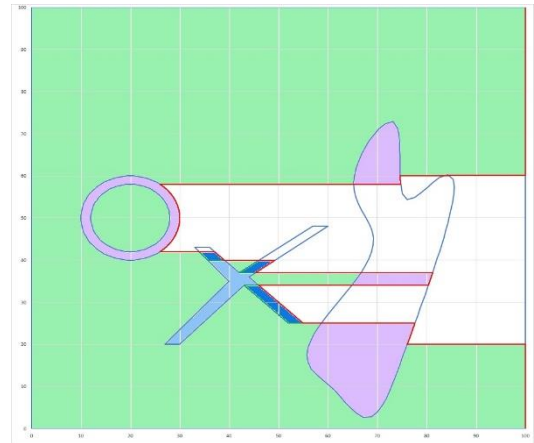
c



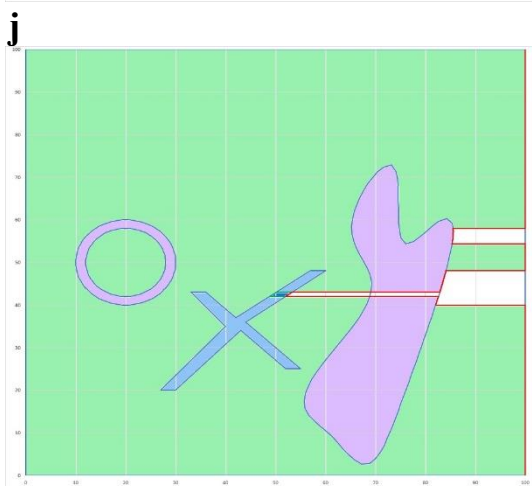
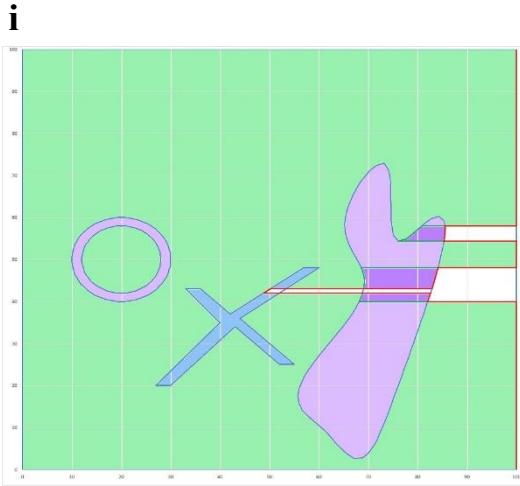
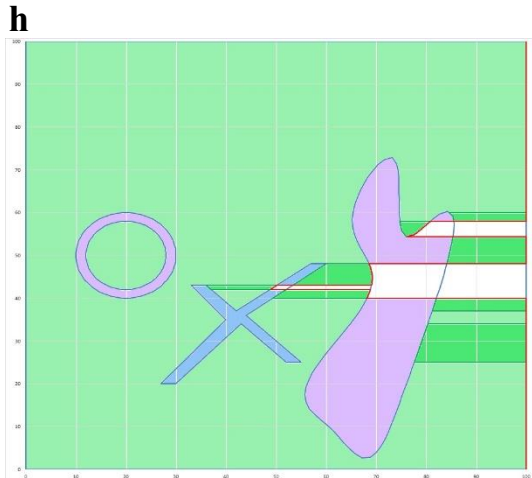
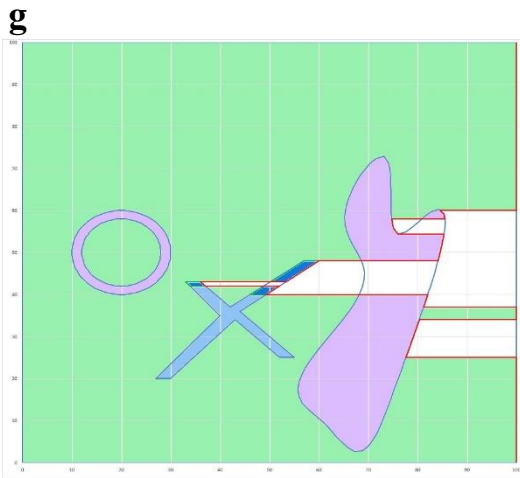
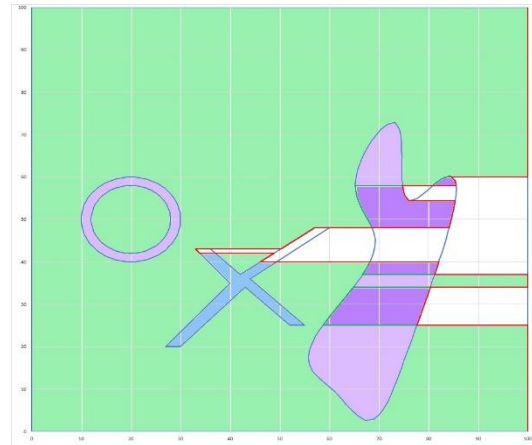
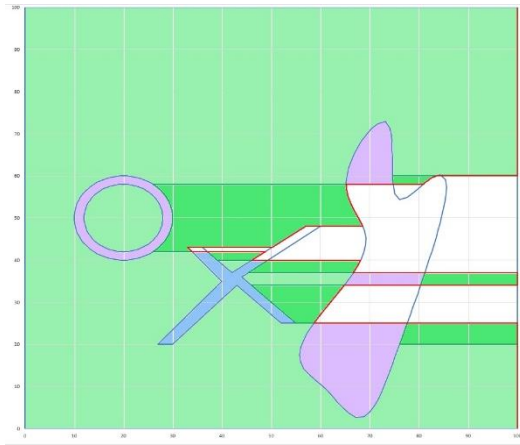
d

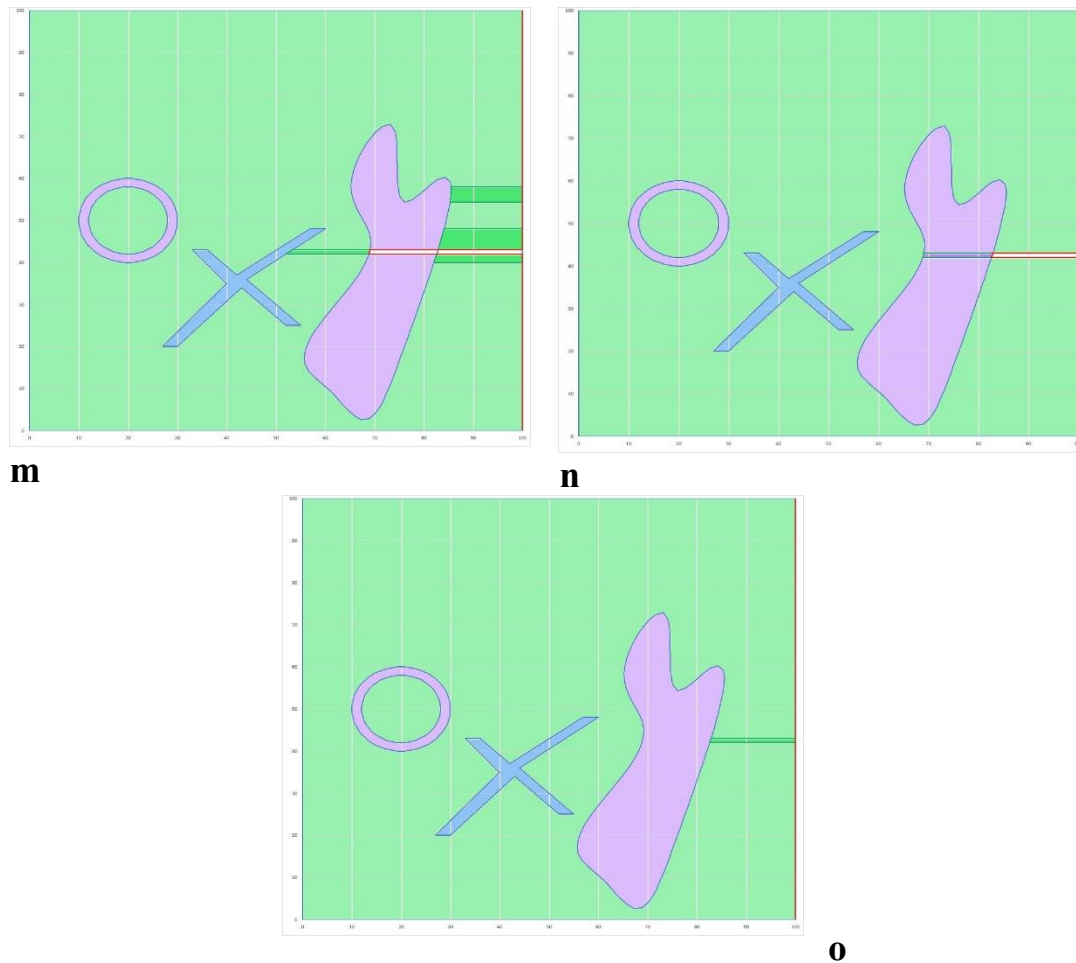


e



f

**k****l**

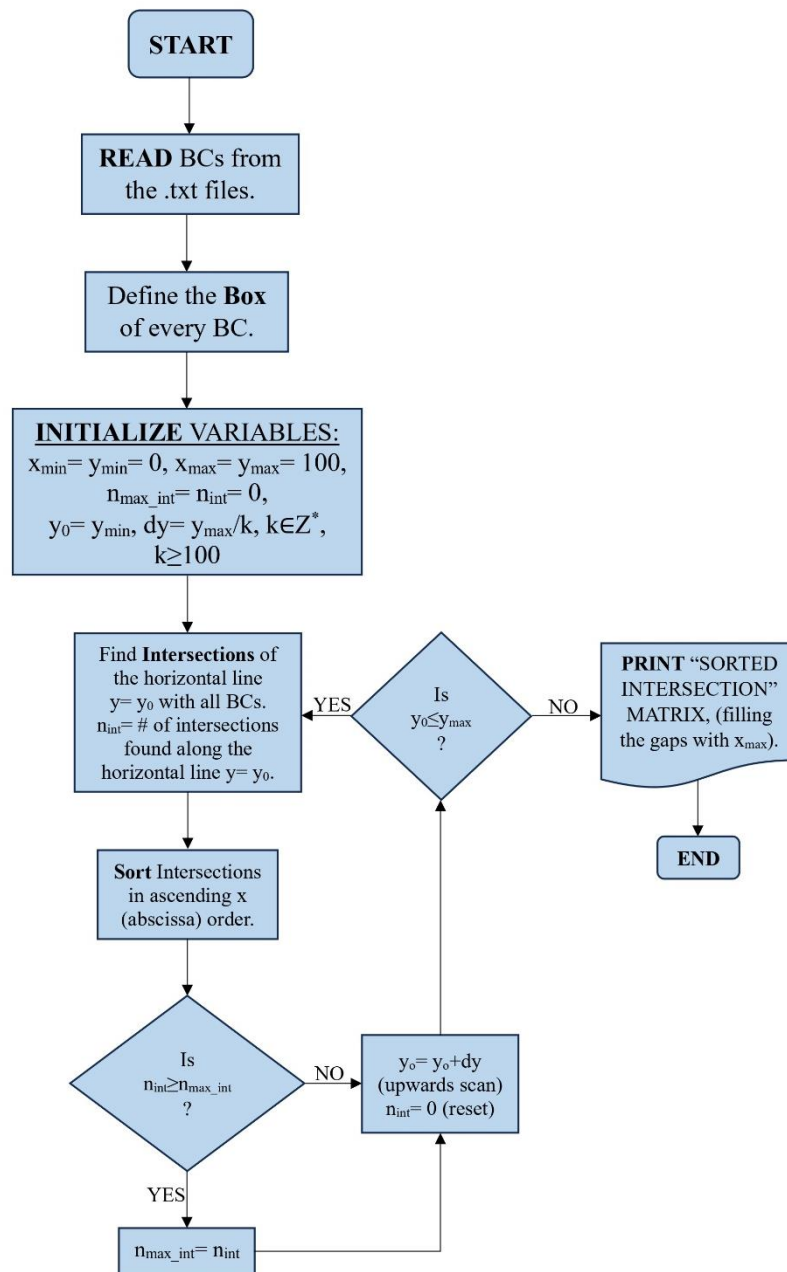


Σχήμα 6.7: Παράδειγμα τμηματοποίησης κατά τον x-άξονα μοτίβου 3 υλικών: **(a)-(o)**: επαναλήψεις της μεθόδου.

Η ανάπτυξη του αριστερού και του δεξιού μετώπου για κάθε βήμα της διαδικασίας τμηματοποίησης του άξονα x πραγματοποιείται με έναν κώδικα γλώσσας C δύο τμημάτων που βρίσκεται στις ενότητες 8.4 και 8.5 (παραρτήματα Δ και Ε). Ο κώδικας του παραρτήματος Δ (ενότητα 8.4) παρουσιάζεται με το διάγραμμα ροής του Σχήματος 6.8. Αρχικά επιλύει το πρόβλημα της εύρεσης των σημείων τομής των συνοριακών καμπυλών με κάθε οριζόντια "ακτίνα φωτός" $y = y_0, y_0 \in [y_{1,D}, y_{1,U}]$ και τα αποθηκεύει σε ένα αρχείο το οποίο θα ανοίξει ο κώδικας του παραρτήματος Ε (ενότητα 8.5), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ταξινόμηση αυτών των σημείων τομής σε αριστερό και δεξί μέτωπο με βάση την κατανομή των υλικών εντός του στρώματος που ορίζεται μέσα στο πρόγραμμα από τον χρήστη. Ο κώδικας του παραρτήματος Ε (ενότητα 8.5) παρουσιάζεται από το διάγραμμα ροής του Σχήματος 6.9.

6.1.3.1 Κώδικας Υπολογισμού Σημείων Τομής

Ο κώδικας του παραρτήματος Δ (ενότητα 8.4) παρουσιάζεται με το διάγραμμα ροής του Σχήματος 6.8.



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα ροής του κώδικα C-γλώσσας του Παραρτήματος D.

Η λειτουργία του κώδικα του παραρτήματος Δ (ενότητα 8.4) είναι η ακόλουθη. Ο κώδικας ανοίγει τα N_b αρχεία .txt που περιέχουν τις συντεταγμένες των σημείων κάθε συνοριακής καμπύλης. Αφού διαβάσει και αποθηκεύσει αυτά τα δεδομένα σε πίνακες, ο κώδικας υπολογίζει τα μέγιστα και τα ελάχιστα κάθε συνοριακής καμπύλης, προκειμένου να καθορίσει τις τιμές $x_{i,L}$, $x_{i,R}$, $y_{i,D}$ και $y_{i,U}$. Μετά από αυτό, ο κώδικας εισέρχεται σε έναν βρόχο όπου ο άξονας y σαρώνεται προς τα πάνω. Ο κώδικας υπολογίζει και αποθηκεύει τις συντεταγμένες των σημείων τομής μεταξύ κάθε

οριζόντιας γραμμής $y = y_0$, $y_0 \in [y_{1,D}, y_{1,U}]$ με κάθε συνοριακή καμπύλη. Εάν δύο διαδοχικά σημεία της i -οστής συνοριακής καμπύλης είναι τα $A(x_j, y_j)$ και $B(x_{j+1}, y_{j+1})$, τότε συνδέονται με γραμμικό τμήμα, η εξίσωση του οποίου δίνεται ως εξής

$$(\varepsilon_{AB}): y = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} x + \frac{y_j x_{j+1} - y_{j+1} x_j}{x_{j+1} - x_j}$$

Τα σημεία τομής υπολογίζονται με την επίλυση του ακόλουθου συστήματος.

$$(\Sigma_1): \begin{cases} y = y_0 \\ y = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} x + \frac{y_j x_{j+1} - y_{j+1} x_j}{x_{j+1} - x_j} \end{cases}$$

Ωστόσο, προκειμένου η οριζόντια ευθεία $y = y_0$ να τέμνει το ευθύγραμμο τμήμα (AB), είναι απαραίτητο να ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$(y_j - y_0)(y_{j+1} - y_0) < 0$$

Στην περίπτωση αυτή, το σημείο τομής δίνεται ως εξής

$$\Gamma_{int} \left(\frac{x_{j+1} - x_j}{y_{j+1} - y_j} y_0 + \frac{y_{j+1} x_j - y_j x_{j+1}}{y_{j+1} - y_j}, y_0 \right)$$

Πίνακας 6.1: Η δομή του πίνακα “SORTED INTERSECTIONS”.

y	Int_1	Int_2	...	Int_k	...	$Int_{n_{max_int}}$
0	$Int_1(0)$	$Int_2(0)$	...	$Int_k(0)$	...	$Int_{n_{max_int}}(0)$
dy	$Int_1(dy)$	$Int_2(dy)$	...	$Int_k(dy)$	...	$Int_{n_{max_int}}(dy)$
$2dy$	$Int_1(2dy)$	$Int_2(2dy)$	...	$Int_k(2dy)$	...	$Int_{n_{max_int}}(2dy)$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
jdy	$Int_1(jdy)$	$Int_2(jdy)$	...	$Int_k(jdy)$	...	$Int_{n_{max_int}}(jdy)$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
y_{max}	$Int_1(y_{max})$	$Int_2(y_{max})$	...	$Int_k(y_{max})$	...	$Int_{n_{max_int}}(y_{max})$

Ο κώδικας χρησιμοποιεί ελέγχους για να συμπεριλάβει και τα σημεία τομής που μπορεί να συμπίπτουν με ένα σημείο των συνοριακών καμπυλών. Αφού υπολογιστούν όλες οι τομές με όλες τις συνοριακές καμπύλες σε μια ορισμένη τιμή τεταγμένης y_0 , αυτές ταξινομούνται κατά αυξανόμενη τιμή τεταγμένης. Στη συνέχεια, ο κώδικας μετακινείται στην επόμενη τιμή τεταγμένης ($y_0 + dy$) και επαναλαμβάνει τη διαδικασία. Κατόπιν, τα σημεία τομής αποθηκεύονται σε ένα αρχείο .txt προκειμένου να ανοιχτούν

από τον κώδικα του Παραρτήματος Ε (ενότητα 8.5), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ταξινόμησή τους σε μέτωπα, με βάση το υλικό κάθε μονοϋλικής υποπεριοχής του στρώματος. Το αρχείο αυτό περιέχει έναν πίνακα με την ονομασία "SORTED INTERSECTIONS", η δομή του οποίου φαίνεται στον Πίνακα 6.1.

6.1.3.2 Κώδικας Ανάπτυξης Μετώπων

Ο κώδικας του παραρτήματος Ε (ενότητα 8.5) παρουσιάζεται με το διάγραμμα ροής του Σχήματος 6.9.

Αρχικά, αναθέτει ένα υλικό σε κάθε συνοριακή καμπύλη. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, κάθε συνοριακή καμπύλη ορίζει μια κλειστή περιοχή (χαρακτηριστικό), στο εσωτερικό της οποίας μπορεί να υπάρχουν μόνο ένα ή περισσότερα υλικά, ανάλογα με την πολυπλοκότητα n_{com} της καμπύλης. Στο δεδομένο μοτίβο του παραδείγματος (βλ. Σχήμα 6.1, Σχήμα 6.2 και Σχήμα 6.3) οι συνοριακές καμπύλες 1, 3, 4 και 5 έχουν πολυπλοκότητα 1 και η 2η συνοριακή καμπύλη πολυπλοκότητα 2. Είναι εύκολο να ανατεθεί ένα υλικό στις συνοριακές καμπύλες που έχουν πολυπλοκότητα 1, ωστόσο είναι λίγο πιο περίπλοκο για συνοριακές καμπύλες υψηλότερης τάξης πολυπλοκότητας. Η συνοριακή καμπύλη 2 είναι ένας κύκλος που εμφωλεύει πλήρως την συνοριακή καμπύλη 3, η οποία είναι ένας κύκλος μικρότερης ακτίνας.

Οι δύο κύκλοι δεν έχουν κοινά σημεία, δηλαδή δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, οπότε το υλικό που αποδίδεται στη 2η συνοριακή καμπύλη είναι αυτό που έρχεται σε εσωτερική επαφή με αυτήν, δηλαδή το υλικό #2 (και στα δύο παραδείγματα του Σχήματος 6.1(Αριστερά) και του Σχήματος 6.1(Δεξιά) - εναπόθεση διπλού και τριπλού υλικού αντίστοιχα). Γενικά, τα υλικά (δηλαδή οι τύποι σκόνης PT) που αντιστοιχούν σε κάθε συνοριακή καμπύλη ($PT_{BC_k}, k \in [1, N_b]$) αποθηκεύονται σε έναν πίνακα με το όνομα MAT, όπως φαίνεται στην Εξίσωση (6.3).

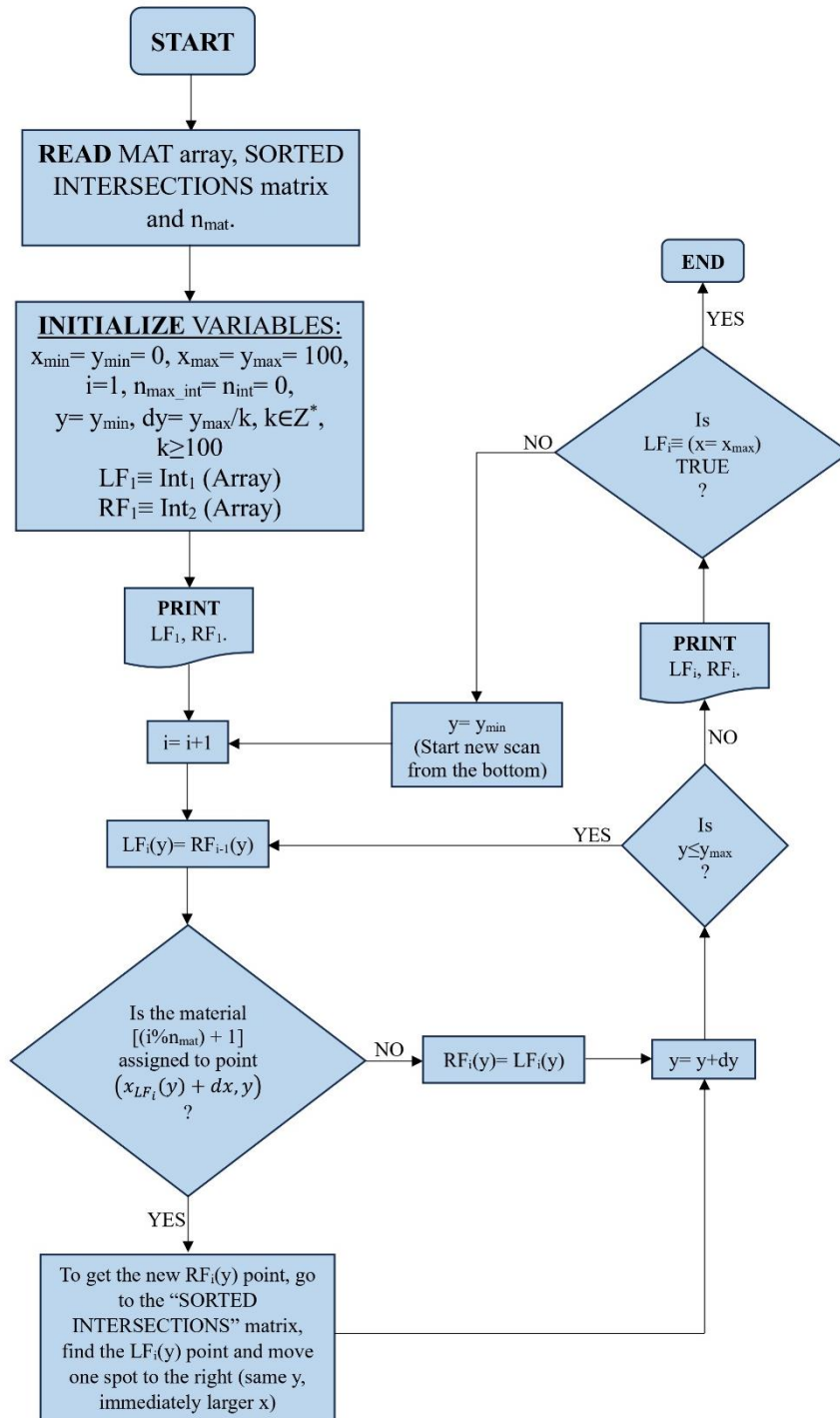
$$\begin{aligned} MAT &= [PT_{BC_1} \quad PT_{BC_2} \quad \cdots \quad PT_{BC_k} \quad \cdots \quad PT_{BC_{N_b}}]^T \\ &= [PT_1 \quad PT_{BC_2} \quad \cdots \quad PT_{BC_k} \quad \cdots \quad PT_{BC_{N_b}}]^T \end{aligned} \quad (6.3)$$

Εξ ορισμού, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το υλικό #1 αντιστοιχίζεται στην BC1 και το υλικό #2 στην BC2. Έτσι, στην περίπτωση της διπλής εναπόθεσης (Σχήμα 6.1(Αριστερά)) η σειρά των υλικών που αντιστοιχίζονται στις συνοριακές καμπύλες είναι

$$MAT_{dual} = [PT_1 \quad PT_2 \quad PT_1 \quad PT_2 \quad PT_2]^T$$

Ενώ η σειρά των υλικών που αντιστοιχούν στις συνοριακές καμπύλες για το παράδειγμα του τριπλού υλικού (Σχήμα 6.1(Δεξιά)) είναι

$$MAT_{triple} = [PT_1 \quad PT_2 \quad PT_1 \quad PT_3 \quad PT_2]^T$$



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα ροής του κώδικα C-γλώσσας του Παραρτήματος Ε.

Αφού αναθέσει υλικά σε κάθε συνοριακή καμπύλη, ο κώδικας ξεκινά μια επανάληψη από τον πρώτο στον τελευταίο τύπο σκόνης. Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης μια μονοϋλική υποπεριοχή που θα καλυφθεί μόνο από τον αντίστοιχο τύπο σκόνης δημιουργείται μέσω δύο "μετώπων", ενός αριστερού και ενός δεξιού μετώπου. Έτσι, στην πρώτη επανάληψη, ο τύπος σκόνης 1 εναποτίθεται στη μονοϋλική υποπεριοχή που ορίζεται από το αριστερό μέτωπο #1 (LF1) και το δεξί μέτωπο #1 (RF1), στη δεύτερη επανάληψη, ο τύπος σκόνης 2 εναποτίθεται στη μονοϋλική υποπεριοχή που ορίζεται από το αριστερό μέτωπο #2 (LF2) και το δεξί μέτωπο #2 (RF2) κ.ο.κ., μέχρι να ολοκληρωθεί το στρώμα.

Το LF1 είναι, εξ ορισμού, η αριστερή κατακόρυφη γραμμή της BC1, ενώ το RF1 είναι ο γεωμετρικός τόπος των δεύτερων τομών σε κάθε τιμή της τεταγμένης $y_0 \in [y_{1,D}, y_{1,U}]$. Εξ ορισμού, το αριστερό μέτωπο κάθε επανάληψης συμπίπτει με το δεξιό μέτωπο της προηγούμενης, οπότε

$$LF_i \equiv RF_{i-1}$$

Το νέο δεξιό μέτωπο, RF2, αναπτύσσεται εξετάζοντας τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που βρίσκονται απειροελάχιστα κοντά στη δεξιά πλευρά του LF2. Σε κάθε τιμή τεταγμένης $y_0 \in [y_{1,D}, y_{1,U}]$, ο κώδικας μετακινεί κάθε σημείο του LF2 προς τα δεξιά κατά μια μικρή τιμή dx . Στη συνέχεια, το σημείο $\Delta(x_{LF_2}(y_0) + dx, y_0)$ εξετάζεται. Εάν αυτό είναι εσωτερικό σε μια περιοχή μονοϋλικού στην οποία έχει ανατεθεί το υλικό #2, τότε στο RF2 ανατίθεται η επόμενη τομή της τεταγμένης y_0 . Διαφορετικά, εάν το σημείο αυτό είναι εσωτερικό σε περιοχή μονοϋλικού οποιουδήποτε άλλου υλικού, το οποίο δεν πρόκειται να εναποτεθεί κατά τη διάρκεια αυτής της επανάληψης της διαδικασίας, τότε στο RF2 ανατίθεται το ίδιο σημείο που ανατίθεται στο LF2 στη συγκεκριμένη τιμή της τεταγμένης y_0 . Η διαδικασία αυτή ονομάζεται "έλεγχος εσωτερικότητας". Για να πραγματοποιηθεί, είναι απαραίτητο να εξεταστεί σε ποια συνοριακή καμπύλη είναι εσωτερικό το σημείο Δ , προκειμένου να του ανατεθεί ένα υλικό. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο "αλγόριθμος ρίψης ακτίνας", που προκύπτει από το θεώρημα καμπύλης Jordan [232].

Πρόκειται για ένα πολύ συνηθισμένο πρόβλημα στην υπολογιστική γεωμετρία, που αποσκοπεί στην εξέταση του κατά πόσον ένα σημείο βρίσκεται εντός, εκτός ή στο όριο ενός πολυγώνου. Για λόγους απλότητας, στην παρούσα εργασία ένα σημείο στο όριο θεωρείται εσωτερικό της καμπύλης ορίου και του αποδίδεται το ίδιο υλικό με το υλικό

της συνοριακής καμπύλης που περιγράφεται. Ο αλγόριθμος ρίψης ακτίνας ορίζει μια γραμμική "ακτίνα" που ξεκινά από το σημείο που εξετάζεται και κινείται απεριόριστα προς μια τυχαία, αλλά σταθερή κατεύθυνση στο επίπεδο του πολυγώνου. Αυτή η ακτίνα μπορεί να τέμνει ή να μην τέμνει το περίγραμμα του πολυγώνου. Εάν τέμνει το περίγραμμα του πολυγώνου περιττό (μονό) αριθμό φορών, τότε το σημείο είναι εσωτερικό του πολυγώνου, ενώ, εάν τέμνει το περίγραμμα του πολυγώνου άρτιο (ζυγό) αριθμό φορών, το σημείο είναι εξωτερικό του πολυγώνου. Για το λόγο αυτό ο αλγόριθμος αυτός είναι επίσης γνωστός ως αλγόριθμος "αριθμού τομών" ή αλγόριθμος "κανόνα ζυγού-μονού".

Είναι δυνατόν ένα σημείο να είναι εσωτερικό σε περισσότερες από μία συνοριακές καμπύλες. Εξ ορισμού, κάθε σημείο είναι εσωτερικό της BC1. Εάν ένα σημείο είναι εσωτερικό σε περισσότερες από μία συνοριακές καμπύλες, τότε το θεωρούμε εσωτερικό στην πιο εσωτερική συνοριακή καμπύλη. Για παράδειγμα, το κέντρο του κύκλου που είναι η BC2 (βλέπε Σχήμα 6.1, Σχήμα 6.2 και Σχήμα 6.3) είναι εσωτερικό της BC2. Ωστόσο, είναι επίσης εσωτερικό της BC3. Ως εκ τούτου, θεωρείται εσωτερικό της BC3 και του αποδίδεται ο τύπος σκόνης που αποδίδεται στην BC3.

Ο κώδικας του παραρτήματος E (ενότητα 8.5) χρησιμοποιεί την ακτίνα που ξεκινά από το υπό εξέταση σημείο και το συνδέει με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων $O(0,0)$. Έστω το σημείο που εξετάζεται και του οποίου ελέγχεται η εσωτερικότητα $\Delta(x_\Delta, y_\Delta)$, σύμφωνα με την ορολογία που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω. Η ακτίνα που ξεκινά από το Δ και οδεύει προς το $O(0,0)$ δίνεται από τη σχέση

$$(\varepsilon_{\Delta O}): y = \frac{y_\Delta}{x_\Delta} x$$

Για να εξεταστεί αν το σημείο Δ είναι εσωτερικό ή εξωτερικό σε μια συνοριακή καμπύλη, ας πούμε BC i (η i -οστή συνοριακή καμπύλη), ο κώδικας υπολογίζει κάθε τομή μεταξύ BC i και $\varepsilon_{\Delta O}$, επιλύοντας το ακόλουθο σύστημα.

$$(\Sigma_2): \left\{ \begin{array}{l} y = \frac{y_\Delta}{x_\Delta} x \\ y = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} x + \frac{y_j x_{j+1} - y_{j+1} x_j}{x_{j+1} - x_j} \end{array} \right\}$$

Δίνεται ότι δύο διαδοχικά σημεία της i -οστής συνοριακής καμπύλης είναι τα $A(x_j, y_j)$ και $B(x_{j+1}, y_{j+1})$, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Δεδομένου ότι, εξ ορισμού, τα x

και y είναι μη αρνητικά, δηλαδή το στρώμα βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο, και η ακτίνα (ΔO) ξεκινά από το Δ και κινείται μόνο προς χαμηλότερες τιμές x και y , οι μόνες αποδεκτές λύσεις του συστήματος είναι αυτές με

$$\begin{aligned} 0 &\leq x_{sol} \leq x_{\Delta} \\ &\text{και} \\ 0 &\leq y_{sol} \leq y_{\Delta} \end{aligned} \tag{6.4}$$

Εάν εντοπιστεί μια λύση και δεν ισχύει το κριτήριο τομής ακτίνων, βλέπε εξίσωση (6.4), σημαίνει ότι η λύση βρίσκεται στην πλευρά της ευθείας (ΔO) που εκτείνεται στο $+\infty$, επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη για τον έλεγχο εσωτερικότητας.

Αφού ο κώδικας ολοκληρώσει τον έλεγχο της εσωτερικότητας, αναθέτει το σωστό υλικό στο εξεταζόμενο σημείο και, εάν το υλικό που ανατέθηκε είναι αυτό που πρόκειται να εναποτεθεί κατά την τρέχουσα επανάληψη, τότε το νέο σημείο του δεξιού μετώπου που επιλέγεται για την τρέχουσα τιμή της τεταγμένης y_0 είναι το επόμενο από τα αποθηκευμένα σημεία τομής που υπολογίστηκαν με την επίλυση του συστήματος (Σ_1), αυξάνοντας την τιμή της τεταγμένης (βλέπε Πίνακα 6.1). Σε κάθε άλλη περίπτωση, το νέο δεξιό μετωπικό σημείο παραμένει το ίδιο με αυτό που ήταν κατά την προηγούμενη επανάληψη του κώδικα. Με αυτόν τον τρόπο, ο κώδικας καταφέρνει να υλοποιήσει τη μέθοδο "αδιαφανές τοίχωμα" που περιγράφηκε σε προηγούμενες Ενότητες.

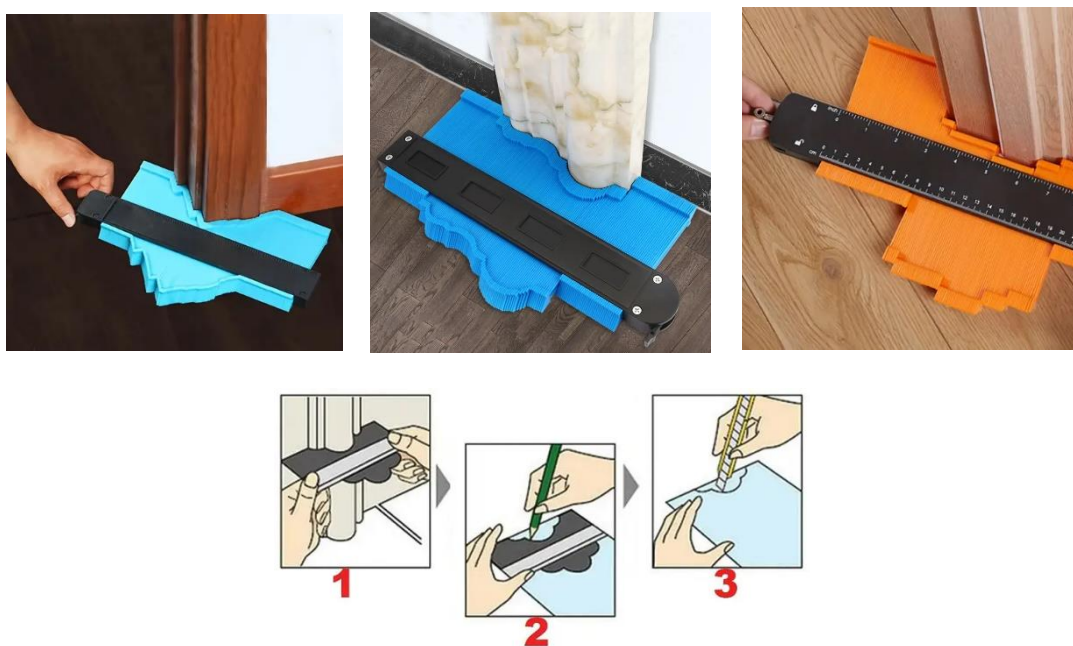
Ο κώδικας ολοκληρώνεται μόνο όταν, μετά από κάποια επανάληψη, το νέο δεξιό μέτωπο συμπίπτει με την κατακόρυφη γραμμή $x = x_{1,R}$, δηλαδή με το δεξιό όριο της BC1.

6.2 Φυσική Υλοποίηση-Ανάπτυξη Ιδιοσυσκευής Δοκιμών

Αφού καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο μια περιοχή πολλαπλών υλικών θα διαιρεθεί σε διάφορες υποπεριοχές ενός υλικού, προκειμένου η εναπόθεση να εκτελεστεί διαδοχικά, είναι απαραίτητο να καθοριστεί η διάταξη και η γεωμετρία της συσκευής που θα είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση της κατάτμησης της περιοχής. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 6.1, η μέθοδος αυτή βασίζεται στη λειτουργία των μετρητών περιγράμματος. Ο μετρητής περιγράμματος (γνωστός και ως μετρητής προφίλ) είναι ένα εργαλείο για την καταγραφή του σχήματος διατομής μιας επιφάνειας. Αποτελείται

από μια συστοιχία πολύ λεπτών "λεπιδών" από μέταλλο ή πλαστικό, οι οποίες διατηρούνται παράλληλες μεταξύ τους από ένα πλαίσιο, το οποίο τις διατηρεί επίσης στο ίδιο επίπεδο. Ολισθαίνοντας ανεξάρτητα παράλληλα η μία δίπλα στην άλλη, όταν πιέζονται πάνω σε ένα αντικείμενο, με κάθετη κατεύθυνση ως προς το πλαίσιο, είναι δυνατή η αναπαραγωγή και η αντιγραφή του σχήματος του εν λόγω αντικειμένου. Τέτοιες συσκευές χρησιμοποιούνται συνήθως στη ξυλουργική και σε έργα DIY. Το *Σχήμα 6.10* παρουσιάζει ορισμένα τυπικά παραδείγματα χρήσης του μετρητή περιγράμματος και δίνει γενικές οδηγίες για το πώς χρησιμοποιείται συνήθως για την αντιγραφή σχημάτων.

Αφού ολοκληρωθεί η τμηματοποίηση της επιφάνειας κατά τον άξονα x (βλέπε προηγούμενη ενότητα), κάθε μία από τις μονοϋλικές υποπεριοχές που ορίστηκαν πρέπει να καλυφθεί διαδοχικά από τους προκαθορισμένους τύπους σκόνης. Προκειμένου η σκόνη να εναποτίθεται μόνο στην υποπεριοχή που έχει οριστεί, πρέπει να αναπτυχθεί ένα σύστημα που θα απομονώνει φυσικά την υποπεριοχή με αποδεκτή ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός διαθέτει ένα όργανο διπλού μετρητή περιγράμματος, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 6.11*.



Σχήμα 6.10: Τυπική χρήση μετρητή περιγράμματος: (Πάνω) Παραδείγματα αντιγραφής της διατομής αντικειμένων, (Κάτω) Οδηγίες ορθής χρήσης.

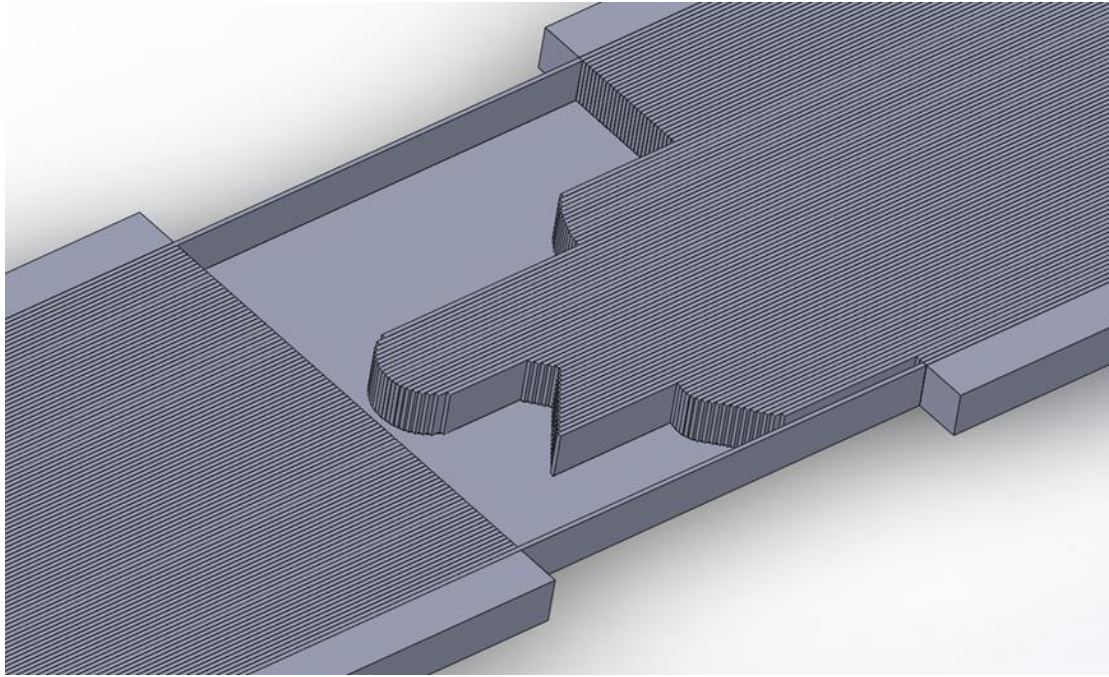
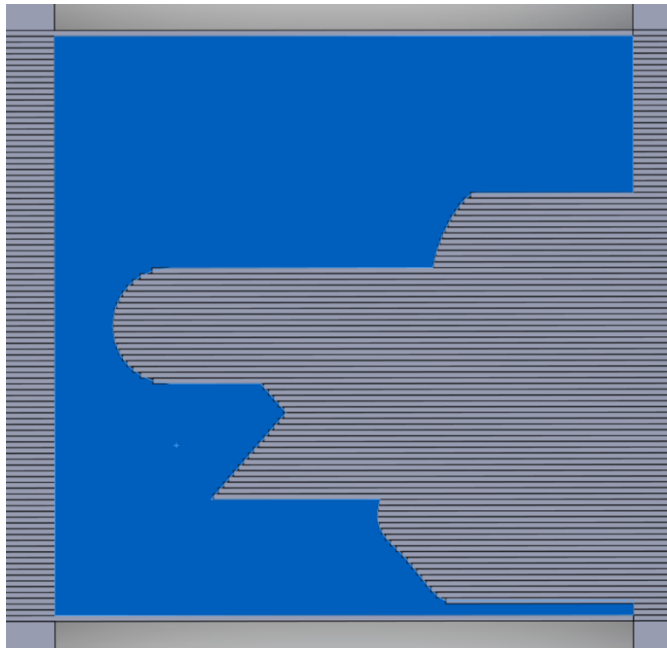
Αποτελείται από δύο συστοιχίες λεπτών λεπιδών που μπορούν να ολισθαίνουν παράλληλα και ανεξάρτητα η μία από την άλλη, κατά μήκος του άξονα x της κλίνης σκόνης. Η μία συστοιχία είναι τοποθετημένη στην αριστερή πλευρά της επιφάνειας του

τραπεζιού κατασκευής και η άλλη στη δεξιά πλευρά του τραπεζιού, με τα μέτωπα των λεπίδων να είναι στραμμένα προς τα μέσα, προς το κέντρο της κλίνης σκόνης, βλέπε *Σχήμα 6.11*.

