



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING  
SECTION OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**Extrusion-based additive manufacturing:  
trajectory design and material deposition optimisation**

DOCTOR OF PHILOSOPHY THESIS

Author

**GEORGIOS PAPAZETIS**

Supervisor

**Prof. G.-C. VOSNIAKOS**

Athens, July 2020



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING  
SECTION OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**Extrusion-based additive manufacturing:  
trajectory design and material deposition optimisation**

DOCTOR OF PHILOSOPHY THESIS

**GEORGIOS PAPAZETIS**

Evaluation Committee

Assist. Prof. P. Benardos (Mech. Eng., NTUA, Advisory Committee)

Prof. N Bilalis (Prod. Eng.. Manag., TUC)

Prof. V. Dedoussis (Ind. Manag. & Tech., UNIPI)

Assist. Prof. J. Giannatsis (Ind. Manag. & Tech., UNIPI)

Prof. D. Manolakos (Mech. Eng., NTUA, Advisory Committee)

Assist Prof. A. Markopoulos (Mech. Eng., NTUA)

Prof. G.-C. Vosniakos (Mech. Eng., NTUA, Supervisor)

Athens, July 2020



This doctoral thesis has been financially supported by the four-year scholarship, contributed from the Special Account for Research Funding (E.L.K.E) of National Technical University of Athens (N.T.U.A.)



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΕΙΔΙΚΟΣ ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ  
ΚΟΝΔΥΛΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ



## *Acknowledgements - Ευχαριστίες*

Η εκπόνηση μιας διδακτορικής διατριβής απαιτεί χρόνο, επιμονή και αφοσίωση στο στόχο. Φτάνοντας στο τέλος αυτής της διαδρομής, θα ήθελα να αφιερώσω δύο σελίδες στους ανθρώπους που συνεργάστηκα και έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στην επίτευξη του στόχου μου, αλλά και σε εκείνους που με την υποστήριξή τους με βοήθησαν να αντεπεξέλθω στις προκλήσεις.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γιώργο Χ. Βοσνιάκο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε τόσο στην αρχή της συνεργασίας μας, στα πλαίσια της μεταπτυχιακής μου εργασίας το 2013, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια του διδακτορικού μου, από το 2015 έως και σήμερα. Η καθοδήγησή του υπήρξε υποδειγματική, ενώ οι γνώσεις που πήρα σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, αποτελούν στέρεη βάση για την επαγγελματική μου πορεία στη συνέχεια. Πέρα όμως από την ακαδημαϊκή κατάρτιση, η ευθύτητα, η εντιμότητα και ο σεβασμός που μου έδειξε με κάνουν να αισθάνομαι ιδιαίτερα τυχερός για την συνεργασία μας. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Δημήτρη Μανωλάκο. Η βοήθειά του, ως μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, σε συνδυασμό με την ευγενική του φυσιογνωμία, διευκόλυναν ιδιαίτερα την εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ στο έτερο μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής, τον επίκουρο καθηγητή Πανώριο Μπενάρδο και στον επίκουρο καθηγητή Άγγελο Μαρκόπουλο για τις συζητήσεις μας και για τις συμβουλές που μου παρείχαν στη διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή Νικόλαο Μπιλάλη, τον καθηγητή Βασίλειο Δεδούση και τον επίκουρο καθηγητή Ιωάννη Γιαννατσή για τη συμμετοχή τους στην υποστήριξη της διδακτορικής μου διατριβής ως μέλη της επταμελούς επιτροπής.

Για τις μεταξύ μας κουβέντες, αλλά και για την ανεξάντλητη διάθεσή του θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο, όπως επίσης και τους Νίκο Μελισσά και Κώστα Κερασιώτη, τόσο για τη βοήθειά τους σε τεχνικά θέματα, όσο και για το πολύ φιλικό κλίμα στο χώρο του εργαστηρίου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ επίσης στους συναδέλφους μου: Δρ. Ηλία Μάτσα για τη φιλική υποδοχή στο εργαστήριο και για την παρέα, Παναγιώτη Αβράμπο και Αδάμο Ιωαννίδη για το χρόνο που περάσαμε στο εργαστήριο και για τη συνεργασία μας, Γιάννη Παπαντωνίου και Νίκο Κάρκαλο για την παράλληλη πορεία μας και την καθημερινή επικοινωνία, αλλά και σε ένα μεγάλο αριθμό προπτυχιακών και μεταπτυχιακών φοιτητών που είχα τη χαρά να γνωρίσω και να αλληλεπιδράσω στο χώρο του εργαστηρίου.

Από την πλευρά των οικείων μου, θα ήθελα να εκφράσω πρωτίστως την αγάπη και την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου Γιάννη και Μαρία για την απόλυτη υποστήριξή τους, ηθικά και υλικά, και γιατί σε αυτούς οφείλω μεγάλο μέρος του τρόπου σκέψης και της στάσης ζωής μου σήμερα. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην αδερφή μου Λίνα και στο Δημήτρη για τη συμπαράστασή τους σε όλη τη διαδρομή και ως ανταπόδοση θα ήθελα να αφιερώσω τη διδακτορική μου διατριβή στον ερχομό του παιδιού τους. Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη μου στη Ματίνα για τον ξεχωριστό της ρόλο, την υπομονή και την καθημερινή της στήριξη από την πρώτη μέρα έως σήμερα. Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου Βασίλη, Τάσο και Σπύρο για την έμπνευση, τις συμβουλές και την εμπειρία τους σχετικά με την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής, αλλά και τους Κωστή, Μάριο, Γιώργο, Γρηγόρη, Φοίβο και Βασίλη για την στήριξη τους, τις στιγμές χαλάρωσης και αποσυμπίεσης αλλά και για την κατανόησή τους για το χρόνο που χρειάστηκε να τους στερήσω ώστε να τον αφιερώσω στο στόχο μου.

## *Abstract*

Additive Manufacturing (AM) constitutes a significant category of manufacturing processes, that has been available for over thirty years. Especially during the last decade, AM has attracted research attention, in an effort to upgrade its utilization from prototyping to end-use industrial applications. One of the most common techniques is extrusion-based AM, also referred as Material Extrusion (ME). Superior design flexibility, consolidation capability of complex assemblies and reduced lead-time are some of the main potentials that ME brings to industrial manufacturing. Currently, the offered competitive advantages, render ME suitable for the production of small batches or one-of-a-kind parts, with increased complexity and customization. However, certain issues still exist, hindering the process from unleashing its full strength. From the industry point of view, the reluctance to integrate ME is mainly attributed to the lack of process standardization that would guarantee predictable and repeatable production. In an attempt to contribute to the efforts towards ME process maturation, this thesis investigates timely issues from two aspects: trajectory design and optimisation of material deposition.

Manufacturing of complex parts consisting of numerous surfaces and possessing complex internal structure has become feasible by the layer-wise fabrication manner of ME. Nevertheless, 3D modeling of such structures induces significant processing difficulties for CAD software even on state-of-the-art computers. Apart from modeling, conversion of complex parts in Stereolithography (STL) file format is likely to induce errors, if not complete conversion inability. Although STL is still the standard intermediate step between design and process planning (slicing) for ME, it is widely accepted that this format is soon becoming obsolete. In this light, a CAD-direct process planning approach is investigated in the **first part of this thesis**. A representative case concerns lattice scaffolds, containing structured macro-pores which can be produced following the ME paradigm. A process planning algorithm is proposed, exploiting the macro-pore as a periodically repeated unit cell. The two latest versions of the implemented code are presented in this work, developed within Application Programming Interface (API) of Solidworks™ CAD software. The penultimate version deals with the representation of the lattice scaffold as a set of segmented files. The first set represents the unit cells lying on the outer boundary of the scaffold and being represented in their exact shape as separate STL files, pertaining to each layer. These consist mostly of incomplete unit cells due to their intersection with the layer boundary. The rest of the unit cells, lying totally inside the scaffold boundary, are represented in essence by a reference point and a reference direction. The last version of the code implements significant updates in order to directly export machine instructions, in the form of G-code commands, that are ready to drive the ME fabrication system. Each unit-cell is now handled

as a separate object with individual properties, such as position ID, reference point and pore size. The on-boundary unit-cells are connected to unified and continuous (when possible) trajectory paths, according to their relative position. They are directly exported as G-code commands, totally by-passing segmented STL file representation of the initial version. Similarly, the reference points of internal unit-cells, from the initial version are utilized to populate G-code commands, thus composing the entire layer. Process parameters for slicing are provided by the user before code execution. The functionality of the exported G-code is verified for the fabrication of a lattice scaffold segment.

From the aspect of material deposition optimization, the open challenge for ME corresponds to the need for quality parts, fabricated with increased productivity. The free-form strategy of material extrusion and deposition is often accompanied by defects, resulting from non-optimal combination of process parameter settings. The large number of available parameters initiates the need to separate what is “allowable” from what is “feasible”, regarding determination of settings. In **the second part of this thesis**, a predictive process-planning tool to balance productivity and quality of ME parts according to user requirements is developed. Taguchi design of experiments (DoE) method is employed in order to determine the process parameters that impact shape fidelity over a wide range of parameter settings and in terms of material deposition stability that results in defect-free products. The development of four common fabrication defects is investigated on simple specimens, which are reverse-engineered and quantified by CAD-to-part 3D comparison. The experimental analysis is based on robust statistical tools and methods, allowing for reliable conclusions. Interaction terms were identified as statistically significant, indicating the non-linear behavior of the process in contrast to what is often assumed in literature. Although, conservative material flow rate settings are typically advised for stable extrusion, the low limit, below which defects form, was identified. A highly reliable Artificial Neural Network (ANN) is configured in an optimum way, and trained on the previous experiments with the aim to predict shape fidelity across the entire parameter level range. Hence, material flow rate, which is a function of the investigated factors, is provided with direct feedback by the ANN regarding possible defects occurrence. The increased granularity of the trained ANN facilitated the detection of the maximum feasible flow-rate, which the Taguchi analysis of the experimental results alone was not able to trace.

The conditions under which material is extruded and deposited on the build platform are often associated with the resulting dimensions of the printed part. Phenomena of anisotropic shrinkage and non-uniform temperature gradients during solidification cause variation of dimensions along the different printing directions or according to the geometric feature that is fabricated. In order to further optimise ME process, a novel approach of adaptive settings during material deposition

is proposed in the **third part of the thesis**. The well-established response surface methodology is applied on a specially designed specimen, containing holes and thin wall features along the three printing directions, in order to obtain separate models that predict dimensional accuracy. This scheme creates a problem with multiple responses and is typically tackled with multiple-objective optimisation routines in order to obtain optimal parameter settings that simultaneously satisfy contradicting requirements, thus carrying a degree of compromise. To improve this, the proposed approach separately optimises dimensional accuracy on every included feature and along the different printing directions, thus providing enhanced flexibility to the derived optimal solution. Optimal settings obtained from the prediction models are fed directly to the material extrusion system as modified machine instructions. Different parameter settings for different regions of the same layer or even varying material extrusion rate and feed rate along continuous trajectory are validated. The efficiency of the proposed approach is compared with multiple-objective optimisation based on the desirability method. The test specimen presented enhanced dimensional accuracy for four out of five features, exhibiting reduction regarding the average deviation from the designed part.

Limitations from the previous solution pertained to the maximum permitted degree of in-situ variations for flow-rate and printing speed, which sometimes caused deposition instability. In ME process, increased performance and part quality is achieved when the extruded strands are uniformly deposited according to the designed trajectory, without defects and with minimal deviation from the intended strand shape and dimension. In the **last part of the thesis**, the extrusion variation along a single linear trajectory path was experimentally evaluated according to its ability to maintain strand width uniformity and also mitigate start-stop errors, reflected by overfills and underfills at the extreme points of the deposited strand. The investigation was performed via a designed fraction factorial experiment and was enriched with other tested parameters that were expected to impact strand width stability, including priming/retraction length and speed, printing speed and melt temperature. This objective becomes more challenging when ME subsystems must be optimally synchronized, in order to perform material deposition at higher rates, given the timely need to improve ME process productivity. In particular, higher flow-rates are likely to trigger instant extrusion blockage, resulting in intermittent paths. Two separate metrics were determined to quantify deposition quality, namely material deposition discontinuity (MDD) and strand width deviation (SWD), as function of corresponding regression models. Image analysis methods are employed to evaluate factor contribution to the fabrication of simple linear segments, and to effectively measure the free form shape of the resulting strands. Frame analysis of video recording was also performed to capture the material extrusion profile during the deposition stages. Analysis of the experiments revealed the mechanisms that trigger

material deposition discontinuity (MDD) during part fabrication. Instant nozzle blockage was successfully captured in the frame analysis and correlated with tested factors. Extrusion variation was found to have comparably lower impact than priming/retraction length, which is responsible for severe overfills and underfills when not optimised. Although increased melt temperature was found to facilitate continuous deposition at higher rates, it was constrained by the uncontrolled oozing that induced defects in the form of stringing. The models were utilized as roadmaps towards continuous and uniform deposition for two indicative case studies, namely at normal and increased melt flow rate. Compared to non-optimized runs at similar flow rates, continuous and more uniform deposition is achieved for both cases.

# Table of Contents

ACKNOWLEDGEMENTS - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	V
ABSTRACT .....	VII
LIST OF FIGURES .....	XIV
LIST OF FIGURES IN ANNEXES .....	XVI
LIST OF TABLES.....	XVII
<b>1 INTRODUCTION .....</b>	<b>18</b>
1.1 ADDITIVE MANUFACTURING.....	18
1.2 MATERIAL EXTRUSION - BASED ADDITIVE MANUFACTURING.....	19
1.3 SCOPE.....	22
1.3.1 <i>Contribution and progressive motivation of work</i> .....	22
1.4 THESIS STRUCTURE .....	25
<b>2 LITERATURE REVIEW .....</b>	<b>27</b>
2.1 SLICING ALGORITHMS .....	27
2.1.1 <i>Common characteristics of slicers</i> .....	28
2.1.2 <i>Issues in trajectory design</i> .....	33
2.2 IN-NOZZLE MATERIAL FLOW .....	35
2.3 MATERIAL DEPOSITION .....	38
2.4 DIMENSIONAL ACCURACY.....	40
2.5 RESIDUAL STRESSES AND WARPAGE.....	42
2.6 SURFACE ROUGHNESS .....	43
2.7 MATERIALS AND PROPERTIES .....	45
<b>3 TRAJECTORY DESIGN IN EXTRUSION-BASED AM .....</b>	<b>47</b>
3.1 POROUS LATTICE STRUCTURES.....	47
3.1.1 <i>Tissue engineering scaffolds</i> .....	47
3.1.2 <i>Difficulty in modeling and tessellation</i> .....	49
3.2 REPRESENTATION OF POROUS LATTICE STRUCTURE .....	50
3.2.1 <i>Overview</i> .....	50
3.2.2 <i>Algorithm</i> .....	52
3.2.3 <i>Implementation</i> .....	55
3.2.4 <i>Cell surface template (CST) generation</i> .....	55
3.2.5 <i>CST location calculation</i> .....	56
3.2.5.1 Surface template placement points on contour (STP <sub>c</sub> ) .....	56
3.2.5.2 Surface template placement points in layer's interior (STP <sub>i</sub> ).....	59
3.3 CODE PERFORMANCE VALIDATION .....	59

3.4	MANUFACTURING OF POROUS LATTICE STRUCTURE .....	62
3.5	DISCUSSION .....	67
<b>4</b>	<b>DEFECT-FREE MATERIAL EXTRUSION.....</b>	<b>69</b>
4.1	PROCESS OPERATIONAL WINDOW .....	69
4.2	MOTIVATION AND CONCEPT .....	69
4.3	METHODOLOGY .....	71
4.3.1	<i>Equipment and materials</i> .....	71
4.3.2	<i>Process parameters examined</i> .....	72
4.3.3	<i>Taguchi DoE</i> .....	73
4.3.4	<i>Artificial Neural Network</i> .....	74
4.4	EXPERIMENTAL RESULTS .....	77
4.4.1	<i>Shape fidelity</i> .....	77
4.4.2	<i>Material flow rate</i> .....	81
4.5	SHAPE FIDELITY AND MATERIAL FLOW RATE OPTIMISATION .....	82
4.6	DISCUSSION .....	86
<b>5</b>	<b>ADAPTIVE SETTINGS FOR IMPROVED DIMENSIONAL ACCURACY .....</b>	<b>87</b>
5.1	VARIABLE MATERIAL EXTRUSION .....	87
5.2	MOTIVATION AND CONCEPT .....	87
5.3	METHODOLOGY .....	88
5.3.1	<i>Process parameters and equipment</i> .....	88
5.3.2	<i>Central composite design and model validation</i> .....	91
5.3.3	<i>Desirability function</i> .....	93
5.4	EXPERIMENTAL RESULTS .....	94
5.4.1	<i>Generated models and model validity check</i> .....	94
5.4.2	<i>Multiple objective optimisation</i> .....	96
5.4.3	<i>Feature-adaptive optimisation with varying parameters</i> .....	97
5.4.3.1	G-code modification .....	97
5.5	MANUFACTURING WITH VARIABLE SETTINGS.....	99
5.6	DISCUSSION .....	101
<b>6</b>	<b>UNIFORM MATERIAL DEPOSITION AT HIGHER RATES .....</b>	<b>103</b>
6.1	INSPECTING STRAND DEPOSITION .....	103
6.2	MEASURING DEPOSITED STRANDS.....	105
6.3	PRIMING AND RETRACTION MEASUREMENTS.....	106
6.4	EXPERIMENT DESIGN .....	108
6.5	EXPERIMENTAL RESULTS, MODELS AND ANALYSIS .....	109
6.6	MATERIAL DEPOSITION DISCONTINUITY (MDD) .....	112
6.7	STRAND WIDTH DEVIATION (SWD).....	115
6.8	REMARKS ON STRAND WIDTH CONSISTENCY.....	119



---

6.9	DISCUSSION .....	122
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>124</b>
7.1	ACHIEVEMENTS AND LIMITATIONS .....	124
7.2	FUTURE WORK.....	127
<b>8</b>	<b>REFERENCES.....</b>	<b>130</b>
<b>I.</b>	<b>ANNEX A.....</b>	<b>148</b>
<b>II.</b>	<b>ANNEX B.....</b>	<b>165</b>
<b>III.</b>	<b>ANNEX C.....</b>	<b>188</b>

## List of Figures

FIG. 1-1 (A) MATERIAL EXTRUSION ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEM OVERVIEW AND (B) EXTRUDER MOTOR AND NOZZLE SUB-SYSTEM. .....	20
FIG. 2-1 (A) LAYER THICKNESS AND (B) EXTRUSION WIDTH. ....	28
FIG. 2-2 NUMBER OF PERIMETERS THAT DETERMINES SKIN THICKNESS.....	29
FIG. 2-3 TRAJECTORY DESIGN UNDER DIFFERENT INFILL PERCENTAGE.....	29
FIG. 2-4 (A) LINEAR INFILL PATTERN AND (B) OCTAGONAL INFILL PATTERN. ....	29
FIG. 2-5 PRINTING SPEED OF THE NOZZLE. ....	30
FIG. 2-6 CUBE STL MODEL IN DIFFERENT ORIENTATIONS WITH RESPECT TO THE BUILD PLATFORM. ....	30
FIG. 2-7 DISTANCE BETWEEN GREEN (INFILL) AND BLUE (PERIMETER) TRAJECTORY DEFINE PERIMETER/INFILL OVERLAP.....	30
FIG. 2-8 MEASUREMENT OF FILAMENT DIAMETER (IMAGE TAKEN FROM KISSLICER© v1.5 USER MANUAL). ....	31
FIG. 2-9 (A) LARGER DEPOSITION FOOTPRINT DUE TO PRIMING AND (B) STRINGING EFFECT DUE TO POOR RETRACTION SETTINGS. ....	32
FIG. 2-10 THE YELLOW TRAJECTORY IS TRAVERSED BACKWARDS IN ORDER TO WIPE EXCESS MATERIAL.....	32
FIG. 2-11 DIFFERENT SUPPORT DENSITY SETTINGS: (A) COARSE AND (B) DENSE (IMAGE TAKEN FROM KISSLICER© v1.5 USER MANUAL). ....	33
FIG. 2-12 SUPPORT ANGLE SET TO (A) 5°, (B) 40° AND (C) 70°, RESULTING IN REDUCING SUPPORT EMBRACEMENT OF THE CYLINDRICAL OVERHANGING PART (IMAGE TAKEN FROM KISSLICER© v1.5 USER MANUAL).....	33
FIG. 2-13 SLICER INACCURACIES / VOIDS IN TOOL-PATH CALCULATION.....	34
FIG. 2-14 DIRECT-DRIVE MATERIAL EXTRUSION SYSTEM.....	36
FIG. 3-1 (A) SQUARE PRISM UNIT CELL (B) UNIT CELL BOOLEAN ADDITION (C) BOOLEAN INTERSECTION. ....	49
FIG. 3-2 ALGORITHM FLOW CHARTS (A) CELL SURFACE TEMPLATE (CST) GENERATION (B) LAYER FILLING. ....	51
FIG. 3-3 (A) UNIT CELL SLICING PROCESS (B) CELL SURFACE TEMPLATE (CST) 1 AND (C) CELL SURFACE TEMPLATE (CST) 2. ....	52
FIG. 3-4 (A) SUCCESSIVE LAYERS AT STEP DISTANCE $\lambda$ (SCALED UP IN THE INTEREST OF VISIBILITY) FOR A SAMPLE TISSUE (B) ONE-HIGH BLOCK OF UNIT CELLS FORMED EVERY N LAYERS. ....	53
FIG. 3-5 CSTS PLACED ON LAYER CONTOUR ACCORDING TO LAYER FILLING VECTOR (V). ....	53
FIG. 3-6 CONTOUR SPLINE CURVE AND EXTRUDED BOUNDARY SURFACE. ....	54
FIG. 3-7 CONTOUR REPRESENTATION (A) BEFORE AND (B) AFTER TRIMMING BY THE CONTOUR SPLINE CURVE.....	54
FIG. 3-8 (A) POSSIBLE LOCATION OF SURFACE BODIES THAT DEFINE A NON-CONTINUOUS CST (B) COMPARISON BETWEEN TWO POINTS IN ORDER TO DETERMINE IF THE SELECTED ENTITIES I(IN) OR I(OUT) LIES INSIDE OR OUTSIDE LAYER'S CONTOUR. ....	55
FIG. 3-9 DATA INPUT FOR THE DIRECT POROUS STRUCTURE GENERATION. ....	56
FIG. 3-10 RAY CASTING PROCESS TO YIELD STPC ACCORDING TO EQNS. (3-1) AND (3-2).....	57
FIG. 3-11 LIGHT-COLOURED CSTS ARE MISSING AND ARE ONLY RETRIEVED AFTER RAY 1 (Y-DIRECTION) AND RAY 2.5 (X-DIRECTION) IS LAUNCHED. ....	58
FIG. 3-12 (A) FEMUR MODEL (B) FIVE LCP ON SUCCESSIVE LAYERS. ....	60
FIG. 3-13 (A) HIP MODEL (B) FIVE LCP ON SUCCESSIVE LAYERS. ....	60
FIG. 3-14 STPI FOR A FEMUR LAYER, MODELED AS SOLIDWORKS™ SKETCH POINTS.....	60
FIG. 3-15 A) SEQUENTIAL CODE ASSIGNMENT FOR EACH LINE SEGMENT, B) INTERSECTION POINTS FOR EACH CODED LINE SEGMENT, C) JOINING OF NEIGHBORING SEGMENT PAIRS WITH A STRAIGHT LINE AND D) PLOT OF THE EXPORTED G-CODE COMMANDS.....	63
FIG. 3-16 IDENTIFICATION NUMBER FOR MAPPING AND TRACING OF INTERNAL LAYER UNIT CELL PATTERNS.....	64