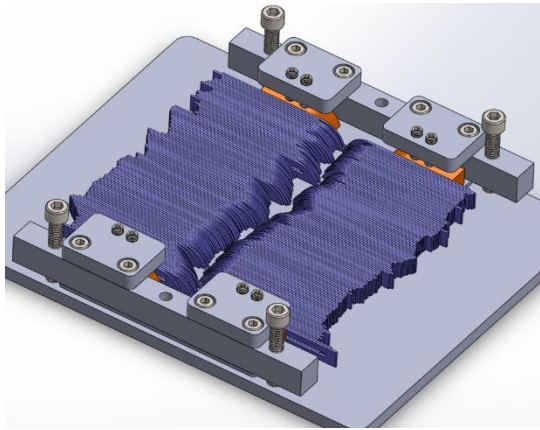
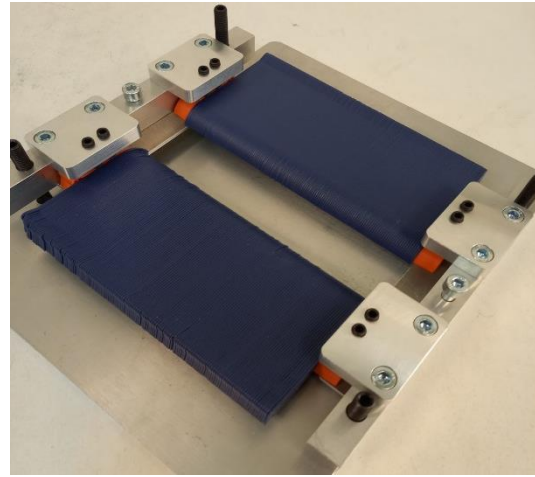
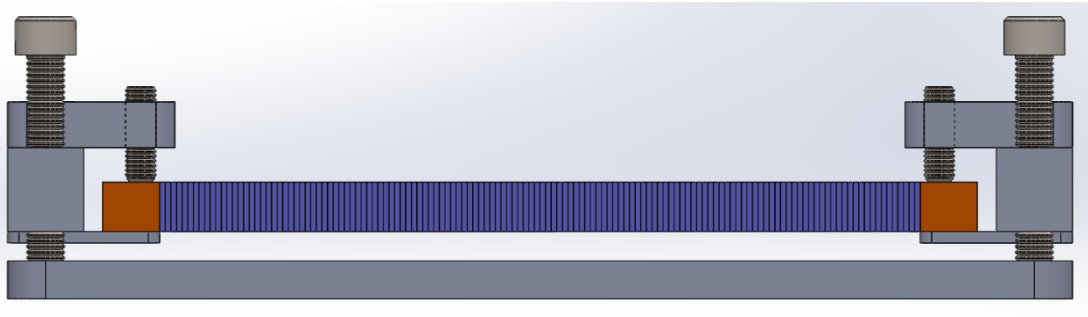
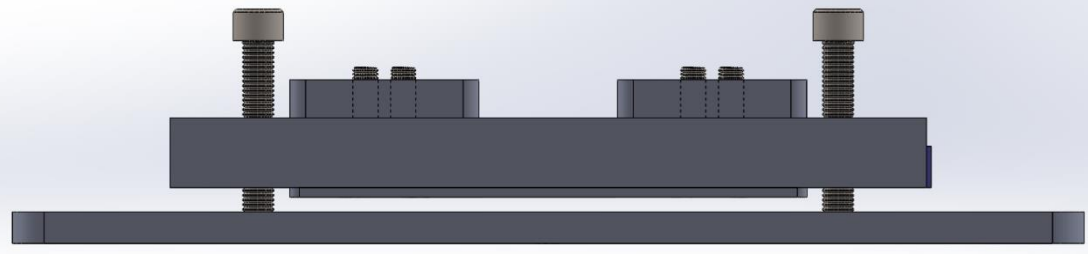
Κάθε λεπίδα των μετρητών μπορεί να κινείται ξεχωριστά και τοποθετείται στην προκαθορισμένη συντεταγμένη x από έναν βηματικό μικρο-κινητήρα που το σπρώχνει στη θέση του μέσω ενός ακροδέκτη (probe tip) ή με μια απλή μέθοδο γραναζιού και οδοντωτού κανόνα. Μόλις μια λεπίδα ωθηθεί στη θέση της, εμποδίζεται να κινηθεί προς τα πίσω μέσω μιας γραμμικής καστανίας, η οποία διαθέτει πολύ λεπτά δόντια, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα αναστροφής φοράς (backlash). Είναι επίσης δυνατό να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη μετακίνηση κάθε λεπίδας εφαρμόζοντας απλώς ροπή συγκράτησης σε αυτήν μέσω του κινητήρα που την τοποθέτησε αρχικά στο προκαθορισμένο σημείο. Αυτή η ροπή συγκράτησης είναι η πιο βιώσιμη λύση, δεδομένου ότι μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε στιγμής που η αυθόρμητη κίνηση της λεπίδας θα ήταν ανεπιθύμητη, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της κίνησης, όπως συμβαίνει στη λύση που βασίζεται στη γραμμική καστανία.

Καθίσταται σαφές ότι, με τη χρήση ενός οργάνου διπλού μετρητή περιγράμματος, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 6.11*, μπορούν να απομονωθούν οι μονοϋλικές υποπεριοχές που αναπτύσσονται με τη μέθοδο κατάτμησης κατά τον άξονα x που περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Οι λεπίδες πρέπει να είναι επαρκώς λεπτές όσον αφορά τόσο το μέγεθος του στρώματος όσο και το μέγεθος των χαρακτηριστικών που πρέπει να δημιουργηθούν στο στρώμα.

Η ιδιοσυσκευή που σχεδιάστηκε, βλ. *Σχήμα 6.12*, έχει δύο μετρητές περιγράμματος του εμπορίου τοποθετημένους ο ένας απέναντι στον άλλο και στερεωμένους σε μια πλάκα αλουμινίου. Τέσσερις κοχλίες λειτουργούν ως αποστάτες μεταξύ του κάτω μέρους των λεπίδων του περιγράμματος και της πλάκας εναπόθεσης. Στρέφοντας τους κοχλίες κατά 360° δεξιόστροφα, η διάταξη περιγράμματος ανυψώνεται κατακόρυφα κατά μια απόσταση ίση με το βήμα του σπειρώματος των κοχλιών. Αυτές οι βίδες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να διασφαλιστεί ότι το συγκρότημα περιγράμματος είναι παράλληλο με την πλάκα εναπόθεσης, εξασφαλίζοντας ένα ομοιόμορφο πάχος στρώματος σκόνης.

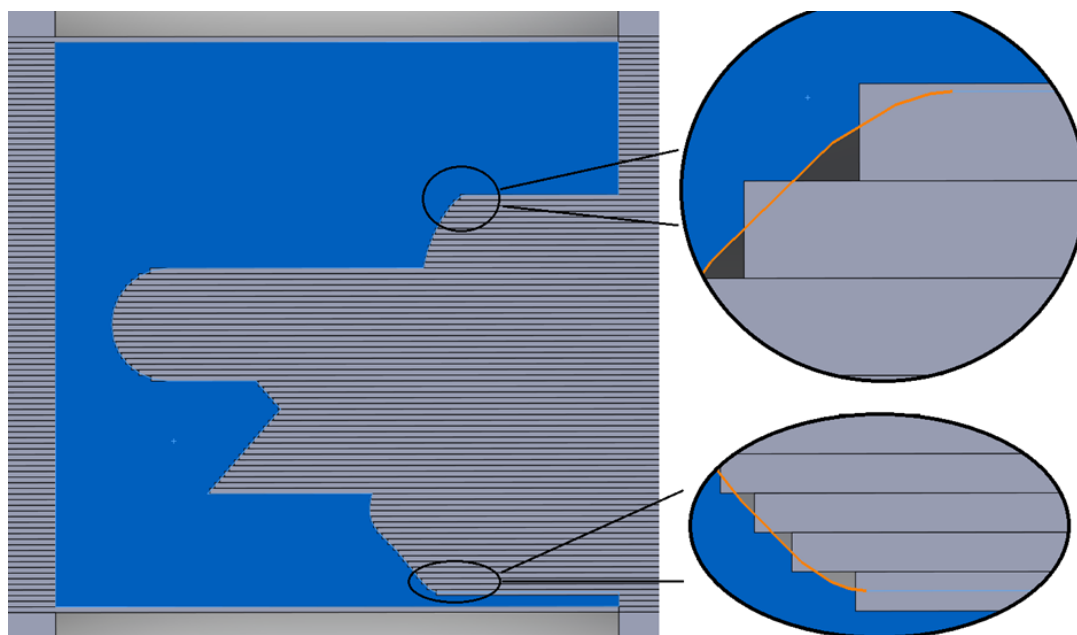
**a****b**

Σχήμα 6.11: Διάταξη διπλού μετρητή περιγράμματος. Τα μέτωπα σχηματίζονται μέσω σωστής τοποθέτησης λεπίδων. Φαίνεται η υποπεριοχή των Σχημάτων 6.6(a), 6.7(a).

**a****b****c****d**

Σχήμα 6.12: Φωτογραφία και σχέδια 3D CAD (SolidWorks™) της ιδιοσυσκευής πολυυλικής εναπόθεσης: **(a)** CAD ισομετρική όψη, **(b)** Φωτογραφία της κατασκευής; **(c)** Αριστερή πλάγια όψη, **(d)** Εμπρόσθια όψη.

Για την ιδιοσυσκευή που σχεδιάστηκε, τα πτερύγια είχαν πάχος (t_b) 1 mm, ωστόσο, η επαλήθευση του σχεδιασμού δοκιμάστηκε επίσης μέσω προσομοίωσης ΜΔΣ, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές σχεδιαστικές ατέλειες και να εξεταστούν τρόποι αντιμετώπισης πιθανών προβλημάτων για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του τελικού στρώματος. Η επαλήθευση της εναπόθεσης σκόνης πολλαπλών υλικών μέσω προσομοίωσης θα καλυφθεί στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 6.13: Σφάλμα λόγω πάχους λεπίδων στην τμηματοποίηση κατά τον x-άξονα.

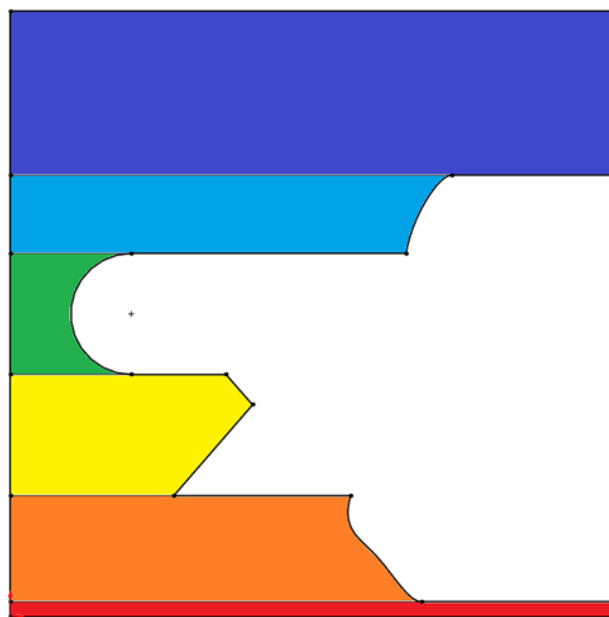
Δεδομένου ότι όλες οι λεπίδες έχουν το ίδιο πάχος και τα χαρακτηριστικά που πρέπει να σχεδιαστούν εντός του στρώματος δεν έχουν απαραίτητα πλάτος ίσο με ακέραιο πολλαπλάσιο του πάχους των λεπίδων, εισάγεται κάποιο σφάλμα στην αναπαράσταση των συνοριακών καμπυλών του στρώματος. Επιπλέον, δεδομένου ότι όλες οι λεπίδες είναι ορθογώνιες, οι συνοριακές καμπύλες προσεγγίζονται με κατακόρυφα και οριζόντια γραμμικά τμήματα. Τα κατακόρυφα, δηλαδή αυτά κατά μήκος του άξονα y , έχουν πάντα μήκος ίσο με το πάχος της λεπίδας, ενώ τα οριζόντια, δηλαδή αυτά κατά μήκος του άξονα x , δεν έχουν σταθερό μήκος, αφού το μήκος τους εξαρτάται από τη συνοριακή καμπύλη που στοχεύουν να προσεγγίσουν οι λεπίδες του μετρητή περιγράμματος. Αυτές οι επιδράσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 6.13.

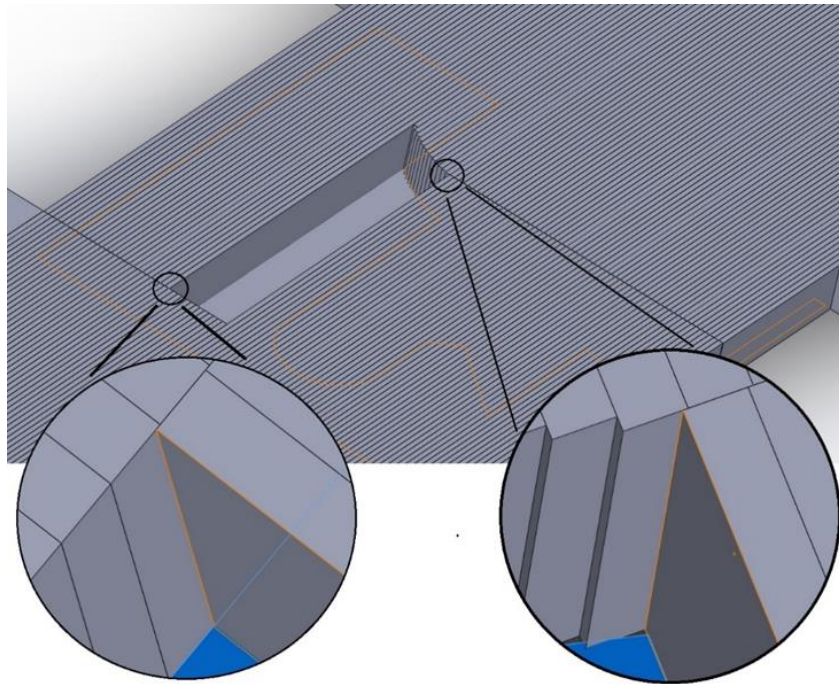
Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί αυτό το σφάλμα, είναι δυνατόν να διαιρεθεί περαιτέρω η υποπεριοχή του ενιαίου υλικού που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.13, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία που ονομάζεται "κατάτμηση κατά τον άξονα y ".

Η υποπεριοχή του Σχήματος 6.13, η οποία έχει οριστεί από τη διαδικασία τμηματοποίησης κατά τον άξονα x , έχει επτά οριζόντιες γραμμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14. Αυτές οι οριζόντιες γραμμές τη χωρίζουν περαιτέρω σε έξι νέες υποπεριοχές, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.14 με διαφορετικό χρωματισμό, ξεκινώντας από τη χαμηλότερη (κόκκινο) και προχωρώντας προς την υψηλότερη όσον αφορά την τιμή y (σκούρο μπλε).

Η κατάτμηση κατά τον άξονα y εισάγεται προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβεια της εναπόθεσης στις "σημαντικές οριζόντιες" γραμμές. Στο Σχήμα 6.14, η περιοχή έχει διαχωριστεί μέσω οριζόντιων γραμμών. Η επάνω και η κάτω οριζόντια γραμμή ανήκουν στο Box 1 (βλέπε Σχήμα 6.3), γεγονός που τις καθιστά τα όρια της κλίνης σκόνης. Είναι κοινή πρακτική να τοποθετείται το κέντρο του υπό κατασκευή τεμαχίου κοντά στο κέντρο της κλίνης πούδρας, ώστε να αποφεύγεται η γειτνίαση των τοιχωμάτων του με τα όρια της κλίνης πούδρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ποιότητα της κλίνης πούδρας μειώνεται δραστικά στην περιοχή αυτή. Έτσι, η κάτω (1η) και η άνω (7η) οριζόντια γραμμή ονομάζονται "μη σημαντικές" οριζόντιες γραμμές για την τρέχουσα κατάτμηση κατά τον άξονα y , ενώ οι άλλες (2η έως 6η) ονομάζονται "σημαντικές". Αυτό σημαίνει ότι το εισαγόμενο σφάλμα προσέγγισης είναι αποδεκτό στην 1η και 7η γραμμή, αλλά δεν είναι ανεκτό στις μεσαίες οριζόντιες γραμμές. Ωστόσο, το σφάλμα αυτό αποφεύγεται δίνοντας στη συστοιχία αριστερών και δεξιών λεπίδων τη δυνατότητα να κινούνται ελεγχόμενα κατά μήκος του άξονα y , παράλληλα με την κλίση σκόνης, ώστε να προσαρμόζεται η θέση τους. Η αριστερή συστοιχία λεπίδων είναι υπεύθυνη για τον περιορισμό της κάτω και της αριστερής πλευράς κάθε υποπεριοχής της κατάτμησης κατά τον άξονα y , ενώ η δεξιά συστοιχία λεπίδων περιορίζει τη δεξιά και την επάνω πλευρά της περιοχής που πρόκειται να καλυφθεί με σκόνη, βλέπε Σχήμα 6.14.

a





b



c

Σχήμα 6.14: Τμηματοποίηση κατά τον y -άξονα: **(a)** της υποπεριοχής του Σχήματος 6.13, **(b)** τοποθέτηση λεπίδων προς απομόνωση της 5^{ης} υποπεριοχής (γαλάζιο) του Σχήματος 6.14(a), **(c)** Κάτοψη της υποπεριοχής του Σχήματος 6.14(b).

Στην περίπτωση αυτή, εάν ο χρήστης κρίνει ότι η ακρίβεια του εν λόγω χαρακτηριστικού είναι εξαιρετικά σημαντική, παρέχεται η δυνατότητα να προχωρήσει στην κατάτμηση κατά τον άξονα y μετά την κατάτμηση κατά τον άξονα x . Αυτό, ωστόσο, θα δημιουργούσε 6 νέες υποπεριοχές μονοϋλικού από τη 1 υποπεριοχή

μονοϋλικού που ορίζεται στο *Σχήμα 6.11*, αυξάνοντας το χρόνο εναπόθεσης σκόνης κατά περίπου 6 φορές. Κατά την εκτίμηση του συγγραφέα, η ακρίβεια που κερδίζεται με αυτόν τον τρόπο δεν αντισταθμίζει τον χρόνο κατασκευής που χάνεται, επομένως το πείραμα και η προσομοίωση που ακολουθούν θα εκτελέσουν μόνο την κατάτμηση μιας επιφάνειας κατά τον άξονα x .

Η κατασκευασμένη ιδιοσυσκευή για εναπόθεση στρωμάτων πολλαπλών υλικών προβλέπει την εναπόθεση ενός ή περισσότερων στρωμάτων το ένα πάνω στο άλλο με τα εξής βήματα:

1. Οι δύο μετρητές περιγράμματος τοποθετούνται στο επιθυμητό ύψος περιστρέφοντας χειροκίνητα τις τέσσερις βίδες στις τέσσερις γωνίες του συγκροτήματος. Το ύψος είναι ίσο με το θεωρητικό πάχος του στρώματος. Το πάχος του πρώτου στρώματος είναι τουλάχιστον ίσο με 1 mm, δεδομένου ότι η πλάκα που έρχεται σε επαφή με το κάτω μέρος των μετρητών περιγράμματος έχει πάχος 1 mm. Τα επόμενα στρώματα μπορούν να έχουν οποιαδήποτε τιμή θεωρητικού πάχους επιλέξει ο χρήστης, περιστρέφοντας τους κοχλίες όπως επιθυμεί με βάση το βήμα του σπειρώματος.
2. Οι λεπίδες του αριστερού και του δεξιού μετρητή περιγράμματος τοποθετούνται στις κατάλληλες συντεταγμένες x χειροκίνητα ή, για λόγους ακρίβειας και παραγωγικότητας, μέσω ενός μηχανοκίνητου συστήματος γραναζιού και οδοντωτού κανόνα που μπορεί να μεταφέρει την κίνηση σε κάθε λεπίδα ξεχωριστά.
3. Η σκόνη κοσκινίζεται χειροκίνητα πάνω από τη συσκευή, έως ότου μια επαρκής ποσότητα σκόνης γεμίσει την πρώτη υποπεριοχή του στρώματος. Είναι δυνατή η εναπόθεση με κοσκίνισμα- ωστόσο, είναι απαραίτητη μια ελεγχόμενη συσκευή κοσκίνισης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο για το πείραμα αυτό η επανεπικάλυψη του στρώματος πραγματοποιήθηκε από τις λεπίδες του περιγράμματος.
4. Ο αριστερός μετρητής περιγράμματος μετακινείται προς το δεξιό μπροστινό μέρος και οι λεπίδες λειτουργούν ως επιστρωτήρας σκόνης. Η πλεονάζουσα ποσότητα σκόνης που παραμένει παγιδευμένη μεταξύ των δύο μετρητών περιγράμματος απομακρύνεται μέσω μιας μικρής ηλεκτρικής σκούπας (π.χ. αυτής που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό ηλεκτρολογίων υπολογιστών) και μιας βούρτσας, ενώ οι δύο συστοιχίες λεπίδων βρίσκονται σε επαφή. Η

- αφαίρεση της σκόνης πρέπει να γίνεται προσεκτικά, ώστε να μην διαταράσσεται το στρώμα που έχει εναποτεθεί.
5. Ο δεξιός μετρητής περιγράμματος επαναποθετείται για να αναπτύξει το νέο δεξιό μέτωπο και επαναλαμβάνεται ο κύκλος "κοσκίνισμα-διάστρωση-αφαίρεση περίσσειας σκόνης".
 6. Το βήμα 5 επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί ολόκληρη η στρώση.

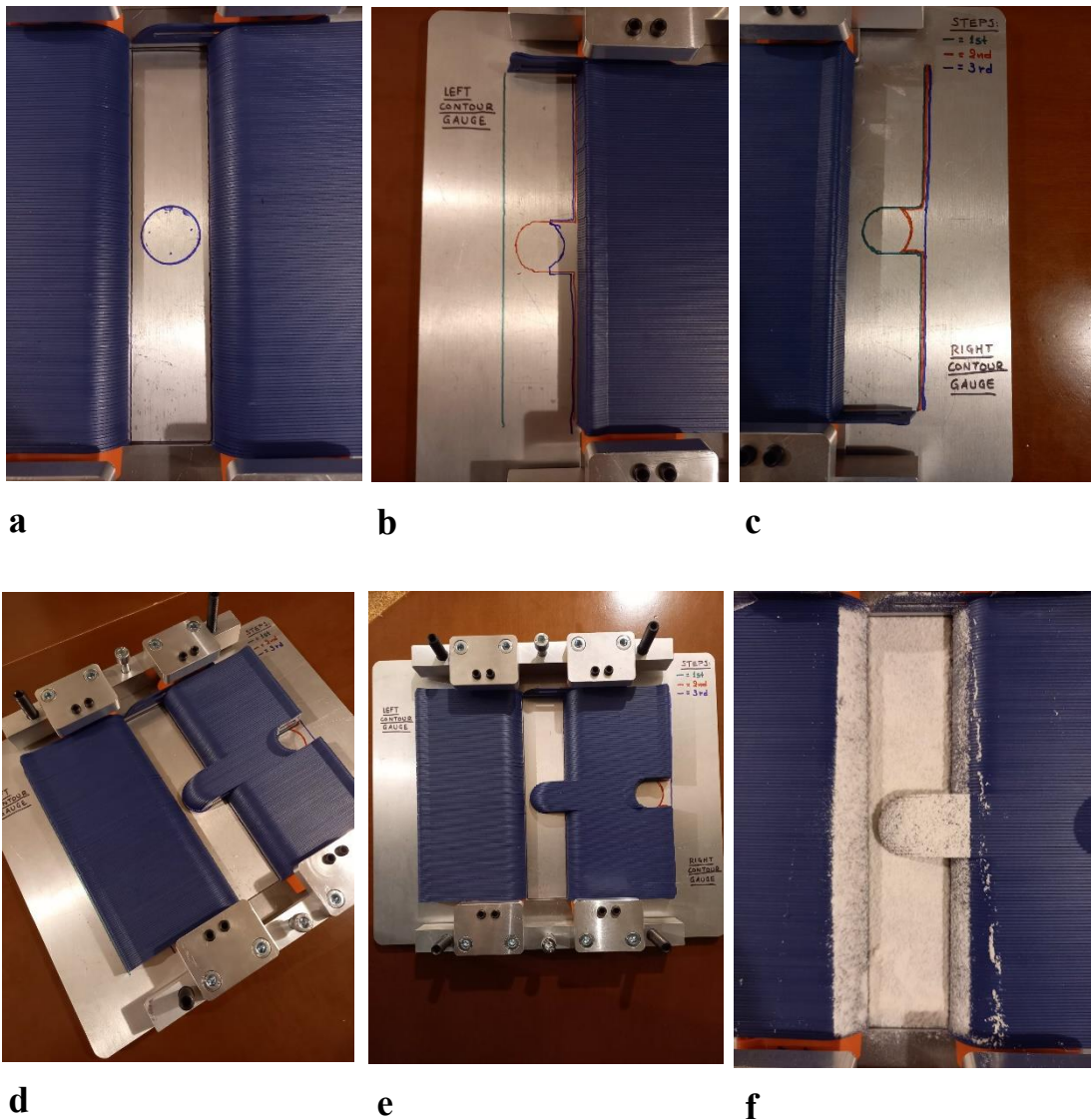
Οι αδυναμίες που εντοπίστηκαν στον προτεινόμενο σχεδιασμό της συσκευής είναι δύο: πρώτον, οι δύο μετρητές περιγράμματος βρίσκονται στο ίδιο ύψος. Αυτό σημαίνει ότι, κατά τη διάρκεια του βήματος εναπόθεσης, δεν υπάρχει δεξιό όριο για τη σκόνη, πράγμα που σημαίνει ότι η σκόνη μπορεί να δημιουργήσει ένα λόφο που θα κινηθεί προς τα δεξιά του προκαθορισμένου ορίου κατά τη διάρκεια της επανεπίστρωσής της. Αυτό εισάγει κάποιο ανεπιθύμητο σφάλμα στο τελικό όριο μεταξύ των μονοϋλικών περιοχών. Δεύτερον, η πλεονάζουσα ποσότητα σκόνης συσσωρεύεται στην κορυφή των δύο συστοιχιών λεπίδων, στον μικρό χώρο σχήματος V που δημιουργείται μεταξύ τους, ενώ οι λεπίδες του αριστερού και του δεξιού περιγράμματος του μετρητή περιγράμματος βρίσκονται σε επαφή, βλέπε *Σχήμα 6.15 (i) και (l)*. Η απομάκρυνση αυτής της σκόνης πρέπει να πραγματοποιείται χειροκίνητα ή αυτόματα με τη χρήση μιας μεθόδου αναρρόφησης σκόνης που είναι αρκετά ισχυρή ώστε να εξασφαλίζει την απομάκρυνση της περίσσειας σκόνης, αλλά και αρκετά προσεκτική ώστε να εγγυάται ότι δεν θα επηρεαστεί το εναποτιθέμενο στρώμα.

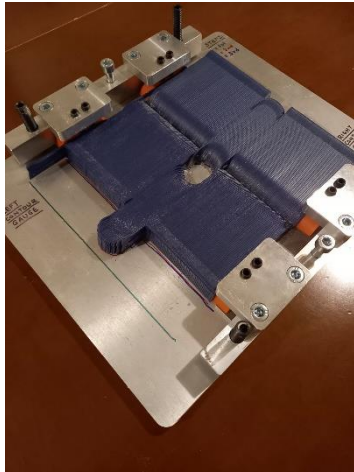
Επιπλέον, η τριβή μεταξύ των λεπίδων αυξάνεται όσο περισσότερο συσφίγγονται οι κοχλίες συγκράτησης, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να επιτευχθεί μια χρυσή τομή, η οποία να εξασφαλίζει ότι οι μετρητές περιγράμματος ασφαλιζονται στη θέση τους, χωρίς όμως να σφίγγουν υπερβολικά, καθιστώντας τις λεπίδες αμετακίνητες ή πολύ σφιγμένες ώστε να ολισθαίνουν. Επιπλέον, υπάρχουν κάποιες σχεδιαστικές προκλήσεις για τη μετατροπή αυτής της ιδέας σε μια πλήρως λειτουργική, αυτοματοποιημένη μηχανή εναπόθεσης σκόνης. Οι λεπίδες πρέπει να μπορούν να ολισθαίνουν ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Ωστόσο, η κίνηση μιας λεπίδας είναι δυνατόν να προκαλέσει μικρή μετατόπιση των λεπίδων που βρίσκονται δίπλα της, λόγω τριβής. Ως εκ τούτου, η τριβή μεταξύ των λεπίδων πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Επίσης, δεδομένου ότι οι λεπίδες θα έχουν πάχος περίπου 1 mm, είναι αρκετά δύσκολο να αναπτυχθεί ένα σύστημα όπου κάθε λεπίδα θα συνδέεται με διαφορετικό επενεργητή. Οι μικρο-κινητήρες θα μπορούσαν να λύσουν αυτό το πρόβλημα. Η ροπή συγκράτησης των κινητήρων θα

είναι επίσης απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ότι οι λεπίδες θα διατηρούν τη θέση τους ενώ άλλες, γειτονικές λεπίδες εξακολουθούν να βρίσκονται σε κίνηση, επιτρέποντας μεγαλύτερα επίπεδα τριβής μεταξύ των λεπίδων.

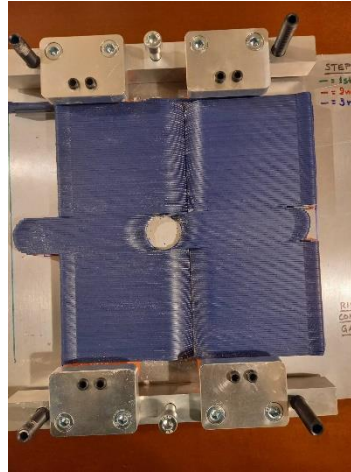
Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζονται τα στάδια του πειράματος εναπόθεσης σκόνης με τη χρήση της παρουσιαζόμενης ιδιοσυσκευής και το τελικό αποτέλεσμα του στρώματος σκόνης.

Οι διαστάσεις x-y του στρώματος είναι 40 mm και 200 mm και το κέντρο της κυκλικής συνοριακής καμπύλης ήταν το μέσο του ορθογώνιου στρώματος, δηλαδή το σημείο C(20 mm, 100 mm). Η διάμετρος της κυκλικής συνοριακής καμπύλης ήταν 30 mm.





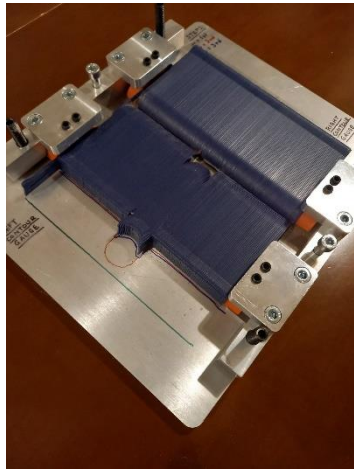
g



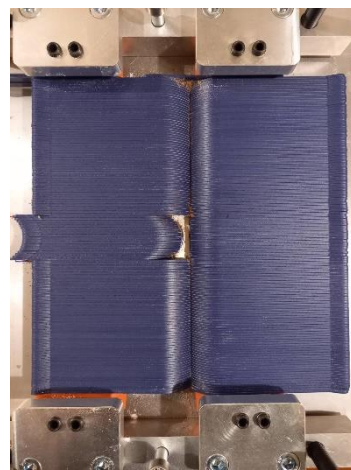
h



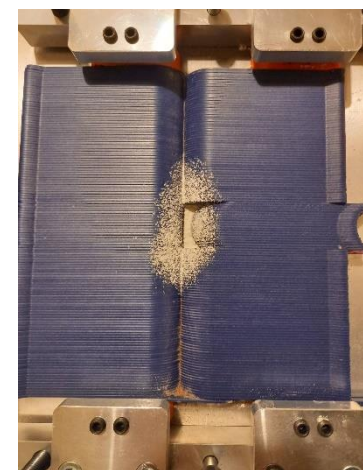
i



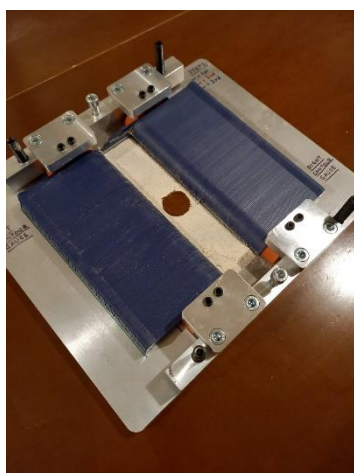
j



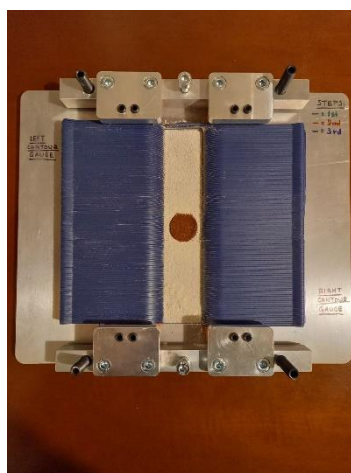
k



l



m



n



o

Σχήμα 6.15: Πείραμα εναπόθεσης πολυϋλικού στρώματος παρόμοιου μοτίβου με του Σχήματος 6.18. (a-b-c) Συνοριακές καμπύλες και μέτωπα, (d-e-f) Βήμα 1, (g-h-i) Βήμα 2, (j-k-l) Βήμα 3, (m-n-o) Τελικό στρώμα.

Η επαλήθευση της προσέγγισης των συνοριακών καμπυλών στο εναποτιθέμενο στρώμα μέσω της πειραματικής ιδιοσκευυής πραγματοποιήθηκε μέσω του μετασχηματισμού κύκλου Hough [233]. Ο μετασχηματισμός κύκλων Hough είναι μια μέθοδος για την ανίχνευση κύκλων σε εικόνες. Μπορεί να προσδιορίσει τόσο το κέντρο όσο και την ακτίνα ενός κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, ο μετασχηματισμός Hough είναι μια τεχνική εξαγωγής χαρακτηριστικών (σχημάτων και μορφών) που χρησιμοποιείται στην ανάλυση εικόνας, στην τεχνητή όραση και στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Στόχος του είναι να βρίσκει ατελείς περιπτώσεις αντικειμένων εντός μιας συγκεκριμένης κατηγορίας σχημάτων μέσω μιας διαδικασίας ψηφοφορίας. Ο κλασικός μετασχηματισμός Hough αναπτύχθηκε αρχικά για τον εντοπισμό γραμμών στην εικόνα, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση άλλων σχημάτων, όπως κύκλων ή ελλείψεων [234], [235].

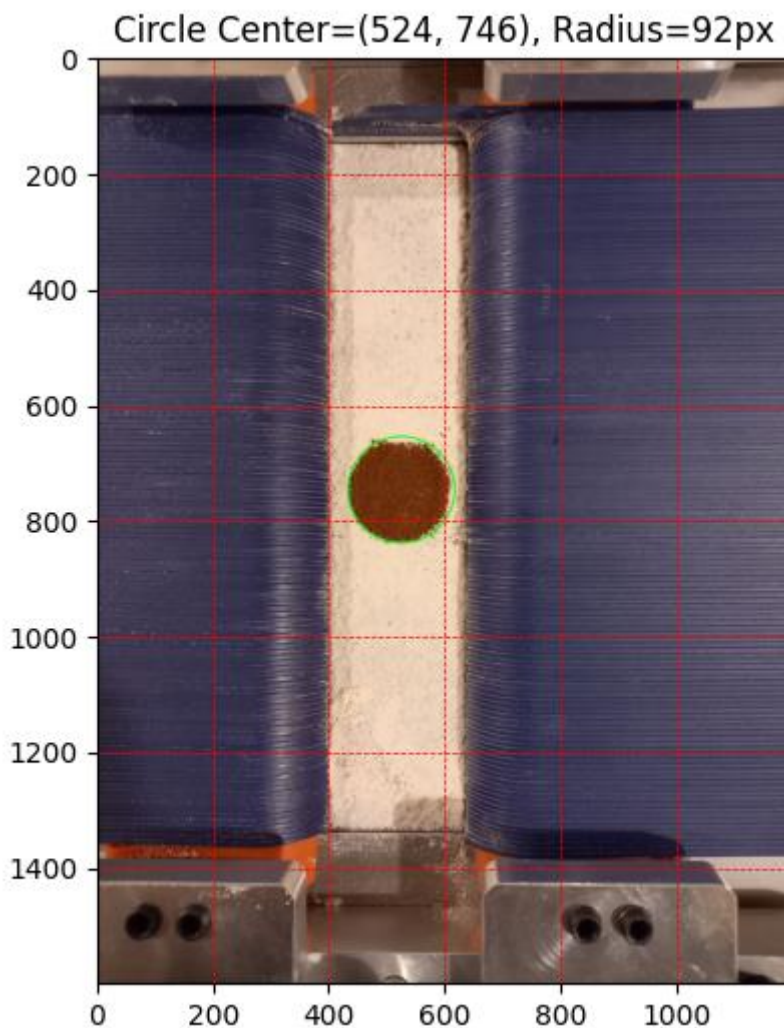
Με τη χρήση του μετασχηματισμού κύκλου Hough σε μια φωτογραφία του εναποτιθέμενου στρώματος πολλαπλών υλικών, δηλαδή στο *Σχήμα 6.15* (n), είναι δυνατόν να εντοπιστεί το κυκλικό μοτίβο της εναποτιθέμενης επιφάνειας και να συγκριθεί με τις συντεταγμένες του κέντρου και την ακτίνα της συνοριακής καμπύλης από την οποία προέρχεται. Είναι σημαντικό η φωτογραφία να λαμβάνεται από θέση ακριβώς πάνω από την επιφάνεια. Ιδανικά, ο άξονας του φακού πρέπει να διέρχεται από το κέντρο του κυκλικού μοτίβου. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι συντεταγμένες του κέντρου πρέπει να εκτιμηθούν, αυτό είναι δυνατό μόνο με οπτική προσέγγιση. Αυτή η τοποθέτηση συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που προέρχονται από την προοπτική. Η φωτογραφία λήφθηκε με φακό των ακόλουθων προδιαγραφών: Ανάλυση 48 MP, μέγεθος διαφράγματος f/2.0, εστιακή απόσταση 26 mm (ευρεία), μέγεθος αισθητήρα 1/2,0", μέγεθος pixel 0,8 μm, PDAF (αυτόματη εστίαση με ανίχνευση φάσης). Παρά το γεγονός ότι ο φακός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ευρυγώνιος, η φωτογραφία λήφθηκε από εστιακή απόσταση 500 mm, επομένως το κυκλικό χαρακτηριστικό καταλαμβάνει μόνο το 8% και το 6% του μήκους και του ύψους της φωτογραφίας αντίστοιχα. Αυτό καθιστά την προοπτική παραμόρφωση του κυκλικού χαρακτηριστικού της φωτογραφίας ελάχιστη.

Το αποτέλεσμα του κώδικα Python [233] που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο *Σχήμα 6.16*. Η κλίμακα pixel-to-mm μπορεί να υπολογιστεί με τη μέτρηση της απόστασης pixel μεταξύ των αντίθετων λεπίδων, η οποία είναι ίση με 40 mm από το σχεδιασμό. Είναι σημαντικό η μέτρηση αυτή να πραγματοποιείται για αντίθετα τοποθετημένες

λεπίδες κοντά στο κέντρο της καλυπτόμενης περιοχής και κοντά στο κυκλικό μοτίβο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που προκαλείται από την προοπτική. Υπολογίστηκε ότι τα 40 mm αντιστοιχούν σε 245 εικονοστοιχεία. Ως εκ τούτου, η κλίμακα είναι $Ratio = 0,163 \text{ mm/px}$.

Η διάμετρος του κύκλου είναι ίση με $2 \cdot 92 = 184 \text{ px}$. Επομένως, η διάμετρος του κύκλου είναι ίση με

$$D_{mm} = Ratio \cdot D_{px} \cong 30.041 \text{ mm}$$



Σχήμα 6.16: Αναγνώριση κυκλικού μοτίβου μέσω Hough Circle Transform.

η οποία είναι μόνο κατά 0,14% μεγαλύτερη από τη διάμετρο της κυκλικής συνοριακής καμπύλης. Οι αποστάσεις αυτές υπολογίζονται ως εξής: $d_{\text{vertical-top}} \cong 97,633 \text{ mm}$, $d_{\text{vertical-bottom}} \cong 96,163 \text{ mm}$, $d_{\text{horizontal-left}} \cong 20,735 \text{ mm}$ and $d_{\text{horizontal-right}} \cong 18,776 \text{ mm}$.

Αυτές είναι οι απόλυτες τιμές. Παρατηρείται ότι τα αθροίσματα των κατακόρυφων και οριζόντιων αποστάσεων είναι μικρότερα σε σύγκριση με το μήκος y και το μήκος x του στρώματος, δηλαδή 200 mm και 40 mm αντίστοιχα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο σφάλμα προοπτικής που εισάγει η κάμερα. Το σφάλμα αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη ως εξής:

$$x_c = \frac{d_{horizontal-left}}{(d_{horizontal-left} + d_{horizontal-right})} \cdot 40 \text{ mm} = 20,992 \text{ mm}$$

$$y_c = \frac{d_{vertical-bottom}}{(d_{vertical-bottom} + d_{vertical-top})} \cdot 200 \text{ mm} = 99,241 \text{ mm}$$

Με το $O(0,0)$ να τοποθετείται στο κάτω αριστερό σημείο του ορθογωνικού στρώματος.