FIG. 3-17 (A)-(I) PROGRESSION OF THE EXPORTED G-CODE TRAJECTORY TO PRINT THE ENTIRE LAYER (INTERIOR AND CONTOUR). .....	65
FIG. 3-18 DIRECT EXPORT OF G-CODE FOR FEMUR BONE SEGMENT, THAT IS MANUFACTURED ON A ME SYSTEM. ....	66
FIG. 3-19 A) PORE QUALITY OPTIMISATION EXPERIMENT AND B) ASSESSMENT OF BRIDGING CAPABILITY FOR POROUS LATTICE SPECIMENS. .....	67
FIG. 4-1 MATERIAL EXTRUSION DEFECT TYPES (A) DEFORMED EDGES (DE)(B) UNDER-EXTRUSION (UE)(C) WEAK FIBER BONDING (WFB)(D) BASE BULGING (BB). ....	70
FIG. 4-2 REVERSE ENGINEERING (A) WHITE LIGHT SCANNING (B) MODEL GENERATION (C) COMPARISON BETWEEN ACTUAL AND REFERENCE MODEL. ....	71
FIG. 4-3 DESIGNED SPECIMEN FOR THE EXPERIMENT. ....	72
FIG. 4-4 MAIN EFFECTS FOR SHAPE FIDELITY EXPRESSED IN SNR FOR (A) INDIVIDUAL FACTORS (B) LTxFT INTERACTION (C) LTxPS INTERACTION (D) FTxPS INTERACTION. ....	79
FIG. 4-5 A) EFFECT OF MATERIAL UNDER-EXTRUSION ON LATERAL FACE AND B) OVER-EXTRUSION CAUSING MATERIAL FLOODING EFFECT ON TOP FACE. ....	80
FIG. 4-6 ANALYSIS OF MEANS TO OBTAIN OPTIMUM ANN TRAINING PARAMETER LEVELS WITH RESPECT TO ROOT MEAN SQUARE ERROR (VERTICAL AXIS).....	83
FIG. 4-7A) SHAPE FIDELITY MAP FOR ALL FACTOR LEVEL COMBINATIONS B) CONTOUR PLOT FOR CONSTANT PRINTING SPEED (PS=40) AND C) CONTOUR PLOT FOR CONSTANT LAYER THICKNESS (LT=0.20MM) ACCORDING TO ANN PREDICTIONS.....	85
FIG. 5-1 DESIGNED SPECIMEN FOR EVALUATION OF DIMENSIONAL ACCURACY. ....	88
FIG. 5-2 INVESTIGATED PROCESS PARAMETERS: A) LAYER THICKNESS B) STRAND WIDTH ADJUSTED BY FLOW TWEAK PARAMETER AND C) NOZZLE VELOCITY DETERMINED BY PRINTING SPEED PARAMETER. ....	89
FIG. 5-3 PART WITH REGIONS (A) – (G) REFERRING TO G-CODE COMMANDS IN TABLE 5-5 . ....	98
FIG. 5-4 DEVIATION BETWEEN ACTUAL AND NOMINAL DIMENSIONS FOR MULTIPLE-OBJECTIVE AND FEATURE-ADAPTIVE OPTIMISATION STRATEGY. ....	100
FIG. 5-5 RIPPLES FORMATION DURING THIN WALL MANUFACTURING A) DUE TO INSTANT CHANGE IN FEED-RATE AND MATERIAL FLOW AND B) WITH CONSTANT SETTINGS.....	101
FIG. 6-1 UNFILLED REGIONS FOR DEPOSITION OF CIRCULAR PATHS AND FOR INCREASING FLOW RATES Q FROM LEFT TO RIGHT. THE DOT AND THE ARROW DENOTE START POINT AND THE DIRECTION OF THE PATH, RESPECTIVELY (A) 0.59 MM <sup>3</sup> /s (B) 1.30 MM <sup>3</sup> /s (C) 4.00 MM <sup>3</sup> /s (D) 7.00 MM <sup>3</sup> /s.....	104
FIG. 6-2 ADJUSTABLE PLATFORM, CAMERA AND TRIPOD CONFIGURATION FOR SPECIMEN MEASUREMENT.....	106
FIG. 6-3 (A) CAMERA POSITIONING ON 3D PRINTER'S CARRIAGE OPPOSITE TO FEEDSTOCK AND (B) WHITE DOTS MARKED ON MOVING FILAMENT FOR MOTION PROFILE MEASUREMENT (CAMERA VIEW). ....	107
FIG. 6-4 EXCERPT OF FEEDSTOCK DISPLACEMENT PROFILE (BLUE LINE). THE POSITION OF THE MOVING DOT AND THE REFERENCE (REF) DOT ARE AUTOMATICALLY TRACKED ON EIGHT SUCCESSIVE FRAMES. ....	107
FIG. 6-5 OVERVIEW OF SPECIMENS FABRICATED ACCORDING TO FRACTION FACTORIAL DESIGN. ....	111
FIG. 6-6 DEPOSITION INTERRUPTION CASES DUE TO: (A) FILAMENT'S INABILITY TO OVERCOME PRESSURE DROP AND (B) LATE EXTRUSION WITH RESPECT TO PLANAR MOTION ACTUATION. ....	112
FIG. 6-7 MAIN EFFECT PLOTS FOR INVESTIGATED FACTORS REGARDING THEIR CONTRIBUTION TO MATERIAL DEPOSITION DISCONTINUITY. LOWER SUM OF SQUARE VALUES SIGNIFIES AN UNINTERRUPTED DEPOSITION. ....	113
FIG. 6-8 DISCONTINUITY OF MATERIAL DEPOSITION OCCURS WHEN SPR IS HIGH AND DTE IS LOW (LEFT), WHILE NORMAL DEPOSITION IS FACILITATED WHEN SPR IS DECREASED AND DTE IS INCREASED (RIGHT).....	113

FIG. 6-9 LPR AND DP INTERACTION EFFECT ON MDD FOR (A) LOW SPR AND LOW T, (B) HIGH SPR AND LOW T, (C) LOW SPR AND HIGH T, (D) HIGH SPR AND HIGH T.....	115
FIG. 6-10 LOCALIZED MEASUREMENTS AT THE START AND AT THE END OF THE STRAND AND CALCULATION OF MEAN STRAND WIDTH ACCORDING TO STRAND AREA (A) AND LENGTH (L) VALUES.....	116
FIG. 6-11 MAIN EFFECT PLOTS FOR INVESTIGATED FACTORS REGARDING THEIR CONTRIBUTION TO STRAND WIDTH DEVIATION. LOWER VALUES INDICATE MORE UNIFORM DEPOSITION.....	117
FIG. 6-12 LPR AND DP INTERACTION EFFECT ON SWD FOR (A) LOW SPR AND LOW T, (B) HIGH SPR AND LOW T, (C) LOW SPR AND HIGH T, (D) HIGH SPR AND HIGH T.....	117
FIG. 6-13 (A) RELATIONSHIP BETWEEN LPR AND SR AT (A) T=195°C AND (B) T=225°C.....	118
FIG. 6-14 RELATIONSHIP BETWEEN ESR AND SR. THE REST OF THE FACTORS ARE SET AT THEIR CENTER POINTS.....	118
FIG. 6-15 FEEDSTOCK VELOCITY VS TIME GRAPHS FOR PRINTING AT 40MM/S: (A) WITHOUT SPECIAL CARE ON PRIMING AND RETRACTION FUNCTIONS AND (B) UNDER IMPROVED PRIMING AND RETRACTION FUNCTIONS. THE ACTUAL STRANDS ARE PRESENTED UNDER THE CORRESPONDING GRAPH.....	119
FIG. 6-16 FEEDSTOCK VELOCITY VS TIME GRAPHS FOR PRINTING AT 65MM/S: (A) OVERFILLS AND DEPOSITION DISCONTINUITY (DOTTED CIRCLES) DUE TO NOZZLE BLOCKAGE AND (B) LOWER SWD UNDER IMPROVED PRIMING AND RETRACTION SETTINGS. THE ACTUAL STRANDS ARE ALSO PRESENTED UNDER THE CORRESPONDING GRAPH.....	121
FIG. 6-17 COMPARISON OF DEPOSITION QUALITY AT PS=65 MM/S AND Q=7.80MM <sup>3</sup> /S FOR (A) NON-OPTIMIZED AND (B) OPTIMIZED SETTINGS.....	122

## *List of Figures in Annexes*

FIGC. III-1 A) INSTRUMENTS USED FOR CALIBRATION OF THE ACCELEROMETER AND B) LEVELLED AND CONNECTED ACCELEROMETER. ...	189
FIGC. III-2 POWER SPECTRUM OF THE INTEGRATED ACCELERATION SIGNAL, PERTAINING TO VELOCITY OF THE CARRIAGE FOR A 40 MM LINEAR DISPLACEMENT AT 40MM/S CARRIAGE SPEED.....	190
FIGC. III-3 INFLUENCE OF LOW-PASS FILTER AND THE MOVING AVERAGE FILTER ON THE RAW ACCELERATION SIGNAL.....	191
FIGC. III-4 APPROXIMATION OF CONTINUOUS ACCELERATION SIGNAL WITH TRAPEZOIDS FIT BETWEEN SUCCESSIVE SENSOR READINGS. .	192
FIGC. III-5 (A) ACCELERATION SIGNAL AND THE OBTAINED MOTION PROFILE OF THE CARRIAGE VIA TIME-DOMAIN INTEGRATION (B) AT TARGET VELOCITY 40 MM/S (C) FOR 40 MM LINEAR DISPLACEMENT.....	193
FIGC. III-6 (A) ACCELERATION SIGNAL AND THE OBTAINED MOTION PROFILE OF THE CARRIAGE VIA TIME-DOMAIN INTEGRATION (B) AT TARGET VELOCITY 65 MM/S (C) FOR 40 MM LINEAR DISPLACEMENT.....	194
FIGC. III-7 MOTION PROFILE OF THE CARRIAGE OBTAINED BY FREQUENCY-DOMAIN INTEGRATION AT (A) TARGET VELOCITY 40 MM/S (C) FOR 40 MM DISPLACEMENT.....	196
FIGC. III-8 POWER SPECTRUM AND THEIR FILTERED FREQUENCY RANGES FOR (A) THE INTEGRATED AND (B) THE DOUBLE-INTEGRATED ACCELERATION SIGNAL IN THE FREQUENCY DOMAIN AT TARGET VELOCITY 40 MM/S FOR 40 MM DISPLACEMENT.....	196
FIGC. III-9 MOTION PROFILE OF THE CARRIAGE OBTAINED BY FREQUENCY-DOMAIN INTEGRATION AT (A) TARGET VELOCITY 65 MM/S (C) FOR 40 MM DISPLACEMENT.....	197
FIGC. III-10 POWER SPECTRUM AND THEIR FILTERED FREQUENCY RANGES FOR (A) THE INTEGRATED AND (B) THE DOUBLE-INTEGRATED ACCELERATION SIGNAL IN THE FREQUENCY DOMAIN AT TARGET VELOCITY 65 MM/S FOR 40 MM DISPLACEMENT.....	197

## *List of Tables*

TABLE 3-1 TISSUE-ENGINEERING SCAFFOLD MODELING TEST RESULTS. ....	50
TABLE 3-2 INDICATIVE RESULTS FOR TWO SCAFFOLD MODELS (UNIT CELL SIDE LENGTH: 500MM/ PORE SIZE: 400MM/ LAYER THICKNESS: 100MM). ....	61
TABLE 3-3 IMPACT OF LAYER THICKNESS ON FILE SIZE AND EXECUTION TIME. (HIP MODEL SIZE: 85x98.24x153.36 MM/ UNIT CELL SIDE LENGTH: 1MM/ PORE SIZE: 600MM). ....	61
TABLE 3-4 IMPACT OF MODEL'S DIMENSIONS ON FILE SIZE AND EXECUTION TIME. (UNIT CELL SIDE LENGTH: 1MM/ PORE SIZE: 800MM/ LAYER THICKNESS: 100MM).....	61
TABLE 3-5 COMPARISON BETWEEN CONVENTIONAL AND PROPOSED MODELING METHOD. ....	62
TABLE 4-1 FACTORS AND LEVELS INCLUDED IN THE EXPERIMENT. ....	73
TABLE 4-2 ANN TRAINING PARAMETERS AND THEIR INVESTIGATED LEVELS. ....	75
TABLE 4-3 L18 FOR ANN TRAINING. ....	76
TABLE 4-4 L27 ORTHOGONAL ARRAY WITH RESULTS ON SHAPE FIDELITY (SF) AND FLOW RATE (Q). ....	78
TABLE 4-5 ANOVA RESULTS FOR SHAPE FIDELITY AT 95% SIGNIFICANCE LEVEL.....	81
TABLE 4-6 TRAINING AND PERFORMANCE RESULTS FOR THE PROPOSED ANN. ....	83
TABLE 5-1 PARAMETERS AND LEVELS INCLUDED IN THE CENTRAL COMPOSITE DESIGN EXPERIMENT.....	90
TABLE 5-2 CENTRAL COMPOSITE DESIGN TO INVESTIGATE DIMENSIONAL ACCURACY. ....	92
TABLE 5-3 MODEL VALIDITY INDICES AND DIAGNOSTICS.....	96
TABLE 5-4 PREDICTED AND ACTUAL DEVIATION FOR VALIDATION SPECIMENS AND OPTIMAL PARAMETER SETTINGS FOR MULTIPLE-OBJECTIVE AND FEATURE-ADAPTIVE OPTIMISATION STRATEGIES. ....	97
TABLE 5-5 INDICATIVE G-CODE FILE EXCERPTS REFERRING TO FIG. 5-3. ....	99
TABLE 6-1 PARAMETERS AND LEVELS INCLUDED IN THE FRACTION FACTORIAL DESIGN EXPERIMENT.....	108
TABLE 6-2 FRACTION FACTORIAL DESIGN TO INVESTIGATE MATERIAL DISCONTINUITY AND STRAND WIDTH DEVIATION. ....	110
TABLE 6-3 STATISTICAL METRICS THAT SUPPORT VALIDITY OF REGRESSION MODELS. ....	110
TABLE 6-4 FACTOR SETTINGS CORRESPONDING TO GRAPHS AND STRANDS IN FIG. 6-15. ....	119
TABLE 6-5 FACTOR SETTINGS CORRESPONDING TO GRAPHS AND STRANDS IN FIG. 6-16. ....	121

# 1

## *Introduction*

### *1.1 Additive Manufacturing*

Additive Manufacturing is a ‘blanket’ term for those manufacturing processes that adopt a layer-wise building strategy [1]. As a technology, AM is present since the 80s decade, starting mainly as a prototyping method. AM includes many variations, divided into the following categories:

1. Material Extrusion (ME), involving extruded material through a die and deposition on a platform, exemplified by Fused Filament Fabrication (FFF) technique,
2. Powder-Bed Fusion (PBF), involving focused heating and fusion of material powder particles, exemplified by Selective Laser Sintering (SLS) and Selective Laser Melting (SLM) techniques,
3. Vat Polymerization (VP), involving resin curing using a light source, exemplified by Stereolithography (SLA) technique,
4. Material Jetting (MJ), involving materials droplets that are jetted selectively and cured,
5. Binder Jetting (BJ), involving binder droplets that are jetted selectively on material powder,
6. Directed Energy Deposition (DED), involving local fusion of material as it is being deposited,
7. Sheet Lamination (SL), involving stacking and joining together material sheets to create a part.

Since AM is a developing technology heading towards maturation, more emerging variations and techniques are proposed on a continuous basis. Often, the term 3D-Printing is used interchangeably with Additive Manufacturing. In fact, “3D-Printing” has prevailed as a more popular term, mainly connected with low-cost desktop FFF machines. According to the published

ISO/ASTM 52900-2015 standard for terminology [2], “Additive Manufacturing” is the term that defines all additive manufacturing processes, as opposed to other manufacturing methodologies, notably subtractive manufacturing.

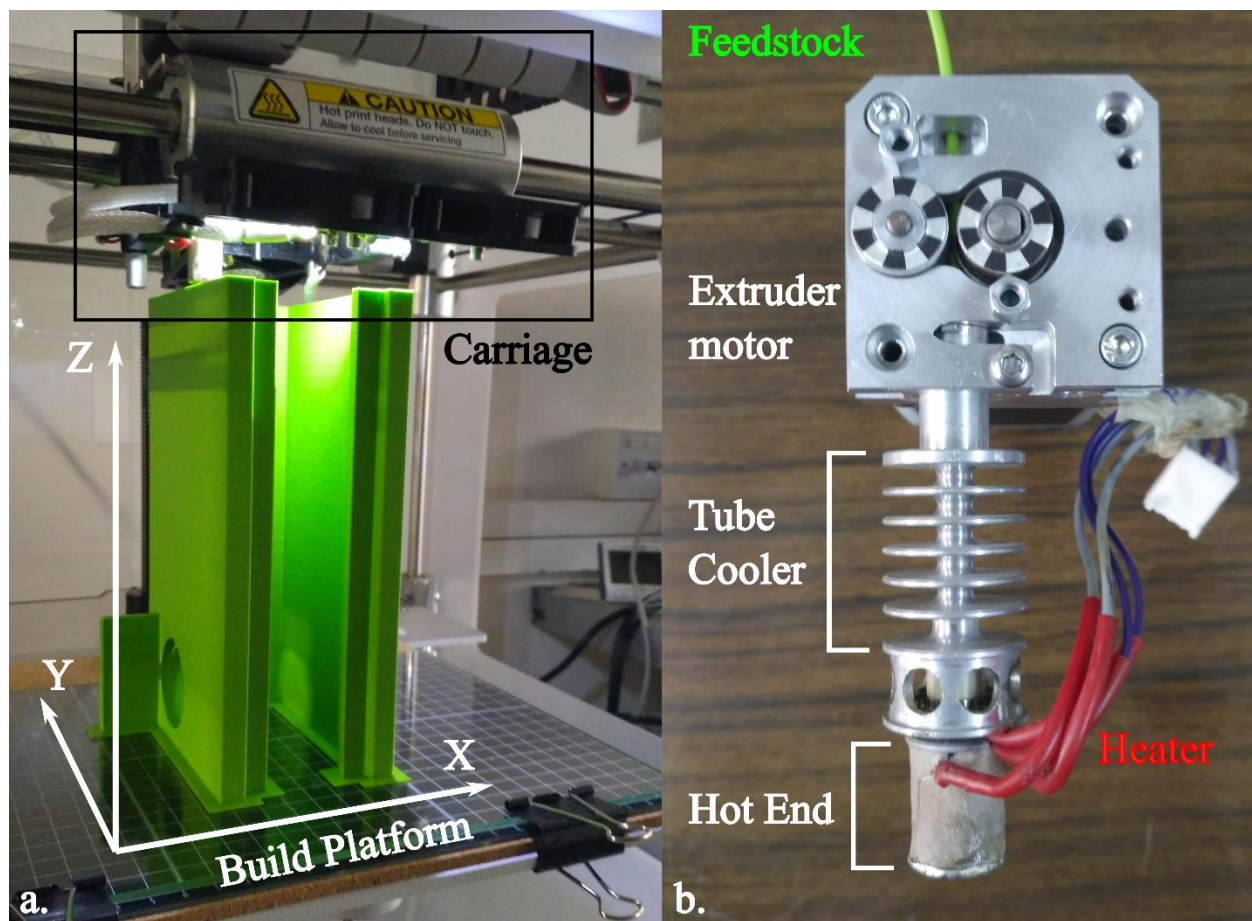
A growing tendency is noticeable throughout the current decade for AM to evolve from a prototyping method to an established manufacturing technology for end-use part production. The expiration of numerous patents related to AM techniques, in combination with the abundance of machine modules resulted in improved and even low-cost AM systems. Even though AM lags behind conventional manufacturing processes in terms of productivity for medium and large batches, it retains its importance in one-of-a-kind or small batch production and in cases where complex geometry features, such as lattice structures, internal voids and overhangs are needed [3]. Along with the evolution of AM, computational methods such as topology optimisation and generative design [4] have also advanced, due to the design flexibility that AM permits. Deriving from the layer-wise manufacturing strategy, AM-oriented design philosophy and guidelines have been advocated [5] and near-zero material waste has been associated with AM [6]. The novel way of re-thinking design for AM offers the potential for part consolidation [7, 8]. In this way, complex components consisting of multiple parts, can be produced in a single build, thus reducing lead-times and facilitating assembly process. One of the main challenges that remains open for AM is the road to standardization of pertinent processes, materials and methods followed, in order to validate quality and viability of the technology and eventually lead to full incorporation of AM to the manufacturing industry [9, 10].

## ***1.2 Material Extrusion - based Additive Manufacturing***

The present thesis focuses on Material Extrusion-based Additive Manufacturing (ME), also known as Fused Filament Fabrication (FFF). The technology was invented by Steven Scott Crump in 1989, under the trademark name Fused Deposition Modeling (FDM), that was commercialized by Stratasys™.

Fused Filament Fabrication is the most popular and widely used technique in the AM realm, which possesses all advantages, potentials and characteristics that were described in the previous section. It involves thermoplastic material in filament form (feedstock) that is fed into a heated nozzle. Feedstock material is extruded in semi-molten form through the nozzle’s hot-end and is deposited onto the horizontal build platform in a sequence of adjacent strands in order to fabricate 3D parts in layer-wise manner. Nozzle diameter dictates the material strand width. The thickness of each layer, the speed at which the nozzle traverses the predefined path, as well as

strand width adjustments around nozzle diameter are determined at the process planning stage. An overview of a typical ME-AM system is presented in Fig. 1-1(a).



**Fig. 1-1 (a) Material extrusion additive manufacturing system overview and (b) extruder motor and nozzle sub-system.**

Breaking down the system into its sub-systems, feedstock material is wound in form of filaments in spools. Typically, filament diameter is 1.75 mm, 2.85 mm or 3 mm and each spool contains 250 g to 1000 g of material. The spool is located on the AM system, fulfilling the requirement for free and uninterrupted filament unwinding for effective feeding. In more sophisticated systems, filament spool is stored in sealed closet so as to prevent humidity absorption. In cases of hydrophilic and high-performance materials the closet is also thermally controlled.

In most AM systems, the filament is driven into the nozzle via a motor-assisted extrusion system, Fig. 1-1(b), consisting of a threaded gear, mounted on the motor's shaft, and a roller on the opposite side. Increased friction due to gear thread, pushes the solid feedstock through a guiding hole. A clearance fit exists between the guiding hole and the filament, to facilitate feedstock advancement. The guiding hole is protected with an aluminum cooler structure, which may also be assisted by external cooling fans. This is necessary because the guiding tube is located near the nozzle's hot-end where temperature could rise between 180 °C – 300 °C, or more. If the heat



is not dissipated in the region of the guiding hole, thermoplastic material temperature could increase prematurely, partially melting and then re-solidifying, thus causing material blockage.

‘Hot-end’ is the term commonly used for the lowest region of the nozzle, where a heating element is mounted near the nozzle’s orifice, Fig. 1-1(b). In this way, the solid feedstock absorbs thermal energy locally, thus reaching the moldable state and achieving viscous flow through the nozzle. The solid part of the feedstock that follows acts as a piston for the melt and this iterative procedure ensures continuous material flow-rate. A temperature sensor is located near the hot-end and is also connected to the AM system’s control in order to stabilize extrusion conditions.

The nozzle is mounted on a larger system, that is called the head or the carriage of the AM machine, see Fig. 1-1(a). The carriage is mounted on axes for controlled motion, typically actuated by stepper motors and belt system. As a result, the carriage moves on the horizontal plane, along the X and Y axes. The carriage is equipped with linear bearings for horizontal motion and also may hold the extruder motor, its encoder or other components, such as control boards, fans and harness routing bracket. This is one of the two main configurations in ME and is called direct-drive extrusion. The advantage of the direct-drive is the shorter distance between the point of force from the extruder motor to the feedstock in the hot-end, thus the better flow management. On the other hand, since the carriage is a moving sub-system, its higher mass will affect machine’s dynamics. The second configuration, commonly known as ‘Bowden-tube’, locates the extruder motor at stable position outside the carriage, thus allowing for reduced moving mass. In contrast to the direct-drive though, extrusion may become more challenging in some cases and for some materials, such as elastomers.

While the feedstock is extruded in moldable state, it is simultaneously deposited on the underlying build platform, Fig. 1-1(a). A dedicated stepper motor controls the height of the build platform. The latter moves vertically at a predefined step; thus, a three-dimensional part is created as a sequence of layers each one consisting of adjacent deposited strands. The relative translation between the nozzle and the build platform is synchronized with the feedstock extrusion rate, generally forming material strands of elliptical cross-sections. The main requirement of the platform is to be flat and parallel to the plane on which X and Y axes travel. The platform’s texture is smooth, or with some roughness in order to facilitate deposited material adhesion.