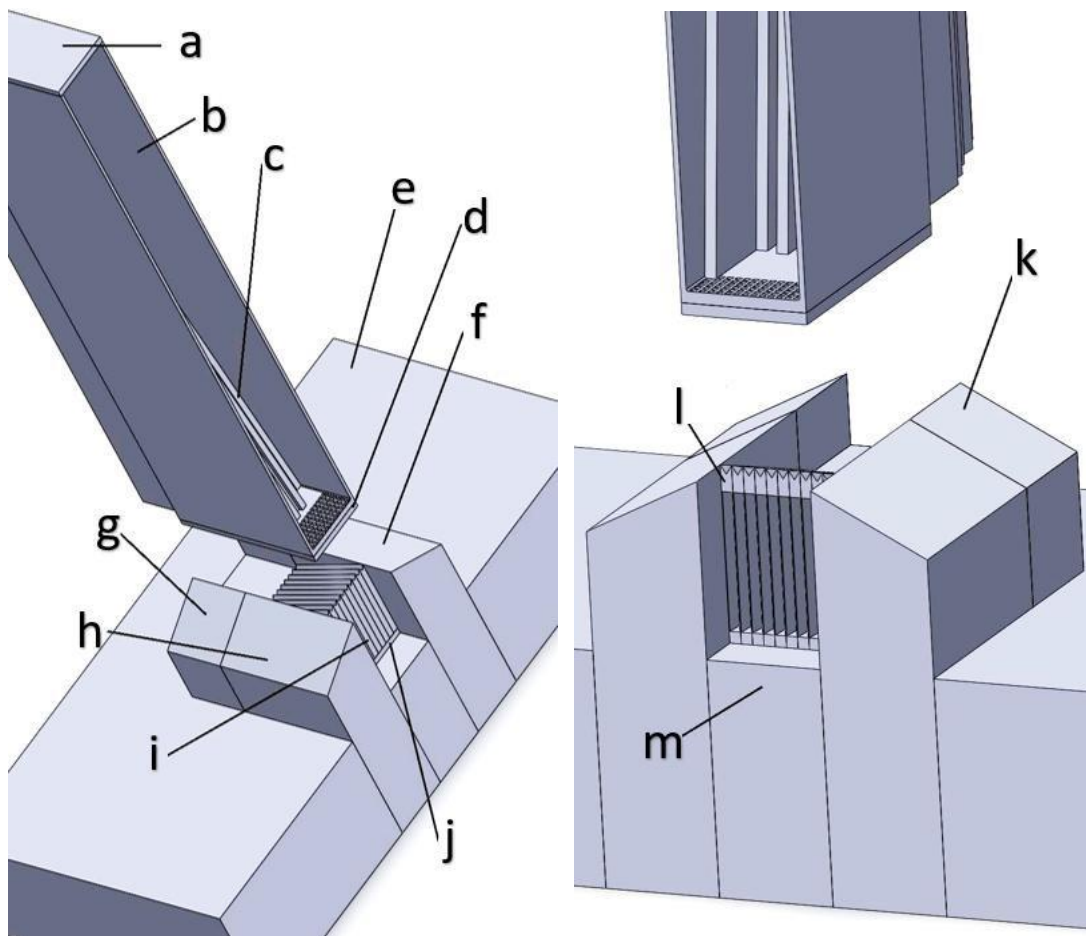
Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η τετμημένη και η τεταγμένη του κέντρου αποκλίνουν κατά (+) 4,96% και (-) 0,8% από τις αναμενόμενες τιμές (20 mm και 100 mm αντίστοιχα), όπως αυτές καθορίστηκαν από την κυκλική συνοριακή καμπύλη. Οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να αποδοθούν σε πολλαπλά σφάλματα, όπως η τοποθέτηση της κάμερας, η οποία μπορεί να είναι εκτός κέντρου ή ελαφρώς περιστραμμένη, εισάγοντας παραμορφώσεις της εικόνας. Η ανάλυση της εικόνας θα μπορούσε επίσης να εισάγει κάποιο σφάλμα. Επιπλέον, οι λεπίδες τοποθετήθηκαν σε κάθε σημείο με τέτοιο τρόπο ώστε το μέσο του μετώπου της λεπίδας να τέμνει την συνοριακή καμπύλη, επηρεάζοντας ενδεχομένως τη διάμετρο και τις συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου. Ωστόσο, αυτές οι αποκλίσεις δεν είναι απαγορευτικές και η μέθοδος φαίνεται αρκετά ελπιδοφόρα, ιδίως αφού ληφθεί υπόψη ότι η πειραματική ιδιοσυσκευή δεν παρέχει ούτε το βέλτιστο σχήμα λεπίδας, ούτε τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους εναπόθεσης, οι οποίες θα εξεταστούν μέσω προσομοίωσης ΜΔΣ (DEM) στην ενότητα 6.3.

6.3 Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού – Προσομοίωση με την Προτεινόμενη Σχεδίαση

Για να αντιμετωπιστούν οι ατέλειες που εντοπίστηκαν, σχεδιάστηκε εκ νέου το σύστημα διπλού μετρητή περιγράμματος. Ο σχεδιασμός που θα παρουσιαστεί θα εξηγηθεί λεπτομερώς. Τέλος, ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός θα χρησιμοποιηθεί για μια προσομοίωση εναπόθεσης στρώματος σκόνης πολλαπλών υλικών, ώστε να εξεταστεί το αποτέλεσμα και να εκτιμηθούν πιθανά σφάλματα της μεθόδου.

Το σχέδιο περιλαμβάνει, βλέπε Σχήμα 6.17:

- a. 1 καπάκι σφράγισης κόσκινου
- b. 1 κόσκينو σχήματος Π
- c. 20 κεκλιμένες λεπίδες για τον περιορισμό του κόσκινου (10 αριστερά και 10 δεξιά)
- d. 1 πλάκα μπλοκαρίσματος κόσκινου
- e. 1 πλάκα εναπόθεσης σκόνης
- f. 1 άνω μπλοκ περιορισμού σκόνης
- g. 1 αριστερό μπλοκ περιορισμού λεπίδων
- h. 1 κάτω μπλοκ περιορισμού σκόνης
- i. 10 λεπίδες εναπόθεσης σκόνης (αριστερός μετρητής περιγράμματος)
- j. 1 αριστερό μπλοκ περιορισμού σκόνης
- k. 1 δεξί μπλοκ περιορισμού λεπίδων
- l. 10 κοίλες λεπίδες (δεξιός μετρητής περιγράμματος)
- m. 1 δεξί μπλοκ περιορισμού σκόνης



Σχήμα 6.17: Αριστερή και δεξιά τομή του σχεδίου 3D CAD (SolidWorks™) του συστήματος εναπόθεσης πολυϋλικών στρωμάτων σκόνης.

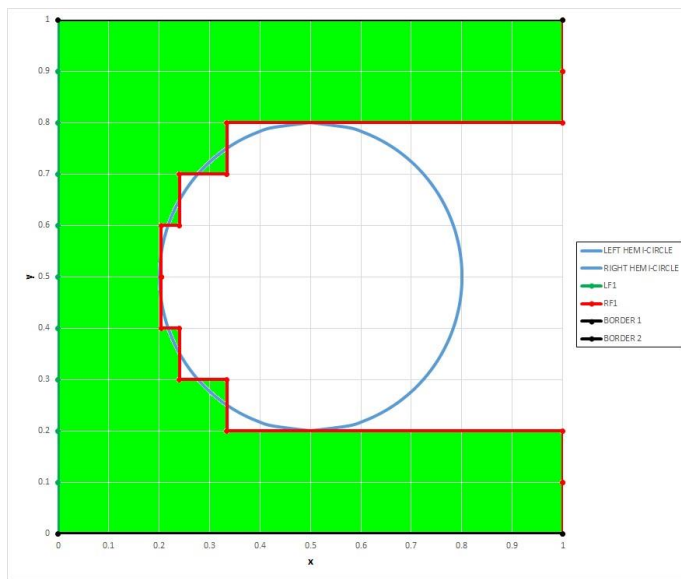
Η πλάκα εναπόθεσης σκόνης περιβάλλει τα 2 (αριστερά και δεξιά) μπλοκ περιορισμού λεπίδων καθώς και τα 4 (αριστερά, δεξιά, άνω και κάτω) μπλοκ περιορισμού σκόνης. Και τα έξι μπλοκ περιορισμού λειτουργούν ως έμβολα που ολισθαίνουν κάθετα ως προς την άνω επιφάνεια της πλάκας εναπόθεσης σκόνης. Αυτό εξασφαλίζει ότι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να απλώνει νέα στρώματα πάνω από τα προηγούμενα στρώματα σκόνης, με απλή ανύψωση όλων των εμβόλων, καθώς και του αριστερού και δεξιού περιγράμματος των λεπίδων κάθετα κατά το επιθυμητό θεωρητικό πάχος στρώματος.

Οι 10 λεπίδες εναπόθεσης σκόνης έχουν γωνία ελευθερίας 0° ($\theta_{rel}=0^\circ$), καθώς αποδείχθηκε ότι αυτό είναι το βέλτιστο επίπεδο για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του στρώματος. Τόσο οι λεπίδες εναπόθεσης σκόνης όσο και οι κοίλες λεπίδες έχουν (στο άνω μέρος τους) κλίση προς τα έξω, εξασφαλίζοντας ότι η σκόνη που πέφτει πάνω τους αντί για το εσωτερικό της μονοϋλικής υποπεριοχής κατά τη διαδικασία κοσκίνισης θα γλιστρήσει προς τα έξω και δεν θα «μολύνει» την επόμενη περιοχή του ενιαίου υλικού κατά την επανατοποθέτηση των λεπίδων στα νέα αριστερά και δεξιά μέτωπα. Οι κοίλες λεπίδες είναι κοίλες σε όλο το μήκος τους και το δάπεδό τους έχει ελαφρά κλίση προς τα έξω. Αυτό διευκολύνει τους αγωγούς, σκοπός των οποίων είναι να απομακρύνουν την περίσσεια σκόνης από το στρώμα. Η κίνηση των λεπίδων εναπόθεσης κατά τη διαδικασία επανεπίστρωσης αναγκάζει την περίσσεια σκόνης να περάσει μέσα από αυτούς τους αγωγούς των κοίλων λεπίδων. Έτσι, δημιουργείται ένα ομοιόμορφο στρώμα και προωθείται η οικονομία της σκόνης, καθώς η περίσσεια σκόνης μπορεί εύκολα να συλλεχθεί και να ανακυκλωθεί. Το ύψος του δαπέδου των κοίλων λεπίδων στην αριστερή πλευρά τους (η πλευρά που δημιουργεί το δεξιό μέτωπο) είναι 100 μm , ίσο με το θεωρητικό πάχος του στρώματος, και μειώνεται ελαφρώς προς τη δεξιά, ελεύθερη άκρη τους. Κατά την επανεπίστρωση, η κάτω επιφάνεια των λεπίδων εναπόθεσης είναι 100 μm υψηλότερα από τις κοίλες λεπίδες, προκειμένου να δημιουργηθεί η άνω επιφάνεια του νέου στρώματος. Η ταχύτητα εναπόθεσης είναι ίση με $u_{tr}=0,01$ m/sec και η κατακόρυφη δόνηση των λεπίδων εναπόθεσης έχει πλάτος $A_{vib}=5$ μm και συχνότητα $f_{vib}=2000$ Hz, καθώς αυτά είναι τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων εναπόθεσης με δονούμενη λεπίδα όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Taguchi που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.

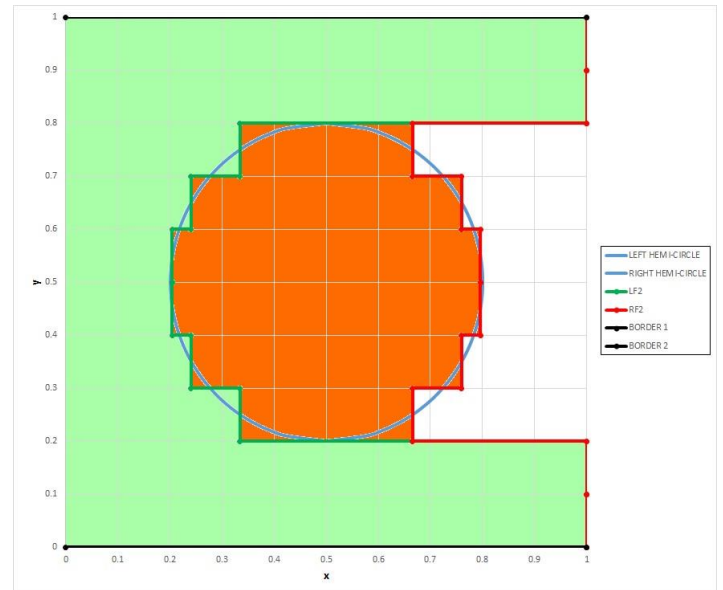
Κάθε λεπίδα έχει πάχος (t_b) 100 μm . Οι 10 λεπίδες έχουν συνδυασμένο πάχος 1 mm. Η περιοχή που θα καλυφθεί στην προσομοίωση είναι ένα τετράγωνο 1 mm x 1 mm, με θεωρητικό πάχος 100 μm , ίδιο με το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο δείγμα που

χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα Taguchi για την εναπόθεση σκόνης. Το μοτίβο που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση θα είναι ένας κύκλος ακτίνας 0,3 mm. Η προσέγγιση του κύκλου μέσω των λεπίδων και της τμηματοποίησης κατά τον άξονα x φαίνεται στο *Σχήμα 6.18*. Το φαινόμενο των σκαλοπατιών είναι ορατό, ωστόσο, δεδομένου ότι το κυκλικό χαρακτηριστικό είναι συγκρίσιμο σε μέγεθος με το πάχος των λεπίδων, αυτό είναι αναμενόμενο. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ λιγότερο εμφανές σε μεγαλύτερα χαρακτηριστικά, τα οποία είναι τουλάχιστον 2 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερα από το πάχος της λεπίδας (δηλ. χαρακτηριστικά μεγέθους περίπου 10 mm κατά μήκος του άξονα y, σε σύγκριση με τα 0,1 mm του πάχους της λεπίδας). Στο εν λόγω σχήμα, με ανοιχτά χρώματα (πράσινο και πορτοκαλί) απεικονίζονται οι μονοϋλικές υποπεριοχές που έχουν καλυφθεί σε προηγούμενα βήματα. Ομοίως, με φωτεινά χρώματα (πράσινο και πορτοκαλί) απεικονίζουμε τη μονοϋλική υποπεριοχή που πρόκειται να καλυφθεί κατά το τρέχον βήμα της τμηματοποίησης.

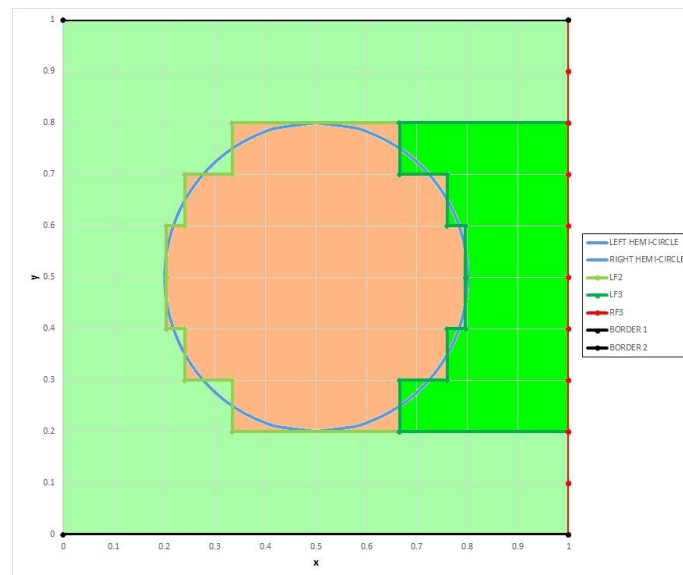
Το κόσκινο έχει σχήμα Π, έτσι ώστε να σφραγίζεται μέσω των κεκλιμένων (με κλίση προς τα μέσα) λεπίδων των δύο μετρητών περιγράμματος. Οι λεπίδες αυτές έχουν επίσης πάχος 100 μm και είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να αναπαράγουν πλήρως το σχήμα της μονοϋλικής υποπεριοχής που πρόκειται να καλυφθεί και μένει ακάλυπτη μέσω των λεπίδων εναπόθεσης και των κοίλων λεπίδων. Αυτό προάγει την οικονομία της σκόνης, καθώς η σκόνη κοσκινίζεται απευθείας στην επιθυμητή μονοϋλική υποπεριοχή. Εάν δεν συνέβαινε αυτό, μια μεγάλη ποσότητα σκόνης θα έπεφτε πάνω στις προς τα έξω κεκλιμένες λεπίδες εναπόθεσης και κοίλες λεπίδες και θα γλιστρούσε εκτός του στρώματος, μολυνόμενη ενδεχομένως από διαφορετικό τύπο σκόνης, καθιστώντας την άχρηστη προς επανάχρηση. Οι παράμετροι κοσκίνισης επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε η διαδικασία να παρέχει την απαραίτητη μάζα σκόνης κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας κοσκίνισης με τον ταχύτερο δυνατό ρυθμό. Επιπλέον, οι λεπίδες του κόσκινου έχουν κλίση 82° προς τα μέσα, γεγονός που μειώνει τη δύναμη συμπίεσης της σκόνης κατά την επανατοποθέτηση των λεπίδων. Εάν δεν συνέβαινε αυτό, η αυξημένη δύναμη συμπίεσης θα αύξανε την πιθανότητα σχηματισμού συσσωματωμάτων, καθιστώντας εντονότερα τα φαινόμενα απόφραξης του κόσκινου και μειώνοντας τελικά τη ροή μάζας της σκόνης κατά το στάδιο της γραμμικής κοσκίνισης ή ακόμη και μειώνοντας τη διάρκεια της φάσης γραμμικότητας.



a



b



c

Σχήμα 6.18: Τμηματοποίηση κατά τον x-άξονα του κυκλικού μοτίβου της προσομοίωσης: **(a)** Βήμα 1, **(b)** Βήμα 2, **(c)** Βήμα 3 της τμηματοποίησης.

Ας υποθεθεί ότι το επίπεδο της κατακαθισμένης σκόνης στο εσωτερικό του κόσκινου σε κάποια τυχαία θέση των κεκλιμένων λεπίδων του κόσκινου είναι ίσο με h_{packed} . Υπάρχουν 10 ζεύγη λεπίδων, κάθε ένα από τα οποία δημιουργείται από την αριστερή και τη δεξιά λεπίδα του κόσκινου που βρίσκονται αντικριστά. Κάθε ένα από αυτά τα ζεύγη λεπίδων δημιουργεί έναν όγκο V_i , $i=1$ έως 10, το σχήμα του οποίου είναι ένα εξωθημένο (extruded) τραπέζιο με μικρή βάση ίση με b_i και μεγάλη βάση ίση με B_i , $i=1$ έως 10. Το ύψος κάθε εξωθημένου τραπεζίου είναι ίσο με h_{packed} . Το πάχος του τραπεζοειδούς (κατά τη διεύθυνση της εξώθησης) είναι ίσο με το πάχος της λεπίδας, t_b (ίσο με 100 μm). Ως εκ τούτου, ισχύει η εξίσωση (6.5):

$$V_i = \left[\frac{(B_i + b_i)h_{packed}}{2} \right] t_b \quad (6.5)$$

Έτσι, ο συνολικός όγκος που καταλαμβάνει η καθιζάνουσα σκόνη μέσα στο κόσκινο είναι ίσος με

$$V_{packed} = \sum_{i=1}^{10} V_i = \frac{h_{packed} t_b}{2} \sum_{i=1}^{10} (B_i + b_i)$$

Η γωνία κλίσης των λεπίδων του κόσκινου είναι ίση με $\theta=82^\circ$. Έτσι, η μεγάλη βάση δίνεται από τη σχέση

$$B_i = b_i + \frac{2h_{packed}}{\tan\theta}$$

Τέλος, με αντικατάσταση, ο συνολικός όγκος που καταλαμβάνεται από την καθιζάνουσα σκόνη στο εσωτερικό του κόσκινου δίνεται από την εξίσωση (6.6).

$$V_{packed} = h_{packed} t_b \left(\frac{10h_{packed}}{\tan\theta} + \sum_{i=1}^{10} b_i \right) \quad (6.6)$$

Τα πειράματα Taguchi για το κοσκίνισμα αποκάλυψαν ότι όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο σκόνης στο κόσκινο, τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός ροής κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας της διαδικασίας κοσκίνισης. Με τη μείωση του χώρου που καταλαμβάνει η σκόνη μέσα στο κόσκινο κατά την επανατοποθέτηση των λεπίδων του κόσκινου, το επίπεδο της σκόνης θα ανέβαινε, γεγονός που θα μείωνε τον ρυθμό ροής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοσκίνισης. Για το λόγο αυτό, το αρχικό επίπεδο θα πρέπει να είναι ίσο με αυτό που δημιουργείται στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κόσκινο 1 mm x 1 mm που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα κοσκίνισης Taguchi από ένα κυβικό "εργοστάσιο σκόνης" πλευράς 1 mm. Αυτό σημαίνει ότι, το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο εργοστάσιο σκόνης που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία σκόνης πρέπει να έχει ύψος διαφορετικό από 1 mm, το οποίο πρέπει να υπολογιστεί. Δεν μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα αν πρέπει να είναι υψηλότερο ή μικρότερο από 1 mm, δεδομένου ότι: α) οι λεπίδες έχουν κλίση προς τα μέσα αντί να έχουν κατακόρυφο τοίχωμα, και β) μόνο ένα μέρος της ενεργού επιφάνειας του κόσκινου καλύπτεται τώρα. Για τον υπολογισμό του επιθυμητού ύψους του εργοστασίου χρησιμοποιείται μια απλή μέθοδος διατήρησης του όγκου.

Για το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κόσκινο με τετράγωνη βάση 1 mm x 1 mm που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα κοσκίνισης Taguchi, το ύψος του εργοστασίου πήρε 3 πιθανές τιμές, δηλαδή 0,5, 1,0 και 1,5 mm. Μετά την καθίζηση της σκόνης στο εσωτερικό του κόσκινου, ενώ το κόσκινο ήταν μπλοκαρισμένο και ακίνητο, μετρήθηκε το επίπεδο της σκόνης στις προσομοιώσεις. Επιπλέον, ο συνολικός όγκος και η συνολική μάζα των σωματιδίων της σκόνης μέσα στο κόσκινο εξήχθησαν επίσης από το λογισμικό προσομοίωσης DEM. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Ο πίνακας αναφέρεται στο κόσκινο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα Taguchi.

Πίνακας 6.2: Σύγκριση μάζας, όγκου, επιπέδου καθιζάνουσας και θεωρητικής πυκνότητας συσσώρευσης σκόνης για διαφορετικά ύψη κυβοειδούς εργοστασίου σκόνης.

h_{bf} (mm)	$m_{prt,TOTAL}$ (mg)	$V_{prt,TOTAL}$ (mm ³)	h_{packed} (μm)	PD_{th} (%)
0.5	0.3083	0.0807	147	54.898
1.0	0.6184	0.1619	290	55.828
1.5	0.9056	0.2371	410	57.829

Ανατρέχοντας στον Πίνακα 6.2, γίνεται σαφές ότι η συνολική μάζα των σωματιδίων, ο συνολικός όγκος των σωματιδίων και η στάθμη της καθιζάνουσας σκόνης στο κόσκινο είναι μεγέθη που συνδέονται γραμμικά με το ύψος του εργοστασίου σκόνης. Η στήλη θεωρητική πυκνότητα συσσώρευσης του Πίνακα 6.2 υπολογίζεται ως ο λόγος μεταξύ του συνολικού όγκου των σωματιδίων της σκόνης διαιρεμένου με τον όγκο του ορθογώνιου πρίσματος που ορίζεται από τη βάση του κόσκινου και τη στάθμη της καθιζάνουσας σκόνης ($V_{packed-Taguchi}=abh_{packed}$), όπου a, b είναι οι πλευρές της βάσης του κόσκινου που χρησιμοποιείται στις δοκιμές Taguchi και είναι και οι δύο ίσες με 1 mm.

$$PD_{th} = \frac{V_{prt,TOTAL}}{V_{packed}} \quad (6.7)$$

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η θεωρητική πυκνότητα συσσώρευσης παραμένει περίπου η ίδια, ανεξάρτητα από το ύψος του κυβοειδούς εργοστασίου σκόνης, βλέπε Πίνακα 6.2. Αυτό ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι η καθίζηση της σκόνης προωθείται αποκλειστικά από τις βαρυτικές δυνάμεις. Το αποτέλεσμα αν το μπλοκαρισμένο κόσκινο είχε δονηθεί μερικές φορές θα ήταν διαφορετικό. Η μέση θεωρητική πυκνότητα συσσώρευσης υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τριών τιμών του Πίνακα 6.2, οπότε λαμβάνουμε $PD_{th,ave}=56,185\%$.

Το κόσκινο διαθέτει τετραγωνικά ανοίγματα με γωνία ανάστροφης κωνικότητας 4° (θ_{tap}). Έχει αποδειχθεί ότι μια μεγαλύτερη γωνία κωνικότητας αυξάνει τη ροή μάζας σκόνης, βλέπε Σχήμα 5.10(a). Ταυτόχρονα, όμως, μειώνει τη συνολική μάζα σκόνης που κοσκινίζεται κατά το στάδιο του γραμμικού κοσκινίσματος. Έτσι, αποφασίστηκε να επιλεγεί το μεσαίο επίπεδο της γωνίας κωνικότητας, ώστε να μην αποτελεί παράγοντα κατά την επιλογή των άλλων τριών παραμέτρων.

Για τον υπολογισμό της αναγκαίας μάζας σκόνης χρησιμοποιήθηκε το βέλτιστο στρώμα εναπόθεσης από τα πειράματα Taguchi για την εξάπλωση. Η συνολική μάζα του βέλτιστου στρώματος που παρήχθη στα πειράματα εναπόθεσης με οδηγό λεπίδα Taguchi ήταν 0,205 mg (βλέπε Πίνακα 4.14 για τα χαρακτηριστικά του στρώματος). Με τη χρήση της αποτιθέμενης μάζας του εν λόγω στρώματος, συνάγεται ότι είναι απαραίτητο να επιτευχθεί απόδοση κοσκίνισης ισοδύναμη με εκείνη που επιτεύχθηκε στα πειράματα κοσκίνισης Taguchi που χρησιμοποίησαν επίπεδο $h_{bf}=1$ mm. Η απόδοση που επιτυγχάνεται με $h_{bf}=0,5$ mm δεν παρέχει την απαραίτητη μάζα σκόνης κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας, ανεξάρτητα από το ποιο είναι το επίπεδο των άλλων παραμέτρων κοσκίνισης, ενώ αυτή που επιτυγχάνεται με $h_{bf}=1,5$ mm μειώνει δραστικά το Q (mg/sec) του σταδίου γραμμικής κοσκίνισης, επιβραδύνοντας την όλη διαδικασία. Ωστόσο, για να επιτευχθεί απόδοση κοσκίνισης ίδια με αυτή που επιτυγχάνεται στο πείραμα κοσκίνισης Taguchi με $h_{bf}=1,0$ mm, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο καθιζάνουσας σκόνης στο εσωτερικό του συγκροτήματος κοσκίνισης, σε σύγκριση με αυτό που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του κόσκινου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση των δοκιμών Taguchi, δηλαδή $h_{\text{packed}}=290$ μm (βλ. Πίνακα 6.2).

Πίνακας 6.3: Υπολογισμός ύψους κυβοειδούς εργοστασίου σκόνης στα στάδια της πολυϋλικής εναπόθεσης.

	h_{packed} (mm)	$\sum_{i=1}^{10} b_i$ (mm)	V_{packed} (mm ³)	$V_{\text{prt,TOTAL}}$ (mm ³)	$m_{\text{prt,TOTAL}}$ (mg)	h_{bf} (mm)
STEP 1 (→)	0.29	5.557	0.1729	0.0972	0.371	0.599
STEP 2 (→)	0.29	2.886	0.0955	0.0536	0.205	0.321
STEP 3 (→)	0.29	1.557	0.0569	0.0320	0.123	0.183

Δεδομένου ότι η γεωμετρία των λεπίδων του κόσκινου εδώ, σε συνδυασμό με τη μεταβαλλόμενη θέση των λεπίδων δημιουργούν μια εντελώς διαφορετική γεωμετρία,

πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια διαφορετική τιμή h_{bf} (δεδομένου ότι το εργοστάσιο διατηρεί το σχήμα του ορθογώνιου πρίσματος - ίδια βάση τετραγώνου, με πλευρά 1 mm, αλλά με διαφορετικό ύψος).

Προκειμένου να διατηρηθεί ένα επίπεδο καθιζάνουσας σκόνης 290 μm μέσα στο κόσκινο στην αρχή κάθε βήματος κοσκίνισης, ο όγκος της καθιζάνουσας σκόνης υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης (6.6). Το άθροισμα των b_i για κάθε βήμα υπολογίζεται από τις οριζόντιες, κατά μήκος του άξονα x, αποστάσεις των λεπίδων που αντικρίζουν η μία την άλλη, στο πιο χαμηλό σημείο τους. Στη συνέχεια, θεωρώντας σταθερή θεωρητική τιμή πυκνότητας συσσώρευσης 56,185%, υπολογίζεται ο συνολικός όγκος των σωματιδίων της σκόνης. Στη συνέχεια, με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των στηλών h_{bf} και $V_{pit,TOTAL}$ του Πίνακα 6.2, υπολογίζεται το απαραίτητο ύψος του εργοστασίου σκόνης. Ας σημειωθεί ότι, το πλάτος και το μήκος του εργοστασίου σκόνης είναι και τα δύο ίσα με 1 mm. Παρά το γεγονός ότι το Βήμα 1 και το Βήμα 3 πρέπει να εκτελεστούν από το ίδιο κόσκινο και τον ίδιο τύπο σκόνης, αν προσθέταμε τα απαραίτητα ύψη των αντίστοιχων εργοστασίων για να γεμίσουμε το κόσκινο #1, θα καταλήγαμε σε πολύ υψηλότερες τιμές h_{packed} σε σχέση με το επιθυμητό 0,29 mm τόσο για το Βήμα 1 όσο και για το Βήμα 3, οδηγώντας σε διαφορετική απόδοση κοσκίνισης όσον αφορά την ταχύτητα ροής, τη μάζα που κοσκινίζεται και τη διάρκεια γραμμικότητας. Ως εκ τούτου, μετά την ολοκλήρωση του βήματος 1, το κόσκινο αδειάζει και ξαναγεμίζει με το ύψος του εργοστασίου του νέου κυβοειδούς να είναι ίσο με 0,183, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.3. Έτσι, οι τελικές τιμές προκειμένου να εφοδιαστούν τα κόσκινα με την κατάλληλη ποσότητα σκόνης είναι οι ακόλουθες:

$$h_{bf-SIEVE \#1 (Step 1)} = 0,599 \text{ mm}$$

$$h_{bf-SIEVE \#2 (Step 2)} = 0,321 \text{ mm}$$

$$h_{bf-SIEVE \#1 (Step 3)} = 0,183 \text{ mm}$$

Για λόγους απλότητας, και τα δύο υλικά της προσομοίωσης θα είναι σωματίδια αλουμίνας, όπως και στις προσομοιώσεις Taguchi για την εξάπλωση και το κοσκίνισμα (βλέπε κεφάλαιο 4 για τις προδιαγραφές της σκόνης και τα δεδομένα της προσομοίωσης), καθώς, για να χρησιμοποιήσουμε ένα διαφορετικό υλικό, θα πρέπει να εκτελέσουμε και πάλι ένα άλλο DoE Taguchi για τη βελτιστοποίηση τόσο της διαδικασίας εναπόθεσης όσο και του κοσκίνισματος, το οποίο δεν είναι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Το πρώτο υλικό, δηλαδή εκείνο που θα χρησιμοποιηθεί για την

κάλυψη των μονοϋλικών υποπεριοχών του βήματος 1 και του βήματος 3 (πράσινο χρώμα του Σχήματος 6.18) θα τροφοδοτηθεί στο υποσύστημα κόσκινου #1 σε δύο δόσεις, ενώ το δεύτερο υλικό, δηλαδή εκείνο που χρησιμοποιείται για την κάλυψη της μονοϋλικής υποπεριοχής του βήματος 2 (πορτοκαλί χρώμα του Σχήματος 6.18) θα τροφοδοτηθεί στο υποσύστημα κόσκινου #2.

Έχει ήδη εξηγηθεί γιατί επιλέχθηκε ένα κόσκινο με γωνία κλίσης 4° και ένα ισοδύναμο ύψος εργοστασίου σκόνης 1 mm. Για αυτά τα επίπεδα παραμέτρων και με τη χρήση των εξισώσεων παλινδρόμησης (εξισώσεις (5.3), (5.4) και (5.5)), υπολογίστηκαν η μάζα κατά τη διάρκεια της γραμμικότητας, η ροή μάζας κατά τη γραμμικότητα και η διάρκεια της γραμμικότητας για κάθε επίπεδο συνδυασμού συχνότητας και πλάτους δόνησης. Ο στόχος ήταν να παρέχεται επαρκής μάζα σκόνης για την κάλυψη κάθε μονοϋλικής υποπεριοχής, με τον ταχύτερο δυνατό ρυθμό, ενώ παράλληλα να διασφαλίζεται ότι αυτό συμβαίνει χωρίς να χρειάζεται να συνεχιστεί η διαδικασία κοσκίνισης μετά την ολοκλήρωση του σταδίου γραμμικότητας της κοσκίνισης. Με τη χρήση ενός υπολογιστικού φύλλου Excel, ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων κοσκίνισης προσδιορίστηκε να είναι ο ακόλουθος:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{vib} = 200 \text{ Hz} \\ A_{vib} = 20 \mu\text{m} \\ \theta_{tap} = 4^\circ \\ h_{bf} = 1.0 \text{ mm} \end{array} \right\}$$

Ο οποίος παρείχε τα ακόλουθα αποτελέσματα

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{lin}(h_{bf} = 1.0) = 0.3064 \text{ mg} \\ Q_{lin}(h_{bf} = 1.0) = 0.9904 \text{ mg/sec} \\ t_{lin}(h_{bf} = 1.0) = 0.3062 \text{ sec} \end{array} \right\}$$

Σε αυτή τη δοκιμή της DoE κοσκίνισματος-Taguchi, μπορούμε να ορίσουμε έναν κρίσιμο λόγο μάζας γραμμικότητας, LMR_{cr} , ως εξής:

$$LMR_{cr} = \frac{m_{lin}}{m_{prt,TOTAL}} \quad (6.8)$$

Ο LMR_{cr} είναι ένα χαρακτηριστικό της απόδοσης κοσκίνισης σε ορισμένο επίπεδο σκόνης, γωνία κωνικότητας και συνθηκών δόνησης του κόσκινου. Για τις επιλεγθείσες συνθήκες κοσκίνισης και με βάση τα δεδομένα που παρέχονται στον Πίνακα 6.2,

$$LMR_{cr} = \frac{0,3064}{0,6184} = 0,495$$

Η μάζα της σκόνης που περιέχεται εντός κάθε μονοϋλικής υποπεριοχής δίνεται από τη μάζα του βέλτιστου στρώματος εναπόθεσης ($m_{opt}=0,205$ mg) πολλαπλασιασμένη με το λόγο της επιφάνειας του τρέχοντος υλικού προς την επιφάνεια του βέλτιστου στρώματος διασποράς ($A_{opt}=1$ mm²). Το ποσό αυτό πολλαπλασιάζεται επίσης με έναν συντελεστή ασφαλείας για τον υπολογισμό της μάζας της σκόνης που κοσκινίστηκε, δεδομένου ότι, για να απλωθεί η σκόνη, είναι απαραίτητο να διασκορπιστεί περισσότερη σκόνη στην μονοϋλική υποπεριοχή και να "ξαφριστεί" η πλεονάζουσα σκόνη μέσω της επιπεδοποίησης που εκτελεί ο επιστρωτήρας. Επιπλέον, κατά το κοσκίνισμα, μέρος της σκόνης δεν θα καταλήξει στην επιθυμητή περιοχή, αλλά θα γλιστρήσει προς τα έξω πάνω από τις κεκλιμένες προς τα έξω λεπίδες εναπόθεσης ή τις κοίλες λεπίδες ή τα μπλοκ περιορισμού σκόνης (άνω και κάτω). Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητος ένας συντελεστής ασφαλείας μεγαλύτερος από 1, ώστε να διασφαλίζεται ότι επαρκής ποσότητα σκόνης θα καταλήξει στην επιθυμητή θέση.

$$m_{spread_step-i} = \left(\frac{A_{step-i}}{A_{opt}} \right) m_{opt}$$

$$S_f = \frac{m_{sieved_step-i}}{m_{spread_step-i}} > 1$$

Ομοίως, δεδομένου ότι η ενεργός περιοχή κοσκίνισης του κόσκινου περιορίζεται από ένα άλλο σύστημα διπλού μετρητή περιγράμματος, το οποίο αντιγράφει τέλεια την μονοϋλική υποπεριοχή που πρόκειται να καλυφθεί, ο ρυθμός ροής μάζας δίνεται από τη σχέση

$$Q_{step-i} = \left(\frac{A_{step-i}}{A_{opt}} \right) Q_{lin}$$

Η μέγιστη μάζα σκόνης που κοσκινίζεται κατά τη φάση της γραμμικής κοσκίνισης σε κάθε βήμα δίνεται πολλαπλασιάζοντας τη συνολική μάζα σκόνης με την οποία τροφοδοτήθηκε το κόσκινο με το LMR_{cr} που υπολογίστηκε παραπάνω, δηλαδή χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6.8) για κάθε βήμα της διαδικασίας. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας, καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση του κοσκίνισματος κάθε βήματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4. Οι υπολογιζόμενοι συντελεστές ασφαλείας για τα προτεινόμενα ύψη εργοστασίων σκόνης που παρατίθενται στον Πίνακα 6.3 δείχνουν ότι τα εργοστάσια

που σχεδιάστηκαν παρέχουν επαρκή ποσότητα σκόνης για την εναπόθεση στρώματος καλής ποιότητας, αφού και οι τρεις τους είναι πάνω από 1,5.

Πίνακας 6.4: Υπολογισμένη διάρκεια κοσκίνισματος και μάζα κοσκινισμένης σκόνης για κάθε βήμα της προσομοίωσης.

	Surface (mm ²)	Spread mass (mg)	Maximum sieved mass (in linearity) (mg)	Safety factor (SF)	Q (mg/sec)	t (sec)
Optimum layer (SCR-RMS)	1	0.205	0.3064	1.495	0.9904	0.3062
Step 1 (Material #1)	0.522	0.107	0.189	1.763	0.5173	0.364
Step 2 (Material #2)	0.322	0.066	0.102	1.545	0.3189	0.320
Step 3 (Material #1)	0.156	0.032	0.056	1.763	0.1542	0.364
Step 1+3 (Material #1)	0.678	0.139	0.245	1.763	-	-

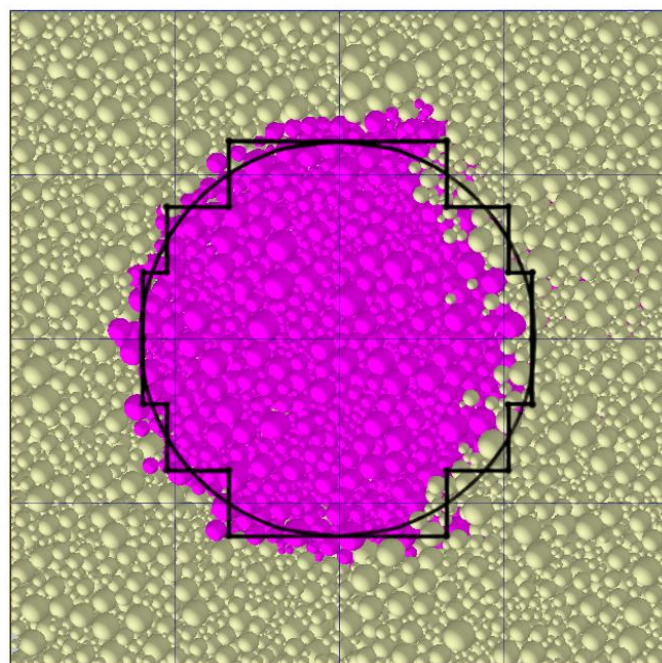
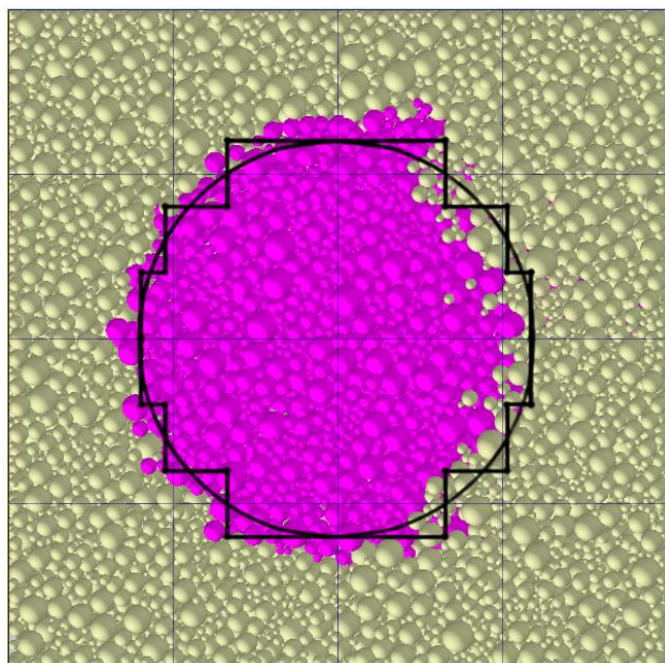
Αφού καθοριστούν οι συνθήκες εναπόθεσης, καθώς και οι διαστάσεις των εργοστασίων και οι διάρκειες και συνθήκες κοσκίνισης, η προσομοίωση μπορεί να εκτελεστεί σύμφωνα με τα ακόλουθα βήματα:

1. Ενεργοποίηση του εργοστασίου σκόνης #1 μέσα στο κόσκινο #1 (υλικό #1).
2. Τοποθέτηση των μετρητών περιγράμματος για το βήμα 1 (και οι λεπίδες εναπόθεσης και οι κοίλες λεπίδες, αλλά και οι κεκλιμένες λεπίδες του κόσκινου #1).
3. Ξεμπλοκάρισμα του κόσκινου #1 και δόνηση της συναρμογής του κόσκινου #1 για 0,356 δευτερόλεπτα.
4. Επανεκφραξη του κόσκινου #1 και επιπεδοποίηση με λεπίδες εναπόθεσης.
5. Αλλαγή του κόσκινου #1 με το κόσκινο #2 - τοποθέτησή του πάνω από το τετράγωνο του δείγματος και επανάληψη των σημείων 1-4 για το βήμα 2, δηλαδή εργοστάσιο #2 μέσα στο κόσκινο #2 (υλικό #2) με χρόνο δόνησης 0,320 sec.
6. Κατά τη διάρκεια του 5, το κόσκινο #1 αδειάζει και ξαναγεμίζει με το εργοστάσιο σκόνης #3 (δεν χάνεται χρόνος λόγω επικάλυψης των ενεργειών).

7. Αλλαγή του κόσκινου #2 με το κόσκινο #1 - τοποθέτησή του πάνω από το τετράγωνο του δείγματος και επανάληψη των σημείων 1-4 για το βήμα 3, με χρόνο δόνησης 0,396 δευτερόλεπτα.