To complete the description of the typical motion system, dedicated stepper motors control each of the three axes, while a fourth motor is responsible for material extrusion, Fig. 1-1(b). In practice the ME motion operation is best described as a 2.5-dimensional Computer Numerical

Control (CNC) system, due to the step-by-step progression of the build platform along the vertical axis.

### ***1.3 Scope***

During the time of the study, the potential of the ME process has been widely publicized, therefore expectations by the manufacturing industry have peaked. It is a fact that in some cases the hype became disproportional to the actual capabilities of the process. However, after almost a decade of intensive research, the myths around AM have been suppressed and the landscape has become clearer. Indicatively, 73.9% of the listed references in this thesis have been published between 2010 and 2020. Different industry sectors have started adopting AM among their manufacturing alternatives. However, certain challenges remain open and with large margin of improvement. In this light, the decision to conduct a structured study on extrusion-based AM derived from the need to advance the maturation of ME process.

#### ***1.3.1 Contribution and progressive motivation of work***

The starting point of the study was the involvement of the STL file format in the AM workflow. STL stands for Stereolithography or Surface Tessellation Language [11]. It was originally documented in “Stereolithography Interface Specification” in 1988 by 3D Systems™, one of the most important companies in additive manufacturing. This is the standard intermediate step between a CAD model and the G-code machine instructions, yet not flexible enough for AM and especially complex shapes that are typically encountered in AM designs. The main initiative was to entirely bypass error-prone STL file for complex and large porous parts in order to directly export G-code commands from the CAD model. A preparatory step was made before this study: a developed code to indirectly represent a complex CAD model. The first version of the code demonstrated acceptable achievement but still remained cumbersome and STL-dependent. Using this first version as basis, the initial part of the thesis was devoted to increase the performance of the code, through reducing the utilization of cumbersome and RAM-overloading CAD entities to represent the geometry. The performance improvement in this second version was significant and brought the first publishable results [12]. The challenge that remained open was the total independency from the STL file and the leap towards direct generation of ready-to-print files. Towards this direction, major updates were performed in the third version of the code, regarding its structure: the Application Programming Interface (API) of the CAD software was mainly utilized as canvas for slicing, trajectory calculations and direct generation of G-code files, minimizing the need for explicit modeling of geometric entities during code execution. The updated version provides:

- a) great process parameterization capability
- b) manufacturable results
- c) flexibility for future extensions due to its modular structure.

This suggests the solution for large and porous parts that otherwise would be impossible to model or export in STL. Regarding both complex and simpler cases, the code allows for greater control over trajectory design and path arrangement, which is an impactful factor on the quality of the fabricated parts.

The resulting G-code files were successfully tested on an extrusion-based AM system and were proven to be fully operational. However, the part that resulted exhibited deviations regarding its shape fidelity, its designated dimensions and also presented manufacturing defects that were clearly a result of improper process planning. At that point the necessity to focus the research on material flow and deposition optimisation became apparent. The large number of available settings in combination with the lack of standardization of the ME process, to be used as guide for repeatable production, were catalysts to this decision. Thus, the thesis advocates experimental methods to identify correlations between process factor settings and the defined criteria. Conduction of experiments and interpretation of the results require deep understanding of the process. In addition, they are prone to capture real-life problems, which provide further insight and help the re-evaluation of model-based observations. Published literature was advised throughout the entire study for assessment of the produced results and in order to keep research focus up-to-date with the timely needs of the field.

The first stage of optimisation dealt with shape fidelity of parts. Shape fidelity is defined as the status of the part, at which commonly defects encountered in ME process are eliminated. The large number of available process parameters during the slicing stage, in combination with the significant deviation between parts that were produced under different setting combinations, acted as an alarming factor to separate “permitted” settings from “feasible” settings. Design of experiments was employed as a robust method to identify reliable results from a reasonable number of experiments. 3d scanning measurement methods were used to reverse engineer the actual shape of the experiment specimens. In this way it became possible to quantify the existence and the intensity of the defects that cannot be measured with conventional measurement equipment. A key aspect in all AM processes is the low productivity, improvement of which is highly prioritized. Therefore, parameters that control process productivity were intentionally included in the study. A neural network was trained by the experiment results to quantify the correlation between pertinent parameters and response. As a result, the operational window inside which ME process could guarantee defect-free parts was identified; furthermore the minimum and maximum productivity thresholds were calculated [13].

Utilizing the previous experiment for ‘screening’, the process parameter range was narrowed to match feasible region. The second phase of optimisation investigated dimensional accuracy of the process. The anisotropic shrinkage of extruded poly-lactic acid (PLA) and the layer-wise manner of the process were taken into account to evaluate dimension along the three axes separately, as well as, for two common features, namely holes and thin walls. Experimental investigation was conducted according to response surface methodology and five separate regression models were fitted to the observations. The standard approach for the optimisation of multiple responses is the adoption of multiple-objective optimisation techniques, such as the desirability method that was employed here. The problem with these methods is that the global optimum will always be a compromise among responses; moreover, as the number of responses becomes larger, the required trade-offs are more severe. The novelty of this part of the thesis, incorporates an adaptive approach regarding process planning: instead of optimizing all five models to identify global optimum settings, that would be applied throughout the whole part, different combinations of optimum settings that correspond to different features were employed. To create a proof-of-concept G-code file was modified in a post-processing stage, since adaptive modification of parameters at this level of granularity is not an option for standard slicers. As a result, settings were changed on-the-fly as soon as nozzle changes direction, or is transposed to print a hole or enters the thin-wall trajectory path. The feasibility of the proposed solution was verified with the successful manufacturing of a specimen under adaptive settings. The effectiveness of the approach was compared to a specimen, for which the settings were globally applied, as obtained from multiple-objective optimisation routine. The results were closer to the designated dimensions for the adaptive approach and therefore the proof-of-concept was achieved [14].

The in-situ transition of settings, that was investigated in the previous part, led to localized defects, partially attributed to the behavior of the material during dynamic deposition and also to the machine vibrations during carriage velocity changes. Furthermore, designed trajectory typically involves adjacent strands of uniform spacing. Hence, any deviation in strand uniformity during deposition is likely to cause defects that will result in deterioration of the structural integrity of the part, or increase deviation from specified dimensions. This was the motivation to investigate material deposition at lower level, thus focusing on a single linear strand instead of entire specimens. Furthermore, inferior deposition quality is the root cause of defects that formulate inside the parts and are difficult to locate during inspection of specimens, at least without non-destructive methods.

This new perspective, allowed better insight for:

- a) impact of dynamic deposition to the dimensions and uniformity of the strand

- b) critical conditions for temporary nozzle blockage that causes material discontinuity
- c) extruder motor behavior during material extrusion

A large number of process parameters were evaluated in this part of the thesis, including parameters that have not been widely investigated in literature. Design of experiments was employed to minimize the number of runs. A series of linear trajectory paths were deposited sequentially. Deposition defects were evaluated in terms of uniformity and deviation from the intended dimensions through image analysis. Extrusion motor rotation was analyzed through video recording and frame analysis. First and second order polynomials were generated from the experiments in order to predict optimal process settings that guarantee uniform and continuous deposition of strands at the highest possible flow rate. As a result, the ultimate capabilities in terms of quality and productivity were identified.

## ***1.4 Thesis structure***

The outline of the investigated subject, as described in section 1.3.1, depicts how the challenges defined at each point, became the initiative for the progression of the thesis. The same rationale is followed in the text structure.

After the current chapter 1, where the ME process is introduced and a high-level description of the thesis contribution is described, literature review is presented in chapter 2. The state-of-the-art for the different ME process stages and the performance characteristics are classified in each sub-section. In chapter 3, the proposed solution for trajectory design of large and porous structures is analytically described. In particular, two versions of the developed code are analyzed in terms of the algorithmic logic and the implementation in the CAD environment. The results and application of the method are discussed along with the limitations. Chapter 4 begins the process optimisation of ME, with respect to commonly encountered defects. The utilized experimental methods and optimisation tools are introduced. The defect-free operational window is graphically presented and evaluated in combination with the achieved productivity. Chapter 5 proposes the idea of adaptive settings on the same layer and during the same trajectory for improved dimensional accuracy in ME. The approach is compared with standard multiple objective optimisation methods, demonstrating its advantages and limitations. Chapter 6 includes the analysis of single material strands with vision methods. The attempt to identify the material extrusion patterns is analytically described and evaluated with respect to the resulting material deposition. The interaction with the generated prediction models in order to improve strand uniformity and material continuity at higher flow rates is presented step-by-step. The maximum predicted flow-rate for uniform and continuous material strands is demonstrated. The concluding

---

chapter 7 summarises the main achievements and limitations of the solutions presented in this thesis. Based on the latter, the final section of this chapter is dedicated to suggestions for future work, thus defining the position of this thesis in the effort for ME process evolution.

# 2

## *Literature review*

Extrusion-based AM is a continuously maturing technique. After describing the operation outline of the pertinent systems, this chapter is dedicated to the trajectory design and process challenges that are met at each phase, as well as the effect of settings and system configuration on the quality of the produced part. The state-of-the-art regarding proposed solutions, challenges and achievements in the field of extrusion-based AM will be provided through a thorough and up-to-date literature review.

### *2.1 Slicing algorithms*

Slicing is the standard procedure that intervenes between design and manufacturing for the 3d printing processes. It is implemented by special software tools, also known as “slicers”. The typical procedure for a part that is to be produced according to the AM paradigm starts with 3D modeling in a CAD environment and, then, exported in a slicer compatible file format, typically stereolithography file format (STL). The latter is the de-facto standard for representing geometry of parts in AM domain. STL describes the model surfaces as a mesh of triangulated facets, whose coordinates are registered in an unsorted list [11]. The STL three-dimensional model is input to the slicer where it is segmented into successive two-dimensional cross-sections, which result from the intersection of an equidistantly moving plane with the model. Each cross-section is converted into trajectory instructions for effective driving of the nozzle so as to fill all regions containing material. Usually, curved trajectory or circles are fabricated as a sum of minimum-length straight segments; the filling pattern is linear (zig-zag), combined with an offset/contour pattern to safeguard boundary accuracy. Once slices have been defined, trajectory is interpreted in G-code commands. G-code is standardized according to ISO 6983 [15] and therefore, the fundamental motion and velocity commands are common among most AM systems. Slight

variations occur according to the firmware or post-processor of the AM system which is responsible for interpreting G-code to machine-level instructions. In practice, a slicer is the counterpart of Computer-Aided Manufacturing (CAM) tools for subtractive methods, notably CNC milling and turning processes.

There is a large number of commercially available slicers, some of which are also distributed for free. The geometric kernel of a slicer determines its efficiency in terms of computational speed and calculation accuracy of the trajectory. The latter is directly depicted on the quality of the print result, although it is not the sole parameter of a successful fabrication as it will be described in detail in the following chapters of this thesis. Pertinent studies that investigate the performance of different commercial slicer packages can be found in [16, 17].

### 2.1.1 Common characteristics of slicers

Among slicer software packages, there is a number of standard process parameters that are fundamental in ME process planning and they are reviewed in this section. Kisslicer™ package is used as reference for parameter names. Although the same parameters may be termed differently in other packages, the description of their function remains the same.

**Layer thickness:** represents the thickness of each stacked layer, Fig. 2-1(a). In practice, this parameter determines the distance between the tip of extrusion nozzle and the build platform or the previous layer, on which fresh material is deposited. The lowest the layer thickness, the better the resolution along build direction since thin layers minimize staircase and thus surface roughness. On the other hand, thinner layers correspond to increased number of iterations to compose the entire part and, therefore, to increased build time.

**Extrusion width:** determines the spacing between adjacent paths in the layer, Fig. 2-1(b). It alters the arrangement of the trajectory sequence at the planning stage. In practice, the air-gap between adjacent strands is determined, which influences the amount of overlapping and hence the bonding of the material.

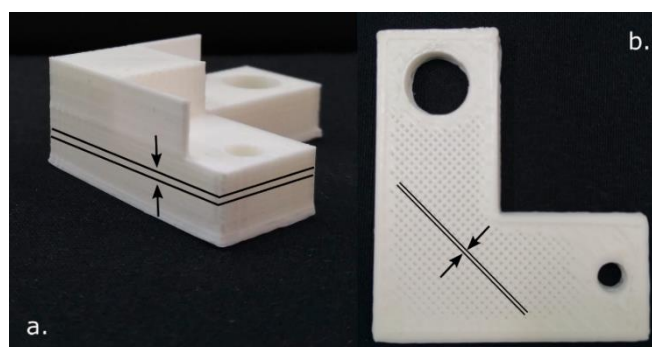
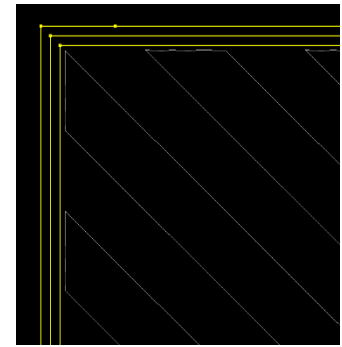


Fig. 2-1 (a) Layer thickness and (b) extrusion width.



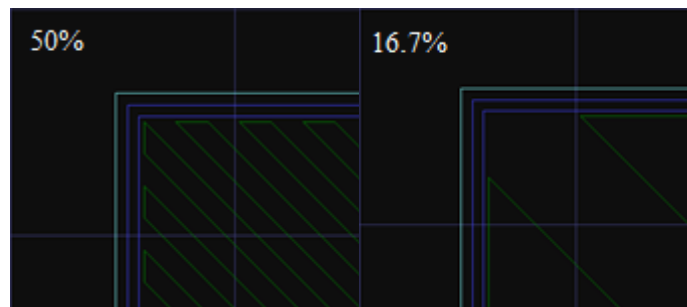
**Number of perimeters:** determines the number of adjacent contour trajectories (yellow lines in Fig. 2-2) that will be performed at the outline of the layer.

**Skin thickness:** it determines the thickness of the outer shell of the part, i.e. bottom, top and side surfaces. For side surfaces it relates with number of perimeters (Fig. 2-2) and extrusion width, and for top and bottom surfaces it determines the number of fully dense layers that will be printed.



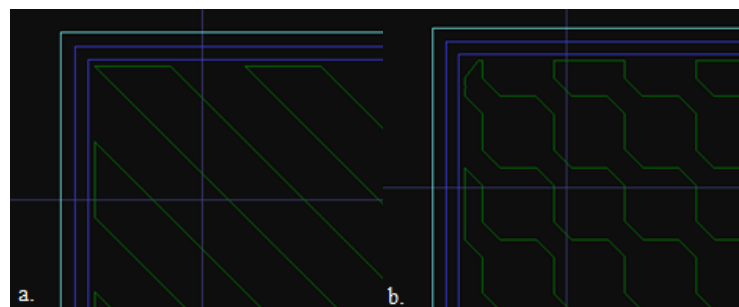
**Fig. 2-2 Number of perimeters that determines skin thickness**

**Infill percentage:** this parameter determines the density (percentage volume) of the infill pattern, which pertains to the entire part except from the skin, Fig. 2-3. It creates a structured porosity inside the part which contributes to mass and build time reduction, although it is expected to result in deterioration of the mechanical properties of the part [18].



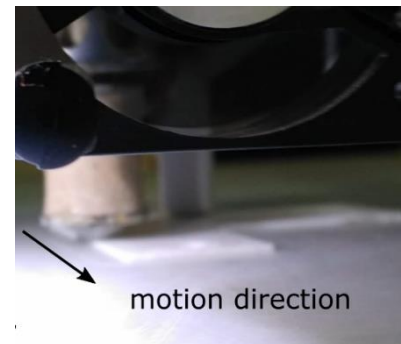
**Fig. 2-3 Trajectory design under different infill percentage.**

**Infill pattern:** it represents the pattern trajectory that is designed for the layer's interior. The most common infill pattern is the linear arrangement of deposited strands, Fig. 2-4(a) one adjacent to the other. However, other more intricate patterns are also implemented, such as cellular, circular, triangular and octagonal, see Fig. 2-4(b).



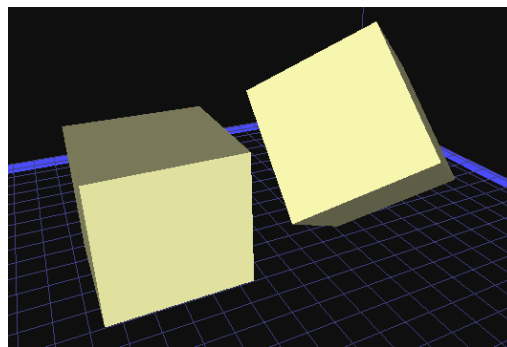
**Fig. 2-4 (a) Linear infill pattern and (b) octagonal infill pattern.**

**Printing Speed:** determining nozzle velocity during fabrication on the horizontal X-Y plane, in mm/s. Typically different speeds can be assigned for perimeters, fully-dense layers and infill. Special care is given to first layer, the quality of which is the first step towards a successful build. Therefore, dedicated speed setting, typically slow, and/or progressively increasing speed for the first layers is implemented. Travel speed can also be determined by the user, pertaining to the rapid displacement of the nozzle between discontinuous trajectory paths.



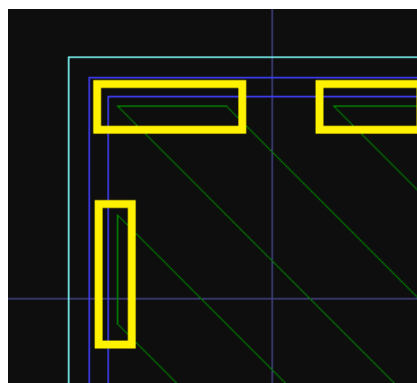
**Fig. 2-5 Printing speed of the nozzle.**

**Orientation:** before the slicing procedure the part should be oriented in 3D-space, see Fig. 2-6. Part orientation plays a significant role in the build time and in the degree of inclination of the surfaces, with respect to the vertical axis Z. The latter has an impact on surface roughness of the final part.



**Fig. 2-6 Cube STL model in different orientations with respect to the build platform.**

**Perimeter/Infill overlap:** is the amount of overlap between the infill paths and the perimeter at the point of their coincidence, Fig. 2-7, given as the percentage of nozzle orifice that passes over an already deposited perimeter strand.



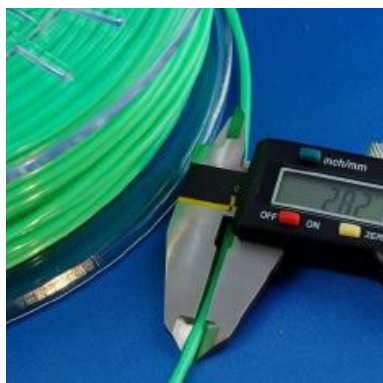
**Fig. 2-7 Distance between green (infill) and blue (perimeter) trajectory define Perimeter/Infill overlap.**

**Temperature:** is a fundamental setting that determines the temperature, in °C, of the hot-end in order to bring feedstock material to extrudable state out of the nozzle. Dedicated, and typically higher, temperature is also permitted for the first layer. In case of multiple extruders on an AM system, temperature setting for the idle extruder can be defined. In this way, the hot-end that is not employed for a particular layer region is not allowed to cool down to environment temperature, thus maintaining its readiness for use and therefore reducing idle time in the process.

**Build platform/chamber temperature:** the temperature that is desired for the build platform and the build chamber (if one exists) of the ME system, aiming to improve adhesion of material and uniform temperature gradients of the manufactured part.

**Fans:** operation speed of fans that are employed for cooling material upon extrusion. It is typically set as the percentage of the maximum RPM that the fan is capable of. Different settings may apply for perimeters and infill. In addition, fans could be set to operate differently for first layer(s) as well as for small layers, in terms of build time and volume of deposited material. Small layers may not have sufficient time to solidify when the new layer is deposited and, as a result the latter may collapse. Air current that is caused by fan operation has an impact on the thermal environment in the vicinity of the manufactured part.

**Filament diameter:** this is another significant parameter, through which the volumetric flow-rate is influenced. A higher setting than the actual filament diameter will result in material underflow and vice versa. Therefore, high-quality filaments are typically accompanied by tolerances regarding the filament diameter.

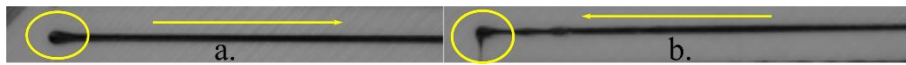


**Fig. 2-8 Measurement of filament diameter (image taken from Kisslicer© v1.5 User Manual).**

**Flow tweak:** essentially modifying extrusion motor speed without re-arranging spacing between adjacent strands, thus inducing slight changes in strand width. Typically, its value equals to 1.00

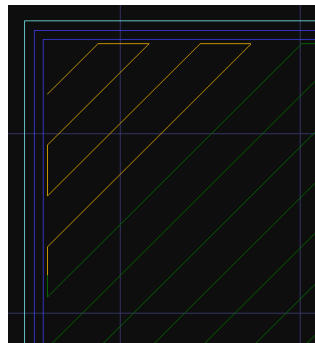
when strand width corresponds to nominal nozzle diameter, while slight modification may be applied for fine tuning of the bonding between adjacent deposited strands.

**Priming/Retraction:** the length and the speed of priming and retraction commands are determined. Priming refers to predefined filament length that is pushed towards the hot-end just before nozzle trajectory begins. This allows the extruder motor sufficient time to apply the demanded force on the viscous melt and develop steady flow. Accordingly, filament retraction is commanded at the end of the path and before the nozzle travel. The extruder motor practically rotates in reverse, retracting the solid segment of the feedstock, thus offering pressure relief to the melt in the hot-end and avoiding material oozing and stringing during nozzle travel.



**Fig. 2-9 (a) Larger deposition footprint due to priming and (b) stringing effect due to poor retraction settings.**

**Wipe:** Complementary to retraction factor, the nozzle traverses a certain length backwards to its trajectory (yellow segment in Fig. 2-10). This way the oozing material at the end of the trajectory is wiped on the previously deposited material instead of creating stringing effect due to travelling of the nozzle towards the starting point of the new trajectory path.

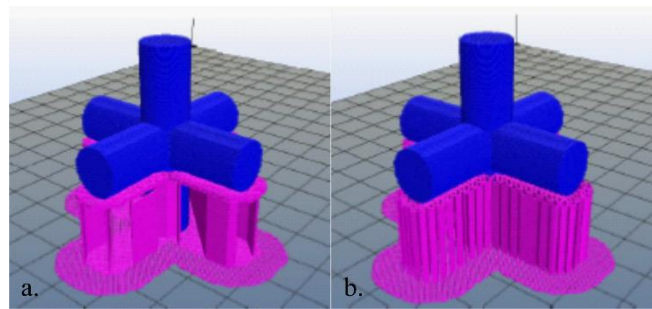


**Fig. 2-10 The yellow trajectory is traversed backwards in order to wipe excess material.**

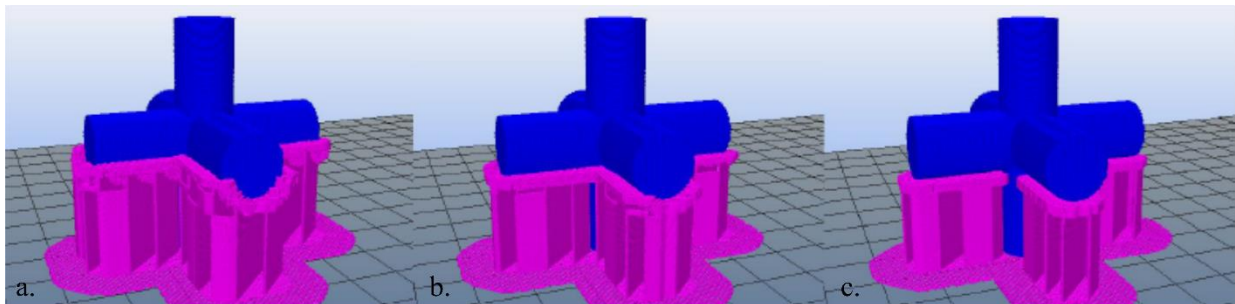
**Shrinkage:** it is a material dependent setting, accounting for the shrinkage of the deposited material strand upon solidification. In practice, it acts by rearranging trajectory along the three axes, in order to bring final part closer to the designated dimensions.