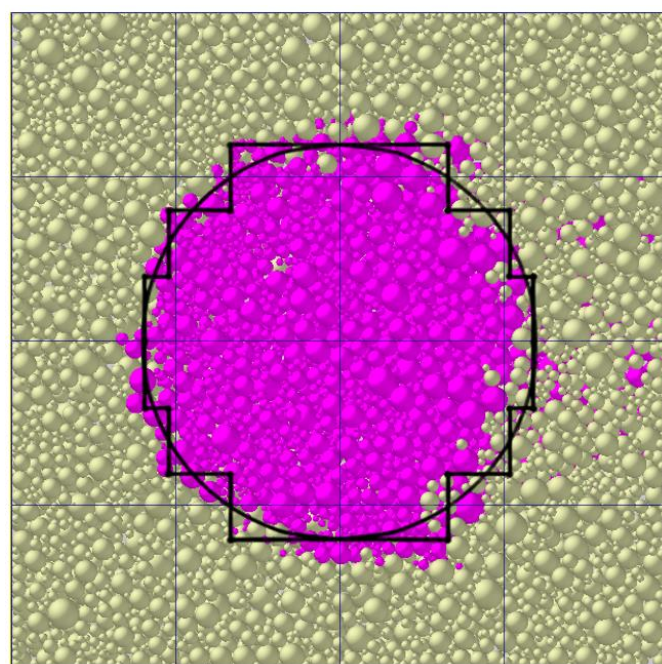
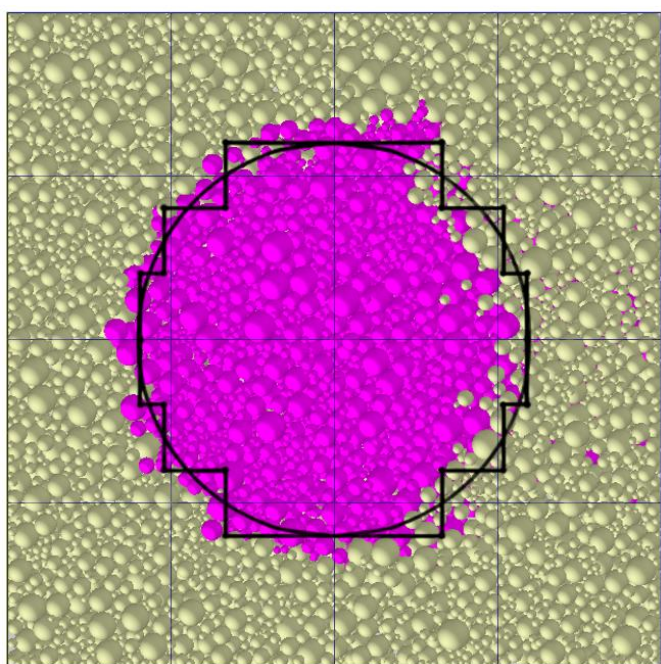
Η επανατοποθέτηση των λεπίδων σε κάθε βήμα πραγματοποιείται στις συντεταγμένες που αφορούν το βήμα που βρίσκεται σε εξέλιξη. Τα τελικά αποτελέσματα είναι ορατά στο *Σχήμα 6.19*, το οποίο παρέχει τομές με επίπεδα παράλληλα προς την πλάκα εναπόθεσης σε διάφορα ποσοστά ύψους του εναποτιθέμενου στρώματος. Το υλικό #1 απεικονίζεται με ανοιχτό κίτρινο χρώμα, ενώ το υλικό #2 απεικονίζεται με ματζέντα χρώμα. Οι εικόνες απεικονίζουν επίσης τον κύκλο και τα όρια της μονοϋλικής υποπεριοχής, όπως ορίζονται από τις ακμές των λεπίδων που δημιούργησαν το αριστερό και το δεξί μέτωπο για κάθε βήμα της διαδικασίας. Αυτό έγινε προκειμένου να συγκριθούν τα αναμενόμενα όρια των μονοϋλικών υποπεριοχών με τα πραγματικά μετά την εναπόθεση σκόνης.

Στο *Σχήμα 6.19*, γίνεται φανερό ότι τα δομημένα όρια μεταξύ των διαφόρων υλικών βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα προκαθορισμένα. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στα υψηλά τμήματα του στρώματος, δηλαδή αυτά που βρίσκονται πιο κοντά στην άνω επιφάνεια του στρώματος. Για τα τμήματα 100%, 87,5% και 75% (υποδιαγράμματα a, b και c) υπάρχει κάποιο σφάλμα, καθώς τα κυκλικά μοτίβα φαίνεται να είναι ελαφρώς μετατοπισμένα προς τα αριστερά σε σχέση με τα προκαθορισμένα όρια που εμφανίζονται με μαύρες γραμμές. Από το σημείο αυτό και μετά, το σφάλμα αυτό θα αποκαλείται σφάλμα αριστερής (Left) πλευράς του άνω (Top) τμήματος (σφάλμα T-L). Στις δύο πρώτες τομές, η γραμμική παρείσφρυση (dx_{inf}) της πορφυρής σκόνης στο εσωτερικό της πρώτης περιοχής ενιαίου υλικού (στο αριστερό ημικύκλιο της καμπύλης του κυκλικού ορίου) φθάνει σε τιμή περίπου 25 μm κατά μήκος του άξονα x, ενώ η παρείσφρυση της κίτρινης σκόνης στο εσωτερικό της δεύτερης μονοϋλικής υποπεριοχής (στο δεξιό ημικύκλιο της καμπύλης του κυκλικού ορίου) φθάνει σε τιμή περίπου 45 μm κατά μήκος του άξονα x. Οι τιμές αυτές εκτιμήθηκαν οπτικά, με αναφορά στο πλέγμα που εισήχθη στα σχήματα που απεικονίζουν τις τομές.



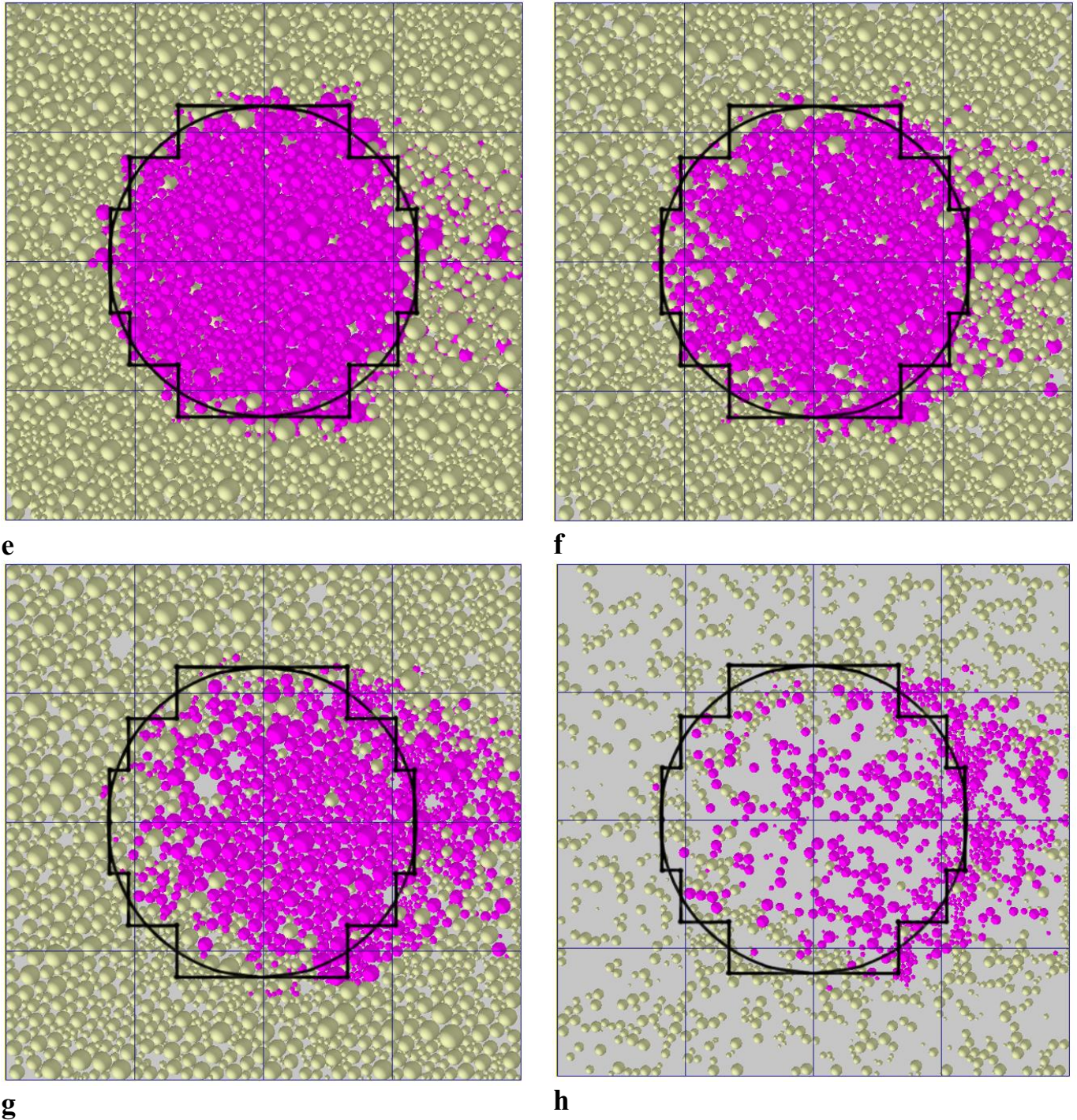
a

b



c

d



Σχήμα 6.19: Οριζόντιες τομές σε διάφορα ποσοστά ύψους του πολυϋλικού στρώματος που προκύπτει από την προσομοίωση: **(a)** 100%, **(b)** 87.5%, **(c)** 75%, **(d)** 62.5%, **(e)** 50%, **(f)** 37.5%, **(g)** 25%, **(h)** 12.5%.

Στο 62,5% και στο 50% (υποδιαγράμματα d και e), το σφάλμα αυτό έχει εξαφανιστεί και το κυκλικό μοτίβο βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τα επιθυμητά όρια. Ωστόσο, καθώς κινούμαστε προς τις χαμηλότερες τομές, δηλαδή αυτές που βρίσκονται πιο κοντά στο υπόστρωμα, φαίνεται να υπάρχει κάποιο σφάλμα, καθώς το κυκλικό μοτίβο μετατοπίζεται προς τα δεξιά σε σχέση με τις καμπύλες των μαύρων ορίων. Αρχικά,

στην τομή του 37,5% (f), φαίνεται να υπάρχουν μόνο μερικά σωματίδια που παρεισφρύνουν στη δεξιά γειτονική τους μονοϋλική υποπεριοχή, ενώ το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο εμφανές στο 25% και στο 12,5% (g και h αντίστοιχα). Στο εξής αυτό θα ονομάζεται σφάλμα κάτω (Bottom) τομής-δεξιάς (Right) πλευράς (σφάλμα B-R). Στις δύο τελευταίες τομές, η παρείσφρυση της κίτρινης σκόνης στο εσωτερικό του κύκλου (στο αριστερό ημικύκλιο της καμπύλης του κυκλικού ορίου) φτάνει σε τιμή περίπου 175 μm κατά μήκος του άξονα x, ενώ η παρείσφρυση της πορφυρής σκόνης στο εσωτερικό της τρίτης μονοϋλικής υποπεριοχής (στο δεξιό ημικύκλιο της καμπύλης του κυκλικού ορίου) φτάνει σε τιμή περίπου 200 μm κατά μήκος του άξονα x.

Τόσο το σφάλμα T-L όσο και το σφάλμα B-R έχουν κοινή αιτία. Αφού ολοκληρωθεί η επίστρωση μιας μονοϋλικής υποπεριοχής, οι κοίλες λεπίδες επανατοποθετούνται μετακινούμενες προς τη δεξιά πλευρά του τετραγώνου δείγματος, προκειμένου να ελευθερωθεί και να παρουσιαστεί η επόμενη μονοϋλική υποπεριοχή πάνω στην οποία θα κοσκινιστεί η επόμενη σκόνη. Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης, η δεξιά πλευρά της ήδη καλυμμένης μονοϋλικής υποπεριοχής, η οποία συγκρατείται κάθετα από τις κοίλες λεπίδες, καταρρέει υπό τις δυνάμεις της βαρύτητας, αποκτώντας μια κλίση. Η κίνηση αυτή είναι παρόμοια με εκείνη που κάνει η σκόνη στο πείραμα γωνίας πρανούς.

Οι Zhang et al. (2020) υπολόγισαν και διασταύρωσαν την πειραματική και την προσομοιωμένη γωνία πρανούς της σκόνης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, υπολογίζοντας τιμές 25,8° και 26,2° αντίστοιχα [71]. Υποθέτοντας ότι η γωνία πρανούς είναι ίση με 26,2°, η οποία είναι η τιμή με την οποία θα πρέπει να συμπίπτει η προσομοίωση, η υπολογισμένη παρείσφρυση του πρανούς θα πρέπει να είναι ίση με

$$dx_{inf-B-R} = \frac{h_{l,th}}{\tan(26,2^\circ)} = \frac{100 \mu\text{m}}{\tan(26,2^\circ)} = 203 \mu\text{m}$$

Αυτή η τιμή είναι σχεδόν η ίδια με εκείνη που φαίνεται στις τομές για τη παρείσφρυση της πορφυρής σκόνης στο εσωτερικό της τρίτης μονοϋλικής υποπεριοχής. Ωστόσο, η παρείσφρυση κίτρινης σκόνης στη δεύτερη μονοϋλική υποπεριοχή ήταν ελαφρώς μικρότερη. Η διαφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί από την ακόλουθη παρατήρηση. Η σχετική θέση των κοίλων λεπίδων σε σχέση με την εναποτιθέμενη μονοϋλική υποπεριοχή μπορεί να ενισχύει ή να μετριάξει το φαινόμενο της κλίσης. Όταν οι κοίλες λεπίδες μετακινούνται από το πρώτο στο δεύτερο δεξιό μέτωπο, απελευθερώνοντας την πρώτη μονοϋλική υποπεριοχή, οι λεπίδες με τη μικρότερη και τη μεγαλύτερη τιμή y (τεταγμένη) τοποθετούνται σε μεγαλύτερες τιμές x (τετμημένη), οπότε η κίνησή τους

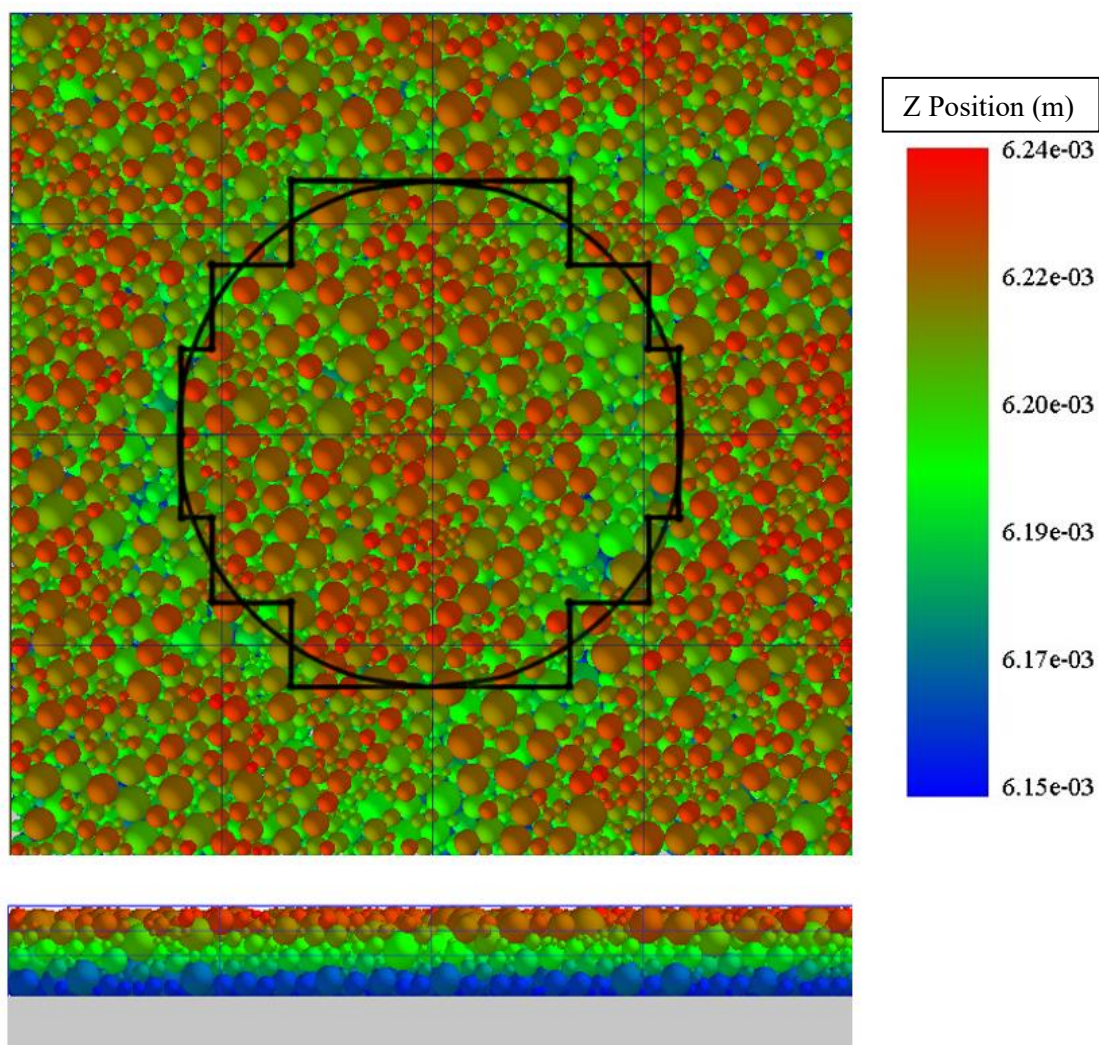
δεν ωθεί τα σωματίδια σκόνης περισσότερο προς τα δεξιά μέσω δυνάμεων τριβής κατά την επανατοποθέτηση των λεπίδων. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει όταν οι κοίλες λεπίδες επανατοποθετούνται από το δεύτερο στο τρίτο δεξιό μέτωπο, απελευθερώνοντας έτσι το δεξί μέτωπο της δεύτερης μονοϋλικής υποπεριοχής. Στην περίπτωση αυτή, οι εσωτερικές λεπίδες είναι αυτές που βρίσκονται στις μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ οι εξωτερικές λεπίδες αυτές που βρίσκονται στις μικρότερες αποστάσεις. Ως εκ τούτου, κατά την επανατοποθέτησή τους, οι εξώτερες κοίλες λεπίδες θα ασκήσουν δυνάμεις τριβής στη σκόνη που βρίσκεται σε επαφή με την πλευρά τους σε ελαφρώς μικρότερη ή μεγαλύτερη τιμή τεταγμένης, εάν η εν λόγω λεπίδα βρίσκεται πάνω ή κάτω από την τιμή $y=0,5$ mm αντίστοιχα. Αυτό θα αυξήσει την οριζόντια μετατόπιση παρείσφρυσης της σκόνης, ενισχύοντας το φαινόμενο.

Αυτό εξηγεί εύκολα το σφάλμα B-R. Το σφάλμα T-L δημιουργείται κατά το κοσκίνισμα της επόμενης μονοϋλικής υποπεριοχής. Η σκόνη που εισέρχεται στην επόμενη μονοϋλική υποπεριοχή διαπερνά το κενό που αφήνει στην κορυφή της κλίσης η σκόνη της προηγούμενης περιοχής μονοϋλικού κατά τη διαδικασία επανατοποθέτησης των κοίλων λεπίδων. Αυτό εξηγεί γιατί το σφάλμα T-L είναι λιγότερο έντονο σε σύγκριση με το σφάλμα B-R.

Είναι εξαιρετικά σημαντικό να σημειωθεί ότι τόσο τα σφάλματα T-L όσο και τα σφάλματα B-R εξαρτώνται αποκλειστικά από τις ρεολογικές ιδιότητες της σκόνης, δηλαδή τη γωνία πρανούς, και η τιμή της γραμμικής παρείσφρυσης εξαρτάται μόνο από το θεωρητικό πάχος του στρώματος. Αυτό σημαίνει ότι, αν και για μικρά χαρακτηριστικά, όπως ένας κύκλος ακτίνας 0,3 mm, το σφάλμα T-L και (κυρίως) το σφάλμα B-R φαίνεται να είναι σημαντικά, η ίδια απόλυτη τιμή σφάλματος θα παραμείνει ανεξάρτητα από το μέγεθος του χαρακτηριστικού, εφόσον χρησιμοποιείται ο ίδιος τύπος σκόνης και το ίδιο πάχος στρώματος. Αυτό το επίπεδο σφάλματος είναι ενδεικτικό των δυνατοτήτων της προτεινόμενης μεθόδου, καθώς, στην περίπτωση του σχεδιασμού ενός κύβου πλευράς 10 mm, το σφάλμα θα ήταν ίσο με 2% και μόνο στο 25% του βάθους κάθε στρώματος, αφού το σφάλμα B-R εμφανίζεται μόνο στις οριζόντιες τομές 12,5% και 25%.

Προτείνεται ότι, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή, θα πρέπει να μελετηθούν μέθοδοι ελαχιστοποίησης της γραμμικής παρείσφρυσης. Σε γενικές γραμμές, κάθε παράγοντας που επηρεάζει τη ρευστότητα της σκόνης μπορεί δυνητικά να επηρεάσει

τη γραμμική παρείσφρυση, καθώς θα επηρεαστεί η γωνία πρानούς. Για παράδειγμα, όσο μεγαλύτερο είναι το μέσο μέγεθος της σκόνης τόσο μικρότερη θα είναι η γραμμική παρείσφρυση, έως ότου μηδενιστεί πρακτικά, όταν το στρώμα αποτελείται μόνο από σωματίδια με διάμετρο ίση με το θεωρητικό πάχος του στρώματος, αφού στην περίπτωση αυτή δεν στοιβάζονται σωματίδια το ένα πάνω στο άλλο. Ωστόσο, μια πολύ λεπτόκοκκη σκόνη θα μπορούσε επίσης να παρουσιάσει μειωμένη γραμμική παρείσφρυση, λόγω της αυξημένης συνοχής μεταξύ των σωματιδίων.



Σχήμα 6.20: Κάτοψη και πλάγια όψη του παραγόμενου πολυϋλικού στρώματος από την προσομοίωση με την προτεινόμενη μέθοδο.

Είναι πιθανό αυτό να αυξήσει ελαφρώς την τοπική τραχύτητα της διεπιφάνειας μεταξύ των υλικών των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν, ωστόσο πρέπει να διερευνηθεί κατά πόσον αυτό θα επηρεάσει την πρόσφυση που θα επιδεικνύουν οι περιοχές διαφορετικών υλικών μεταξύ τους μετά τη στερεοποίηση των υλικών.

Πίνακας 6.5: Σύγκριση πολυϋλικού έναντι βέλτιστου μονοϋλικού στρώματος μέσω δονούμενης λεπίδας.

	u_{tr} (m/sec)	f_{vib} (Hz)	A_{vib} (μm)	θ_{rel} (deg)	LTD_{reg} (LTD_{sim})	SCR_{reg} (SCR_{sim})	$S_{q_{reg}}$ ($S_{q_{sim}}$)	Ssk_{sim}	Sku_{sim}
MULTI-MATERIAL	0.01	2000	5	0	- (21.6)	- (99.50)	- (13.9)	-1.440	6.907
UNI-MATERIAL OPTIMUM	0.01	2000	5	0	21.4 (22.1)	99.54 (99.33)	15.8 (15.7)	-1.543	6.530

(Σημείωση: Reg: “regression”; sim: “simulation”).

Ο Πίνακας 6.5 σε συνδυασμό με το Σχήμα 6.20 δείχνει πώς η εναπόθεση της στρώσης πολλαπλών υλικών συγκρίνεται με τη βέλτιστη στρώση ενός υλικού, όπως αυτή καθορίστηκε από την εξάπλωση Taguchi DoE του Κεφαλαίου 4. Παρατηρείται ότι η απόκλιση του πάχους του στρώματος πολλαπλών υλικών είναι στα 21,6 μm , ο λόγος κάλυψης της επιφάνειας είναι στο 99,5% και η μέση τετραγωνική ρίζα τραχύτητας στα 13,9 μm , όλα πολύ κοντά στις τιμές του βέλτιστου μονοϋλικού στρώματος επιφάνειας. Για τη δοκιμή εναπόθεσης σκόνης πολλαπλών υλικών δεν μπορούν να υπολογιστούν τιμές παλινδρόμησης, καθώς η διαδικασία της είναι εντελώς διαφορετική σε σύγκριση με τις δοκιμές που περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό Taguchi. Επιπλέον, οι δείκτες ποιότητας της λοξότητας (Ssk) και της κύρτωσης (Sku) είναι επίσης πολύ κοντά στις τιμές του βέλτιστου στρώματος μονοϋλικού, αποδεικνύοντας ότι η διαδοχική εναπόθεση σκόνης στις μονοϋλικές υποπεριοχές και το φαινόμενο της κλίσης που περιεγράφηκε προηγουμένως δεν επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα της τελικής επιφάνειας.

Η ανάλυση της διάρκειας των επιμέρους διαδικασιών για την προσομοίωση φαίνεται στον Πίνακα 6.6. Προκειμένου να εκτιμηθεί ποια θα ήταν η προσαρμοσμένη διάρκεια σε μια πραγματική διαδικασία εναπόθεσης στρώματος σκόνης πολλαπλών υλικών, πρέπει να επισημανθεί ότι οι διάρκειες κοσκίνισης δεν σχετίζονται με την επιφάνεια. Η επιφάνεια του κόσκινου θα καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του στρώματος που πρόκειται να εναποτεθεί και η στάθμη της σκόνης στο κόσκινο θα ρυθμίζεται σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές που παρέχονται στο παρόν κεφάλαιο, ώστε να διασφαλίζεται ότι οι χρόνοι κοσκίνισης θα παραμένουν οι ίδιοι. Ωστόσο, οι χρόνοι τοποθέτησης της λεπίδας, επιπεδοποίησης στρώσης μέσω λεπίδων εναπόθεσης και

εναλλαγής του κόσκινου θα είναι πολύ μεγαλύτεροι, αν ληφθεί υπόψη ότι τα κινούμενα μέρη θα πρέπει να διανύσουν πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις προκειμένου ένας πραγματικός μηχανισμός να καλύψει μια επιφάνεια η οποία θα είναι, π.χ., 100 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με το τετράγωνο δείγμα με πλευρά 1 mm που εξετάζεται σε αυτή την προσομοίωση. Ειδικά στην περίπτωση της διαδικασίας επάλειψης, η αύξηση της ταχύτητας θα προκαλέσει επιδείνωση της ποιότητας της επιφάνειας, όπως αποδείχθηκε από το DoE επάλειψης Taguchi. Ωστόσο, είναι ακόμη δυνατό να αντισταθμιστεί ελαφρώς αυτό με τη ρύθμιση άλλων παραμέτρων εναπόθεσης, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4. Ακόμα, στην περίπτωση αλλαγής κόσκινου ή τοποθέτησης λεπίδας, είναι δυνατή η σημαντική αύξηση της ταχύτητας, καθώς οι κινήσεις αυτές δεν έχουν καμία επίδραση στην ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος.

Πίνακας 6.6: Διάρκεια εναπόθεσης πολυϋλικού στρώματος για προσομοίωση και προσαρμοσμένη σε εναπόθεση σε πραγματικό χρόνο στρώματος κλιμακας 100:1.

	Stage	In-sim duration (sec)	Real-life adjusted duration (sec)
1	Filling sieve #1	0.1	0.5
2	Blade positioning-Step 1	0.01	0.1
3	Sieving-Step 1	0.364	0.364
4	Spreading-Step 1	0.1	10
5	Sieve switch	0.1	1
6	Filling sieve #2	0.1	0.5
7	Blade positioning-Step 2	0.01	0.1
8	Sieving-Step 2	0.320	0.320
9	Spreading-Step 2	0.06	6
10	Sieve switch	0.1	1
11	Blade positioning-Step 3	0.01	0.1
12	Sieving-Step 3	0.364	0.364
13	Spreading-Step 3	0.035	3.5
	TOTAL	1.673	23.848

Για να γίνει μια εκτίμηση του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εναπόθεσης σκόνης πολλαπλών υλικών ενός τετραγωνικού στρώματος πάχους 100 μm με πλευρά 100 mm (δηλ. 10 cm) με το ίδιο μοτίβο όπως στην προσομοίωση (κυκλική συνοριακή καμπύλη ακτίνας 30 mm), γίνονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

Ο χρόνος επιπεδοποίησης της σκόνης από τις λεπίδες εναπόθεσης πολλαπλασιάζεται επί 100, καθώς το μήκος κατά μήκος του άξονα εναπόθεσης (x) πολλαπλασιάζεται επί 100 (από 1 έως 100 mm), ενώ η πρόωση των λεπίδων εναπόθεσης παραμένει η ίδια. Ο

χρόνος κοσκίνισης παραμένει σταθερός, αφού η μόνη παράμετρος που αλλάζει είναι οι διαστάσεις του κόσκινου, οι οποίες δεν επηρεάζουν τη διάρκεια της κοσκίνισης. Ο χρόνος τοποθέτησης των λεπίδων (για τις κοίλες λεπίδες του δεξιού μετρητή περιγράμματος και για τους δύο μετρητές περιγράμματος με κεκλιμένες λεπίδες του κόσκινου) και ο χρόνος εναλλαγής των κόσκινων δεκαπλασιάζονται, όπως εκτιμά ο συγγραφέας, παρά το γεγονός ότι οι αποστάσεις που πρέπει να καλυφθούν πολλαπλασιάζονται επί 100, αφού η ταχύτητα των λεπίδων και η ταχύτητα μεταφοράς του κόσκινου μπορούν να αυξηθούν σε σχέση με την προσομοίωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν επηρεάζουν την ποιότητα της αποτιθέμενης επιφάνειας. Η μόνη εξαίρεση είναι οι δεξιές κοίλες λεπίδες, οι οποίες θα πρέπει να επιταχύνονται αργά μετά την κάλυψη μιας μονοϋλικής υποπεριοχής, προκειμένου να αποφευχθεί η αύξηση της γραμμικής τιμής παρείσφρυσης λόγω προσκόλλησης με σωματίδια σκόνης. Ωστόσο, μόλις το κατακόρυφο τοίχωμά τους διαχωριστεί από τα σωματίδια, οι κοίλες λεπίδες μπορούν να φτάσουν σε υψηλές τιμές ταχύτητας χωρίς καμία επίπτωση στην ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος. Τέλος, ο χρόνος πλήρωσης του κόσκινου, ο οποίος περιλαμβάνει την ισοπέδωση του εντός του κόσκινου στρώματος μέσω εφαρμογής δονήσεων στο σφραγισμένο κόσκινο πριν από το κοσκίνισμα (προς εξασφάλιση ομοιόμορφης στάθμης σε όλη την επιφάνεια του κόσκινου), πενταπλασιάζεται, σύμφωνα με εκτίμηση του συγγραφέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος που προτείνεται στις ενότητες 3.4.1 και 5.7, η οποία βασίζεται σε ένα τύμπανο δοσομετρητή σκόνης με κοίλα ανοίγματα, είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμη (διάμετρος κυλίνδρου, αριθμός και διάμετρος τυφλών ανοιγμάτων, αριθμός ελίκων, ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου κατά τη δοσομέτρηση), προκειμένου να επιτευχθεί ο επιθυμητός χρόνος πλήρωσης. Ωστόσο, η πλήρωση με κόσκινο και η επανατοποθέτηση των λεπίδων κόσκινου είναι βήματα που μπορούν να εκτελεστούν κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης της προηγούμενης μονοϋλικής υποπεριοχής ή κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του προηγούμενου στρώματος, συνεπώς δεν καθυστερούν τον συνολικό χρόνο κατασκευής του τεμαχίου.

Η τελική εκτίμηση είναι ένας χρόνος περίπου 24 δευτερολέπτων για ένα μόνο στρώμα. Το ίδιο μέγεθος στρώματος από ένα μόνο υλικό θα μπορούσε να εναποτεθεί βέλτιστα σε χρόνο περίπου 11 δευτερολέπτων (πλήρωση κόσκινου, κοσκίνισμα και εναπόθεση με ταχύτητα 0,01 m/sec).

Συνοψίζοντας, στη σχετικά απλή περίπτωση που μελετήθηκε, η διάρκεια της διαδικασίας εναπόθεσης σκόνης με δύο υλικά είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη με ένα υλικό. Ωστόσο, αυτή αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά με την πολυπλοκότητα του στρώματος πολλαπλών υλικών και το πλήθος των χαρακτηριστικών εντός του πολυϋλικού στρώματος. Προτείνεται να αναπτυχθούν νέοι αλγόριθμοι τεμαχισμού για να διατηρηθεί στο ελάχιστο η πολυπλοκότητα του στρώματος πολλαπλών υλικών ή να διασπαστούν τα πολύπλοκα σχέδια πολλαπλών υλικών σε περισσότερα από ένα, απλούστερα στοιχεία πολλαπλών υλικών τα οποία πρόκειται να συναρμολογηθούν, ώστε να μειωθεί τόσο ο αριθμός των στοιχείων όσο και να διατηρηθεί ο χρόνος κατασκευής εντός αποδεκτών ορίων. Η σωστή τοποθέτηση και προσανατολισμός των εξαρτημάτων στον τρισδιάστατο τομέα είναι επίσης απαραίτητη, προκειμένου να απλοποιηθούν οι συνοριακές καμπύλες και να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των μονοϋλικών υποπεριοχών μέσα σε κάθε στρώμα. Οι νέες μελέτες θα πρέπει να επικεντρωθούν στον προσδιορισμό των απαραίτητων χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων που θα πρέπει να κατασκευαστούν μέσω ΣΚΠ πολλαπλών υλικών και να επιλέξουν αυτά που θα δημιουργήσουν τα περισσότερα οφέλη χωρίς να θυσιάσουν τον χρόνο κατασκευής πέραν κάποιου επιτρεπτού ορίου.

7 *Επίλογος*

7.1 Επιτεύγματα και Περιορισμοί

Εκτός από τη λεπτομερή συζήτηση των ευρημάτων που παρέχεται σε κάθε επιμέρους κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, στη συνέχεια παρατίθεται μια σύνοψη των θεμάτων που αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς στο σύνολο της εργασίας αυτής και των σχετικών περιορισμών.

Το πρώτο ζήτημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η έλλειψη εκτεταμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης με βάση την εξάπλωση σκόνης για την ΠΚ με βάση τη ΣΚΠ. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάστηκε είναι ολοκληρωμένη, επικαιροποιημένη και ακολουθεί μια διαδοχική σύνδεση μεταξύ των παραμέτρων της διεργασίας διασποράς σκόνης, των δεικτών ποιότητας στρώματος σκόνης (PLQIs) σε συνδυασμό με τους τρόπους παρακολούθησής τους και των δεικτών ποιότητας τελικού τεμαχίου (FPQIs). Με αυτόν τον τρόπο, οι ερευνητές και τα μέλη του βιομηχανίας μπορούν εύκολα να συνδέσουν πιθανές αλλαγές στη διαδικασία επανεπίστρωσης πούδρας με αλλαγές στην ποιότητα του τελικού τεμαχίου. Οι πληροφορίες είναι εύκολα προσβάσιμες, καθώς παρέχονται με τη μορφή πινάκων. Ωστόσο, η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των αλλαγών των παραμέτρων εναπόθεσης σκόνης σε ορισμένα κριτήρια ποιότητας του τελικού τεμαχίου παραμένει αναγκαία, καθώς οι συνδέσεις που γίνονται είναι κυρίως ποιοτικές και πρέπει να διεξαχθούν πειράματα για τη λεπτομερή ρύθμιση των παραμέτρων της διαδικασίας εναπόθεσης σε σχέση με τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου.

Το δεύτερο ζήτημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η έλλειψη σύγκρισης μεταξύ των μεθόδων εναπόθεσης σκόνης καθώς και η έλλειψη μεθόδου για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης ενός συστήματος εναπόθεσης σκόνης (ΣΕΠ). Η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (AHP) χρησιμοποιήθηκε για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος με συστηματικό, στατιστικά αξιόπιστο και ευέλικτο τρόπο. Οι μέθοδοι εναπόθεσης σκόνης που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία ήταν: μηχανική εναπόθεση, ηλεκτροστατική εναπόθεση (ή μαγνητική για σιδηρομαγνητικές σκόνες), εναπόθεση

με ψεκασμό με τη βοήθεια αερολύματος (AASD), εναπόθεση με ακροφύσιο πύργου και εναπόθεση με δόνηση/υπέρηχο. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκρισή τους ήταν: η ανάγκη βαθμονόμησης, η ευκολία αυτοματισμού και ελέγχου για καθολική εφαρμογή, η απλότητα της διαδικασίας, η ποιότητα της εναποτιθέμενης επιφάνειας, η ταχύτητα εξάπλωσης, το κόστος κατασκευής και η ευκολία κατασκευής. Η μηχανική εναπόθεση αποδείχθηκε ότι είναι η βέλτιστη μέθοδος για την εξάπλωση σκόνης, κυρίως χάρη στην ικανότητά της να εναποθέτει γρήγορα στρώματα σε συνδυασμό με την υψηλή δυνατότητα ελέγχου και την καλή ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος. Ο σχεδιασμός ενός πρωτότυπου ΣΕΠ συγκρίθηκε, και πάλι μέσω AHP, με κοινά εμπορικά ΣΕΠ, κατασκευασμένα για μηχανές ΣΚΠ. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε σε δύο μέρη: (i) σύγκριση της ομάδας δοσομέτρησης/κοσκίνισης σκόνης και (ii) σύγκριση της ομάδας επανεπίστρωσης σκόνης. Η πρώτη τόνισε την ανάγκη για αρχικό κοσκίνισμα της σκόνης για φιλτράρισμα των συσσωματωμάτων και των υπερμεγέθων σωματιδίων. Επιπλέον, το κατακόρυφο σιλό σε συνδυασμό με έναν κύλινδρο δοσομέτρησης με εσοχές ως μέθοδο αποθήκευσης και τροφοδοσίας υπερτερεί έναντι του συνήθως χρησιμοποιούμενου εμβόλου τροφοδοσίας, το οποίο δεν προάγει τον έλεγχο της κατανομής μεγέθους της σκόνης, το φιλτράρισμα συσσωματωμάτων, την οικονομία της σκόνης ή τη δυνατότητα εύκολης εγκατάστασης αισθητήρων ποιότητας σκόνης και εφαρμογών (π.χ. αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, αναδευτήρας σκόνης κ.λπ.). Η δεύτερη σύγκριση έδειξε την υπεροχή ενός συνδυασμένου, ρυθμιζόμενου ως προς το ύψος, συστήματος οδηγού λεπίδας και κυλίνδρου ως επιστρωτήρα. Η οδηγός λεπίδα που κινείται πριν από τον κύλινδρο διατηρεί σταθερό το ύψος του λόφου της σκόνης μπροστά από τον κύλινδρο, διατηρώντας έτσι σταθερή πίεση καθ' όλη τη διάρκεια της εναπόθεσης. Αυτό οδηγεί σε ομοιογενή πυκνότητα συσσώρευσης σε όλο το στρώμα. Η λεπίδα από μόνη της αποτυγχάνει να εφαρμόσει υψηλά επίπεδα συμπίεσης, αφήνοντας στρώματα σχετικά χαμηλής πυκνότητας συσσώρευσης, ενώ ο κύλινδρος από μόνος του οδηγεί σε στρώματα που είναι αρχικά πολύ συμπιεσμένα και λιγότερο συμπιεσμένα καθώς κινείται ο κύλινδρος, λόγω της φθίνουσας κλίσης της σκόνης και του γεγονότος ότι τα μικρότερα σωματίδια εναποτίθενται πρώτα, αφήνοντας τα μεγαλύτερα να απλωθούν στα δεξιότερα σημεία των στρωμάτων, με την εναπόθεση να γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός μπορεί επίσης να υποστηρίξει την εναπόθεση μόνο με κοσκίνισμα για αυξημένη οικονομία σκόνης και καλύτερο έλεγχο της κατανομής των σωματιδίων.

Το τρίτο θέμα που εξετάστηκε ήταν η σχέση μεταξύ των παραμέτρων εναπόθεσης της σκόνης και της ποιότητας του εναποτιθέμενου στρώματος. Αυτό μελετήθηκε με προσομοίωση βάσει DEM, Taguchi DoE και ANOVA. Η εναπόθεση της σκόνης μοντελοποιήθηκε μέσω κατακόρυφων λεπίδων με διαφορετικές τιμές γωνίας ελευθερίας σε διάφορες ταχύτητες επανεπίστρωσης και κατακόρυφη δόνηση της λεπίδας σε διάφορα επίπεδα πλάτους και συχνότητας. Η ποιότητα του στρώματος σκόνης εξετάστηκε με την απόκλιση πάχους στρώματος (LTD), τον λόγο κάλυψης επιφάνειας (SCR), την RMS τραχύτητα επιφανειακού στρώματος (S_q) και την πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης (PDtr). Παρουσιάστηκε η διαφορά μεταξύ της πραγματικής πυκνότητας συσσώρευσης, η οποία λαμβάνει αποκλειστικά υπόψη τον αριθμό συντονισμού όλων των σωματιδίων, και της θεωρητικής πυκνότητας συσσώρευσης, η οποία λαμβάνει υπόψη το θεωρητικό πάχος του στρώματος ως τρόπο υπολογισμού του όγκου του στρώματος. Αποδείχθηκε ότι η χρήση μιας πολύ χαμηλής τιμής μέτρου διάτμησης (G), περίπου 3-4 τάξεις μεγέθους μικρότερης από την πραγματική τιμή, οδηγεί σε αποτελέσματα στην ασφαλή πλευρά, με ελαφρώς χειρότερη ποιότητα στρώματος σκόνης, αλλά σε υπολογιστικό χρόνο έως και 12 φορές μικρότερο. Η διασταύρωση μεταξύ προσομοίωσης και πειραματικών αποτελεσμάτων για τις δοκιμές γωνίας πρανούς και γωνίας χιονοστιβάδας εξασφάλισε τη ρεαλιστική ρεολογική συμπεριφορά της σκόνης. Η πραγματική πυκνότητα συσσώρευσης βρέθηκε να είναι σταθερή ανεξάρτητα από τα επίπεδα των παραμέτρων εναπόθεσης. Επιπλέον, η ταχύτητα επανεπίστρωσης αποδείχθηκε ότι είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη επίδραση στην ποιότητα του στρώματος όσον αφορά κάθε κριτήριο ποιότητας. Η επίδραση της δόνησης αποδείχθηκε ευεργετική, καθώς δημιουργεί πιο επίπεδες στρώσεις, με μικρότερη τραχύτητα και απόκλιση πάχους στρώσης. Ειδικά σε σχετικά χαμηλή ταχύτητα επανεπίστρωσης, η οποία βελτιώνει την ποιότητα του στρώματος, διαπιστώθηκε ότι μεγαλύτερη συχνότητα δόνησης (2000 Hz) έχει τη βέλτιστη επίδραση. Επιπλέον, οι σταθμισμένοι μέσοι όροι των τριών κριτηρίων ποιότητας (συγκεκριμένα: LTD, SCR και S_q) απεικονίστηκαν σε σχέση με τις τιμές της λοξότητας (S_{sk}) και της κύρτωσης (S_{ku}) για κάθε μία από τις δοκιμές Taguchi. Οι συντελεστές βαρύτητας υπολογίστηκαν για τον καθορισμό της καλύτερης γραμμικής προσέγγισης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αποδείχθηκε ότι τα S_{sk} και S_{ku} μπορούν να χρησιμεύσουν ως ισοδύναμα κριτήρια ποιότητας επιφανειακού στρώματος. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να αξιολογούν μόνο μία παράμετρο του επιφανειακού

στρώματος για την εκτίμηση της ποιότητας του αποτιθέμενου στρώματος, καθιστώντας έτσι τη διαδικασία αξιολόγησης σημαντικά ευκολότερη. Ωστόσο, αυτό θα πρέπει να δοκιμαστεί και για πειραματικά απλωμένα στρώματα μέσω τρισδιάστατης σάρωσης. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις εξέτασαν μόνο τα σφαιρικά σωματίδια, οπότε θα πρέπει να εξεταστούν και τα μη σφαιρικά για να ελεγχθεί κατά πόσον οι S_{sk} και S_{ku} μπορούν να χρησιμεύσουν ως δείκτες επιφανειακού στρώματος ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του σχήματος των σωματιδίων.

Το τέταρτο θέμα που εξετάστηκε ήταν η καταλληλότητα του κοσκίνισματος της σκόνης ως εναλλακτική λύση για την εναπόθεση σκόνης αντί για τη χρήση επιστρωτήρων, όπως οι λεπίδες. Χρησιμοποιήθηκε ξανά το ίδιο μοντέλο σκόνης με προσομοίωση DEM, Taguchi DoE και ANOVA. Οι παράμετροι κοσκίνισης που εξετάστηκαν ήταν η ποσότητα σκόνης που τροφοδοτήθηκε στο κόσκινο, το πλάτος και η συχνότητα της κάθετης δόνησης και η γωνία αντίστροφης κωνικότητας των ανοιγμάτων του κόσκινου. Η επίδραση των προαναφερόμενων παραμέτρων εξετάστηκε κατά τη σταθερή φάση, δηλαδή το στάδιο κατά το οποίο η διαδικασία κοσκίνισης παρουσιάζει σταθερή ροή μάζας. Αξιολογήθηκαν η διάρκεια της σταθερής φάσης, η μάζα σκόνης που κοσκινίζεται κατά τη διάρκεια της σταθερής φάσης και η ροή μάζας της σταθερής φάσης. Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι η συνολική μάζα στη γραμμική φάση και η διάρκεια της γραμμικής φάσης επηρεάζονται σχεδόν αποκλειστικά από την ποσότητα της σκόνης που τροφοδοτείται στο κόσκινο, δηλαδή από τη στάθμη της σκόνης στο κόσκινο. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο σκόνης, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια και η συνολική μάζα σκόνης που κοσκινίζεται κατά τη γραμμική φάση. Το φαινόμενο αυτό επιτείνεται από την υψηλή συχνότητα δόνησης. Ωστόσο, η ροή μάζας φαίνεται να εξαρτάται περισσότερο από το πλάτος και τη συχνότητα δόνησης (σχεδόν εξίσου από το καθένα) και λιγότερο από τη στάθμη της σκόνης στο κόσκινο. Μικρότερο πλάτος οδηγεί σε υψηλότερη ροή μάζας, ενώ το φαινόμενο επιτείνεται με μικρότερη συχνότητα και μικρότερο επίπεδο σκόνης στο κόσκινο. Στη συνέχεια, η ποιότητα του στρώματος σκόνης που δημιουργήθηκε με ελεγχόμενο κοσκίνισμα αξιολογήθηκε για κάθε μία από τις δοκιμές Taguchi DoE με τη μέτρηση των S_{sk} και S_{ku} . Αποδείχθηκε ότι, με ελεγχόμενο κοσκίνισμα είναι δυνατή η εναπόθεση στρώσεων έτοιμων για PBF (ΣΚΠ) υψηλότερης ποιότητας σε σύγκριση με αυτές που εναποτίθενται μέσω μη δονούμενης λεπίδας. Εξασφαλίζοντας κατάλληλα ελεγχόμενη δόνηση του κόσκινου και επάρκεια της μάζας που θα εναποτεθεί κατά τη διάρκεια της σταθερής φάσης

κοσκίνισης για το επιθυμητό πάχος στρώματος, μπορούν να δημιουργηθούν στρώματα έτοιμα για PBF. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται ο χρόνος εναπόθεσης, δεδομένου ότι το κοσκίνισμα γίνεται μόνο "στιγμιαία" για τα πάχη στρώματος που είναι επιθυμητά στις διεργασίες PBF. Ωστόσο, υπάρχουν μηχανικοί περιορισμοί, δεδομένου ότι πρέπει να αναπτυχθεί κατάλληλος εξοπλισμός για την εξάλειψη των παρεμβολών θορύβου (π.χ. θόρυβος που προκαλείται από τις δονήσεις του κινητήρα που μεταφέρονται στο κόσκινο μέσω των τμημάτων της συναρμογής που βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους) και να διασφαλιστεί ότι η κατεύθυνση, το πλάτος και η συχνότητα της δόνησης επιτυγχάνονται με ακρίβεια και συνέπεια.

Το πέμπτο ζήτημα που εξετάστηκε σε αυτή την εργασία ήταν η αξιοσημείωτη έλλειψη μεθόδων εναπόθεσης σκόνης πολλαπλών υλικών. Αναπτύχθηκε μια μέθοδος βασισμένη στο σχεδιασμό διπλού μετρητή περιγράμματος, η οποία ορίστηκε μαθηματικά και κωδικοποιήθηκε. Το στρώμα πολλαπλών υλικών διαχωρίστηκε σε διάφορες μονοϋλικές υποπεριοχές, καθεμία από τις οποίες μπορούσε να απομονωθεί μέσω διαφορετικής τοποθέτησης των λεπίδων κάθε ενός από τους μετρητές περιγράμματος. Στη συνέχεια, η σκόνη μπορούσε να κοσκινιστεί στην απομονωμένη υποπεριοχή με τη χρήση κατάλληλων παραμέτρων κοσκίνισης, όπως αυτές είχαν οριστεί στις προσομοιώσεις κοσκίνισης προηγουμένως. Το στρώμα σκόνης είτε εναποτίθεται αποκλειστικά μέσω κοσκίνισης, είτε οι αριστερές λεπίδες των μετρητών περιγράμματος λειτουργούν ως λεπίδες εναπόθεσης (επιπεδοποίηση της στρώσης κάθε μονοϋλικής υποπεριοχής). Κατά την επανατοποθέτηση των τελευταίων για την απομόνωση της επόμενης μονοϋλικής υποπεριοχής, πραγματοποιείται η απόξεση και η αποβολή της περίσσειας σκόνης, χρησιμοποιώντας τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους εναπόθεσης που ορίστηκαν στις προσομοιώσεις εναπόθεσης μέσω δονούμενης λεπίδας προηγουμένως. Πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα επικύρωσης, τόσο μέσω προσομοίωσης DEM όσο και μέσω μιας πειραματικής ιδιοσυσκευής που κατασκευάστηκε εσωτερικά. Και οι δύο δοκιμές έδειξαν ότι τα όρια των αποτιθέμενων μοτίβων και η ποιότητα της επιφάνειας του στρώματος είναι αποδεκτά. Η διαδικασία αυτή μπορεί να προσφέρει στους ερευνητές και τη βιομηχανία έναν νέο τρόπο εναπόθεσης στρωμάτων πολλαπλών υλικών. Ωστόσο, τα ιδιαίτερα πολύπλοκα στρώματα ή ο μεγάλος αριθμός υλικών εντός του στρώματος αυξάνουν δραστικά το χρόνο εναπόθεσης. Επιπλέον, μια αυτοματοποιημένη συσκευή πρέπει να σχεδιαστεί

και να κατασκευαστεί, πράγμα που, δεδομένης της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού και του πλήθους των λεπίδων, αποτελεί πρόκληση.

7.2 Μελλοντική Έρευνα

Ο υψηλός βαθμός πολυπλοκότητας της εναπόθεσης σκόνης για την παρασκευή μονοϋλικών και πολυϋλικών στρώσεων έτοιμων για ΣΚΠ καθιστά αδύνατο να καλυφθούν όλες οι πτυχές σε μία μόνο διατριβή- ως εκ τούτου, διατυπώνονται οι ακόλουθες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Αρχικά, η βιβλιογραφική ανασκόπηση αποκάλυψε την ανάγκη ανάπτυξης περισσότερων μεθόδων παρακολούθησης της ποιότητας του στρώματος που εναποτίθεται σε σκόνη, με μη καταστροφικές μεθόδους ζωντανής παρακολούθησης. Ειδικότερα, δεν υπάρχουν τρόποι παρακολούθησης της πραγματικής πυκνότητας συσσώρευσης κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά την εναπόθεση στρώματος από το σύστημα εναπόθεσης σκόνης. Για παράδειγμα, μπορούν να εξεταστούν μέθοδοι που βασίζονται στην ανακλαστικότητα του φωτός που επιδεικνύει το στρώμα της σκόνης, δεδομένου ότι, όσο πιο πυκνό είναι το στρώμα, τόσο λιγότερο φως διαφεύγει από μια δέσμη που πέφτει κάθετα πάνω σε αυτό. Επιπλέον, οι ερευνητές πρέπει να ποσοτικοποιήσουν τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων εναπόθεσης της σκόνης με τα PLQIs και, τελικά, με τα FPQIs, δεδομένου ότι η ποιοτική ανάλυση που παρέχεται δίνει μόνο τις γενικές κατευθυντήριες γραμμές, αλλά δεν είναι αρκετή για την πραγματική βελτιστοποίηση της κατασκευής του τεμαχίου όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες.

Επιπλέον, είναι υψίστης σημασίας ο σχεδιασμός και η κατασκευή συστημάτων εναπόθεσης σκόνης που εφαρμόζουν ελεγχόμενη δόνηση στη μέθοδο επανεπίστρωσης (κύλινδρος ή λεπίδα). Για παράδειγμα, η δόνηση μέσω εφαρμογής υπερήχων φαίνεται πολλά υποσχόμενη, εφόσον μόνο ο επιστρωτήρας δέχεται τη διέγερση και τα προηγούμενα στρώματα παραμένουν άθικτα, πράγμα αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί. Εναλλακτικά, οι απλές μηχανικές δονήσεις που επιβάλλονται μέσω κινητήρων υψηλής ταχύτητας σε συνδυασμό με έκκεντρα των επιθυμητών διαστάσεων θα άξιζαν να εξεταστούν, ιδίως για πλάτη δόνησης μεγαλύτερα από αυτά που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Η ανάπτυξη συστημάτων που ελέγχουν με ακρίβεια την κατεύθυνση, τη συχνότητα και το πλάτος των δονήσεων είναι απαραίτητη για την επίτευξη της εναπόθεσης με κοσκίνιση, η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει μια

σημαντική ανακάλυψη, καθώς θα μειώσει δραστικά τον χρόνο κατασκευής των εξαρτημάτων για τις διαδικασίες ΣΚΠ.

Αξιοποιώντας την προσομοίωση ΜΔΣ (DEM), θα ήταν ωφέλιμο να εξεταστεί η επίδραση της δόνησης σε έναν επιστρωτήρα κυλίνδρου και να συγκριθεί με την απόδοση της δονούμενης λεπίδας. Επιπλέον, θα μπορούσαν να εξεταστούν σχήματα σωματιδίων με αυξημένη γωνιακότητα, προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσον η επιφανειακή λοξότητα και κύρτωση του στρώματος μπορούν να χρησιμεύσουν ως ισοδύναμοι δείκτες ποιότητας του στρώματος, δεδομένου ότι το διαφορετικό σχήμα των σωματιδίων θα επηρέαζε τις επιφανειακές παραμέτρους με τρόπους που δεν μπορούν να προβλεφθούν ή να εκτιμηθούν χωρίς την εκτέλεση των εν λόγω προσομοιώσεων. Τέλος, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί εξέταση πραγματικών στρωμάτων σκόνης και τα αποτελέσματα να συνδεθούν με τις προσομοιώσεις. Η τρισδιάστατη σάρωση λευκού φωτός είναι μια κατάλληλη μη καταστροφική μέθοδος για την αξιολόγηση της ποιότητας του στρώματος, δεδομένου ότι παρέχει ένα νέφος σημείων της άνω επιφάνειας του στρώματος.

Τέλος, προκειμένου να αναπτυχθούν πραγματικά στρώματα πολλαπλών υλικών με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, το περιγραφόμενο σύστημα θα πρέπει να σχεδιαστεί με τρόπο που να παρέχει αυτοματοποιημένη και ακριβή κίνηση και τοποθέτηση κάθε στοιχείου της συναρμογής, πράγμα που, δεδομένης της πολυπλοκότητάς της, θα αποτελέσει πρόκληση. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος παραγωγής του εξαρτήματος, είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη νέου λογισμικού για τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης και του προσανατολισμού του εξαρτήματος εντός του θαλάμου κατασκευής, ώστε να απλοποιηθούν τα μοτίβα συνοριακών καμπυλών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των μονοϋλικών υποπεριοχών. Επιπλέον, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν υβριδικές μέθοδοι εναπόθεσης στρωμάτων σκόνης πολλαπλών υλικών. Ο συνδυασμός της μεθόδου διπλού μετρητή περιγράμματος με τις μεθόδους δονούμενου ακροφυσίου θα μπορούσε να αμβλύνει τους περιορισμούς κάθε μεθόδου, δεδομένου ότι η πρώτη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη γρήγορη εξάπλωση μεγάλων μονοϋλικών υποπεριοχών, ενώ η δεύτερη θα μπορούσε να εφαρμοστεί για την επιτάχυνση της εναπόθεσης μικρών υποπεριοχών, δημιουργώντας τα μικρά χαρακτηριστικά του μοτίβου μωσαϊκού, απλοποιώντας τη διαδικασία τμηματοποίησης κατά τον άξονα x.

7.3 Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη διατριβή

- Κεφάλαιο 2:
 1. P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, “A review of powder deposition in additive manufacturing by powder bed fusion,” *J. Manuf. Process.*, vol. 74, pp. 332–352, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.12.021.
- Κεφάλαιο 3:
 1. P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, “A prototype powder deposition system for an open Selective Laser Sintering machine,” *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 755–762, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.106.
 2. P. Avrampos, “Optimized development of a prototype Selective Laser Sintering powder recoating system via Analytic Hierarchy Process,” *Int. J. Exp. Des. Process Optim.*, vol. 1, no. 1, p. XX, 2023, doi: 10.1504/IJEDPO.2023.10059808.
 3. S. Pasalopoulos, P. Avrampos, and G.-C. Vosniakos, “Surface quality evaluation of non-sintered powder layers in Selective Laser Sintering by 3D scanning,” *Procedia Manuf.*, vol. 51, no. 2019, pp. 748–754, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.105.
- Κεφάλαιο 4:
 1. P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, “A Study on Powder Spreading Quality in Powder Bed Fusion Processes Using Discrete Element Method Simulation,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 8, no. 3, p. 101, May 2024, doi: 10.3390/jmmp8030101.
- Κεφάλαιο 5:
 1. P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, “A Simulation Study on Sieving as a Powder Deposition Method in Powder Bed Fusion Processes,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 14, p. 3382, Jul. 2024, doi: 10.3390/ma17143382.
- Κεφάλαιο 6:
 1. P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, “A novel method of depositing multi-material powder layers for Powder Bed Fusion processes,” (under review)

8 Παραρτήματα

8.1 Παράρτημα Α: Κατάλογος υλικών του πρωτοτύπου ΣΕΠ (οι βίδες, τα παξιμάδια και οι ροδέλες δεν περιλαμβάνονται)

Code	Description	Qty	Material	M/B*
	Powder Hopper/Doser Subassembly	1		
1	Powder tank	1	Al 6061	M
2	Doser cylinder tube	1	Al 6061	M
3	Doser drum cylinder	1	Al 6061	M
4	Doser cylinder housing	2	Al 6061	M
5	Doser powder seal	1	Ertalon PA6	M
6	Powder tank level indicator	1	Polystyrene	M
7	Motor mounting bracket	1	Cast iron	M
8	Doser mounting bracket	1	Cast iron	M
9	GT2 20T timing pulley	1	Al 6061	B
10	GT2 60T timing pulley	1	Al 6061	B
11	GT2 320mm timing belt	1	GFRP Neoprene	B
17	Compression springs $D_i=6.5\text{mm}$ $d_w=0.5\text{mm}$ $n=13$ $L_o=20\text{mm}$	6	Inox 302	B
22	AFBMA 20.1 - 15 x 35 x 11 (d_i x d_o x t) Ball Bearings	2	SAE 52100 St	B
23	42BYGHW804 (NEMA 17) <i>Wantai Motors</i> Stepper Motor (Doser)	1	(multiple)	B
	Siever subassembly	1		
24	Connecting arms	2	Cast iron	M
25	Siever top bearing plate	1	Al 6061	M
26	Siever bottom bearing plate	1	Al 6061	M
27	Siever connecting rod	1	Al 6061	M
28	Siever cam	1	Cast iron	M
29	Siever cam axle	1	Cast iron	M
30	Siever spacer	1	Cast iron	M
31	Siever middle axle	1	Cast iron	M
32	Siever connecting part	1	Al 6061	M

33	Siever rod spacer	2	Cast iron	M
34	Siever rod D=8mm	1	Inox 302	B
35	Siever tank	1	Al 6061	M
36	Interchangeable mesh	1	Carbon steel	B
37	Siever motor mounting bracket	1	Cast iron	M
38	GT2 20T timing pulley	1	Al 6061	B
39	GT2 40T timing pulley	3	Al 6061	B
40	GT2 200mm timing belt	1	GFRP Neoprene	B
41	Tipper connecting part	1	Al 6061	M
42	Tipper belt tensioning plate	1	Al 6061	M
43	Tipper motor mounting bracket	1	Cast iron	M
44	GT2 320mm timing belt	1	GFRP Neoprene	B
45	Brass bushings 6 x 12 x 10(d_i x d_o x t)	2	Brass	B
46	Horizontal axis brackets SHF8	2	Al 6061	B
47	ISO radial ball bearings (15 x 24 x 5) (d_i x d_o x t)	2	SAE 52100 St	B
48	ISO radial ball bearings (8 x 22 x 7) (d_i x d_o x t)	2	SAE 52100 St	B
49	ISO radial ball bearings (8 x 16 x 5) (d_i x d_o x t)	2	SAE 52100 St	B
50	57BYGH420 (NEMA 23) <i>Wantai Motors</i> Stepper Motor (Siever)	1	(multiple)	B
51	57BYGH420 (NEMA 23) <i>Wantai Motors</i> Stepper Motor (Tipper)	1	(multiple)	B
	Doctor blade subassembly	1		
65	Doctor blade	1	inox 302	B
66	Starrett V1212MXRL Micrometer, 25-50mm, 1 μ m resolution	2	(multiple)	B
67	Doctor blade securing cylinder	1	Al 6061	M
68	Micrometer height adjusting rods	2	Cast iron	M
69	Doctor blade z-inclination controlling plates	2	Al 6061	M
70	Micrometer holders	2	Al 6061	M
71	Micrometer cylinder junctions	2	Polystyrene	M
72	Micrometer cylinder junction spheres	2	Inox 302	B
73	Compression springs $D_i=11$ mm, $d_w=0.75$ mm, $n=10$, $L_o=45$ mm	2	Inox 302	B
	Recoating cylinder (roller) subassembly	1		
82	Roller D=22mm	1	Inox 302	B
83	Roller housing	2	Al 6061	M
84	Roller gantry plate	1	Al 6061	M
85	Roller gantry side cable rail (Left)	1	Al 6061	M
86	Roller gantry side cable rail (Right)	1	Al 6061	M

87	Linear bearing platform MGN12CH	4	(multiple)	B
88	Roller motor mounting bracket	1	Al 6061	M
89	GT2 40T timing pulley	2	Al 6061	B
90	GT2 200mm timing belt	1	GFRP Neoprene	B
91	AFBMA 18.1.3.1 - 10 x 14 x 12 mm (d_i x d_o x t) Needle Roller Bearings	2	SAE 52100 St	B
99	42BYGHW804 (NEMA 17) <i>Wantai Motors</i> Stepper Motor (Roller)	1	(multiple)	B
	Linear motion system	1		
100	MGN 12H Rails	2	(multiple)	B
101	57BYGH420 (NEMA 23) <i>Wantai Motors</i> Stepper Motor	1	(multiple)	B
102	Lead screw-nut block	1	Inox 302	B
103	Linear motor mounting bracket	1	Al 6061	M
107	Roller gantry plate-Lead screw nut's connector	1	Al 6061	M

*M/B: made/bought

8.2 Παράρτημα Β: Κώδικας *Arduino*TM UNO Ελέγχου του ΣΕΠ

```

/*
- SECOND APPROACH IN SYSTEM HANDLING.
- Dosers are activated by the same pin.
- System will be executed only once.
- Somehow PMAC should reset the system (TX input?).
- Debouncing is the function with which switches acquire a steady response.
*/

// SYSTEM INITIALIZATION.

#include <AccelStepper.h>

/* Initialize Xaxis stepper motor pins and properties of the motor. */
/* Arduino Pin assignment. */
/* Purple (DRV8825) Top Right Driver. */
#define Xaxis_pindir 2
#define Xaxis_pinstep 3
#define sleep_Xaxis 8
/* Xaxis stepper motor property settings. */
#define stepsPerRev_Xaxis 200
#define Xaxis_speed 750
#define Xaxis_acc 40000

/* Initialize Doser Drum stepper motor pins and properties of the motor. */
/* Arduino Pin assignment. */
/* Red (Big Easy Driver) Bottom Left Driver. */
#define dd_pindir 4
#define dd_pinstep 5
#define sleep_dd 19
/* Doser Drum stepper motor property settings. */
#define dd_speed 1500
#define dd_acc 1000

/* Initialize Roller stepper motor pins and properties of the motor. */
/* Arduino Pin assignment. */
/* Red (Big Easy Driver) Top Left Driver. */
#define roller_pindir 7
#define roller_pinstep 6
#define sleep_roller 18
/* Roller stepper motor property settings. */
#define roller_speed 4000

/* Initialize Sieve Tipper stepper motor pins and properties of the motor. */
/* Arduino Pin assignment. */
/* Green (A4988) Top Left Driver. */
#define tipper_pindir 12
#define tipper_pinstep 11
#define sleep_tipper 13
/* Tipper stepper motor property settings. */
#define tipper_speed 500
#define tipper_acc 65000
#define stepsPerRev_tipper 2000

/* Initialize Sieve's palindromic motion's stepper motor pins. */
/* Arduino Pin assignment. */
/* Red (Big Easy Driver) Middle Left Driver. */
#define siever_pindir 9
#define siever_pinstep 10
#define sleep_siever 17
/* Siever stepper motor property settings. */
#define siever_speed 10000
#define siever_acc 40000
#define stepsPerRev_siever 3200

/* Define the Arduino pins of the switches of the Powder Deposition System (PDS). */
#define switch_Xaxis 14 // Left border switch for Xaxis stepper motor motion. A0-HIGH
when Open (NC).
#define enc_lin 16 // Linear encoder for Xaxis stepper motor motion. A2-HIGH when
Open (NC).

```

```

/* Define global variables for the amount of void loop() execution times and linear
encoder position identification. */
int execute=HIGH ; // Execute program when HIGH, stop execution while
LOW.
int lin_count=0; // Counts how many times linear encoder changes value.
int lin_prev=HIGH,lin_now=HIGH; // Show the previous and current state of the linear
encoder's switch, respectively.

/* Initialization of stepper motors driving via the AccelStepper library. */
AccelStepper Xaxis(AccelStepper::DRIVER,Xaxis_pinstep,Xaxis_pindir); //
(steps,direction).
AccelStepper dd(AccelStepper::DRIVER,dd_pinstep, dd_pindir);
AccelStepper roller(AccelStepper::DRIVER,roller_pinstep,roller_pindir);
AccelStepper siever(AccelStepper::DRIVER,siever_pinstep,siever_pindir);
AccelStepper tipper(AccelStepper::DRIVER,tipper_pinstep,tipper_pindir);

// SYSTEM SETUP (To be executed only once, at the start of the SLS printing process).

void setup() {

/* Starting serial to screen monitor the program. */
Serial.begin(9600);
Serial.println("entered setup");

/* Set Xaxis stepper motor initial settings. */
Xaxis.setMaxSpeed(Xaxis_speed); // Setting maximum Speed.
Xaxis.setAcceleration(Xaxis_acc); // Setting Acceleration.
Xaxis.setEnablePin(sleep_Xaxis); // Setting Enable Pin.

/* Set Doser Drum stepper motor initial settings. */
dd.setMaxSpeed(dd_speed); // Setting maximum Speed.
dd.setAcceleration(dd_acc); // Setting Acceleration.
dd.setEnablePin(sleep_dd); // Setting Enable Pin.

/* Set Roller stepper motor initial settings. */
roller.setMaxSpeed(8000); // Setting maximum Speed.
roller.setAcceleration(100); // Setting Acceleration.
roller.setEnablePin(sleep_roller); // Setting Enable Pin.

/* Set Siever stepper motor initial settings. */
siever.setMaxSpeed(siever_speed); // Setting maximum Speed.
siever.setAcceleration(siever_acc); // Setting Acceleration.
siever.setEnablePin(sleep_siever); // Setting Enable Pin.

/* Set Tipper stepper motor initial settings. */
tipper.setMaxSpeed(tipper_speed); // Setting maximum Speed.
tipper.setAcceleration(tipper_acc); // Setting Acceleration.
tipper.setEnablePin(sleep_tipper); // Setting Enable Pin.

/* Initialization of switches. */
pinMode(switch_Xaxis,INPUT); // Left border switch of Xaxis.

/* Bringing table into starting position (left). */
tipper.disableOutputs();
roller.disableOutputs();
siever.disableOutputs();
dd.disableOutputs();
Xaxis.enableOutputs(); // Enable the driving outputs of Xaxis stepper motor.
Xaxis.setSpeed(Xaxis_speed); // Set the speed of Xaxis stepper motor.

// Serial.println("System Initialization process begin");
while (digitalRead(switch_Xaxis)==HIGH){
Xaxis.runSpeed(); // Move powder deposition system to the left (Xaxis
<---) till the left border switch is pressed.
}
Xaxis.setPinsInverted(1,0,0); // Change Xaxis moving direction from left to right
by inverting the rotation direction of Xaxis stepper motor.
myMove(Xaxis,2*stepsPerRev_Xaxis); // Move Xaxis to the right slightly, so that left
border switch gets released again.
Xaxis.disableOutputs();
delay(2000); // Delay for 2000 msec = 2 sec.
Xaxis.enableOutputs();
Xaxis.setSpeed(Xaxis_speed); // The setSpeed() function must be used after every
myMove() function call.

```



```

while (lin_count<1 && digitalRead(switch_Xaxis)==HIGH){ // While linear encoder click
counter is less than 1 and the left border switch is released, enter the loop.
  Xaxis.runSpeed();
  lin_now=digitalRead(enc_lin); // Read the linear encoder switch current status.
  if (lin_now!=lin_prev){ // Compare current to previous linear encoder switch
status.
    lin_count++; // If status has changed, increase the linear
encoder click number.
    debounce(Xaxis,Xaxis_speed); // Debouncing via slight motion of the motor to the
same direction (?? Is it really necessary at this point ??).
  }
  lin_prev=lin_now; // Update the previous linear encoder status.
}
lin_count=0; // Zero the total linear encoder click count [This variable will be
used in void loop()].
}

// MAIN PROGRAM LOOP (To be executed every time the PMAC requests, in communication
with the other subsystems of the SLS machine).

void loop(){
  Serial.print("Just entered void loop:\n");
  // Serial.print(lin_count);
  while (execute==HIGH)
  {
    // Serial.println("Just entered while (execute==HIGH) loop:\n");
    // Serial.print(lin_count, "\n");
    // Serial.print(lin_prev, "\n");
    // Serial.print(lin_now, "\n");

Xaxis.disableOutputs(); // Temporarily disable Xaxis stepper motor's driving.
dd.enableOutputs(); // Enable the driving outputs of Doser Drum's stepper motor.

/* Doser Drum dispenses the powder dosage via its rotation. */
dd.setSpeed(dd_speed);
myMove(dd,20000);
dd.disableOutputs();
delay(200);

/* Xaxis to move till the powder sieve initializing position */
Xaxis.enableOutputs();

while (lin_count<=2 &&digitalRead(switch_Xaxis)==HIGH){
  Xaxis.runSpeed();
  lin_now=digitalRead(enc_lin);
  if (lin_now!=lin_prev){
    lin_count++;
    debounce(Xaxis,Xaxis_speed);
    // Serial.print(lin_count);
    // Serial.print(lin_prev, "\n");
    // Serial.print(lin_now, "\n");
  }
}
lin_prev=lin_now;
Xaxis.disableOutputs();
delay(1000);

/* When the Xaxis reaches the predefined position (climbing of second 'hill' of linear
encoder), begin the Roller and the Sieve's stepper motors' movement. */
// Serial.println("laying powder");
Xaxis.enableOutputs();
roller.enableOutputs();
siever.enableOutputs();
roller.setPinsInverted(1,0,0);
Xaxis.setSpeed(Xaxis_speed);
roller.setSpeed(roller_speed);
siever.setSpeed(siever_speed);

/* Powder deposition - simultaneous Xaxis, Roller and Sieve's palindromic movements. */
while (lin_count<=6 &&digitalRead(switch_Xaxis)==HIGH){

  while (lin_count==3){
    Xaxis.runSpeed();
    roller.runSpeed();
    siever.runSpeed();
    lin_now=digitalRead(enc_lin);
    Serial.println(lin_now);

```

```

    if (lin_now!=lin_prev){
        lin_count++;
        debounce2(Xaxis,roller,Xaxis_speed,roller_speed);
        Serial.print(lin_count,"\n");
        // Serial.print(lin_prev, "\n");
        // Serial.print(lin_now, "\n");
    }
    lin_prev=lin_now;
}
siever.disableOutputs();

while(lin_count>=4 && lin_count<=5){
    Xaxis.runSpeed();
    roller.runSpeed();
    lin_now=digitalRead(enc_lin);
    if (lin_now!=lin_prev){
        lin_count++;
        debounce2(Xaxis,roller,Xaxis_speed,roller_speed);
    }
    lin_prev=lin_now;
}

if(lin_count==6){
    Xaxis.disableOutputs();
    roller.disableOutputs();
    tipper.enableOutputs();
    tipper.setPinsInverted(1,0,0);
    myMove(tipper,200);
    delay(200);
    tipper.setPinsInverted(0,0,0);
    tipper.setSpeed(tipper_speed);
    myMove(tipper,199);
}

tipper.disableOutputs();
break;
}

lin_count=0;

delay(2000); //TIPPER FUNCTION-TO BE PERFECTED, not to be performed in every loop
(trials to finalise it).

/* Powder deposition system returns to its starting position (Left). */
Xaxis.enableOutputs();
roller.enableOutputs();
Xaxis.setPinsInverted(0,0,0);
roller.setPinsInverted(0,0,0);
myMove(Xaxis,2*stepsPerRev_Xaxis);
Xaxis.setSpeed(Xaxis_speed);
roller.setSpeed(roller_speed);

while (lin_count<=5 &&digitalRead(switch_Xaxis)==HIGH){
    Xaxis.runSpeed();
    roller.runSpeed();
    lin_now=digitalRead(enc_lin);
    if (lin_now!=lin_prev){
        lin_count++;
        debounce2(Xaxis,roller,Xaxis_speed,roller_speed);
    }
    lin_prev=lin_now;
}
lin_count=0;
delay(1000);
Xaxis.setPinsInverted(1,0,0);
Xaxis.disableOutputs();
roller.disableOutputs();
execute=LOW;
}
}

void myMove (AccelStepper&myStepper,int steps)
{
myStepper.move(steps);
// Serial.println("moving");
while (myStepper.distanceToGo()){

```

```
// if(myStepper==&tipper){
//
myStepper.run();
}
}

void debounce (AccelStepper&myStepper,int stepperSpeed)
{
int temp=0;
float coef=0.;
if (&myStepper==&Xaxis){
coef=0.5;
}
else if (&myStepper==&roller){
coef=1/8;
}
else{
coef=0.3;
}

myStepper.setSpeed(stepperSpeed);
while (temp<coef*stepperSpeed){
myStepper.runSpeed();
temp++;
}
}

void debounce2 (AccelStepper&myStepper1,AccelStepper&myStepper2, int stepperSpeed1,int
stepperSpeed2)
{
int temp=0;
myStepper1.setSpeed(stepperSpeed1);
myStepper2.setSpeed(stepperSpeed2);
while (temp<500){
myStepper1.runSpeed();
myStepper2.runSpeed();
temp++;
}
}
```

8.3 Παράρτημα Γ: Υπολογισμός Σημείων Στρώματος Σκόνης

```

/* POWDER LAYER EVALUATION-LAYER SURFACE POINTS ACQUISITION */
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#define N_particles_max 100000
int main()
{
    /* Open the already created .txt files that contain the particle data - center
    coordinates and diameters. These coordinates are extracted by EDEM software post-
    simulation */
    /* The .txt files must be located in the same folder as the c code and its .exe post-
    compilation file */
    /* All lengths are measured in micrometers (μm) */

    FILE* ptr1 = fopen("PARTICLE_ID.txt", "r");
    if (ptr1 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr2 = fopen("PARTICLE_DIAMETER.txt", "r");
    if (ptr2 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr3 = fopen("PARTICLE_X.txt", "r");
    if (ptr3 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr4 = fopen("PARTICLE_Y.txt", "r");
    if (ptr4 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr5 = fopen("PARTICLE_Z.txt", "r");
    if (ptr5 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    int i;
    int prt_ID[N_particles_max];
    float prt_D[N_particles_max], prt_X[N_particles_max], prt_Y[N_particles_max],
    prt_Z[N_particles_max];

    /* Read particle center coordinates, diameter and ID from the .txt files and store
    them in the respective arrays */

    int N_ID, N_D, N_X, N_Y, N_Z;

    i=0;
    while(fscanf(ptr1, "%d\n",&prt_ID[i])!=EOF)
    {
        i=i+1;
    }
    N_ID=i;

    i=0;
    while(fscanf(ptr2, "%f\n",&prt_D[i])!=EOF)

```

```

    {
        i=i+1;
    }
    N_D=i;

    i=0;
    while(fscanf(ptr3, "%f\n",&prt_X[i])!=EOF)
    {
        i=i+1;
    }
    N_X=i;

    i=0;
    while(fscanf(ptr4, "%f\n",&prt_Y[i])!=EOF)
    {
        i=i+1;
    }
    N_Y=i;

    i=0;
    while(fscanf(ptr5, "%f\n",&prt_Z[i])!=EOF)
    {
        i=i+1;
    }
    N_Z=i;

/* Check that the particle data are stored correctly via screen display */
int N_prt;

    if((N_ID==N_D) && (N_ID==N_X) && (N_ID=N_Y) && (N_ID=N_Z) )
    {
//    printf("All N_values are equal to %d.\n", N_ID);
        N_prt=N_ID;
    }
    else
    {
        printf("Error at file reading.\n");
    }

/* Initialize grid x and y values */
/* Calculate limits in excel, then enter here to reduce computing time */

    float x_min = -500;
    float y_min = -500;
    float z_min = 502.5;
    float D_min = 5;
    float x_max = 500;
    float y_max = 500;
    float z_max = 597.4;
    float D_max = 71.3;
    float z_substrate = 500;

    float x, y;
    float dx=1; /* X-step */
    float dy=1; /* Y-step */
    float distance;
    float z_temp;
    float sp_Z;

    sp_Z = z_substrate;
/* DEBUG */

//    printf("A/a\tParticle ID\tDiameter\tX\tY\tZ\n", i+1, prt_ID[i], prt_D[i],
    prt_X[i], prt_Y[i], prt_Z[i]);

//    for(i=0;i<N_prt;i++)
//    {
//        printf("%d\t%d\t%f\t%f\t%f\t%f\n", i+1, prt_ID[i], prt_D[i], prt_X[i],
    prt_Y[i], prt_Z[i]);
//    }

    int sp_cnt=0; /* sp stands for surface points */

    const char* fileName = "Surface_points_calculated_XYZ_coordinates_grid";
    const char* fileType = ".txt";
    char name_buffer[512];
    FILE* f = NULL;

```

```

sprintf(name_buffer,"%s%s", fileName, fileType);
f = fopen(name_buffer,"w");

const char* fileName2 = "Surface_points_calculated_XYZ_coordinates_columns";
const char* fileType2 = ".txt";
char name_buffer2[512];
FILE* f2 = NULL;
sprintf(name_buffer2,"%s%s", fileName2, fileType2);
f2 = fopen(name_buffer2,"w");

for(x=x_min ; x<=x_max ; x+=dx)
{
  for(y=y_min ; y<=y_max ; y+=dy)
  {
//    printf("(%f,%f)\n", x, y);

    for(i=0 ; i<N_prt ; i++)
    {
      distance = ((x-prt_X[i])*(x-prt_X[i])) + ((y-prt_Y[i])*(y-prt_Y[i]));

      if( distance < (prt_D[i]/2)*(prt_D[i]/2) )
      {
        z_temp = prt_Z[i] + sqrt( (prt_D[i]/2)*(prt_D[i]/2) - (x-prt_X[i])*(x-
prt_X[i]) - (y-prt_Y[i])*(y-prt_Y[i]) );

        if( z_temp>sp_Z )
        {
          sp_Z=z_temp;
        }

      }
      else if( fabs(distance - (prt_D[i]/2)*(prt_D[i]/2)) <= 0.00001 )
      {
        z_temp = prt_Z[i];

        if(z_temp>sp_Z)
        {
          sp_Z=z_temp;
        }

      }

      fprintf(f2, "%f\t%f\t%f\n", x, y, sp_Z);
      fprintf(f, "%f ", y);
      sp_cnt++;
      sp_Z = z_substrate;

    }

    fprintf(f, "\n");

  }

  return 0;
}

```

8.4 Παράρτημα Δ: Τμηματοποίηση επί Άξονα x / Υπολογισμός και ταξινόμηση σημείων τομής

```

/* MULTIMATERIAL POWDER LAYER SEGMENTATION-FRONT DEVELOPMENT */
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#define Nbc 101 /* NUMBER OF POINTS WITH WHICH EACH BORDER CURVE IS DEPICTED */
#define Nfmax 10^6 /* MAXIMUM NUMBER OF POINTS OF EACH FRONT */

int main()
{
/* Open the already created .txt files that contain the border point coordinates.
These coordinates are extracted y Solidworks section cuts of slicing softwares */
/* The .txt files must be located in the same folder as the c code and its .exe post-
compilation file */
/* WARNING: MIGHT NEED TO COMMENT OUT OR ADD LINES, IN CASE OF MORE OR LESS BORDER
CURVES */

FILE* ptr1 = fopen("BORDER1.txt", "r");
if (ptr1 == NULL)
{
printf("no such file.");
return 0;
}

FILE* ptr2 = fopen("BORDER2.txt", "r");
if (ptr2 == NULL)
{
printf("no such file.");
return 0;
}

FILE* ptr3 = fopen("BORDER3.txt", "r");
if (ptr3 == NULL)
{
printf("no such file.");
return 0;
}

FILE* ptr4 = fopen("BORDER4.txt", "r");
if (ptr4 == NULL)
{
printf("no such file.");
return 0;
}

FILE* ptr5 = fopen("BORDER5.txt", "r");
if (ptr5 == NULL)
{
printf("no such file.");
return 0;
}

int i;

/* Insert as many border curves as they exist in the multimaterial layer that is to
be deposited by simply adding lines */
/* WARNING: MIGHT NEED TO COMMENT OUT OR ADD LINES, IN CASE OF MORE OR LESS BORDER
CURVES */

float xborder1[Nbc], yborder1[Nbc];
float xborder2[Nbc], yborder2[Nbc];
float xborder3[Nbc], yborder3[Nbc];
float xborder4[Nbc], yborder4[Nbc];
float xborder5[Nbc], yborder5[Nbc];

/* Read border curve coordinates from the .txt files and store them in the
respective arrays */
/* WARNING: MIGHT NEED TO COMMENT OUT OR ADD LINES, IN CASE OF MORE OR LESS BORDER
CURVES */

```

```

int N1, N2, N3, N4, N5;

i=0;
while(fscanf(ptr1, "%f%f\n",&xborder1[i],&yborder1[i])!=EOF)
{
    i=i+1;
}
N1=i;

i=0;
while(fscanf(ptr2, "%f%f\n",&xborder2[i],&yborder2[i])!=EOF)
{
    i=i+1;
}
N2=i;

i=0;
while(fscanf(ptr3, "%f%f\n",&xborder3[i],&yborder3[i])!=EOF)
{
    i=i+1;
}
N3=i;

i=0;
while(fscanf(ptr4, "%f%f\n",&xborder4[i],&yborder4[i])!=EOF)
{
    i=i+1;
}
N4=i;

i=0;
while(fscanf(ptr5, "%f%f\n",&xborder5[i],&yborder5[i])!=EOF)
{
    i=i+1;
}
N5=i;

/* Close the BC files again */

fclose(ptr1);
fclose(ptr2);
fclose(ptr3);
fclose(ptr4);
fclose(ptr5);

/* Check that the border curves are stored correctly via screen display */

// for(i=0;i<N5;i++){
//     printf("%d\t%f\t%f\n",i+1,xborder5[i],yborder5[i]);
// }

/* Front creation (Left Front (LF) represents the left array of blades-Right Front
(RF) represents the right array of blades of the area segmentation method) */

float y, dy;

/* Find the size (along the y-axis) of the powder layer, along with the maximum and
minimum values of the y-arrays of each border curve */
/* WARNING: MIGHT NEED TO COMMENT OUT OR ADD LINES, IN CASE OF MORE OR LESS BORDER
CURVES */

float y_1U, y_2U, y_3U, y_4U, y_5U; /* Define the upper limits (maximum y-
coordinates) of the 5 border curves */
float y_1D, y_2D, y_3D, y_4D, y_5D; /* Define the lower limits (minimum y-
coordinates) of the 5 border curves */
float temp_y_max, temp_y_min; /* Define the temporary helper-variables */
int placeholder_1U[10], placeholder_2U[10], placeholder_3U[10], placeholder_4U[10],
placeholder_5U[10]; /* Define the placeholders for the position of the maximum y-
value of the array */
int placeholder_1D[10], placeholder_2D[10], placeholder_3D[10], placeholder_4D[10],
placeholder_5D[10]; /* Define the placeholders for the position of the minimum y-
value of the array */

temp_y_max=yborder1[0]; /* Initialize maximum value */
temp_y_min=yborder1[0]; /* Initialize minimum value */