**Support density:** this setting determines density of printed support to ensure successful deposition of overhangs, with the trade-off of increased build time and also difficulty in removing support material after part fabrication, Fig. 2-11.

**Support Angle:** a threshold value regarding the overhang angle, below which support structure is not planned, Fig. 2-12. This is a way to minimize the required support structures for a faster, yet successful printing.



**Fig. 2-11 Different support density settings: (a) coarse and (b) dense (image taken from Kisslicer© v1.5 User Manual).**



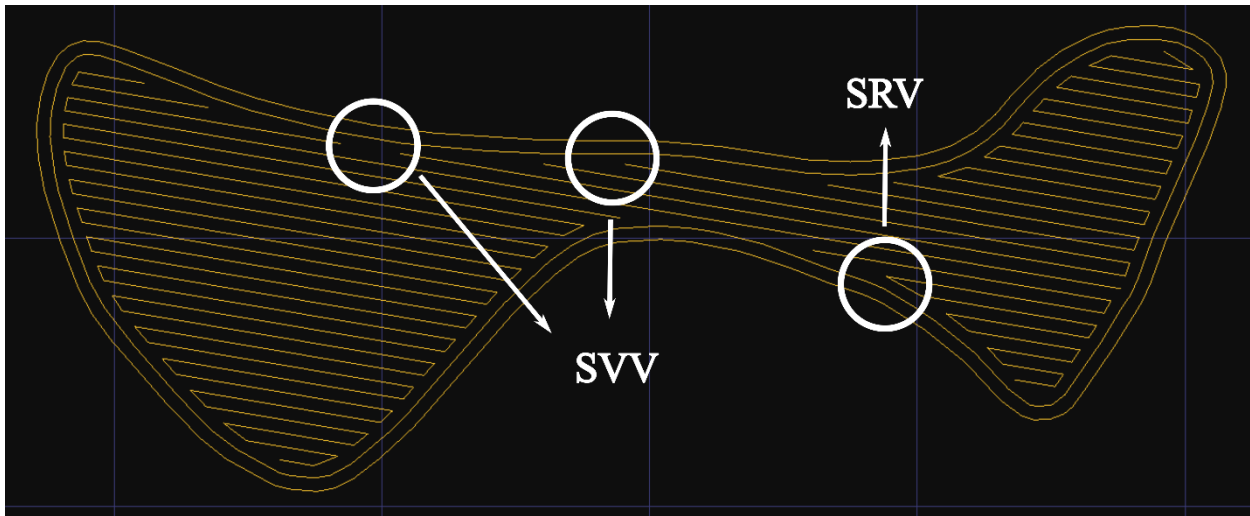
**Fig. 2-12 Support angle set to (a) 5°, (b) 40° and (c) 70°, resulting in reducing support embracement of the cylindrical overhanging part (image taken from Kisslicer© v1.5 User Manual).**

Nineteen settings are described above, in an effort to include only those that are fundamental to the process planning of ME. However, there are many other settings available in slicers that play their role, maybe of secondary importance or with localized effect. In any case, this is a proof that preparation of extrusion-based AM process is a complex task, requiring in-depth knowledge of the factor's effect and how these will affect manufacturing process. In addition to this, contradicting effects are also expected, thus rendering planning procedure to a multiple-objective optimisation problem.

### **2.1.2 Issues in trajectory design**

Regarding slicer accuracy, one of the commonest issues that has been intensively investigated is the formation of voids in the layer's interior. This is attributed to the non-optimal trajectory planning. In a pertinent study, Qiu and Langrana [19] categorized voids in three classes, namely (i) sub-perimeter vector-direction void (SVV), (ii) sub-perimeter road-turn void (SRV) and (iii) irregular void (IV). The latter refers to void formation due to deposition inefficiencies and cannot be controlled at the trajectory design stage. The first and second errors are attributed to slicer inaccuracies as illustrated in Fig. 2-13, but they are predictable and as a result they can be rectified. Their root-cause is the mismatch between the strand width and the remaining gap, which is small enough to be filled and at the same time large enough to form a void. A solution is offered by adaptive strand width and re-calculation in problematic regions. Adding to adaptive

strand width, Eliat and Urbanic [20] optimised raster angle and the airgap between adjacent strands in order to minimize layer voids.



**Fig. 2-13 Slicer inaccuracies / voids in tool-path calculation.**

Apart from unfilled regions in the same layer, voids also occur between successive layers. This is mainly attributed to the oblong shape of the strand cross section which results from the simultaneous extrusion from the circular orifice of the nozzle and at the same time is slightly squeezed between the nozzle and the build platform upon deposition. An alternative intra-layer strand configuration by Rodriquez et al. [21] at the trajectory design stage, resulted in different gap shape and size between successive layers, thus affecting structural properties of the specimens. This configuration involved skewed stacking of strands, so that the upper strands fill the valley that is formulated between two adjacent strands of the previous layer. A computational fluid dynamics (CFD) simulation was performed by Serdeczny et al. [22] to validate this solution and showed that the skewed configuration caused reduction in void percentage, especially when the predefined layer thickness was increased. Adams and Turner [23] connected the inability to adapt standard infill patterns provided by typical slicers to inadequacy in filling thin walls, round corners, or rounded features on a layer.

Sun et al. [24] developed a CAD-direct slicing tool that was implemented on a commercial CAD package. Although, uniform slicing was found to be slower than STL slicing, they employed curvature-based adaptive slicing methods in order to improve slicing performance and also address the issue of optimized layer thickness during part fabrication. Another adaptive CAD-direct approach is reviewed in [25]. According to its developers, parts are parameterized in sub-layer resolution in order to employ different infills for functionally graded structures. Their solution operates efficiently for large parts of dimensions above 6 m. A recent study [26] presents an algorithm to extract feature-based tool-paths for a 5-axis robotic additive manufacturing, directly from STEP file rather than the error prone STL file.

## 2.2 *In-nozzle material flow*

Material extrusion is performed via synchronization of feedstock extrusion rate and planar velocity of the nozzle. Upon extrusion, the material is slightly squeezed in the gap between the moving nozzle and the build platform. This gap determines the layer thickness, or the vertical resolution, of the part and as a result it should correspond to the determined flow rate. Volumetric flow rate  $Q$  is determined by the printing conditions, namely printing speed  $u$  (in mm/s), the strand width  $w$  in mm and the layer height  $h$  in mm as in Eqn. (2-1). To achieve the desired flow rate certain limitations regarding the process must be respected. In a comprehensive review Turner et al. [27] gathered mathematical models that describe each material extrusion sub-system that are critical for improving process planning.

Extrusion motor rotation applies axial force to the filament via the mounted gear. The filament is pushed downwards. The applied force must exceed total pressure drop  $\Delta P$  in the nozzle, in order to push molten material out of the hot-end orifice of area  $A$ , Eqn. (2-2). Pressure drop in relevant published studies [28, 29], is analytically modeled by segmentation of nozzle geometry in three sections, as illustrated in Fig. 2-14. For each section, the corresponding pressure drop is calculated as in Eqns. (2-3), (2-4) and (2-5). Other pertinent studies [30, 31] have attempted to model pressure condition in the nozzle incorporated in a larger guiding tube that is divided in five regions, a closer resemblance to Bowden-type extrusion systems. As already mentioned, feedstock passes through the nozzle guiding tube towards the hot-end, thus experiencing temperature transition from solid to viscous phase. Material viscosity  $\eta$  expresses the flow facilitation and is calculated in Eqn. (2-6). It is the product of viscosity at shear rate  $\gamma$  and the viscosity at temperature  $T$ . The first is calculated from the power-law in Eqn. (2-7). Terms  $K$  and  $n$  are obtained from shear rate-shear stress plot, via regression fitting at temperature  $T$  [32]. Then, coefficients  $m$  and  $\phi$  are calculated in Eqns. (2-8) and (2-9) [29]. At the same temperature, the temperature-dependent term  $H(T)$  that defines viscosity is calculated according to Arrhenius expression, Eqn. (2-10). Activation energy  $\alpha$  is calculated through dividing activation flow energy  $\Delta E$  (shear stress dependent) by gas constant  $R$ , as in Eqn. (2-11). A proposed method to calculate the shear stress dependent  $\Delta E$  is proposed in [33].



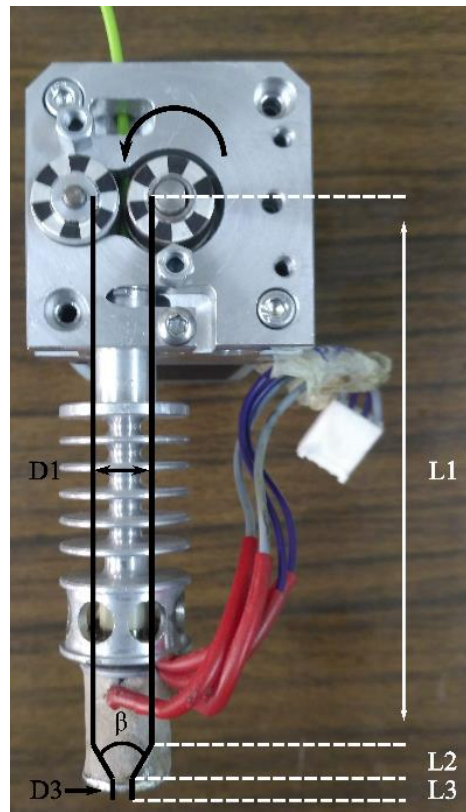


Fig. 2-14 Direct-drive material extrusion system.

$$Q = h * w * u \quad (2-1)$$

$$F = \sum_{i=1}^3 (\Delta P_i) A \quad (2-2)$$

$$\Delta P_1 = 2L_1 \left( \frac{u}{\varphi} \right)^{1/m} \frac{m+3}{(D_1/2)^{1/m}} e^{\left( a \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_a} \right) \right)} \quad (2-3)$$

$$\Delta P_2 = \left( \frac{2m}{3 \tan(\beta/2)} \right) \left( \frac{1}{D_2^{3/m}} - \frac{1}{D_1^{3/m}} \right) \left( \left( \frac{D_1}{2} \right) (m+3) 2^{m+3} \right)^{1/m} e^{\left( a \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_a} \right) \right)} \quad (2-4)$$

$$\Delta P_3 = 2L_3 \left( \frac{u}{\varphi} \right)^{1/m} \left( \frac{(m+3)(D_1/2)^2}{(D_2/2)^{m+3}} \right)^{1/m} e^{\left( a \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_a} \right) \right)} \quad (2-5)$$

$$\eta = H(T) \eta_{T_0}(\dot{\gamma}) \quad (2-6)$$

$$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (2-7)$$

$$m = 1/n \quad (2-8)$$

$$\varphi = 1/K^n \quad (2-9)$$

$$H(T) = e^{\left( a \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_a} \right) \right)} \quad (2-10)$$

$$\alpha = \frac{\Delta E}{R} \quad (2-11)$$



Where,

L1, L2 and L3: is the length of each section

D1 and D3: is the diameter of the corresponding section

$\beta$ : the convergence angle of the conical section

u: feedstock velocity

K,n,m,  $\phi$ : power-law coefficients

$\eta$ : material viscosity

H(T): temperature dependent term that defines viscosity

$\eta(\dot{\gamma})$ : shear rate term that defines viscosity

$\alpha$ : activation energy

$\Delta E$ : flow activation energy in J/mol

R = 8,314 J/mol K

An inherent limitation of material extrusion is its low productivity due to the layer-wise building strategy; typically, several hours are required to fabricate a complex part. If nozzle feed rate is increased, unstable deposition may result due to material pressure relief at nozzle exit and to insufficient time available for the material to adhere to its substrate [34]. To synchronize with high nozzle feed rate, solid filament is fed into the hot-end with high rate which may result in insufficient thermal energy absorption, lower extrusion temperature than the predefined one and finally weak bonding with the previous layers [35]. Due to the aforementioned issues, a significant amount of research work focuses on material extrusion process modeling and optimisation as regards material extrusion rate and extrusion feasibility.