```



```

for(i=0;i<10;i++)
{
  placeholder_1U[i]=0; /* Initialize maximum value's position in the array */
  placeholder_1D[i]=0; /* Initialize minimum value's position in the array */
}

int number_of_max_1, number_of_min_1;
number_of_max_1=0;
number_of_min_1=0;

for (i = 1; i < N1; i++)
{
  if (yborder1[i] > temp_y_max)
  {
    temp_y_max = yborder1[i];
  }
  if (yborder1[i] < temp_y_min)
  {
    temp_y_min = yborder1[i];
  }
}
y_1U=temp_y_max;
y_1D=temp_y_min;

// Finding the position of the maximums and minimums of the BC1

for (i = 0; i < N1; i++)
{
  if(fabs(yborder1[i]-y_1U)<0.00001)
  {
    number_of_max_1++;
    placeholder_1U[number_of_max_1-1]=i;
  }

  if(fabs(yborder1[i]-y_1D)<0.00001)
  {
    number_of_min_1++;
    placeholder_1D[number_of_min_1-1]=i;
  }
}

for(i=0;i<number_of_max_1;i++)
{
  printf("#%d max of BC1 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder1[placeholder_1U[i]],
y_1U);
}

for(i=0;i<number_of_min_1;i++)
{
  printf("#%d min of BC1 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder1[placeholder_1D[i]],
y_1D);
}

temp_y_max=yborder2[0]; /* Initialize maximum value */
temp_y_min=yborder2[0]; /* Initialize minimum value */

for(i=0;i<10;i++)
{
  placeholder_2U[i]=0; /* Initialize maximum value's position in the array */
  placeholder_2D[i]=0; /* Initialize minimum value's position in the array */
}

int number_of_max_2, number_of_min_2;
number_of_max_2=0;
number_of_min_2=0;

for (i = 1; i < N2; i++)
{
  if (yborder2[i] > temp_y_max)
  {
    temp_y_max = yborder2[i];
  }
  if (yborder2[i] < temp_y_min)

```

```

    {
        temp_y_min = yborder2[i];
    }
}
y_2U=temp_y_max;
y_2D=temp_y_min;

// Finding the position of the maximums and minimums of the BC2

for (i = 0; i < N2; i++)
{
    if(fabs(yborder2[i]-y_2U)<0.00001)
    {
        number_of_max_2++;
        placeholder_2U[number_of_max_2-1]=i;
    }

    if(fabs(yborder2[i]-y_2D)<0.00001)
    {
        number_of_min_2++;
        placeholder_2D[number_of_min_2-1]=i;
    }
}

for(i=0;i<number_of_max_2;i++)
{
    printf("#%d max of BC2 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder2[placeholder_2U[i]],
y_2U);
}

for(i=0;i<number_of_min_2;i++)
{
    printf("#%d min of BC2 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder2[placeholder_2D[i]],
y_2D);
}

temp_y_max=yborder3[0]; /* Initialize maximum value */
temp_y_min=yborder3[0]; /* Initialize minimum value */

for(i=0;i<10;i++)
{
    placeholder_3U[i]=0; /* Initialize maximum value's position in the array */
    placeholder_3D[i]=0; /* Initialize minimum value's position in the array */
}

int number_of_max_3, number_of_min_3;
number_of_max_3=0;
number_of_min_3=0;

for (i = 1; i < N3; i++)
{
    if (yborder3[i] > temp_y_max)
    {
        temp_y_max = yborder3[i];
    }
    if (yborder3[i] < temp_y_min)
    {
        temp_y_min = yborder3[i];
    }
}
y_3U=temp_y_max;
y_3D=temp_y_min;

// Finding the position of the maximums and minimums of the BC3

for (i = 0; i < N3; i++)
{
    if(fabs(yborder3[i]-y_3U)<0.00001)
    {
        number_of_max_3++;
    }
}

```

```

    placeholder_3U[number_of_max_3-1]=i;
  }

  if(fabs(yborder3[i]-y_3D)<0.00001)
  {
    number_of_min_3++;
    placeholder_3D[number_of_min_3-1]=i;
  }
}

for(i=0;i<number_of_max_3;i++)
{
  printf("#%d max of BC3 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder3[placeholder_3U[i]],
y_3U);
}

for(i=0;i<number_of_min_3;i++)
{
  printf("#%d min of BC3 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder3[placeholder_3D[i]],
y_3D);
}

temp_y_max=yborder4[0]; /* Initialize maximum value */
temp_y_min=yborder4[0]; /* Initialize minimum value */

for(i=0;i<10;i++)
{
  placeholder_4U[i]=0; /* Initialize maximum value's position in the array */
  placeholder_4D[i]=0; /* Initialize minimum value's position in the array */
}

int number_of_max_4, number_of_min_4;
number_of_max_4=0;
number_of_min_4=0;

for (i = 1; i < N4; i++)
{
  if (yborder4[i] > temp_y_max)
  {
    temp_y_max = yborder4[i];
  }
  if (yborder4[i] < temp_y_min)
  {
    temp_y_min = yborder4[i];
  }
}
y_4U=temp_y_max;
y_4D=temp_y_min;

// Finding the position of the maximums and minimums of the BC4

for (i = 0; i < N4; i++)
{
  if(fabs(yborder4[i]-y_4U)<0.00001)
  {
    number_of_max_4++;
    placeholder_4U[number_of_max_4-1]=i;
  }

  if(fabs(yborder4[i]-y_4D)<0.00001)
  {
    number_of_min_4++;
    placeholder_4D[number_of_min_4-1]=i;
  }
}

for(i=0;i<number_of_max_4;i++)
{
  printf("#%d max of BC4 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder4[placeholder_4U[i]],
y_4U);
}

for(i=0;i<number_of_min_4;i++)

```

```

    {
        printf("#%d min of BC4 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder4[placeholder_4D[i]],
            y_4D);
    }

    temp_y_max=yborder5[0]; /* Initialize maximum value */
    temp_y_min=yborder5[0]; /* Initialize minimum value */

    for(i=0;i<10;i++)
    {
        placeholder_5U[i]=0; /* Initialize maximum value's position in the array */
        placeholder_5D[i]=0; /* Initialize minimum value's position in the array */
    }

    int number_of_max_5, number_of_min_5;
    number_of_max_5=0;
    number_of_min_5=0;

    for (i = 1; i < N5; i++)
    {
        if (yborder5[i] > temp_y_max)
        {
            temp_y_max = yborder5[i];
        }
        if (yborder5[i] < temp_y_min)
        {
            temp_y_min = yborder5[i];
        }
    }
    y_5U=temp_y_max;
    y_5D=temp_y_min;

// Finding the position of the maximums and minimums of the BC5

    for (i = 0; i < N5; i++)
    {
        if(fabs(yborder5[i]-y_5U)<0.00001)
        {
            number_of_max_5++;
            placeholder_5U[number_of_max_5-1]=i;
        }

        if(fabs(yborder5[i]-y_5D)<0.00001)
        {
            number_of_min_5++;
            placeholder_5D[number_of_min_5-1]=i;
        }
    }

    for(i=0;i<number_of_max_5;i++)
    {
        printf("#%d max of BC5 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder5[placeholder_5U[i]],
            y_5U);
    }

    for(i=0;i<number_of_min_5;i++)
    {
        printf("#%d min of BC5 is the point (%f,%f)\n", i+1, xborder5[placeholder_5D[i]],
            y_5D);
    }

// printf("%f\n",y_1U);
// printf("%f\n",y_1D);

/* DEFINE THE Y AND DY VALUES FOR THE SCANNING OF THE POWDER LAYER */

    y=0;
    dy=y_1U/1000;
    int max_int_count_total=0;
    float X_INT_COMPLETE[30000], Y_INT_COMPLETE[30000];

```

```

int BC_INT_IND_COMPLETE[30000];
int cumsum_int_at_cur_y[30000]; /* Stores the cumulative sum of intersections of
all the border curves until a certain y value */
int big_loop_counter=0;
int int_count_total[30000];
cumsum_int_at_cur_y[0]=0;

for(y=0;y<=y_1U;y=y+dy)
{
/* FIND THE INTERSECTIONS OF THE Y=Y_CURRENT HORIZONTAL SCANNING LINE WITH THE BC1
*/

y=round(10*y)/10; /* Eliminating the rounding error for more accurate results */

big_loop_counter++;

float x_int_1[50], y_int_1[50];
int intersections_count_1=0;

if( (y>y_1D) && (y<y_1U) )
{
for(i=0;i<N1-1;i++)
{
if(fabs(yborder1[i]-y)<0.00001)
{
intersections_count_1++;
if(i>0 && i<N1-1 && (yborder1[i-1]-yborder1[i])*(yborder1[i]-
yborder1[i+1])<0) /* Searching for local extremes (minimums and maximums) */
{
x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i]-0.001;
y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
intersections_count_1++;
x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
}
else
{
x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i];
y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
}
}
else if((yborder1[i]-y)*(yborder1[i+1]-y)<0)
{
intersections_count_1++;
if(xborder1[i]!=xborder1[i+1])
{
y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
x_int_1[intersections_count_1-1]=y*(xborder1[i+1]-
xborder1[i])/(yborder1[i+1]-yborder1[i])+(yborder1[i+1]*xborder1[i]-
yborder1[i]*xborder1[i+1])/(yborder1[i+1]-yborder1[i]); /* Linear interpolation */
}
else
{
x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i];
y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
}
}
}
}
else if(fabs(y-y_1D)<=0.00001)
{
for(i=0;i<N1-1;i++)
{
// printf("%f\t%f\t%f\n", y, yborder1[i], fabs(y-yborder1[i]));
float kappa=fabs(y-yborder1[i]);
if(kappa<=0.00001)
{
intersections_count_1++;
if(i>0 && i<N1-1 && (yborder1[i-1]-yborder1[i])*(yborder1[i]-
yborder1[i+1])<0) /* Absolute minimum of BC1 */
{
x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i]-0.001;
y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
intersections_count_1++;
x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i]+0.001; /* Duplicate point */

```

```

        y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
    }
    else
    {
        x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i];
        y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
    }
}
}
else if(fabs(y-y_1U)<=0.00001)
{
    for(i=0;i<N1-1;i++)
    {
        if(fabs(y-yborder1[i])<=0.00001)
        {
            intersections_count_1++;
            if(i>0 && i<N1-1 && (yborder1[i-1]-yborder1[i])*(yborder1[i]-
yborder1[i+1])<0) /* Absolute maximum of BC1 */
            {
                x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i]-0.001;
                y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
                intersections_count_1++;
                x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i]+0.001; /* Duplicate point */
                y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
            }
            else
            {
                x_int_1[intersections_count_1-1]=xborder1[i];
                y_int_1[intersections_count_1-1]=y;
            }
        }
    }
}
else
{
    printf("No intersections of the 1st border curve exist at y=%f\n",y);
}

    printf("The 1st border curve has %d intersection(s) at y=%f\n",
intersections_count_1, y);

/* FIND THE INTERSECTIONS OF THE Y=Y_CURRENT HORIZONTAL SCANNING LINE WITH THE BC2
*/

float x_int_2[50], y_int_2[50];
int intersections_count_2=0;

if( (y>y_2D) && (y<y_2U) )
{
    for(i=0;i<N2-1;i++)
    {
        if(fabs(yborder2[i]-y)<0.00001)
        {
            intersections_count_2++;
            if(i>0 && i<N2-1 && (yborder2[i-1]-yborder2[i])*(yborder2[i]-
yborder2[i+1])<0) /* Searching for local extremes in BC2 */
            {
                x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i];//-0.001;
                y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
                // intersections_count_2++;
                // x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
                // y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
            }
            else
            {
                x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i];
                y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
            }
        }
        else if( (yborder2[i]-y)*(yborder2[i+1]-y)<0 )
        {
            intersections_count_2++;
            if(xborder2[i]!=xborder2[i+1])
            {

```

```

        y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
        x_int_2[intersections_count_2-1]=y*(xborder2[i+1]-
xborder2[i])/(yborder2[i+1]-yborder2[i])+(yborder2[i+1]*xborder2[i]-
yborder2[i]*xborder2[i+1])/(yborder2[i+1]-yborder2[i]); /* Linear interpolation */
    }
    else
    {
        x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i];
        y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
    }
}
}
else if(fabs(y-y_2D)<=0.00001)
{
    for(i=0;i<N2-1;i++)
    {
        // printf("%f\t%f\t%f\n", y, yborder2[i], fabs(y-yborder2[i]));
        float kappa=fabs(y-yborder2[i]);
        if(kappa<=0.00001)
        {
            intersections_count_2++;
            if(i>0 && i<N2-1 && (yborder2[i-1]-yborder2[i])*(yborder2[i]-
yborder2[i+1])<0) /* Absolute minimum of BC2 */
            {
                x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i];//-0.001;
                y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
                // intersections_count_2++;
                // x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
                // y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
            }
            else
            {
                x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i];
                y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
            }
        }
    }
}
else if(fabs(y-y_2U)<=0.00001)
{
    for(i=0;i<N2-1;i++)
    {
        if(fabs(y-yborder2[i])<=0.00001)
        {
            intersections_count_2++;
            if(i>0 && i<N2-1 && (yborder2[i-1]-yborder2[i])*(yborder2[i]-
yborder2[i+1])<0) /* Absolute maximum of BC2 */
            {
                x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i];//-0.001;
                y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
                // intersections_count_2++;
                // x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
                // y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
            }
            else
            {
                x_int_2[intersections_count_2-1]=xborder2[i];
                y_int_2[intersections_count_2-1]=y;
            }
        }
    }
}
else
{
    printf("No intersections of the 2nd border curve exist at y=%f\n",y);
}

printf("The 2nd border curve has %d intersection(s) at y=%f\n",
intersections_count_2, y);

/* FIND THE INTERSECTIONS OF THE Y=Y_CURRENT HORIZONTAL SCANNING LINE WITH THE BC3
*/

float x_int_3[50], y_int_3[50];

```

```

int intersections_count_3=0;

if( (y>y_3D) && (y<y_3U) )
{
  for(i=0;i<N3-1;i++)
  {
    if(fabs(yborder3[i]-y)<0.00001)
    {
      intersections_count_3++;
      if(i>0 && i<N3-1 && (yborder3[i-1]-yborder3[i])*(yborder3[i]-
yborder3[i+1])<0) /* Searching for local extremes in BC3 */
      {
        x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i];//-0.001;
        y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
        // intersections_count_3++;
        // x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
        // y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
      }
      else
      {
        x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i];
        y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
      }
    }
    else if( (yborder3[i]-y)*(yborder3[i+1]-y)<0)
    {
      intersections_count_3++;
      if(xborder3[i]!=xborder3[i+1])
      {
        y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
        x_int_3[intersections_count_3-1]=y*(xborder3[i+1]-
xborder3[i])/(yborder3[i+1]-yborder3[i])+(yborder3[i+1]*xborder3[i]-
yborder3[i]*xborder3[i+1])/(yborder3[i+1]-yborder3[i]); /* Linear interpolation */
      }
      else
      {
        x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i];
        y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
      }
    }
  }
}
else if(fabs(y-y_3D)<=0.00001)
{
  for(i=0;i<N3-1;i++)
  {
    // printf("%f\t%f\t%f\n", y, yborder3[i], fabs(y-yborder3[i]));
    float kappa=fabs(y-yborder3[i]);
    if(kappa<=0.00001)
    {
      intersections_count_3++;
      if(i>0 && i<N3-1 && (yborder3[i-1]-yborder3[i])*(yborder3[i]-
yborder3[i+1])<0) /* Absolute minimum of BC3 */
      {
        x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i];//-0.001;
        y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
        // intersections_count_3++;
        // x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
        // y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
      }
      else
      {
        x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i];
        y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
      }
    }
  }
}
else if(fabs(y-y_3U)<=0.00001)
{
  for(i=0;i<N3-1;i++)
  {
    if(fabs(y-yborder3[i])<=0.00001)
    {

```



```

        intersections_count_3++;
        if(i>0 && i<N3-1 && (yborder3[i-1]-yborder3[i])*(yborder3[i]-
yborder3[i+1])<0) /* Absolute maximum of BC3 */
        {
            x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i];//-0.001;
            y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
            // intersections_count_3++;
            // x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
            // y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
        }
        else
        {
            x_int_3[intersections_count_3-1]=xborder3[i];
            y_int_3[intersections_count_3-1]=y;
        }
    }
}
else
{
    printf("No intersections of the 3rd border curve exist at y=%f\n",y);
}

printf("The 3rd border curve has %d intersection(s) at y=%f\n",
intersections_count_3, y);

/* FIND THE INTERSECTIONS OF THE Y=Y_CURRENT HORIZONTAL SCANNING LINE WITH THE BC4
*/

float x_int_4[50], y_int_4[50];
int intersections_count_4=0;

if( (y>y_4D) && (y<y_4U) )
{
    for(i=0;i<N4-1;i++)
    {
        if(fabs(yborder4[i]-y)<0.00001)
        {
            intersections_count_4++;
            if(i>0 && i<N4-1 && (yborder4[i-1]-yborder4[i])*(yborder4[i]-
yborder4[i+1])<0) /* Searching for local extremes in BC4 */
            {
                x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i];//-0.001;
                y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
                // intersections_count_4++;
                // x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
                // y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
            }
            else
            {
                x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i];
                y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
            }
        }
        else if( (yborder4[i]-y)*(yborder4[i+1]-y)<0)
        {
            intersections_count_4++;
            if(xborder4[i]!=xborder4[i+1])
            {
                y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
                x_int_4[intersections_count_4-1]=y*(xborder4[i+1]-
xborder4[i])/(yborder4[i+1]-yborder4[i])+(yborder4[i+1]*xborder4[i]-
yborder4[i]*xborder4[i+1])/(yborder4[i+1]-yborder4[i]); /* Linear interpolation */
            }
            else
            {
                x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i];
                y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
            }
        }
    }
}
else if(fabs(y-y_4D)<=0.00001)
{
    for(i=0;i<N4-1;i++)

```

```

{
// printf("%f\t%f\t%f\n", y, yborder4[i], fabs(y-yborder4[i]));
float kappa=fabs(y-yborder4[i]);
if(kappa<=0.00001)
{
intersections_count_4++;
if(i>0 && i<N4-1 && (yborder4[i-1]-yborder4[i])*(yborder4[i]-
yborder4[i+1])<0) /* Absolute minimum of BC4 */
{
x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i];//-0.001;
y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
// intersections_count_4++;
// x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
// y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
}
else
{
x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i];
y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
}
}
}
}
else if(fabs(y-y_4U)<=0.00001)
{
for(i=0;i<N4-1;i++)
{
if(fabs(y-yborder4[i])<=0.00001)
{
intersections_count_4++;
if(i>0 && i<N4-1 && (yborder4[i-1]-yborder4[i])*(yborder4[i]-
yborder4[i+1])<0) /* Absolute maximum of BC4 */
{
x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i];//-0.001;
y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
// intersections_count_4++;
// x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i]+0.001; /* Duplicating the
extreme */
// y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
}
else
{
x_int_4[intersections_count_4-1]=xborder4[i];
y_int_4[intersections_count_4-1]=y;
}
}
}
}
}
else
{
printf("No intersections of the 4th border curve exist at y=%f\n",y);
}

printf("The 4th border curve has %d intersection(s) at y=%f\n",
intersections_count_4, y);

/* FIND THE INTERSECTIONS OF THE Y=Y_CURRENT HORIZONTAL SCANNING LINE WITH THE BC5
*/

float x_int_5[50], y_int_5[50];
int intersections_count_5=0;

if( (y>y_5D) && (y<y_5U) )
{
for(i=0;i<N5-1;i++)
{
if(fabs(yborder5[i]-y)<0.00001)
{
intersections_count_5++;
if(i>0 && i<N5-1 && (yborder5[i-1]-yborder5[i])*(yborder5[i]-
yborder5[i+1])<0) /* Searching for local extremes in BC5 */
{
x_int_5[intersections_count_5-1]=xborder5[i]-0.001;
y_int_5[intersections_count_5-1]=y;
intersections_count_5++;
}
}
}
}
}

```



```

    }
  }
  else
  {
    printf("No intersections of the 5th border curve exist at y=%f\n",y);
  }

  printf("The 5th border curve has %d intersection(s) at y=%f\n",
intersections_count_5, y);

  /* Fill arrays with all intersections-create array of indicators-to which BC each
intersection belongs */

  float x_int_ALL[50], y_int_ALL[50]; /* arrays that contain all intersections */
  int BC_int_ind[50]; /* Indicator array-if an intersection belongs to BC1, then
it has value of 1, if it belongs to BC2, it has a value of 2, etc. */

  for(i=0;i<intersections_count_1;i++)
  {
    x_int_ALL[i]=x_int_1[i];
    y_int_ALL[i]=y_int_1[i];
    BC_int_ind[i]=1;
  }

  for(i=intersections_count_1;i<intersections_count_1+intersections_count_2;i++)
  {
    x_int_ALL[i]=x_int_2[i-intersections_count_1];
    y_int_ALL[i]=y_int_2[i-intersections_count_1];
    BC_int_ind[i]=2;
  }

  for(i=intersections_count_1+intersections_count_2;i<intersections_count_1+intersect
ions_count_2+intersections_count_3;i++)
  {
    x_int_ALL[i]=x_int_3[i-intersections_count_1-intersections_count_2];
    y_int_ALL[i]=y_int_3[i-intersections_count_1-intersections_count_2];
    BC_int_ind[i]=3;
  }

  for(i=intersections_count_1+intersections_count_2+intersections_count_3;i<intersect
ions_count_1+intersections_count_2+intersections_count_3+intersections_count_4;i++)
  {
    x_int_ALL[i]=x_int_4[i-intersections_count_1-intersections_count_2-
intersections_count_3];
    y_int_ALL[i]=y_int_4[i-intersections_count_1-intersections_count_2-
intersections_count_3];
    BC_int_ind[i]=4;
  }

  for(i=intersections_count_1+intersections_count_2+intersections_count_3+intersectio
ns_count_4;i<intersections_count_1+intersections_count_2+intersections_count_3+inters
ections_count_4+intersections_count_5;i++)
  {
    x_int_ALL[i]=x_int_5[i-intersections_count_1-intersections_count_2-
intersections_count_3-intersections_count_4];
    y_int_ALL[i]=y_int_5[i-intersections_count_1-intersections_count_2-
intersections_count_3-intersections_count_4];
    BC_int_ind[i]=5;
  }

  /* Intersection array sorting in ascending x-coordinate order */

  float temp_sort_x;
  int temp_sort_ind;
  int j;

  int_count_total[big_loop_counter]=intersections_count_1+intersections_count_2+inter
sections_count_3+intersections_count_4+intersections_count_5;
  cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter]=cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter-
1]+int_count_total[big_loop_counter];

```

```

    if(max_int_count_total<int_count_total[big_loop_counter])
    {
        max_int_count_total=int_count_total[big_loop_counter];
        printf("The current maximum intersection number is %d and first occurs at
y=%f\n", max_int_count_total, y);
    }

    for (i = 0; i < int_count_total[big_loop_counter]; ++i)
    {
        for (j = i + 1; j < int_count_total[big_loop_counter]; ++j)
        {
            if (x_int_ALL[i] > x_int_ALL[j])
            {
                temp_sort_x = x_int_ALL[i];
                temp_sort_ind = BC_int_ind[i];
                x_int_ALL[i] = x_int_ALL[j];
                BC_int_ind[i] = BC_int_ind[j];
                x_int_ALL[j] = temp_sort_x;
                BC_int_ind[j] = temp_sort_ind;
            }
        }
    }

    int help=0;
    for(i=cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter-
1];i<cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter];i++)
    {

        X_INT_COMPLETE[i]=x_int_ALL[help];
        Y_INT_COMPLETE[i]=y_int_ALL[help];
        BC_INT_IND_COMPLETE[i]=BC_int_ind[help];
        help++;
    }

    for (i = 0; i < int_count_total[big_loop_counter]; ++i)
    {
        printf("#%d intersection: The #%d border curve's (BC%d) has an intersection at
the point (%f,%f)\n", i+1, BC_int_ind[i], BC_int_ind[i], x_int_ALL[i], y_int_ALL[i]);
    }
}

for(i=0;i<big_loop_counter;i++)
{
    printf("At y=%f, there are %d intersections, raising the cumulative sum of
intersections to the number of %d\n", i*dy,
int_count_total[i+1],cumsum_int_at_cur_y[i+1]);
}

/* FITTING THE INTERSECTIONS INTO FRONTS */

int internal_int_counter=1;
int local_counter[10000];

for(i=0;i<cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter];i++)
{
    if(i==0)
    {
        printf("#%d intersection: The #%d border curve's (BC%d) has an intersection (the
#%d intersection at y=%f) at the point (%f,%f)\n", i+1, BC_INT_IND_COMPLETE[i],
BC_INT_IND_COMPLETE[i], internal_int_counter, Y_INT_COMPLETE[i], X_INT_COMPLETE[i],
Y_INT_COMPLETE[i]);
        local_counter[i]=internal_int_counter;
    }
    else if(fabs(Y_INT_COMPLETE[i]-Y_INT_COMPLETE[i-1])<=0.00001)
    {
        internal_int_counter++;
        printf("#%d intersection: The #%d border curve's (BC%d) has an intersection (the
#%d intersection at y=%f) at the point (%f,%f)\n", i+1, BC_INT_IND_COMPLETE[i],
BC_INT_IND_COMPLETE[i], internal_int_counter, Y_INT_COMPLETE[i], X_INT_COMPLETE[i],
Y_INT_COMPLETE[i]);
        local_counter[i]=internal_int_counter;
    }
    else

```

```

    {
        printf("#%d intersection: The #%d border curve's (BC%d) has an intersection (the
#1 intersection at y=%f) at the point (%f,%f)\n", i+1, BC_INT_IND_COMPLETEE[i],
BC_INT_IND_COMPLETEE[i], Y_INT_COMPLETEE[i], X_INT_COMPLETEE[i], Y_INT_COMPLETEE[i]);
        internal_int_counter=1;
        local_counter[i]=internal_int_counter;
    }
}

// printf("A/A\tX_inters.\tY_inters.\tLoc.int.count\t BC\n");
//
// for(i=0;i<cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter];i++)
// {
//     printf("%d\t%f\t%f\t%d\t\t %d\n", i+1, X_INT_COMPLETEE[i], Y_INT_COMPLETEE[i],
local_counter[i], BC_INT_IND_COMPLETEE[i]);
// }

    printf("The maximum number of intersections is %d.\n", max_int_count_total);

/* Add duplicates for local minimums or maximums */

/* Add the necessary points (X_1R,y_current) in the X_INT_COMPLETEE and Y_INT_COMPLETEE
arrays */

int m;
int added_points=0;
float X_INT_COMPLETEE_FINAL[20000], Y_INT_COMPLETEE_FINAL[20000];
int BC_INT_IND_COMPLETEE_FINAL[20000], local_counter_FINAL[20000];

for(i=0;i<cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter];i++)
{
    if(fabs(X_INT_COMPLETEE[i]-100)<0.00001 && local_counter[i]<max_int_count_total)
    {
        X_INT_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=X_INT_COMPLETEE[i];
        Y_INT_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=Y_INT_COMPLETEE[i];
        BC_INT_IND_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=BC_INT_IND_COMPLETEE[i];
        local_counter_FINAL[i+added_points]=local_counter[i];

        for(m=local_counter[i]+1;m<=max_int_count_total;m++)
        {
            added_points++;
            X_INT_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=100;
            Y_INT_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=Y_INT_COMPLETEE[i];
            BC_INT_IND_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=1;
            local_counter_FINAL[i+added_points]=m;
        }
    }
    else
    {
        X_INT_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=X_INT_COMPLETEE[i];
        Y_INT_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=Y_INT_COMPLETEE[i];
        BC_INT_IND_COMPLETEE_FINAL[i+added_points]=BC_INT_IND_COMPLETEE[i];
        local_counter_FINAL[i+added_points]=local_counter[i];
    }
}

// printf("-----\n");
// printf("A/A\tX_inters.\tY_inters.\tLoc.int.count\t BC\n");
//
// for(i=0;i<cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter]+added_points;i++)
// {
//     printf("%d\t%f\t%f\t%d\t\t %d\n", i+1, X_INT_COMPLETEE_FINAL[i],
Y_INT_COMPLETEE_FINAL[i], local_counter_FINAL[i], BC_INT_IND_COMPLETEE_FINAL[i]);
// }

/* OPEN THE .TXT FILES THAT WILL CONTAIN THE COORDINATES OF THE FRONTS. */
/* THE NUMBER OF FRONTS IS AT MOST EQUAL TO THE NUMBER OF MAXIMUM INTERSECTIONS AT
SOME Y MULTIPLIED BY THE NUMBER OF MATERIALS ON THE LAYER MINUS 1 */
/* (MAX # FRONTS)=(max_int_count_total)*(# MATERIALS - 1) */

const char* fileName1 = "Intersection_#";
const char* fileType = ".txt";

```

```

char buffer1[50];

FILE* f1 = NULL;

int j;

/* Print points into files based on the order of intersections at each y */

float x_sol, y_sol;
int loc_cnt_sol, BC_ind_sol;
float distance, distance_min;;
distance_min=1000;
distance=1100;
int n, j_prev;

for(i=0;i<max_int_count_total;i++)
{
  for(j=0;j<cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter]+added_points;j++)
  {
    if(j==0)
    {
      sprintf(buffer1,"%s%d%s",fileName1,i+1,fileType);
      f1 = fopen(buffer1,"w");
    }

    if(local_counter_FINAL[j]==i+1)
    {
      if( (j>1 && j<(cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter]+added_points-1) &&
X_INT_COMPLETE_FINAL[j]-X_INT_COMPLETE_FINAL[j_prev]<-2.5) /* || (j>0 &&
BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j]!=BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j_prev] &&
X_INT_COMPLETE_FINAL[j]<X_INT_COMPLETE_FINAL[j_prev]) */ )
      {
        for(n=0;n<12;n++)
        {
          distance = (X_INT_COMPLETE_FINAL[j_prev]-X_INT_COMPLETE_FINAL[j-
local_counter_FINAL[j]+(n+1)])*(X_INT_COMPLETE_FINAL[j_prev]-X_INT_COMPLETE_FINAL[j-
local_counter_FINAL[j]+(n+1)])+(Y_INT_COMPLETE_FINAL[j_prev]-Y_INT_COMPLETE_FINAL[j-
local_counter_FINAL[j]+(n+1)])*(Y_INT_COMPLETE_FINAL[j_prev]-Y_INT_COMPLETE_FINAL[j-
local_counter_FINAL[j]+(n+1)]);

          if(distance<=distance_min)
          {
            x_sol=X_INT_COMPLETE_FINAL[j-local_counter_FINAL[j]+(n+1)];
            y_sol=Y_INT_COMPLETE_FINAL[j-local_counter_FINAL[j]+(n+1)];
            loc_cnt_sol=local_counter_FINAL[j-local_counter_FINAL[j]+(n+1)];
            BC_ind_sol=BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j-local_counter_FINAL[j]+(n+1)];
            distance_min=distance;
          }
        }

        fprintf(f1, "%f\t%f\t%d\t%d\n", x_sol, y_sol, loc_cnt_sol, BC_ind_sol);
        fprintf(f1, "%f\t%f\t%d\t%d\n", X_INT_COMPLETE_FINAL[j],
Y_INT_COMPLETE_FINAL[j], local_counter_FINAL[j], BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j]);
      }
      else if( (j>1 && j<(cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter]+added_points-1) &&
X_INT_COMPLETE_FINAL[j]-X_INT_COMPLETE_FINAL[j_prev]>2.5) /* || (j>0 &&
BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j]!=temp_BC &&
X_INT_COMPLETE_FINAL[j]>X_INT_COMPLETE_FINAL[j-1]) */ )
      {
        for(n=0;n<12;n++)
        {
          distance = (X_INT_COMPLETE_FINAL[j]-X_INT_COMPLETE_FINAL[j-
local_counter_FINAL[j]-n])*(X_INT_COMPLETE_FINAL[j]-X_INT_COMPLETE_FINAL[j-
local_counter_FINAL[j]-n])+(Y_INT_COMPLETE_FINAL[j]-Y_INT_COMPLETE_FINAL[j-
local_counter_FINAL[j]-n])*(Y_INT_COMPLETE_FINAL[j]-Y_INT_COMPLETE_FINAL[j-
local_counter_FINAL[j]-n]);

          if(distance<=distance_min)
          {
            x_sol=X_INT_COMPLETE_FINAL[j-local_counter_FINAL[j]-n];
            y_sol=Y_INT_COMPLETE_FINAL[j-local_counter_FINAL[j]-n];
            loc_cnt_sol=local_counter_FINAL[j-local_counter_FINAL[j]-n];
            BC_ind_sol=BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j-local_counter_FINAL[j]-n];
            distance_min=distance;
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

```

        fprintf(f1, "%f\t%f\t%d\t%d\n", x_sol, y_sol, loc_cnt_sol, BC_ind_sol);
        fprintf(f1, "%f\t%f\t%d\t%d\n", X_INT_COMPLETE_FINAL[j],
Y_INT_COMPLETE_FINAL[j], local_counter_FINAL[j], BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j]);
    }
    else
    {
        fprintf(f1, "%f\t%f\t%d\t%d\n", X_INT_COMPLETE_FINAL[j],
Y_INT_COMPLETE_FINAL[j], local_counter_FINAL[j], BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j]);

    }

    j_prev=j;
    distance_min=1100;
}
}
fclose(f1);
}

/* -----
----- */

/* PRINT FILE FOR THE FRONT-CREATING PROGRAM TO RUN */

const char* fileName2 = "All_intersections";
char buffer2[50];

FILE* f2 = NULL;
sprintf(buffer2,"%s%s", fileName2, fileType);
f2 = fopen(buffer2,"w");

for(j=0;j<cumsum_int_at_cur_y[big_loop_counter]+added_points;j++)
{
    fprintf(f2, "%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", j, X_INT_COMPLETE_FINAL[j],
Y_INT_COMPLETE_FINAL[j], local_counter_FINAL[j], BC_INT_IND_COMPLETE_FINAL[j]);
}

/* -----
----- */

return 0;
}

```


8.5 Παράρτημα Ε: Τμηματοποίηση επί άξονα X / Ανάπτυξη μετώπων

```

/* ASSIGNING MATERIAL TO POINT-CHECKING FOR INTERNALITY-EXTERNALITY */
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#define Nbc 101 /* NUMBER OF POINTS WITH WHICH EACH BORDER CURVE IS DEPICTED */

int main()
{
    /* Open the already created .txt files that contain the border point coordinates. These
    coordinates are extracted by Solidworks section cuts of slicing software. */
    /* The .txt files must be located in the same folder as the c code and its .exe post-
    compilation file */
    /* WARNING: MIGHT NEED TO COMMENT OUT OR ADD LINES, IN CASE OF MORE OR LESS BORDER
    CURVES */

    FILE* ptr1 = fopen("BORDER1.txt", "r");
    if (ptr1 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr2 = fopen("BORDER2.txt", "r");
    if (ptr2 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr3 = fopen("BORDER3.txt", "r");
    if (ptr3 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr4 = fopen("BORDER4.txt", "r");
    if (ptr4 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr5 = fopen("BORDER5.txt", "r");
    if (ptr5 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    FILE* ptr6 = fopen("All_intersections.txt", "r");
    if (ptr6 == NULL)
    {
        printf("no such file.");
        return 0;
    }

    int i;

    /* Insert as many border curves as they exist in the multimaterial layer that is to be
    deposited by simply adding lines */
    /* WARNING: MIGHT NEED TO COMMENT OUT OR ADD LINES, IN CASE OF MORE OR LESS BORDER
    CURVES */

    float xborder1[Nbc], yborder1[Nbc];
    float xborder2[Nbc], yborder2[Nbc];
    float xborder3[Nbc], yborder3[Nbc];
    float xborder4[Nbc], yborder4[Nbc];

```

```

float xborder5[Nbc],yborder5[Nbc];
float x[15000], y[15000];
int local_counter[15000], BC_indicator[15000], placeholder[15000];

/* Read border curve coordinates from the .txt files and store them in the respective
arrays */
/* WARNING: MIGHT NEED TO COMMENT OUT OR ADD LINES, IN CASE OF MORE OR LESS BORDER
CURVES */

int N1, N2, N3, N4, N5, num_of_int;

i=0;
while(fscanf(ptr1, "%f%f\n",&xborder1[i],&yborder1[i])!=EOF)
{
i=i+1;
}
N1=i;

i=0;
while(fscanf(ptr2, "%f%f\n",&xborder2[i],&yborder2[i])!=EOF)
{
i=i+1;
}
N2=i;

i=0;
while(fscanf(ptr3, "%f%f\n",&xborder3[i],&yborder3[i])!=EOF)
{
i=i+1;
}
N3=i;

i=0;
while(fscanf(ptr4, "%f%f\n",&xborder4[i],&yborder4[i])!=EOF)
{
i=i+1;
}
N4=i;

i=0;
while(fscanf(ptr5, "%f%f\n",&xborder5[i],&yborder5[i])!=EOF)
{
i=i+1;
}
N5=i;

i=0;
while(fscanf(ptr6, "%d%f%f%d\n", &placeholder[i], &x[i], &y[i], &local_counter[i],
&BC_indicator[i])!=EOF)
{
i=i+1;
}
num_of_int=i;

/* Measure the number of horizontal lines, i.e. the (y1,U/dy) */

int num_of_hor_lines=0;
float y_counter;

for(y_counter=0;y_counter<=100;y_counter+=0.1)
{
num_of_hor_lines++;
}

// printf("The number of horizontal y=y0 lines is %d.\n", num_of_hor_lines); /*
Debug line */

/* Check that the border curves are stored correctly via screen display */

// for(i=0;i<N5;i++){ /* Debug line */
// printf("%d\t%f\t%f\n",i+1,xborder5[i],yborder5[i]); /* Debug line */
// } /* Debug line */

/* Find the maximum number of intersections with a horizontal y=y0 line. */

int max_int_count_total;

```

```

max_int_count_total = local_counter[0];

for (i = 1; i < num_of_int; ++i)
{
    if (max_int_count_total < local_counter[i])
    {
        max_int_count_total = local_counter[i];
    }
}

// printf("Number of intersections per horizontal line is %d\n", max_int_count_total);
/* Debug line */

/* ASSIGN MATERIAL TO EACH BORDER CURVE AND FIND THE NUMBER OF MATERIALS IN THE LAYER
*/

int num_of_materials;
int assigned_material;
int mat_BC[5];

mat_BC[0]=1; /* Material #1 is assigned to the BC1 - ALWAYS */
mat_BC[1]=2; /* Material #2 is assigned to the BC2 - ALWAYS */
mat_BC[2]=1; /* Material #1 is assigned to the BC3 */
mat_BC[3]=3; /* Material #3 is assigned to the BC4 */
mat_BC[4]=2; /* Material #2 is assigned to the BC5 */

num_of_materials=mat_BC[0];

for(i = 0; i < 5; i++)
{
    if (mat_BC[i]>=num_of_materials)
    {
        num_of_materials=mat_BC[i]; /* The number of materials in the layer is equal
to the maximum value of the array mat_BC[] */
    }
}

/* ENTER THE COORDINATES OF THE POINT THAT IS TO BE EXAMINED-ASSIGN MATERIAL TYPE TO IT
*/

float x_A, y_A;
// x_A=46.7; /* Debug line */
// y_A=36.8; /* Debug line */
float dx=0.13;

/* DEFINE THE ARRAYS TO STORE THE COORDINATES OF THE INTERSECTIONS OF THE BORDER CURVES
WITH THE OA RAY - FOR INTERNALITY CHECKS */

float x_int_temp, y_int_temp;
float x_int[50], y_int[50];
int intersections_count_2=0;
int intersections_count_3=0;
int intersections_count_4=0;
int intersections_count_5=0;

/* DEFINE INTERNALITY AND EXTERNALITY INDICES */

int int_index_1, int_index_2, int_index_3, int_index_4, int_index_5; /* The internal
index of an internal point is 1, and the internal index of an external point equals to
0 */
int_index_1=1; /* Always, by default, as the BC1 is the
orthogonal rectangle area that envelops the entire layer */

int ext_index[5];

/* DEFINE SWITCHES TO CHECK WHETHER A POINT IS DIRECTLY ONTO A BORDER CURVE */

int switch_1=0;
int switch_2=0;
int switch_3=0;
int switch_4=0;
int switch_5=0;

/* -----
-----
----- */

```

```

/* Develop the first two fronts LF0 and RF0 */

FILE* f1 = NULL;
FILE* f2 = NULL;

char buffer1[50];
char buffer2[50];

const char* fileName1 = "LF_#";
const char* fileName2 = "RF_#";
const char* fileType = ".txt";

sprintf(buffer1,"%s%d%s", fileName1, 0, fileType);
f1 = fopen(buffer1,"w");
sprintf(buffer2,"%s%d%s", fileName2, 0, fileType);
f2 = fopen(buffer2,"w");

float x_sol, y_sol;
int loc_cnt_sol, BC_ind_sol;
int placeholderRF_sol;
float distance, distance_min;
distance_min=1000;
int n, j_prev, j, k1;
k1=0;

/* Creating LF0 */

float xLF[2000], yLF[2000];
int LCLF[2000], BCLF[2000], placeholderLF[2000]; /* Placeholder stores the
position that the selected point has within the x and y array that contains all the
intersections */

/* Creating RF0 */

float xRF[2000], yRF[2000];
int LCRF[2000], BCRF[2000], placeholderRF[2000];

/* LF0 AND RF0 COINCIDE, AND THEY ARE THE VERTICAL x=x_1,L=0 LINE */

for(i=0;i<num_of_int;i++)
{
  if(local_counter[i]==1)
  {
    k1++;
    xLF[k1-1]=x[i];
    yLF[k1-1]=y[i];
    LCLF[k1-1]=local_counter[i];
    BCLF[k1-1]=BC_indicator[i];
    placeholderLF[k1-1]=i;
    fprintf(f1, "%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", k1-1, i, x[i], y[i], local_counter[i],
BC_indicator[i]);

    xRF[k1-1]=x[i];
    yRF[k1-1]=y[i];
    LCRF[k1-1]=local_counter[i];
    BCRF[k1-1]=BC_indicator[i];
    placeholderRF[k1-1]=i;
    fprintf(f2, "%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", k1-1, i, x[i], y[i], local_counter[i],
BC_indicator[i]);
  }
}

fclose(f1);
fclose(f2);

/* We will now create the new front couples (i.e. LF1-RF1, LF2-RF2, etc.) */

int FLC=0; /* Stands for Front Loop Counter. It counts the number of the DO...WHILE
loop iteration */
int switcheroo=0;
int all_equal;
int previous_RF_elements;
previous_RF_elements=k1;
k1=0; /* k1 counter will be used to count the elements of the new Right Front
inside the DO...WHILE Loop */

```

```

do
{
/* Opening the files that will contain the data of the new Left Front and Right
Front */

FILE* f3 = NULL;
FILE* f4 = NULL;

sprintf(buffer1,"%s%d%s", fileName1, FLC+1, fileType);
f3 = fopen(buffer1,"w");
sprintf(buffer2,"%s%d%s", fileName2, FLC+1, fileType);
f4 = fopen(buffer2,"w");

/* The new Left Front is the previous Right Front, hence the previous_RF_elements
is equal to the new_LF_elements */

for(i=0;i<previous_RF_elements;i++)
{
xLF[i]=xRF[i];
yLF[i]=yRF[i];
LCLF[i]=LCRF[i];
BCLF[i]=BCRF[i];
placeholderLF[i]=placeholderRF[i];
fprintf(f3, "%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", i, placeholderLF[i], xLF[i], yLF[i],
LCLF[i], BCLF[i]);
}

fclose(f3);

/* Creating the new Right Front */

for(j=0;j<previous_RF_elements;j++)
{
if(fabs(yLF[j])<0.001)
{
k1++;
xRF[k1-1]=100;
yRF[k1-1]=yLF[j];

if(LCLF[j]<max_int_count_total)
{
LCRF[k1-1]=LCLF[j]+1;
placeholderRF[k1-1]=placeholderLF[j]+1;
}
else
{
LCRF[k1-1]=max_int_count_total;
placeholderRF[k1-1]=max_int_count_total;
}

BCRF[k1-1]=1;

fprintf(f4, "%d\t%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", j, k1-1, placeholderRF[k1-1],
xRF[k1-1], yRF[k1-1], LCRF[k1-1], BCRF[k1-1]);

}
else if(fabs(xLF[j]-100)<0.001)
{
k1++;
xRF[k1-1]=xLF[j];
yRF[k1-1]=yLF[j];

if(LCLF[j]<max_int_count_total)
{
LCRF[k1-1]=LCLF[j]+1;
}
else
{
LCRF[k1-1]=max_int_count_total;
}

if( (placeholderLF[j]+1) % max_int_count_total != 0 )
{
placeholderRF[k1-1]=placeholderLF[j]+1;
}
}
}
}

```

```

    }
    else
    {
        placeholderRF[k1-1]=placeholderLF[j];
    }

    BCRF[k1-1]=1;

    fprintf(f4, "%d\t%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", j, k1-1, placeholderRF[k1-1],
xRF[k1-1], yRF[k1-1], LCRF[k1-1], BCRF[k1-1]);
}
else
{
    x_A=x[placeholderLF[j]+1]-dx;
    y_A=y[placeholderLF[j]+1];

    /*
#####
#####
##### */
    /* ##### INTERNALITY CHECK WITHIN THE
DO...WHILE LOOP
#####
##### */

    /* BC1 */

    /* LOCATE THE A POINT WITH REGARD TO THE BC1 BORDER CURVE */

    /* DEFINE WHAT HAPPENS IN BORDER CONDITIONS, I.E. WHEN THE POINT WE EVALUATE
IS ON THE BC1 BORDER CURVE */

    for(i=0;i<N1;i++)
    {
        if(fabs(x_A-xborder1[i])<=0.00001 && fabs(y_A-yborder1[i])<=0.00001) /*
If the A point happens to coincide with a point of the BC. */
        {
            switch_1=1; /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N1-1 && fabs(x_A-xborder1[i])<=0.00001 && fabs(x_A-
xborder1[i+1])<=0.00001 && (y_A-yborder1[i])*(y_A-yborder1[i+1])<0) /* If the A point
happens to be on the vertical linear segment that is defined by the i-th and (i+1)th
point of the BC. */
        {
            switch_1=1; /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N1-1 && fabs(y_A-yborder1[i])<=0.00001 && fabs(y_A-
yborder1[i+1])<=0.00001 && (x_A-xborder1[i])*(x_A-xborder1[i+1])<0) /* If the A
point happens to be on the horizontal linear segment that is defined by the i-th and
(i+1)th point of the BC. */
        {
            switch_1=1; /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N1-1 && fabs(-y_A+(yborder1[i]*xborder1[i+1]-
yborder1[i+1]*xborder1[i])/(xborder1[i+1]-xborder1[i])+x_A*(yborder1[i+1]-
yborder1[i])/(xborder1[i+1]-xborder1[i]))<=0.00001 && (y_A-yborder1[i])*(y_A-
yborder1[i+1])<0) /* If the A point happens to be on the random inclined linear segment
that is defined by the i-th and (i+1)th point of the BC. */
        {
            switch_1=1; /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else
        {
            switch_1=0; /* The A point is not on the BC. */
        }
    }

    if(switch_1==1)
    {

```

```

        printf("The A(%f,%f) point is located exactly onto the 1st Border Curve
(BC1).\n", x_A, y_A);
    }
    else
    {
        printf("The A(%f,%f) point is internal to the 1st Border Curve
(BC1).\n", x_A, y_A); /* By default, a point is either internal to, or located exactly
onto the BC1. */
    }

    /* -----
-----
----- */

    /* BC2 */

    /* DEFINE WHAT HAPPENS IN BORDER CONDITIONS, I.E. WHEN THE POINT WE
EVALUATE IS ON THE BC2 BORDER CURVE */

    for(i=0;i<N2;i++)
    {
        if(fabs(x_A-xborder2[i])<=0.00001 && fabs(y_A-yborder2[i])<=0.00001) /*
If the A point happens to coincide with a point of the BC. */
        {
            switch_2=1; /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N2-1 && fabs(x_A-xborder2[i])<=0.00001 && fabs(x_A-
xborder2[i+1])<=0.00001 && (y_A-yborder2[i])*(y_A-yborder2[i+1])<0) /* If the A point
happens to be on the vertical linear segment that is defined by the i-th and (i+1)th
point of the BC. */
        {
            switch_2=1; /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N2-1 && fabs(y_A-yborder2[i])<=0.00001 && fabs(y_A-
yborder2[i+1])<=0.00001 && (x_A-xborder2[i])*(x_A-xborder2[i+1])<0) /* If the A point
happens to be on the horizontal linear segment that is defined by the i-th and (i+1)th
point of the BC. */
        {
            switch_2=1; /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N2-1 && fabs(-y_A+(yborder2[i]*xborder2[i+1]-
yborder2[i+1]*xborder2[i])/(xborder2[i+1]-xborder2[i])+x_A*(yborder2[i+1]-
yborder2[i])/(xborder2[i+1]-xborder2[i]))<=0.00001 && (y_A-yborder2[i])*(y_A-
yborder2[i+1])<0) /* If the A point happens to be on the random inclined linear segment
that is defined by the i-th and (i+1)th point of the BC. */
        {
            switch_2=1; /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else
        {
            switch_2=0; /* The A point is not on the BC. */
        }
    }

    /* LOCATE THE INTERSECTIONS OF THE OA RAY WITH THE BC2 BORDER CURVE, TO
ESTABLISH INTERNALITY OR EXTERNALITY */

    if(switch_2==0)
    {
        for(i=0;i<N2-1;i++)
        {
            if(fabs(xborder2[i]-xborder2[i+1])<=0.00001) /* In case the i-th and
(i+1)-th points of the BC have the same x. */
            {
                x_int_temp=xborder2[i];
                y_int_temp=(y_A/x_A)*xborder2[i];

                if( ((yborder2[i]-y_int_temp)*(yborder2[i+1]-y_int_temp)<0) &&
(y_int_temp<y_A) )
                {
                    intersections_count_2++;
                    x_int[intersections_count_2-1]=x_int_temp;
                }
            }
        }
    }

```

```

        y_int[intersections_count_2-1]=y_int_temp;
    }
}
else if(fabs(yborder2[i]-yborder2[i+1])<=0.00001) /* In case the i-th
and (i+1)-th points of the BC have the same y. */
{
    x_int_temp=(x_A/y_A)*yborder2[i];
    y_int_temp=yborder2[i];

    if( ((xborder2[i]-x_int_temp)*(xborder2[i+1]-x_int_temp)<0) &&
(x_int_temp<x_A) )
    {
        intersections_count_2++;
        x_int[intersections_count_2-1]=x_int_temp;
        y_int[intersections_count_2-1]=y_int_temp;
    }
}
else if(fabs((y_A/x_A)-(yborder2[i]/xborder2[i]))<0.00001 &&
yborder2[i]<y_A) /* In case any points of the BC happen to belong exactly onto the
OA ray */
{
    intersections_count_2++;
    x_int_temp=xborder2[i];
    y_int_temp=yborder2[i];
    x_int[intersections_count_2-1]=x_int_temp;
    y_int[intersections_count_2-1]=y_int_temp;
}
else
{
    x_int_temp=(yborder2[i]*xborder2[i+1]-
yborder2[i+1]*xborder2[i])/(xborder2[i+1]-xborder2[i])*1/((y_A/x_A)-((yborder2[i+1]-
yborder2[i])/(xborder2[i+1]-xborder2[i])));
    y_int_temp=(y_A/x_A)*x_int_temp;

    if( ((yborder2[i]-y_int_temp)*(yborder2[i+1]-y_int_temp)<0) &&
(y_int_temp<y_A) )
    {
        intersections_count_2++;
        x_int[intersections_count_2-1]=x_int_temp;
        y_int[intersections_count_2-1]=y_int_temp;
    }
}
}
}

if(switch_2==1)
{
    // printf("The A(%f,%f) point is located exactly onto the 2nd Border Curve
(BC2).\n", x_A, y_A);
}
else
{
    printf("The 2nd Border Curve (BC2) has %d intersections with the OA ray
casted from the A(%f,%f) point towards the O(0,0) point.\n", intersections_count_2,
x_A, y_A);
}

for(i=0;i<intersections_count_2;i++)
{
    printf("BC2's #%d intersection with the OA ray is the (%f,%f) point.\n",
i+1, x_int[i], y_int[i]);
}

/* IF THERE IS AN ODD NUMBER OF INTERSECTIONS, A IS INTERNAL, IF THERE IS AN
EVEN ONE, IT IS EXTERNAL TO THE BORDER CURVE */

if(switch_2==1)
{
    printf("The A(%f,%f) point is exactly onto the 2nd Border Curve
(BC2).\n", x_A, y_A);
    int_index_2=1; /* Being onto a BC counts as being an internal point to
it. */
}
else if(switch_2==0 && intersections_count_2 % 2 == 0)
{

```



```

        printf("The A(%f,%f) point is external to the 2nd Border Curve
(BC2).\n", x_A, y_A);
        int_index_2=0;
    }
    else if (switch_2==0 && intersections_count_2 % 2 == 1)
    {
        printf("The A(%f,%f) point is internal to the 2nd Border Curve
(BC2).\n", x_A, y_A);
        int_index_2=1;
    }

    intersections_count_2=0;

    /* -----
----- */

/* BC3 */

/* DEFINE WHAT HAPPENS IN BORDER CONDITIONS, I.E. WHEN THE POINT WE
EVALUATE IS ON THE BC3 BORDER CURVE */

    for(i=0;i<N3;i++)
    {
        if(fabs(x_A-xborder3[i])<=0.00001 && fabs(y_A-yborder3[i])<=0.00001) /*
If the A point happens to coincide with a point of the BC. */
        {
            switch_3=1;    /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N3-1 && fabs(x_A-xborder3[i])<=0.00001 && fabs(x_A-
xborder3[i+1])<=0.00001 && (y_A-yborder3[i])*(y_A-yborder3[i+1])<0) /* If the A point
happens to be on the vertical linear segment that is defined by the i-th and (i+1)th
point of the BC. */
        {
            switch_3=1;    /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N3-1 && fabs(y_A-yborder3[i])<=0.00001 && fabs(y_A-
yborder3[i+1])<=0.00001 && (x_A-xborder3[i])*(x_A-xborder3[i+1])<0) /* If the A point
happens to be on the horizontal linear segment that is defined by the i-th and (i+1)th
point of the BC. */
        {
            switch_3=1;    /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if(i<N3-1 && fabs(-y_A+(yborder3[i]*xborder3[i+1]-
yborder3[i+1]*xborder3[i])/(xborder3[i+1]-xborder3[i])+x_A*(yborder3[i+1]-
yborder3[i])/(xborder3[i+1]-xborder3[i]))<=0.00001 && (y_A-yborder3[i])*(y_A-
yborder3[i+1])<0) /* If the A point happens to be on the random inclined linear segment
that is defined by the i-th and (i+1)th point of the BC. */
        {
            switch_3=1;    /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else
        {
            switch_3=0;    /* The A point is not on the BC. */
        }
    }

    /* LOCATE THE INTERSECTIONS OF THE OA RAY WITH THE BC3 BORDER CURVE, TO
ESTABLISH INTERNALITY OR EXTERNALITY */

    if(switch_3==0)
    {
        for(i=0;i<N3-1;i++)
        {
            if(fabs(xborder3[i]-xborder3[i+1])<=0.00001) /* In case the i-th and
(i+1)-th points of the BC have the same x. */
            {
                x_int_temp=xborder3[i];
                y_int_temp=(y_A/x_A)*xborder3[i];

                if( ((yborder3[i]-y_int_temp)*(yborder3[i+1]-y_int_temp)<0) &&
(y_int_temp<y_A) )

```

```

        {
            intersections_count_3++;
            x_int[intersections_count_3-1]=x_int_temp;
            y_int[intersections_count_3-1]=y_int_temp;
        }
    }
    else if(fabs(yborder3[i]-yborder3[i+1])<=0.00001) /* In case the i-th
and (i+1)-th points of the BC have the same y. */
    {
        x_int_temp=(x_A/y_A)*yborder3[i];
        y_int_temp=yborder3[i];

        if( ((xborder3[i]-x_int_temp)*(xborder3[i+1]-x_int_temp)<0) &&
(x_int_temp<x_A) )
        {
            intersections_count_3++;
            x_int[intersections_count_3-1]=x_int_temp;
            y_int[intersections_count_3-1]=y_int_temp;
        }
    }
    else if(fabs((y_A/x_A)-(yborder3[i]/xborder3[i]))<0.00001 &&
yborder3[i]<y_A) /* In case any points of the BC happen to belong exactly onto the
OA ray */
    {
        intersections_count_3++;
        x_int_temp=xborder3[i];
        y_int_temp=yborder3[i];
        x_int[intersections_count_3-1]=x_int_temp;
        y_int[intersections_count_3-1]=y_int_temp;
    }
    else
    {
        x_int_temp=(yborder3[i]*xborder3[i+1]-
yborder3[i+1]*xborder3[i])/(xborder3[i+1]-xborder3[i])* (1/((y_A/x_A)-((yborder3[i+1]-
yborder3[i])/(xborder3[i+1]-xborder3[i]))));
        y_int_temp=(y_A/x_A)*x_int_temp;

        if( ((yborder3[i]-y_int_temp)*(yborder3[i+1]-y_int_temp)<0) &&
(y_int_temp<y_A) )
        {
            intersections_count_3++;
            x_int[intersections_count_3-1]=x_int_temp;
            y_int[intersections_count_3-1]=y_int_temp;
        }
    }
}
}

if(switch_3==1)
{
    // printf("The A(%f,%f) point is located exactly onto the 3rd Border Curve
(BC3).\n", x_A, y_A);
}
else
{
    printf("The 3rd Border Curve (BC3) has %d intersections with the OA ray
casted from the A(%f,%f) point towards the O(0,0) point.\n", intersections_count_3,
x_A, y_A);
}

for(i=0;i<intersections_count_3;i++)
{
    printf("BC3's #%d intersection with the OA ray is the (%f,%f) point.\n",
i+1, x_int[i], y_int[i]);
}

/* IF THERE IS AN ODD NUMBER OF INTERSECTIONS, A IS INTERNAL, IF THERE IS AN
EVEN ONE, IT IS EXTERNAL TO THE BORDER CURVE */

if(switch_3==1)
{
    printf("The A(%f,%f) point is exactly onto the 3rd Border Curve
(BC3).\n", x_A, y_A);
    int_index_3=1; /* Being onto a BC counts as being an internal point to
it. */
}
}

```



```

        if( ((yborder4[i]-y_int_temp)*(yborder4[i+1]-y_int_temp)<0) &&
(y_int_temp<y_A) )
        {
            intersections_count_4++;
            x_int[intersections_count_4-1]=x_int_temp;
            y_int[intersections_count_4-1]=y_int_temp;
        }
        else if(fabs(yborder4[i]-yborder4[i+1])<=0.00001) /* In case the i-th
and (i+1)-th points of the BC have the same y. */
        {
            x_int_temp=(x_A/y_A)*yborder4[i];
            y_int_temp=yborder4[i];

            if( ((xborder4[i]-x_int_temp)*(xborder4[i+1]-x_int_temp)<0) &&
(x_int_temp<x_A) )
            {
                intersections_count_4++;
                x_int[intersections_count_4-1]=x_int_temp;
                y_int[intersections_count_4-1]=y_int_temp;
            }
            else if(fabs((y_A/x_A)-(yborder4[i]/xborder4[i]))<0.00001 &&
yborder4[i]<y_A) /* In case any points of the BC happen to belong exactly onto the
OA ray */
            {
                intersections_count_4++;
                x_int_temp=xborder4[i];
                y_int_temp=yborder4[i];
                x_int[intersections_count_4-1]=x_int_temp;
                y_int[intersections_count_4-1]=y_int_temp;
            }
            else
            {
                x_int_temp=(yborder4[i]*xborder4[i+1]-
yborder4[i+1]*xborder4[i])/(xborder4[i+1]-xborder4[i])*(1/((y_A/x_A)-((yborder4[i+1]-
yborder4[i])/(xborder4[i+1]-xborder4[i]))));
                y_int_temp=(y_A/x_A)*x_int_temp;

                if( ((yborder4[i]-y_int_temp)*(yborder4[i+1]-y_int_temp)<0) &&
(y_int_temp<y_A) )
                {
                    intersections_count_4++;
                    x_int[intersections_count_4-1]=x_int_temp;
                    y_int[intersections_count_4-1]=y_int_temp;
                }
            }
        }
    }

    if(switch_4==1)
    {
        // printf("The A(%f,%f) point is located exactly onto the 4th Border Curve
(BC4).\n", x_A, y_A);
    }
    else
    {
        printf("The 4th Border Curve (BC4) has %d intersections with the OA ray
casted from the A(%f,%f) point towards the O(0,0) point.\n", intersections_count_4,
x_A, y_A);
    }

    for(i=0;i<intersections_count_4;i++)
    {
        printf("BC4's #%d intersection with the OA ray is the (%f,%f) point.\n",
i+1, x_int[i], y_int[i]);
    }

    /* IF THERE IS AN ODD NUMBER OF INTERSECTIONS, A IS INTERNAL, IF THERE IS AN
EVEN ONE, IT IS EXTERNAL TO THE BORDER CURVE */

    if(switch_4==1)
    {
        printf("The A(%f,%f) point is exactly onto the 4th Border Curve
(BC4).\n", x_A, y_A);
    }

```

```

        int_index_4=1;    /* Being onto a BC counts as being an internal point to
it. */
    }
    else if (switch_4==0 && intersections_count_4 % 2 == 0)
    {
        printf("The A(%f,%f) point is external to the 4th Border Curve
(BC4).\n", x_A, y_A);
        int_index_4=0;
    }
    else if (switch_4==0 && intersections_count_4 % 2 == 1)
    {
        printf("The A(%f,%f) point is internal to the 3rd Border Curve
(BC3).\n", x_A, y_A);
        int_index_4=1;
    }

    intersections_count_4=0;

    /* -----
----- */

    /* BC5 */

    /* DEFINE WHAT HAPPENS IN BORDER CONDITIONS, I.E. WHEN THE POINT WE
EVALUATE IS ON THE BC5 BORDER CURVE */

    for(i=0;i<N5;i++)
    {
        if (fabs(x_A-xborder5[i])<=0.00001 && fabs(y_A-yborder5[i])<=0.00001) /*
If the A point happens to coincide with a point of the BC. */
        {
            switch_5=1;    /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if (i<N5-1 && fabs(x_A-xborder5[i])<=0.00001 && fabs(x_A-
xborder5[i+1])<=0.00001 && (y_A-yborder5[i])*(y_A-yborder5[i+1])<0) /* If the A point
happens to be on the vertical linear segment that is defined by the i-th and (i+1)th
point of the BC. */
        {
            switch_5=1;    /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if (i<N5-1 && fabs(y_A-yborder5[i])<=0.00001 && fabs(y_A-
yborder5[i+1])<=0.00001 && (x_A-xborder5[i])*(x_A-xborder5[i+1])<0) /* If the A point
happens to be on the horizontal linear segment that is defined by the i-th and (i+1)th
point of the BC. */
        {
            switch_5=1;    /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else if (i<N5-1 && fabs(-y_A+(yborder5[i]*xborder5[i+1]-
yborder5[i+1]*xborder5[i])/(xborder5[i+1]-xborder5[i])+x_A*(yborder5[i+1]-
yborder5[i])/(xborder5[i+1]-xborder5[i]))<=0.00001 && (y_A-yborder5[i])*(y_A-
yborder5[i+1])<0) /* If the A point happens to be on the random inclined linear segment
that is defined by the i-th and (i+1)th point of the BC. */
        {
            switch_5=1;    /* The A point is on the BC. */
            break;
        }
        else
        {
            switch_5=0;    /* The A point is not on the BC. */
        }
    }

    /* LOCATE THE INTERSECTIONS OF THE OA RAY WITH THE BC5 BORDER CURVE, TO
ESTABLISH INTERNALITY OR EXTERNALITY */

    if (switch_5==0)
    {
        for (i=0; i<N5-1; i++)
        {
            if (fabs(xborder5[i]-xborder5[i+1])<=0.00001) /* In case the i-th and
(i+1)-th points of the BC have the same x. */
            {

```

```

        x_int_temp=xborder5[i];
        y_int_temp=(y_A/x_A)*xborder5[i];

        if( ((yborder5[i]-y_int_temp)*(yborder5[i+1]-y_int_temp)<0) &&
(y_int_temp<y_A) )
        {
            intersections_count_5++;
            x_int[intersections_count_5-1]=x_int_temp;
            y_int[intersections_count_5-1]=y_int_temp;
        }
        else if(fabs(yborder5[i]-yborder5[i+1])<=0.00001) /* In case the i-th
and (i+1)-th points of the BC have the same y. */
        {
            x_int_temp=(x_A/y_A)*yborder5[i];
            y_int_temp=yborder5[i];

            if( ((xborder5[i]-x_int_temp)*(xborder5[i+1]-x_int_temp)<0) &&
(x_int_temp<x_A) )
            {
                intersections_count_5++;
                x_int[intersections_count_5-1]=x_int_temp;
                y_int[intersections_count_5-1]=y_int_temp;
            }
        }
        else if(fabs((y_A/x_A)-(yborder5[i]/xborder5[i]))<0.00001 &&
yborder5[i]<y_A) /* In case any points of the BC happen to belong exactly onto the
OA ray */
        {
            intersections_count_5++;
            x_int_temp=xborder5[i];
            y_int_temp=yborder5[i];
            x_int[intersections_count_5-1]=x_int_temp;
            y_int[intersections_count_5-1]=y_int_temp;
        }
        else
        {
            x_int_temp=(yborder5[i]*xborder5[i+1]-
yborder5[i+1]*xborder5[i])/(xborder5[i+1]-xborder5[i])*(1/((y_A/x_A)-((yborder5[i+1]-
yborder5[i])/(xborder5[i+1]-xborder5[i]))));
            y_int_temp=(y_A/x_A)*x_int_temp;

            if( ((yborder5[i]-y_int_temp)*(yborder5[i+1]-y_int_temp)<0) &&
(y_int_temp<y_A) )
            {
                intersections_count_5++;
                x_int[intersections_count_5-1]=x_int_temp;
                y_int[intersections_count_5-1]=y_int_temp;
            }
        }
    }
}

if(switch_5==1)
{
    // printf("The A(%f,%f) point is located exactly onto the 5th Border Curve
(BC5).\n", x_A, y_A);
}
else
{
    printf("The 5th Border Curve (BC5) has %d intersections with the OA ray
casted from the A(%f,%f) point towards the O(0,0) point.\n", intersections_count_5,
x_A, y_A);
}

for(i=0;i<intersections_count_5;i++)
{
    printf("BC5's #%d intersection with the OA ray is the (%f,%f) point.\n",
i+1, x_int[i], y_int[i]);
}

/* IF THERE IS AN ODD NUMBER OF INTERSECTIONS, A IS INTERNAL, IF THERE IS AN
EVEN ONE, IT IS EXTERNAL TO THE BORDER CURVE */

if(switch_5==1)
{

```

```

        printf("The A(%f,%f) point is exactly onto the 5th Border Curve
(BC5).\n", x_A, y_A);
        int_index_5=1;    /* Being onto a BC counts as being an internal point to
it. */
    }
    else if (switch_5==0 && intersections_count_5 % 2 == 0)
    {
        printf("The A(%f,%f) point is external to the 5th Border Curve
(BC5).\n", x_A, y_A);
        int_index_5=0;
    }
    else if (switch_5==0 && intersections_count_5 % 2 == 1)
    {
        printf("The A(%f,%f) point is internal to the 5th Border Curve
(BC5).\n", x_A, y_A);
        int_index_5=1;
    }

    intersections_count_5=0;

    /* -----
----- */

/* MATERIAL ASSIGNMENT OF THE A POINT BASED ON THE CALCULATED INTERNALITY
INDICES */

    ext_index[0]=!int_index_1;
    ext_index[1]=!int_index_2;
    ext_index[2]=!int_index_3;
    ext_index[3]=!int_index_4;
    ext_index[4]=!int_index_5;

    if (ext_index[1]*ext_index[2]*ext_index[3]*ext_index[4]==1)
    {
        assigned_material=mat_BC[0];
        printf("The A(%f,%f) point is only internal to the 1st Border Curve
(BC1). Its material is material #d.\n", x_A, y_A, mat_BC[0]);
    }
    else if (ext_index[4]==0)
    {
        assigned_material=mat_BC[4];
        printf("The innermost Border Curve to which the A(%f,%f) point is
internal to is the 5th Border Curve (BC5). Its material is material #d.\n", x_A, y_A,
mat_BC[4]);
    }
    else if ( ext_index[4]==1 && ext_index[3]==0 )
    {
        assigned_material=mat_BC[3];
        printf("The innermost Border Curve to which the A(%f,%f) point is
internal to is the 4th Border Curve (BC4). Its material is material #d.\n", x_A, y_A,
mat_BC[3]);
    }
    else if ( ext_index[3]==1 && ext_index[2]==0 )
    {
        assigned_material=mat_BC[2];
        printf("The innermost Border Curve to which the A(%f,%f) point is
internal to is the 3rd Border Curve (BC3). Its material is material #d.\n", x_A, y_A,
mat_BC[2]);
    }
    else if ( ext_index[2]==1 && ext_index[1]==0 )
    {
        assigned_material=mat_BC[1];
        printf("The innermost Border Curve to which the A(%f,%f) point is
internal to is the 2nd Border Curve (BC2). Its material is material #d.\n", x_A, y_A,
mat_BC[1]);
    }
    printf("%d assigned material number\n", assigned_material);

    if ( assigned_material == (FLC % num_of_materials)+1 )
    {

        if ( (j>1 && x[placeholderLF[j]+1]-xRF[k1-1]<-2.5) )
        {

```

```

        distance_min=1100;
        for(n= placeholderLF[j]+1-local_counter[placeholderLF[j]] ;
n<placeholderLF[j]+1-local_counter[placeholderLF[j]] + max_int_count_total ; n++)
        {
            distance = (xRF[k1-1]-x[n])*(xRF[k1-1]-x[n])+(yRF[k1-1]-
y[n])*(yRF[k1-1]-y[n]);

            if(distance<=distance_min)
            {
                x_sol=x[n];
                y_sol=y[n];
                loc_cnt_sol=local_counter[n];
                BC_ind_sol=BC_indicator[n];
                placeholderRF_sol=n;
                distance_min=distance;
            }

            k1++;
            xRF[k1-1]=x_sol;
            yRF[k1-1]=y_sol;
            LCRF[k1-1]=loc_cnt_sol;
            BCRF[k1-1]=BC_ind_sol;
            placeholderRF[k1-1]=placeholderRF_sol;
            fprintf(f4, "%d\t%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", j, k1-1, placeholderRF[k1-
1], xRF[k1-1], yRF[k1-1], LCRF[k1-1], BCRF[k1-1]);
        }
        else if( (j>1 && j<previous_RF_elements-1 && x[placeholderLF[j]+1]-
xRF[k1-1]>2.5) )
        {
            distance_min=1100;
            for(n= placeholderLF[j-1]-((placeholderLF[j-1]) % max_int_count_total)
; n<placeholderLF[j-1]-((placeholderLF[j-1]) % max_int_count_total)+max_int_count_total
; n++)
            {
                distance = (x[placeholderLF[j]+1]-x[n])*(x[placeholderLF[j]+1]-
x[n])+(y[placeholderLF[j]+1]-y[n])*(y[placeholderLF[j]+1]-y[n]);

                if(distance<=distance_min)
                {
                    x_sol=x[n];
                    y_sol=y[n];
                    loc_cnt_sol=local_counter[n];
                    BC_ind_sol=BC_indicator[n];
                    placeholderRF_sol=n;
                    distance_min=distance;
                }
            }

            k1++;
            xRF[k1-1]=x_sol;
            yRF[k1-1]=y_sol;
            LCRF[k1-1]=loc_cnt_sol;
            BCRF[k1-1]=BC_ind_sol;
            placeholderRF[k1-1]=placeholderRF_sol;
            fprintf(f4, "%d\t%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", j, k1-1, placeholderRF[k1-
1], xRF[k1-1], yRF[k1-1], LCRF[k1-1], BCRF[k1-1]);
        }

        k1++;
        xRF[k1-1]=x[placeholderLF[j]+1];
        yRF[k1-1]=y[placeholderLF[j]+1];
        LCRF[k1-1]=local_counter[placeholderLF[j]+1];
        BCRF[k1-1]=BC_indicator[placeholderLF[j]+1];
        placeholderRF[k1-1]=placeholderLF[j]+1;
        printf("why-1\n");

        fprintf(f4, "%d\t%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", j, k1-1, placeholderRF[k1-
1], xRF[k1-1], yRF[k1-1], LCRF[k1-1], BCRF[k1-1]);
    }
    else
    {
        k1++;
        xRF[k1-1]=xLF[j];

```



```

        yRF[kl-1]=yLF[j];
        LCRF[kl-1]=LCLF[j];
        BCRF[kl-1]=BCLF[j];
        placeholderRF[kl-1]=placeholderLF[j];

        printf("why-2\n");
        fprintf(f4, "%d\t%d\t%d\t%f\t%f\t%d\t%d\n", j, kl-1, placeholderRF[kl-
1], xRF[kl-1], yRF[kl-1], LCRF[kl-1], BCRF[kl-1]);
    }

    /*
#####
#####
##### */
    /*
#####
#####
##### */
    }

    previous_RF_elements=kl;
    kl=0;

    fclose(f3);
    fclose(f4);

    /* Check if the new RF coincides with the x=x_1,R=100 vertical line. If it does,
switch=1, and the DO...WHILE loop ends. */

    /* Checking if the new Left Front is coincident with the x=x_1,R=100 vertical line,
in order to stop the DO...WHILE loop */

    for(i=0;i<previous_RF_elements-1;i++)
    {
        if(fabs(xRF[i]-xRF[i+1])>0.001)
        {
            switcheroo=0; /* If at least two elements are not the same with each other,
then there is no chance that LF_new coincides with the x=100 line, so front_switch=0 */
            all_equal=0;
            break;
        }
        else
        {
            all_equal=1;
        }
    }

    if(all_equal==1 && fabs(xLF[0]-100)<0.001)
    {
        switcheroo=1; /* If all elements are equal and one of them equals to 100, then
the LF coincides with the x=100 line, so front_switch=1 */
    }

    if(switcheroo==0)
    {
        printf("The new RF is not the x=x_1,R=100 yet, there must be a new
iteration.\n"); // Debug line
    }
    else
    {
        printf("The new RF is coincident with the x=x_1,R=100 yet, the loop will now
stop.\n"); // Debug line
    }

    FLC++;

}while(switcheroo==0);

return 0;
}

```

9 Βιβλιογραφία

- [1] A. Savini and G. G. Savini, “A short history of 3D printing, a technological revolution just started,” in *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*, Aug. 2015, pp. 1–8. doi: 10.1109/HISTELCON.2015.7307314.
- [2] ISO/ASTM, “ISO/ASTM 52900:2021(en) Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary,” 2021. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> (accessed Apr. 29, 2024).
- [3] A. Mahmood, T. Akram, H. Chen, and S. Chen, “On the Evolution of Additive Manufacturing (3D/4D Printing) Technologies: Materials, Applications, and Challenges,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 21, p. 4698, Nov. 2022, doi: 10.3390/polym14214698.
- [4] S. Pratheesh Kumar, S. Elangovan, R. Mohanraj, and J. R. Ramakrishna, “Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes,” *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 7907–7920, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.567.
- [5] A. K. Kushwaha *et al.*, “Powder bed fusion–based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS,” in *Tribology of Additively Manufactured Materials*, P. Kumar, M. Misra, and P. L. B. T.-T. of A. M. M. Menezes, Eds. Elsevier, 2022, pp. 1–37. doi: 10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9.
- [6] X. Zhang and F. Liou, “Introduction to additive manufacturing,” in *Additive Manufacturing*, J. Pou, A. Riveiro, and J. P. B. T.-A. M. Davim, Eds. Elsevier, 2021, pp. 1–31. doi: 10.1016/B978-0-12-818411-0.00009-4.
- [7] A. B. Peters *et al.*, “Selective laser sintering in reactive atmospheres: Towards in-situ synthesis of net-shaped carbide and nitride ceramics,” *Addit. Manuf.*, vol. 45, p. 102052, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102052.
- [8] P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, “A review of powder deposition in additive manufacturing by powder bed fusion,” *J. Manuf. Process.*, vol. 74, pp. 332–352, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.12.021.
- [9] D. Gu, “Introduction,” in *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*, D. Gu, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 1–13. doi: 10.1007/978-3-662-46089-4_1.
- [10] F. Tjellesen and A. Hartmann, “Methods and apparatus for the manufacture of three-dimensional objects,” WO2020115492A1, 2019
- [11] C. Körner, “Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 61, no. 5, pp. 361–377, Jul. 2016, doi: 10.1080/09506608.2016.1176289.
- [12] N. Hopkinson and E. Poonjolai, “High Speed Sintering-Early Research into a New Rapid Manufacturing Process,” *Solid Free. Fabr. Symp.*, Jan. 2004.

- [13] T. Wohlers, R. I. Campbell, O. Diegel, J. Kowen, N. Mostow, and I. Fidan, “Wohlers Report 2022: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry,” Fort Collins, Colo., Washington, DC, 2022. [Online]. Available: <https://wohlersassociates.com/product/wohlers-report-2022/>
- [14] G. E. Muniz, “Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020, Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing,” Brussels, 2014. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=6aeec19c-265f-11e7-ab65-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part>
- [15] A. Purvis, “The Gartner 2017 report on 3D Printing,” *3dnatives*, 2017. <https://www.3dnatives.com/en/gartner-2017-3d-printing080820174/> (accessed Apr. 17, 2024).
- [16] C. Valdivieso, “Gartner Hype Cycle 2019: 3D Printing Predictions,” *3dnatives*, 2019. <https://www.3dnatives.com/en/gartner-hype-cycle-3dprintingpredictions-150120194/> (accessed Apr. 19, 2024).
- [17] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, pp. 172–196, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [18] M. Baumers, C. Tuck, and R. Hague, “Selective heat sintering versus laser sintering: comparison of deposition rate, process energy consumption and cost performance,” in *SFF proceedings*, 2015, pp. 109–121. [Online]. Available: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-9-Baumers.pdf>
- [19] B. Utela, D. Storti, R. Anderson, and M. Ganter, “A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP),” *J. Manuf. Process.*, vol. 10, no. 2, pp. 96–104, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.jmapro.2009.03.002.
- [20] A. Mostafaei *et al.*, “Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 119, p. 100707, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>.
- [21] S. Barui, A. K. Panda, S. Naskar, R. Kuppuraj, S. Basu, and B. Basu, “3D inkjet printing of biomaterials with strength reliability and cytocompatibility: Quantitative process strategy for Ti-6Al-4V,” *Biomaterials*, vol. 213, p. 119212, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.biomaterials.2019.05.023.
- [22] S. K. Tiwari, S. Pande, S. Agrawal, and S. M. Bobade, “Selection of selective laser sintering materials for different applications,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, no. 6, pp. 630–648, Oct. 2015, doi: 10.1108/RPJ-03-2013-0027.
- [23] S. Singh, S. Ramakrishna, and R. Singh, “Material issues in additive manufacturing: A review,” *J. Manuf. Process.*, vol. 25, pp. 185–200, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006.
- [24] I. Ferretto, D. Kim, N. M. Della Ventura, M. Shahverdi, W. Lee, and C. Leinenbach, “Laser powder bed fusion of a Fe–Mn–Si shape memory alloy,” *Addit. Manuf.*, vol. 46, p. 102071, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102071.
- [25] F. Rouzé l’Alzit *et al.*, “Powder bed laser sintering of copper-doped hydroxyapatite: Numerical and experimental parametric analysis,” *Addit. Manuf.*, vol. 46, p. 102044, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102044.
- [26] T. Ullsperger *et al.*, “Ultra-short pulsed laser powder bed fusion of Al-Si alloys: Impact of pulse duration and energy in comparison to continuous wave excitation,”

- Addit. Manuf.*, vol. 46, p. 102085, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102085.
- [27] S. Pramanik, L. Tasche, K.-P. Hoyer, and M. Schaper, “Investigating the microstructure of an additively manufactured FeCo alloy: an electron microscopy study,” *Addit. Manuf.*, vol. 46, p. 102087, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102087.
- [28] G. Soundarapandiyan *et al.*, “The effects of powder reuse on the mechanical response of electron beam additively manufactured Ti6Al4V parts,” *Addit. Manuf.*, vol. 46, p. 102101, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102101.
- [29] B. H. Bae, J. W. Lee, J. M. Cha, I.-W. Kim, H.-D. Jung, and C.-B. Yoon, “Preliminary Characterization of Glass/Alumina Composite Using Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) Additive Manufacturing,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 9, p. 2156, May 2020, doi: 10.3390/ma13092156.
- [30] X. Wang, O. Sanchez-Mata, S. E. Atabay, J. A. Muñoz-Lerma, M. Attarian Shandiz, and M. Brochu, “Crystallographic orientation dependence of Charpy impact behaviours in stainless steel 316L fabricated by laser powder bed fusion,” *Addit. Manuf.*, vol. 46, p. 102104, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102104.
- [31] D. Sofia, R. Chirone, P. Lettieri, D. Barletta, and M. Poletto, “Selective laser sintering of ceramic powders with bimodal particle size distribution,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 136, pp. 536–547, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2018.06.008.
- [32] D. Sofia, D. Barletta, and M. Poletto, “Laser sintering process of ceramic powders: The effect of particle size on the mechanical properties of sintered layers,” *Addit. Manuf.*, vol. 23, pp. 215–224, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.08.012.
- [33] G. Ziólkowski, K. Gruber, E. Tokarczyk, R. Roszak, and M. Ziegenhorn, “X-ray Computed Tomography for the ex-situ mechanical testing and simulation of additively manufactured IN718 samples,” *Addit. Manuf.*, vol. 45, p. 102070, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102070.
- [34] H. Gu, Z. Bashir, and L. Yang, “The re-usability of heat-exposed poly (ethylene terephthalate) powder for laser sintering,” *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 194–204, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.05.004.
- [35] P. Tan, F. Shen, W. S. Tey, and K. Zhou, “A numerical study on the packing quality of fibre/polymer composite powder for powder bed fusion additive manufacturing,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 16, no. sup1, pp. S1–S18, Sep. 2021, doi: 10.1080/17452759.2021.1922965.
- [36] V. V Popov, A. Katz-Demyanetz, A. Garkun, and M. Bamberger, “The effect of powder recycling on the mechanical properties and microstructure of electron beam melted Ti-6Al-4 V specimens,” *Addit. Manuf.*, vol. 22, pp. 834–843, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.06.003.
- [37] H. P. Tang, M. Qian, N. Liu, X. Z. Zhang, G. Y. Yang, and J. Wang, “Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting,” *JOM*, vol. 67, no. 3, pp. 555–563, 2015, doi: 10.1007/s11837-015-1300-4.
- [38] S. Ghods *et al.*, “Electron beam additive manufacturing of Ti6Al4V: Evolution of powder morphology and part microstructure with powder reuse,” *Materialia*, vol. 9, p. 100631, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.mtla.2020.100631.
- [39] J.-P. Kruth and G. Levy, “Survey of Materials and Material Issues in Rapid Manufacturing by SLS/SLM,” 2009. [Online]. Available:

- <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/78845>
- [40] D. Bourell *et al.*, “Materials for additive manufacturing,” *CIRP Ann.*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.009.
- [41] D. K. Leigh and D. Bourell, “Powder Bed Fusion of Polymers,” in *Additive Manufacturing Processes*, ASM International, 2020, pp. 52–57. doi: 10.31399/asm.hb.v24.a0006543.
- [42] Z. Chen *et al.*, “3D printing of ceramics: A review,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 39, no. 4, pp. 661–687, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013.
- [43] L. Yang and H. Miyanaji, “CERAMIC ADDITIVE MANUFACTURING : A REVIEW OF CURRENT STATUS AND CHALLENGES,” in *Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International*, 2017, pp. 652–679.
- [44] S. L. Sing *et al.*, “Direct selective laser sintering and melting of ceramics: a review,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 611–623, Apr. 2017, doi: 10.1108/RPJ-11-2015-0178.
- [45] Y. Zhang *et al.*, “Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–13, Jan. 2018, doi: 10.1007/s11665-017-2747-y.
- [46] M. Puttegowda, S. M. Rangappa, M. Jawaid, P. Shivanna, Y. Basavegowda, and N. Saba, “Potential of natural/synthetic hybrid composites for aerospace applications,” in *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, M. Jawaid and M. B. T.-S. C. for A. A. Thariq, Eds. Elsevier, 2018, pp. 315–351. doi: 10.1016/B978-0-08-102131-6.00021-9.
- [47] I. Shishkovsky, N. Kakovkina, and V. Scherbakov, “Fabrication of heat-resisting nickel composite gradient structures with TiC nano additive during powder bed fusion process,” *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 68–71, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.032>.
- [48] Y.-H. Chueh, X. Zhang, C. Wei, Z. Sun, and L. Li, “Additive Manufacturing of Polymer-Metal/Ceramic Functionally Graded Composite Components via Multiple Material Laser Powder Bed Fusion,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 142, no. 5, May 2020, doi: 10.1115/1.4046594.
- [49] X. Zhang, Y. Chueh, C. Wei, Z. Sun, J. Yan, and L. Li, “Additive manufacturing of three-dimensional metal-glass functionally gradient material components by laser powder bed fusion with in situ powder mixing,” *Addit. Manuf.*, vol. 33, p. 101113, May 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101113.
- [50] “Biomaterials,” *Elsevier*, 2021. <https://www.journals.elsevier.com/biomaterials> (accessed Jul. 16, 2021).
- [51] A. Hudecki, G. Kiryczyński, and M. J. Łos, “Biomaterials, Definition, Overview,” in *Stem Cells and Biomaterials for Regenerative Medicine*, M. J. Łos, A. Hudecki, and E. B. T.-S. C. and B. for R. M. Wiecheć, Eds. Elsevier, 2019, pp. 85–98. doi: 10.1016/B978-0-12-812258-7.00007-1.
- [52] A. Nouri, A. Rohani Shirvan, Y. Li, and C. Wen, “Additive manufacturing of metallic and polymeric load-bearing biomaterials using laser powder bed fusion: A review,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 94, pp. 196–215, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jmst.2021.03.058.
- [53] S. Bose, D. Ke, H. Sahasrabudhe, and A. Bandyopadhyay, “Additive manufacturing of biomaterials,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 93, pp. 45–111, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.08.003.

- [54] W. S. W. Harun, M. S. I. N. Kamariah, N. Muhamad, S. A. C. Ghani, F. Ahmad, and Z. Mohamed, "A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials," *Powder Technol.*, vol. 327, pp. 128–151, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2017.12.058.
- [55] S. D. Dobson and T. L. Starr, "Powder characterization and part density for powder bed fusion of 17-4 PH stainless steel," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 27, no. 1, pp. 53–58, Jan. 2021, doi: 10.1108/RPJ-01-2020-0023.
- [56] N. P. Karapatis, G. Egger, P. Gygax, and R. Glardon, "Optimization of powder layer density in selective laser sintering," in *Proceedings of the 9th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, 1999*, pp. 255–264. doi: <https://doi.org/10.26153/TSW%2F746>.
- [57] A. Spierings and G. Levy, "Comparison of density of stainless steel 316 L parts produced with selective laser melting using different powder grades," 2009.
- [58] S. E. Brika, M. Letenneur, C. A. Dion, and V. Brailovski, "Influence of particle morphology and size distribution on the powder flowability and laser powder bed fusion manufacturability of Ti-6Al-4V alloy," *Addit. Manuf.*, vol. 31, p. 100929, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100929.
- [59] P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, "A prototype powder deposition system for an open Selective Laser Sintering machine," *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 755–762, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.106.
- [60] J. S. Weaver *et al.*, "The effects of particle size distribution on the rheological properties of the powder and the mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel," *Addit. Manuf.*, vol. 39, p. 101851, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101851.
- [61] A. T. Sutton, C. S. Kriewall, M. C. Leu, and J. W. Newkirk, "Powder characterisation techniques and effects of powder characteristics on part properties in powder-bed fusion processes," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 12, no. 1, pp. 3–29, Jan. 2017, doi: 10.1080/17452759.2016.1250605.
- [62] I. Cruz-Matías *et al.*, "Sphericity and roundness computation for particles using the extreme vertices model," *J. Comput. Sci.*, vol. 30, pp. 28–40, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jocs.2018.11.005.
- [63] D. Schiochet Nasato and T. Pöschel, "Influence of particle shape in additive manufacturing: Discrete element simulations of polyamide 11 and polyamide 12," *Addit. Manuf.*, vol. 36, p. 101421, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101421.
- [64] S. Haeri, "Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in Additive Manufacturing using DEM simulations," *Powder Technol.*, vol. 321, pp. 94–104, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.011>.
- [65] S. Shamsdini, M. H. Ghoncheh, and M. Mohammadi, "Effect of recoater-blade type on the mechanical properties and microstructure of additively manufactured maraging steels," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 812, p. 141104, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.141104.
- [66] M. Daña, I. Zetková, and P. Hanzl, "The Influence of a Ceramic Recoater Blade on 3D Printing using Direct Metal Laser Sintering," *Manuf. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 23–28, Feb. 2019, doi: 10.21062/ujep/239.2019/a/1213-2489/MT/19/1/23.
- [67] M. Wohlfart, "Use-cases of different recoater configurations for DMLS®," 2020. <https://www.linkedin.com/pulse/use-cases-different-recoater-configurations-dmls->

- michael-wohlfart (accessed Jul. 13, 2021).
- [68] M. Y. Kayacan, K. Özsoy, B. Duman, N. Yilmaz, and M. C. Kayacan, “A study on elimination of failures resulting from layering and internal stresses in Powder Bed Fusion (PBF) additive manufacturing,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 34, no. 13, pp. 1467–1475, Oct. 2019, doi: 10.1080/10426914.2019.1655151.
- [69] “Surface Science: Categorizing Surface Energy,” *3M, Science. Applied to Life*, 2021. https://www.3m.com/3M/en_US/bonding-and-assembly-us/resources/science-of-adhesion/categorizing-surface-energy/ (accessed Jul. 23, 2021).
- [70] S. Haeri, Y. Wang, O. Ghita, and J. Sun, “Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing,” *Powder Technol.*, vol. 306, pp. 45–54, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.11.002.
- [71] J. Zhang, Y. Tan, T. Bao, Y. Xu, X. Xiao, and S. Jiang, “Discrete Element Simulation of the Effect of Roller-Spreading Parameters on Powder-Bed Density in Additive Manufacturing,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 10, p. 2285, May 2020, doi: 10.3390/ma13102285.
- [72] A. Budding and T. H. J. Vaneker, “New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques,” *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 527–532, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.03.100.
- [73] L. Wang, A. Yu, E. Li, H. Shen, and Z. Zhou, “Effects of spreader geometry on powder spreading process in powder bed additive manufacturing,” *Powder Technol.*, vol. 384, pp. 211–222, May 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.02.022.
- [74] G. Jacob, C. U. Brown, and A. Donmez, “The influence of spreading metal powders with different particle size distributions on the powder bed density in laser-based powder bed fusion processes,” *Advanced Manufacturing Series (NIST AMS)*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Gaithersburg, MD, Mar. 2018. doi: 10.6028/NIST.AMS.100-17.
- [75] J. F. Bredt, S. Clark, and G. Gilchrist, “Three dimensional printing material system and method,” US7087109B2, 2006 [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US7087109B2>
- [76] S. Shamsdini, S. Shakerin, A. Hadadzadeh, B. S. Amirkhiz, and M. Mohammadi, “A trade-off between powder layer thickness and mechanical properties in additively manufactured maraging steels,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 776, p. 139041, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139041>.
- [77] M. Strømme Mattsson, P. Hedenus, G. . Niklasson, and R. Ek, “A new method of characterising liquid uptake within particles over short time periods,” *Int. J. Pharm.*, vol. 199, no. 2, pp. 179–185, Apr. 2000, doi: 10.1016/S0378-5173(00)00381-1.
- [78] P. Hedenus, M. Strømme Mattsson, G. . Niklasson, O. Camber, and R. Ek, “Characterisation of instantaneous water absorption properties of pharmaceutical excipients,” *Int. J. Pharm.*, vol. 202, no. 1–2, pp. 141–149, Jul. 2000, doi: 10.1016/S0378-5173(00)00436-1.
- [79] L.-P. Lefebvre, F. Bernier, N. Orsoni-Wiemer, C. Charbonneau, B. Alchikh-Sulaiman, and S. Yue, “Rheology of powders: assessing the robustness and impact of humidity, tribocharging, particle size and composition,” *Proceeding of the EuroPM Conference*. European Powder Metallurgy Association, 2019.
- [80] Freeman Technology, “Powder Rheology,” 2021. <https://www.freemantech.co.uk/learn/powder-rheology> (accessed Jul. 15, 2021).

- [81] A. Rescaglio, J. Schockmel, F. Francqui, N. Vandewalle, and G. Lumay, “How triboelectric charges modify powder flowability,” in *Annual Transactions of The Nordic Rheology Society*, 2017, pp. 17–21. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/How-tribo-electric-charges-modify-powder-Rescaglio-Schockmel/aa45af6a0c1c621f84fe0b7082054338a977e81a>
- [82] R. Mertens, S. Dadbakhsh, J. Van Humbeeck, and J.-P. Kruth, “Application of base plate preheating during selective laser melting,” *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 5–11, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.002>.
- [83] R. Mertens, B. Vrancken, N. Holmstock, Y. Kinds, J.-P. Kruth, and J. Van Humbeeck, “Influence of Powder Bed Preheating on Microstructure and Mechanical Properties of H13 Tool Steel SLM Parts,” *Phys. Procedia*, vol. 83, pp. 882–890, 2016, doi: [10.1016/j.phpro.2016.08.092](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.092).
- [84] H. Ali, L. Ma, H. Ghadbeigi, and K. Mumtaz, “In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti6Al4V,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 695, pp. 211–220, May 2017, doi: [10.1016/j.msea.2017.04.033](https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.033).
- [85] X. Li and J. Dong, “Study on Curve of Pre-heating Temperature Control in Selective Laser Sintering,” in *Proceedings of the 2009 International Symposium on Web Information Systems and Applications (WISA '09)*, 2009, pp. 156–158. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/openview/2ff2fe367d06698d883499c9ad568a24/1?pq-origsite=gscholar&cbl=136089>
- [86] R. Casati, M. Hamidi Nasab, M. Coduri, V. Tirelli, and M. Vedani, “Effects of Platform Pre-Heating and Thermal-Treatment Strategies on Properties of AlSi10Mg Alloy Processed by Selective Laser Melting,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 11, p. 954, Nov. 2018, doi: [10.3390/met8110954](https://doi.org/10.3390/met8110954).
- [87] C. Yan, Y. Shi, Z. Li, S. Wen, and Q. Wei, “Research on preparation and forming technology of selective laser sintering inorganic nonmetallic materials,” in *Selective Laser Sintering Additive Manufacturing Technology*, C. Yan, Y. Shi, Z. Li, S. Wen, and Q. B. T.-S. L. S. A. M. T. Wei, Eds. Elsevier, 2021, pp. 503–669. doi: [10.1016/B978-0-08-102993-0.00004-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102993-0.00004-7).
- [88] D. Ruggi, M. Lupo, D. Sofia, C. Barrès, D. Barletta, and M. Poletto, “Flow properties of polymeric powders for selective laser sintering,” *Powder Technol.*, vol. 370, pp. 288–297, Jun. 2020, doi: [10.1016/j.powtec.2020.05.069](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.069).
- [89] M. Van den Eynde, L. Verbelen, and P. Van Puyvelde, “Influence of temperature on the flowability of polymer powders in laser sintering,” in *AIP Conference Proceedings 1914*, 2017, p. 190007. doi: [10.1063/1.5016796](https://doi.org/10.1063/1.5016796).
- [90] D. Grossin *et al.*, “A review of additive manufacturing of ceramics by powder bed selective laser processing (sintering / melting): Calcium phosphate, silicon carbide, zirconia, alumina, and their composites,” *Open Ceram.*, vol. 5, p. 100073, Mar. 2021, doi: [10.1016/j.oceram.2021.100073](https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100073).
- [91] N. Hesse *et al.*, “Analysis of Tribo-Charging during Powder Spreading in Selective Laser Sintering: Assessment of Polyamide 12 Powder Ageing Effects on Charging Behavior,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 4, p. 609, Apr. 2019, doi: [10.3390/polym11040609](https://doi.org/10.3390/polym11040609).
- [92] P. A. Kulkarni, R. J. Berry, and M. S. A. Bradley, “Review of the flowability measuring techniques for powder metallurgy industry,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E*

- J. Process Mech. Eng.*, vol. 224, no. 3, pp. 159–168, Aug. 2010, doi: 10.1243/09544089JPME299.
- [93] L. I. Escano *et al.*, “Revealing particle-scale powder spreading dynamics in powder-bed-based additive manufacturing process by high-speed x-ray imaging,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, p. 15079, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-33376-0.
- [94] C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall, and A. J. Hart, “Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 266, pp. 484–501, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.037>.
- [95] T.-P. Le, X. Wang, K. P. Davidson, J. E. Fronza, and M. Seita, “Experimental analysis of powder layer quality as a function of feedstock and recoating strategies,” *Addit. Manuf.*, vol. 39, p. 101890, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101890.
- [96] R. W. Penny *et al.*, “Spatial mapping of powder layer density for metal additive manufacturing via transmission X-ray imaging,” *Addit. Manuf.*, p. 102197, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102197.
- [97] Z. Xiang, M. Zhang, R. Yan, Q. Yin, and K. Zhang, “Powder-spreading dynamics and packing quality improvement for laser powder bed fusion additive manufacturing,” *Powder Technol.*, vol. 389, pp. 278–291, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.05.036.
- [98] Y. Shanjanani and E. Toyserkani, “Material spreading and compaction in powder-based solid freeform fabrication methods : mathematical modelling,” 2008. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/MATERIAL-SPREADING-AND-COMPACTION-IN-POWDER-BASED-%3A-Shanjanani-Toyserkani/98cbd586ba48a7f92af0c1bf7e6be1118d2c30dd>
- [99] U. Ali *et al.*, “On the measurement of relative powder-bed compaction density in powder-bed additive manufacturing processes,” *Mater. Des.*, vol. 155, pp. 495–501, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.06.030.
- [100] E. Wycisk, A. Solbach, S. Siddique, D. Herzog, F. Walther, and C. Emmelmann, “Effects of Defects in Laser Additive Manufactured Ti-6Al-4V on Fatigue Properties,” *Phys. Procedia*, vol. 56, pp. 371–378, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.120.
- [101] W. Nan *et al.*, “Jamming during particle spreading in additive manufacturing,” *Powder Technol.*, vol. 338, pp. 253–262, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.07.030.
- [102] M. Ahmed, M. Pasha, W. Nan, and M. Ghadiri, “A simple method for assessing powder spreadability for additive manufacturing,” *Powder Technol.*, vol. 367, pp. 671–679, 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2020.04.033.
- [103] S. Pasalopoulos, P. Avrampos, and G.-C. Vosniakos, “Surface quality evaluation of non-sintered powder layers in Selective Laser Sintering by 3D scanning,” *Procedia Manuf.*, vol. 51, no. 2019, pp. 748–754, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.105.
- [104] M. Kalms, R. Narita, C. Thomy, F. Vollertsen, and R. B. Bergmann, “New approach to evaluate 3D laser printed parts in powder bed fusion-based additive manufacturing in-line within closed space,” *Addit. Manuf.*, vol. 26, pp. 161–165, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.01.011.
- [105] M. Kalms and R. B. Bergmann, “Structure function analysis of powder beds in additive manufacturing by laser beam melting,” *Addit. Manuf.*, vol. 36, no. January, p. 101396, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101396.
- [106] W. Lin, D. A. Gonçalves, A. De Souza, P. Pereira, and M. Pereira, “Quality analysis

- method for powder deposited layers applicable to selective laser sintering and selective laser melting processes,” *J. Laser Appl.*, vol. 31, no. 2, 2019, doi: 10.2351/1.5096144.
- [107] S. Beitz, R. Uerlich, T. Bokelmann, A. C. Diener, T. Vietor, and A. Kwade, “Influence of Powder Deposition on Powder Bed and Specimen Properties,” *Materials (Basel)*, 2019, doi: 10.3390/ma12020297.
- [108] G. Jacob, A. Donmez, J. Slotwinski, and S. Moylan, “Measurement of powder bed density in powder bed fusion additive manufacturing processes,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 11, p. 115601, 2016, doi: 10.1088/0957-0233/27/11/115601.
- [109] J.-P. Choi *et al.*, “Evaluation of Powder Layer Density for the Selective Laser Melting (SLM) Process,” *Mater. Trans.*, vol. 58, no. 2, pp. 294–297, 2017, doi: 10.2320/matertrans.M2016364.
- [110] P. Lhuissier *et al.*, “In situ 3D X-ray microtomography of laser-based powder-bed fusion (L-PBF)—A feasibility study,” *Addit. Manuf.*, vol. 34, p. 101271, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101271.
- [111] Y. He, J. Gardy, A. Hassanpour, and A. E. Bayly, “A digital-based approach for characterising spread powder layer in additive manufacturing,” *Mater. Des.*, vol. 196, p. 109102, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109102.
- [112] C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall, and A. John Hart, “Modeling and characterization of cohesion in fine metal powders with a focus on additive manufacturing process simulations,” *Powder Technol.*, vol. 343, pp. 855–866, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.072.
- [113] Y. Liu, L. Blunt, Z. Zhang, H. A. Rahman, F. Gao, and X. Jiang, “In-situ areal inspection of powder bed for electron beam fusion system based on fringe projection profilometry,” *Addit. Manuf.*, vol. 31, p. 100940, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100940.
- [114] B. Zhang, J. Ziegert, F. Farahi, and A. Davies, “In situ surface topography of laser powder bed fusion using fringe projection,” *Addit. Manuf.*, vol. 12, pp. 100–107, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.addma.2016.08.001.
- [115] W. S. Land, B. Zhang, J. Ziegert, and A. Davies, “In-Situ Metrology System for Laser Powder Bed Fusion Additive Process,” *Procedia Manuf.*, vol. 1, pp. 393–403, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.09.047.
- [116] Z. Li *et al.*, “In Situ 3D Monitoring of Geometric Signatures in the Powder-Bed-Fusion Additive Manufacturing Process via Vision Sensing Methods,” *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1180, Apr. 2018, doi: 10.3390/s18041180.
- [117] A. B. Spierings, N. Herres, and G. Levy, “Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 17, no. 3, pp. 195–202, Apr. 2011, doi: 10.1108/13552541111124770.
- [118] H. Chen, Q. Wei, Y. Zhang, F. Chen, Y. Shi, and W. Yan, “Powder-spreading mechanisms in powder-bed-based additive manufacturing: Experiments and computational modeling,” *Acta Mater.*, vol. 179, pp. 158–171, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.actamat.2019.08.030.
- [119] A. AlFaify, J. Hughes, and K. Ridgway, “Controlling the porosity of 316L stainless steel parts manufactured via the powder bed fusion process,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 25, no. 1, pp. 162–175, Jan. 2019, doi: 10.1108/RPJ-11-2017-0226.

- [120] A. Leicht, M. Fischer, U. Klement, L. Nyborg, and E. Hryha, "Increasing the Productivity of Laser Powder Bed Fusion for Stainless Steel 316L through Increased Layer Thickness," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 1, pp. 575–584, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11665-020-05334-3.
- [121] S. Ziri, A. Hor, and C. Mabru, "Effect of powder size and processing parameters on surface, density and mechanical properties of 316L elaborated by Laser Powder Bed Fusion," *ESAFORM 2021*, Apr. 2021, doi: 10.25518/esaform21.1563.
- [122] M. A. Balbaa, A. Ghasemi, E. Fereiduni, M. A. Elbestawi, S. D. Jadhav, and J.-P. Kruth, "Role of powder particle size on laser powder bed fusion processability of AlSi10Mg alloy," *Addit. Manuf.*, vol. 37, p. 101630, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101630.
- [123] H. Nadiyah, H. Gajera, R. Bidajwala, K. Abhisek, and K. Dave, "Effects of powder bed fusion process parameters on hardness for Inconel 718," *Mater. Today Proc.*, vol. 38, pp. 2275–2280, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.388.
- [124] A. S. Azar, M. Reiersen, E. W. Hovig, M. M'hamdi, S. Diplas, and M. M. Pedersen, "A novel approach for enhancing the fatigue lifetime of the components processed by additive manufacturing technologies," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 27, no. 2, pp. 256–267, Mar. 2021, doi: 10.1108/RPJ-02-2020-0030.
- [125] Y. Liu, Y. Yang, S. Mai, D. Wang, and C. Song, "Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder," *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 797–806, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.086>.
- [126] J. Yin *et al.*, "Correlation between forming quality and spatter dynamics in laser powder bed fusion," *Addit. Manuf.*, vol. 31, p. 100958, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100958>.
- [127] Z. A. Young *et al.*, "Types of spatter and their features and formation mechanisms in laser powder bed fusion additive manufacturing process," *Addit. Manuf.*, vol. 36, p. 101438, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101438.
- [128] D. Wang *et al.*, "Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties," *Mater. Des.*, vol. 117, no. Supplement C, pp. 121–130, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.060>.
- [129] S. Haeri, S. Haeri, J. Hanson, and S. Lotfian, "Analysis of radiation pressure and aerodynamic forces acting on powder grains in powder-based additive manufacturing," *Powder Technol.*, vol. 368, pp. 125–129, May 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2020.04.031.
- [130] O. Pannitz and J. T. Sehr, "Transferability of Process Parameters in Laser Powder Bed Fusion Processes for an Energy and Cost Efficient Manufacturing," *Sustainability*, vol. 12, no. 4, p. 1565, Feb. 2020, doi: 10.3390/su12041565.
- [131] Q. Guo *et al.*, "Transient dynamics of powder spattering in laser powder bed fusion additive manufacturing process revealed by in-situ high-speed high-energy x-ray imaging," *Acta Mater.*, vol. 151, pp. 169–180, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.actamat.2018.03.036.
- [132] J. L. Bartlett and X. Li, "An overview of residual stresses in metal powder bed fusion," *Addit. Manuf.*, vol. 27, pp. 131–149, May 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.02.020.
- [133] S. Haeri, L. Benedetti, and O. Ghita, "Effects of particle elongation on the binary coalescence dynamics of powder grains for Laser Sintering applications," *Powder*

- Technol.*, vol. 363, pp. 245–255, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2019.12.025.
- [134] D. Sofia, D. Barletta, and M. Poletto, “Flowability of ceramic powders in the sintering process,” Dec. 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Daniele-Sofia/publication/311575774_Flowability_of_ceramic_powders_in_the_sintering_process/links/5bbe6ca299bf1010178c0c1/Flowability-of-ceramic-powders-in-the-sintering-process.pdf
- [135] S. Matthes, M. Kluge, S. Jahn, and C. Emmelmann, “Factors influencing powder-properties of TiAl6V4 along the L-PBF process chain,” *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 5, no. 1, pp. 33–39, Mar. 2020, doi: 10.1007/s40964-020-00120-y.
- [136] R. W. McVey, R. M. Melnychuk, J. A. Todd, and R. P. Martukanitz, “Absorption of laser irradiation in a porous powder layer,” *J. Laser Appl.*, vol. 19, no. 4, pp. 214–224, Nov. 2007, doi: 10.2351/1.2756854.
- [137] P. Avrampos, “Optimized development of a prototype Selective Laser Sintering powder recoating system via Analytic Hierarchy Process,” *Int. J. Exp. Des. Process Optim.*, vol. 1, no. 1, p. XX, 2023, doi: 10.1504/IJEDPO.2023.10059808.
- [138] C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall, and A. J. Hart, “1) Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 266, pp. 484–501, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.10.037.
- [139] S. P. Soe, “Quantitative analysis on SLS part curling using EOS P700 machine,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 11, pp. 2433–2442, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.012>.
- [140] A. G. Bailey, “The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating,” *J. Electrostat.*, vol. 45, no. 2, pp. 85–120, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(98\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(98)00049-7).
- [141] T. Stichel *et al.*, “Electrophotographic Multilayer Powder Pattern Deposition for Additive Manufacturing,” *JOM*, vol. 72, no. 3, pp. 1366–1375, 2020, doi: 10.1007/s11837-019-03965-z.
- [142] E. Emeruwa, J. Jarrige, J. Mexmain, M. Billy, and K. Bouzouita, “Powder compaction with ultrasonic assistance,” *J. Mater. Sci.*, vol. 25, no. 2, pp. 1459–1462, 1990, doi: 10.1007/BF00585465.
- [143] O. L. Khasanov, E. S. Dvilis, V. M. Sokolov, and P. Pokholkov Yu, “Ceramic Powder Dry Compaction Under Powerful Ultrasound Action,” *Key Eng. Mater.*, vol. 264–268, pp. 73–76, 2004, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.264-268.73.
- [144] Y. Wu and K.-L. Choy, “The microstructure of alumina coatings prepared by aerosol assisted spray deposition,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 180–181, pp. 436–440, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.078>.
- [145] Y. Wu, J. Du, K.-L. Choy, and L. L. Hench, “Fabrication of titanium dioxide ceramics by laser sintering green layers prepared via aerosol assisted spray deposition,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 454–455, pp. 148–155, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.077>.
- [146] C. Lino, R. Deepak, L. Kathleen, Y. Wenqiang, T. Alexander, and H. William, “The tower nozzle solid freeform fabrication technique,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 16, no. 4, pp. 295–301, Jan. 2010, doi: 10.1108/13552541011049315.

- [147] Z. Wang, A. Zhang, and X. Shang, “3-D Design and Numerical Simulation of Two-Phase Flow in the Laser Rapid Prototyping Coaxial Powder Delivery System,” *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 14, pp. 200–205, 2009, doi: [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70092-6](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70092-6).
- [148] C. Schmutzler, C. Boeker, and M. F. Zaeh, “Investigation of Deviations Caused by Powder Compaction During 3D Printing,” *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 698–703, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.121>.
- [149] H. Chen, Q. Wei, Y. Zhang, F. Chen, Y. Shi, and W. Yan, “Powder-spreading mechanisms in powder-bed-based additive manufacturing: Experiments and computational modeling,” *Acta Mater.*, vol. 179, pp. 158–171, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.08.030>.
- [150] Z. Snow, R. Martukanitz, and S. Joshi, “On the development of powder spreadability metrics and feedstock requirements for powder bed fusion additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 28, no. April, pp. 78–86, 2019, doi: [10.1016/j.addma.2019.04.017](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.017).
- [151] T. Q. Pham, T. T. Do, P. Kwon, and S. N. Foster, “Additive Manufacturing of High Performance Ferromagnetic Materials,” in *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018, pp. 4303–4308. doi: [10.1109/ECCE.2018.8558245](https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8558245).
- [152] M. L. Ang and P. J. Lloyd, “Investigation of charged particle trajectories in electrostatic powder coating systems,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 13, no. 6, pp. 823–836, 1987, doi: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(87\)90069-3](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90069-3).
- [153] F. S. Ali, T. E. Base, and I. I. Inculet, “Mathematical modeling of powder paint particle trajectories in electrostatic painting,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 4, pp. 992–997, 2000, doi: [10.1109/28.855952](https://doi.org/10.1109/28.855952).
- [154] X. Zhang, C. Wei, Y.-H. Chueh, and L. Li, “An Integrated Dual Ultrasonic Selective Powder Dispensing Platform for Three-Dimensional Printing of Multiple Material Metal/Glass Objects in Selective Laser Melting,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 141, no. 1, Oct. 2018, doi: [10.1115/1.4041427](https://doi.org/10.1115/1.4041427).
- [155] T. L. Saaty, “A scaling method for priorities in hierarchical structures,” *J. Math. Psychol.*, vol. 15, no. 3, pp. 234–281, 1977, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- [156] R. W. Saaty, “The analytic hierarchy process—what it is and how it is used,” *Math. Model.*, vol. 9, no. 3, pp. 161–176, 1987, doi: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- [157] T. L. Saaty, “Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process BT - The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making,” D. L. Schmoldt, J. Kangas, G. A. Mendoza, and M. Pesonen, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001, pp. 15–35. doi: [10.1007/978-94-015-9799-9_2](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2).
- [158] C. Reiff, F. Wulle, O. Riedel, S. Epple, and V. Onuseit, “On inline process control for selective laser sintering,” in *8th International Conference on Mass Customization and Personalization – Community of Europe (MCP-CE 2018)*, 2018, no. December. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/329625918_On_Inline_Process_Control_for_Selective_Laser_Sintering
- [159] M. Ma, Z. Wang, M. Gao, and X. Zeng, “Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 215, pp. 142–150, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.034>.

- [160] M. Van den Eynde, L. Verbelen, and P. Van Puyvelde, "Assessing polymer powder flow for the application of laser sintering," *Powder Technol.*, vol. 286, pp. 151–155, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.004>.
- [161] V. Srivastava, S. K. Parida, and P. M. Pandey, "Surface Roughness Studies in Selective Laser Sintering of Glass filled Polyamide BT," in *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*, 2010, pp. 495–499.
- [162] D. L. Bourell, T. J. Watt, D. K. Leigh, and B. Fulcher, "Performance Limitations in Polymer Laser Sintering," *Phys. Procedia*, vol. 56, pp. 147–156, 2014, doi: [10.1016/j.phpro.2014.08.157](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.157).
- [163] L. Dobrzanski, A. Dobrzanska-Danikiewicz, A. Achteplik-Franczak, L. B. Dobrzański, M. Szindler, and T. Gawel, "Porous Selective Laser Melted Ti and Ti6Al4V Materials for Medical Applications," 2017. doi: [10.5772/65375](https://doi.org/10.5772/65375).
- [164] D. Dev Singh, T. Mahender, and A. Raji Reddy, "Powder bed fusion process: A brief review," *Mater. Today Proc.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.415>.
- [165] 3dsourced, "Top 12 Best SLS 3D Printers 2020 (For ALL Price Ranges!)," 2020. <https://3dsourced.com/3d-printers/sls-3d-printer/> (accessed Dec. 30, 2020).
- [166] K. Niru, "The different SLS 3D printers on the market," 2020. <https://www.3dnatives.com/en/different-sls-3d-printers-220320184/> (accessed Dec. 30, 2020).
- [167] A. Shimosaka, S. Higashihara, and J. Hidaka, "Estimation of the sieving rate of powders using computer simulation," *Adv. Powder Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 487–502, 2000, doi: [10.1163/156855200750172088](https://doi.org/10.1163/156855200750172088).
- [168] T. Niino and K. Sato, "Effect of Powder Compaction in Plastic Laser Sintering Fabrication," *20th Annu. Int. Solid Free Fabr. Symp. SFF 2009*, pp. 193–205, Jan. 2009, [Online]. Available: [http://edge.rit.edu/edge/P10551/public/SFF/SFF 2009 Proceedings/2009 SFF Papers/2009-18-Niino.pdf](http://edge.rit.edu/edge/P10551/public/SFF/SFF%2009%20Proceedings/2009%20SFF%20Papers/2009-18-Niino.pdf)
- [169] Eco Blade, "Eco Blade offers the finest in custom-made doctor blades." Eco Blade, Inc., Yokohama, Japan, 2015. [Online]. Available: http://www.eco-blade.co.jp/wp-content/uploads/2014/05/2014_Catalog-e.pdf
- [170] Y. Shanjani and E. Toyserkani, "Material spreading and compaction in powder-based solid freeform fabrication methods: mathematical modelling," in *19th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2008*, 2008, pp. 399–410. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/MATERIAL-SPREADING-AND-COMPACTION-IN-POWDER-BASED-:-Shanjani-Toyserkani/98cbd586ba48a7f92af0c1bf7e6be1118d2c30dd# citing-papers>
- [171] A. Michelis, "Development of Numerical Controlled Device of Two Cartesian Motion Axes for an Additive Layered Manufacturing SLS/SLM Machine Tool.," National Technical University of Athens, 2012. doi: [http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.2746](https://doi.org/10.26240/heal.ntua.2746).
- [172] A. Bournias-Varotsis, "Powder Deposition System design for a prototype SLS/SLM machine," National Technical University of Athens, 2013.
- [173] F. Psarommatis-Giannakopoulos, "Development of a Powder Management Mechanism for an SLS/SLM Machine," National Technical University of Athens, 2017. doi: [http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.6887](https://doi.org/10.26240/heal.ntua.6887).
- [174] T. L. Saaty and L. G. Vargas, "Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 107–117, Oct. 1987, doi:

- 10.1016/0377-2217(87)90275-X.
- [175] I. Durbach, R. Lahdelma, and P. Salminen, “The analytic hierarchy process with stochastic judgements,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 238, no. 2, pp. 552–559, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.ejor.2014.03.045.
- [176] E. R. Jalao, T. Wu, and D. Shunk, “A stochastic AHP decision making methodology for imprecise preferences,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 270, pp. 192–203, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.ins.2014.02.077.
- [177] Y. Liu, C. M. Eckert, and C. Earl, “A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 161, p. 113738, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113738.
- [178] M. Hamka and Harjono, “Application of fuzzy preference relations method in AHP to improve judgment matrix consistency,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 821, no. 1, p. 012035, Apr. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/821/1/012035.
- [179] S. Cao, Y. Qiu, X.-F. Wei, and H.-H. Zhang, “Experimental and theoretical investigation on ultra-thin powder layering in three dimensional printing (3DP) by a novel double-smoothing mechanism,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 220, pp. 231–242, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.016>.
- [180] C. Wei, H. Gu, X. Zhang, Y. Chueh, and L. Li, “Hybrid ultrasonic and mini-motor vibration-induced irregularly shaped powder delivery for multiple materials additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 33, no. February, p. 101138, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101138.
- [181] C. Wei *et al.*, “Ultrasonic material dispensing-based selective laser melting for 3D printing of metallic components and the effect of powder compression,” *Addit. Manuf.*, vol. 29, p. 100818, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100818>.
- [182] P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, “A Study on Powder Spreading Quality in Powder Bed Fusion Processes Using Discrete Element Method Simulation,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 8, no. 3, p. 101, May 2024, doi: 10.3390/jmmp8030101.
- [183] M. Baucchio, *ASM Engineered Materials Reference Book*, 2nd ed. ASM International, Materials Park, OH, ©1994, 1994.
- [184] AZO Materials, “Alumina as a Biomaterial (99.5% Alumina).” <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=105> (accessed Nov. 15, 2023).
- [185] AZO Materials, “Alumina - Aluminium Oxide - Al₂O₃ - A Refractory Ceramic Oxide.” <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=52> (accessed Nov. 28, 2023).
- [186] H. Chen, Y. G. Xiao, Y. L. Liu, and Y. S. Shi, “Effect of Young’s modulus on DEM results regarding transverse mixing of particles within a rotating drum,” *Powder Technol.*, vol. 318, pp. 507–517, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2017.05.047.
- [187] S. J. Burns, P. T. Piiroinen, and K. J. Hanley, “Critical time step for DEM simulations of dynamic systems using a Hertzian contact model,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 119, no. 5, pp. 432–451, Aug. 2019, doi: 10.1002/nme.6056.
- [188] M. Kremmer and J. F. Favier, “A method for representing boundaries in discrete element modelling—part II: Kinematics,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 51, no. 12, pp. 1423–1436, Aug. 2001, doi: 10.1002/nme.185.
- [189] K. D. Kafui, C. Thornton, and M. J. Adams, “Discrete particle-continuum fluid modelling of gas–solid fluidised beds,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 57, no. 13, pp. 2395–

- 2410, Jul. 2002, doi: 10.1016/S0009-2509(02)00140-9.
- [190] C. THORNTON and C. W. RANDALL, “Applications of Theoretical Contact Mechanics to Solid Particle System Simulation,” in *Micromechanics of Granular Materials*, vol. 20, M. Satake and J. T. B. T.-S. in A. M. Jenkins, Eds. Elsevier, 1988, pp. 133–142. doi: 10.1016/B978-0-444-70523-5.50023-0.
- [191] Y. Li, Y. Xu, and C. Thornton, “A comparison of discrete element simulations and experiments for ‘sandpiles’ composed of spherical particles,” *Powder Technol.*, vol. 160, no. 3, pp. 219–228, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.powtec.2005.09.002.
- [192] C. Thornton, *Granular Dynamics, Contact Mechanics and Particle System Simulations*, vol. 24. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-18711-2.
- [193] H. Hertz, “Ueber die Berührung fester elastischer Körper.,” *crll*, vol. 1882, no. 92, pp. 156–171, 1882, doi: 10.1515/crll.1882.92.156.
- [194] R. D. Mindlin, “Compliance of Elastic Bodies in Contact,” *J. Appl. Mech.*, vol. 16, no. 3, pp. 259–268, Sep. 1949, doi: 10.1115/1.4009973.
- [195] R. Mukherjee *et al.*, “Effects of particle size on the triboelectrification phenomenon in pharmaceutical excipients: Experiments and multi-scale modeling,” *Asian J. Pharm. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 603–617, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2016.04.006>.
- [196] S. Ose, “Dusting of Alumina and Electrostatic Charging,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 237–245, Jul. 2003, doi: 10.1080/02726350307483.
- [197] K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts, “Surface energy and the contact of elastic solids,” *Proc. R. Soc. London. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 324, no. 1558, pp. 301–313, Sep. 1971, doi: 10.1098/rspa.1971.0141.
- [198] B. V Derjaguin, V. M. Muller, and Y. . Toporov, “Effect of contact deformations on the adhesion of particles,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 53, no. 2, pp. 314–326, 1975, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(75\)90018-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(75)90018-1).
- [199] ITASCA, “Johnson-Kendall-Roberts (JKR) Contact Model,” 2021. <https://docs.itascacg.com/pfc700/common/contactmodel/jkr/doc/manual/cmjkr.html> (accessed Dec. 07, 2023).
- [200] A. EDEM, “The Hertz-Mindlin with JKR Version 2 model.” https://2022.help.altair.com/2022.2/EDem/Creator/Physics/Base_Models/Hertz-Mindlin_with_JKR_V2.htm (accessed Mar. 27, 2024).
- [201] K. L. Johnson and J. A. Greenwood, “Adhesive Contact of Elastic Bodies: The JKR Theory,” in *Encyclopedia of Tribology*, Boston, MA: Springer US, 2013, pp. 42–49. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_1086.
- [202] D. S. Grierson, E. E. Flater, and R. W. Carpick, “Accounting for the JKR–DMT transition in adhesion and friction measurements with atomic force microscopy,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3–5, pp. 291–311, Jan. 2005, doi: 10.1163/1568561054352685.
- [203] D. Maugis, “Adhesion of spheres: The JKR–DMT transition using a dugdale model,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 150, no. 1, pp. 243–269, Apr. 1992, doi: 10.1016/0021-9797(92)90285-T.
- [204] X. Shi and Y.-P. Zhao, “Comparison of various adhesion contact theories and the influence of dimensionless load parameter,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 1, pp. 55–68, Jan. 2004, doi: 10.1163/156856104322747009.

- [205] J. A. Greenwood, “Adhesion of Elastic Spheres,” *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 453, no. 1961, pp. 1277–1297, Dec. 1997, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/53001>
- [206] A. H. Tavakoli *et al.*, “Amorphous Alumina Nanoparticles: Structure, Surface Energy, and Thermodynamic Phase Stability,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 117, no. 33, pp. 17123–17130, Aug. 2013, doi: 10.1021/jp405820g.
- [207] D. Vollath, F. D. Fischer, and D. Holec, “Surface energy of nanoparticles – influence of particle size and structure,” *Beilstein J. Nanotechnol.*, vol. 9, pp. 2265–2276, Aug. 2018, doi: 10.3762/bjnano.9.211.
- [208] P. D. Tepesch and A. A. Quong, “First-Principles Calculations of α -Alumina (0001) Surfaces Energies with and without Hydrogen,” *Phys. status solidi*, vol. 217, no. 1, pp. 377–387, Jan. 2000, doi: 10.1002/(SICI)1521-3951(200001)217:1<377::AID-PSSB377>3.0.CO;2-B.
- [209] I. Vilfan, T. Deutsch, F. Lançon, and G. Renaud, “Erratum to: ‘Structure determination of the (3×3) reconstructed α -Al₂O₃(0001)’ [Surf. Sci. 505 (2002) L215],” *Surf. Sci.*, vol. 529, no. 1–2, p. 281, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0039-6028(03)00261-9.
- [210] R. Spolenak, S. Gorb, H. Gao, and E. Arzt, “Effects of contact shape on the scaling of biological attachments,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 461, no. 2054, pp. 305–319, Feb. 2005, doi: 10.1098/rspa.2004.1326.
- [211] L. Schiller and A. Naumann, “A Drag Coefficient Correlation,” *Zeitschrift des Vereins Dtsch. Ingenieure*, vol. 77, pp. 318–320, 1935.
- [212] S. S. Karunarathne and L.-A. Tokheim, “Comparison of the influence of drag models in CFD simulation of particle mixing and segregation in a rotating cylinder,” Sep. 2017, pp. 151–156. doi: 10.3384/ecp17138151.
- [213] AZO Materials, “Stainless Steel - Grade 304 (UNS S30400),” 2023. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=965> (accessed Dec. 27, 2023).
- [214] OLYMPUS-IMS-EVIDENT, “Surface Roughness Measurement—Parameters,” 2023. <https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/> (accessed Dec. 23, 2023).
- [215] S. Taylor, E. C. Forrest, and B. H. Jared, “Investigating Applicability of Surface Roughness Parameters in Describing the Metallic Additive Manufacturing Process.,” 2019. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/1641526>
- [216] Michigan Metrology LLC, “Ssk (Skewness) and Sku (Kurtosis),” 2023. <https://michmet.com/glossary-term/kurtosis/> (accessed Dec. 22, 2023).
- [217] Y. M. Fouda and A. E. Bayly, “A DEM study of powder spreading in additive layer manufacturing,” *Granul. Matter*, vol. 22, no. 1, pp. 1–18, 2020, doi: 10.1007/s10035-019-0971-x.
- [218] S. Wu *et al.*, “Study on powder particle behavior in powder spreading with discrete element method and its critical implications for binder jetting additive manufacturing processes,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 18, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1080/17452759.2022.2158877.
- [219] R. Roy, *A primer on the Taguchi method*, 1st ed. New York: Society of Manufacturing Engineers, 1990. [Online]. Available: <https://catalogue.nla.gov.au/Record/1852247>
- [220] D. Schiochet Nasato, H. Briesen, and T. Pöschel, “Influence of vibrating recoating

- mechanism for the deposition of powders in additive manufacturing: Discrete element simulations of polyamide 12,” *Addit. Manuf.*, vol. 48, p. 102248, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102248.
- [221] U. Ali *et al.*, “Identification and characterization of spatter particles and their effect on surface roughness, density and mechanical response of 17-4 PH stainless steel laser powder-bed fusion parts,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 756, pp. 98–107, May 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.04.026.
- [222] Elcan Industries Inc., “Ultrasonic Sieving Machines: Here’s What You Should Know,” 2023. https://elcanindustries.com/blog_posts/ultrasonic-sieving-machines-heres-what-you-should-know/ (accessed May 21, 2024).
- [223] Takeda Tokyo Process Service Co. Ltd., “Micro-sieves.” <https://www.tkd-topro.com/english/product/microsieve/> (accessed Jan. 12, 2024).
- [224] W.S.Tyler, “Terminology & Measurement Methods of Sieves,” 2024. <https://wstyler.com/square-opening-wire-mesh/terminology-measurement-methods/> (accessed Jan. 12, 2024).
- [225] Retsch, “Sieve Analysis: Taking a close look at quality,” 2015. <https://www.retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf> (accessed Jan. 17, 2024).
- [226] C. O’Callaghan, “Sifting Through Sieve Analysis,” *Innopharma Technology*, 2023. <https://www.innopharmatechnology.com/news/sifting-through-sieve-analysis> (accessed Jan. 17, 2024).
- [227] K. Yamane, S. Ishihara, R. Soda, J. Kano, and F. Saito, “DEM Simulation of Sieving Process about Rod-like Particles,” *J. Soc. Powder Technol. Japan*, vol. 49, no. 11, pp. 818–826, 2012, doi: 10.4164/sptj.49.818.
- [228] AEROSINT, “Multi-material L-PBF,” 2021. <https://aerosint.com/multi-material-3d-printing-bundle/> (accessed Jan. 21, 2024).
- [229] S. Diener, A. Zocca, and J. Günster, “Literature review: Methods for achieving high powder bed densities in ceramic powder bed based additive manufacturing,” *Open Ceram.*, vol. 8, p. 100191, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.oceram.2021.100191.
- [230] Fraunhofer IGCV, “3-D-Multimaterialbauteile, Projekt FORNEXTGEN,” 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=pm62sRQOUgE> (accessed Jun. 11, 2024).
- [231] C. Seidel, “Multi-material metal parts by Powder Bed Fusion: New application opportunities,” *Metal AM Vol 8 No. 2*, pp. 145–151, 2022. Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.metal-am.com/articles/multi-material-metal-parts-by-powder-bed-fusion-new-application-opportunities/>
- [232] K. Hormann and A. Agathos, “The point in polygon problem for arbitrary polygons,” *Comput. Geom.*, vol. 20, no. 3, pp. 131–144, Nov. 2001, doi: 10.1016/S0925-7721(01)00012-8.
- [233] OpenCV, “Hough Circle Transform.” https://docs.opencv.org/4.x/da/d53/tutorial_py_houghcircles.html (accessed Apr. 22, 2024).
- [234] L. A. F. Fernandes and M. M. Oliveira, “A general framework for subspace detection in unordered multidimensional data,” *Pattern Recognit.*, vol. 45, no. 9, pp. 3566–3579, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.patcog.2012.02.033.
- [235] D. H. Ballard, “Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes,” *Pattern Recognit.*, vol. 13, no. 2, pp. 111–122, Jan. 1981, doi: 10.1016/0031-3203(81)90009-1.