According to Go et al. [36] limitations in material extrusion rate derive from both the design of the machine moduli, as well as the process physics. An improved extrusion module is proposed in [37], equipped with nut-feed filament drive along with laser assisted pre-heating of the filament stage achieving approximately 10-fold greater flow rate in comparison with typical material extrusion systems. Exceeding critical pressure in the liquefier causes filament buckling and as a result disagreement between planned and actual volumetric material deposition, as described by Venkataraman et al. [38]. The above issue is further facilitated when remnants of burnt material or external particles hinder continuous material flow [39]. Fiber-reinforced materials affect extrusion pressure as well, due to the increase in composite material's viscosity. A pertinent study on carbon fiber reinforced materials and the effect on material extrusion rate is presented in [40]. Insufficient friction applied from the motor gear-roller system to the solid

filament result in slippage between them leading to unstable material flow and under-extrusion [41].

These process-related constraints are typically addressed by conservative fabrication settings that limit process productivity. In particular, cases of complex parts that are manufactured in small lots may benefit from ME but part quality and process productivity are still limiting factors comparing to conventional antagonistic methods, such as injection molding [42]. Hence, the goal to retrieve the highest material flow rate without sacrificing part quality is always timely.

### ***2.3 Material deposition***

Material deposition is performed via synchronization of feedstock extrusion rate and planar velocity of the nozzle or the build platform, depending on the hardware configuration of the 3D printing machine. Deposition of material plays primary role in the successful initiation of fabrication process that is critically dependent on material adhesion to the build platform, typically achieved by increased material flow rate and material temperature as described in [43]. The flow and thermal conditions under which the material is extruded and deposited determines the structural integrity and the quality of fusion among adjacent strands and stacked layers [44, 45]. In practice, new melt material is deposited on layers that have already solidified. In order for the new layer to adhere to the previous one, the interface temperature should locally rise above the material's molding state temperature. In this way, a 'welding' zone is formed and material aggregation is achieved, as presented by the developed numerical simulation in [46]. The effect of interlayer and adjacent-bead bonding on product quality is highlighted in many research studies. Yardimci et.al. [47] developed a theoretical thermal model which quantifies the bonding potential of the adjacent beads, with respect to temperature history, cooling rate and material properties. The impact of process parameters on the bonding quality of the product were studied by Sun et al. [35, 48] and Bellehumeur et. al [44]. The transition from semi-molten state to solid plastic is modeled by Crockett [49, 50], with focus on how the molten bead spreads within the solidification time frame. Die swelling of extruded polymer, described by Michaeli [51], results from material pressure relief at the nozzle exit and is detrimental to fabrication resolution in material extrusion systems. Xia et al. [52] highlighted the limitations of simulating ME process with accuracy even with state-of-the art computational power, due to the complexity of the included phenomena. In [53] it is proven that printing excessively thin layers over a certain thickness threshold depending on the material, leads to over-compressed layers deteriorating mechanical properties of the part.

A fair amount of ME defects, occur in-process and originate from inefficient material deposition due to poor synchronization between feedstock velocity and planar motion of the nozzle. In particular, material overfills at the start and at the end of a path [41], underfills [54], stringing [55], part internal voids [56] and poor bonding between material strands [57] are common issues which are likely to occur on both low cost and more sophisticated equipment. Given the nature of the process, a lot of extrusion variation occurs during travel moves of the nozzle where filament retracts and ‘primes’ in order to ensure selective deposition according to the designed trajectory [58]. Furthermore, variations in planar motion of the nozzle are also induced due to acceleration and deceleration stages upon changes in printing direction. In [59], it is demonstrated that increased shear rate, due to high flow rate, results in severe deformation and defects in the extruded material.

Excessive material deposited at the corner points of the path are numerically modeled and evaluated by Comminal et al. [60]. The study presents an optimum degree of trajectory smoothing in order to compensate for material overfill at the turning points without sacrificing dimensional accuracy. On an already smoothed trajectory, Ertay et al. [61] reduced material overfills by synchronizing extrusion rate with tangential velocity of the nozzle along the path. In ME process, filament priming and retraction are critical operations in tackling uncontrollable material deposition during fabrication, unfortunately, at the expense of processing time. Therefore, Jin et al. [62] proposed optimal trajectory planning in order to minimize retraction and travel moves. Li et al. [63] focused on synchronization between the planar velocity of the nozzle and the velocity of a plunger, assembled to extrude viscous ceramic paste through the nozzle. Although, differences between ceramics and thermoplastics extrusion do exist, the aim is still to rectify flow rate variations at the start and at the end point of the designed path. Thermal factors are experimentally investigated in [64]. A clear relationship between lower melt temperature settings and the occurrence of underfills during deposition is detected. Feedstock temperature fluctuations have been evaluated via a thermal camera with respect to priming, retraction and travel motions in a study conducted by Pollard et al. [58]. Improved adhesion to the previous layer is achieved with a laser-assisted local heating approach presented in [65], leading to stronger bonding and increased strength of the part. The synchronization between extrusion rate and printing velocity is experimentally evaluated by Geng et al. [66], in an attempt to successfully deposit PEEK, a high performance engineering polymer, which is challenging to process.

## 2.4 *Dimensional accuracy*

While the feedstock is extruded in moldable state, it is simultaneously deposited on the underlying build platform, creating a three-dimensional part as a sequence of layers consisting of adjacent deposited strands. The relative translation between the nozzle and the build platform is synchronized with the feedstock extrusion rate, generally forming material strands of elliptical cross-sections. However, the sensitivity of material deposition regarding the complexity of process parameterization results in varying cross-section shapes. Therefore, dimensional accuracy in ME can be traced to material deposition variance. Only a few attempts to model and quantify the shape of extruded material strand are found in literature and this is attributed to the complex nature of the phenomena involved [67]. Boschetto and Bottini [68] proposed a mathematical model to predict height deviation between the nominal and actual strand cross-sections, with respect to part's build orientation and the defined layer thickness. A recent numerical simulation of thin-wall additive manufacturing [69], measured the actual width and height of the resulting cross-section, on an improved localized laser-heating system. Likewise, numerical simulation followed by experimental verification [70], illustrated and quantified the variation in strand cross-section, according to typical material extrusion parameters, namely layer thickness, nozzle diameter, feedstock velocity and printing velocity. The effect of printing velocity and layer thickness to the coalescence between adjacent strands was studied by Huang and Singamneni [71] in an attempt to evaluate material deposition in the internal part structure. Strand width inconsistency is also caused by acceleration and deceleration of the printing head [41, 61]. In this light, the spreading of the strand cross-section starting from the melt deposition and evolving through solidification [50] induces expansion or contraction of the part's outer boundaries, leading to deviation from the nominal dimensions.

Unlike analytical models, which usually involve simplifications to reduce computation complexity, experiment-based methodologies are more prominent to capture real-life occurrences and noise effects during the process. For this reason, dimensional accuracy in extrusion-based AM has been investigated mostly experimentally. Design of experiments (DoE) has been widely reported in literature, as a well-established set of methodologies to empirically establish the effect of process parameters on the part's dimensional accuracy in ME. Taguchi method is the prevailing technique applied in many relevant cases [72–74] to obtain optimum settings among typical material extrusion parameters, such as layer thickness, strand width, strand deposition angle, air gap, extrusion temperature, printing speed and part orientation. Sood et al. [75] designed a series of experiments following the Taguchi DoE method. They studied five process parameters at three levels each, aiming to retrieve the optimum combination.

Different optimum conditions are retrieved for each of the three build directions. Therefore, the three different combinations were merged into a single response named Grey Relational Grade (GRG). Chang et al. investigate the effect on profile error of FFF parameters affecting part perimeter and of those affecting part interior structure [73] using Taguchi DoE and ANOVA and concluding a strong relation between contour width and profile error. Sanchez et al. [76] designed a benchmark model and fabricated it under different layer thickness, raster width and nozzle speed value combinations taking into account standard IT tolerance grades. Similarly, a benchmark model with numerous features was designed by Minetola et al. [77] in order to compare two low cost FFF printers. Dimension compensation at the design stage has been advocated as a remedy to fabrication-induced deviations. Deviation models for prismatic and cylindrical shapes have been developed and Taguchi experiments were performed to generate data for training a predictive ANN [71, 78].

Similar attempts utilize response surface methodology (RSM), which is considered to be suitable for fitting polynomial models that predict dimensional accuracy on a continuous parameter level range [55, 79, 80]. Relevant experimental approaches involve specially designed benchmarking models, used to evaluate material extrusion systems according to standardized international tolerance (IT) grades. Accuracy evaluation is based on multiple features, such as thin walls, holes, bosses and overhangs, resulting in increased granularity of the analysis and providing a more detailed insight regarding the material extrusion system capabilities [76, 77, 81, 82].

Dimension compensation at the design stage has been advocated as an alternative remedy to fabrication-induced deviations. Deviation models for prismatic and cylindrical shapes have been developed [83], whilst Taguchi experiments were performed to generate data for training a predictive artificial neural network (ANN) [78].

Separate analysis of individual responses is vital for understanding the underlying phenomena; however, multiple goals that need to be simultaneously satisfied are commonplace in manufacturing. Regarding material extrusion, multiple-objective optimisation via different techniques is widely reported in literature. Wang, Lin and Hu [84] integrated Taguchi experiments with grey relational analysis (GRA) with the aim to optimize dimensional accuracy, surface roughness and mechanical properties of the fabricated part. RSM was combined with non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) to find the optimum part orientation in order to optimize two contradicting responses: part's tensile strength and volumetric shrinkage [85]. Neural network models were constructed [86] in order to correlate layer thickness and part orientation with volumetric accuracy and time required to build the part. Afterwards both objectives were simultaneously minimized utilizing genetic algorithm optimisation. When not

treated as volumetric deviation, dimensional accuracy is commonly perceived as a multiple-objective response since the investigated parameters may affect accuracy along the three motion axes X, Y and Z in a different manner. Indicatively, this is proved in [87], which integrated Taguchi method with fuzzy logic optimisation technique to obtain a global optimum. Another approach, aiming to optimize accuracy along all axes involves an optimal RSM design followed by Derringer's desirability function [88].

## ***2.5 Residual stresses and warpage***

The layer-wise strategy and the selective deposition of material in extrusion-based AM brings a variety of advantages and new perspectives. However, as with every manufacturing process, limitations are still present. One of the most well-known issues, that has been intensively investigated in research literature is part deformation, better known as warpage. In order to understand warpage, it is important to review the occurrences during material deposition. Thermoplastic material, typically employed in ME, is heated above glass transition temperature in order to become moldable and develop viscous flow through the nozzle. While in molten state, the specific volume of the thermoplastic is increased and consequently the deposited strand shrinks upon solidification. In addition, as explained by Spoerk et al. [89], volume increase is abrupt for semi-crystalline polymers, such as Poly-propylene (PP) and Poly-ether-ether-ketone (PEEK), when the temperature rises above glass transition point, whilst for amorphous polymers, such as Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), linear volume increase is observed and therefore part shrinkage is smaller, although still present. The selective fabrication nature of ME involves uneven heat distribution [90], due to the serial deposition of material strands, and uneven cooling cycles of the different regions of the layer. The layer-wise nature implies iterative nozzle traversal over the same part regions, thus inducing temperature cycles [91]. In this light, internal forces develop and, as a result, the part is susceptible to deformation. In practice, this happens during the process and is characterized by part detachment from the build platform, thus canceling fabrication. Protruding features and thin walls are more susceptible to warp due to the rapid contraction associated with their reduced thermal mass [67, 92]. Workarounds to ensure adhesion to the platform involve fabrication of a larger base footprint, named as brim and raft structures in AM process planning software (slicers). Even if the part manages to adhere to the build platform, the residual stresses can still cumulate internally and induce delamination between layers.

Residual stress formation is investigated by numerous researchers. Yardimci [93–95] developed heat transfer models in order to evaluate bonding potential of adjacent deposited beads. The analytical model proposed by Wang et al. [96] assessed part warpage with respect to build

environment temperature, material shrinkage rate, tool-path pattern, total number of layers and the glass transition temperature of the material. One of their findings referred to the role of elevation of the build chamber temperature close to the material's glass transition temperature in order to mitigate residual stresses in the part. However, rising temperature over the glass-transition point will prolong solidification time of the layer and as a result fresh material will be deposited on molten substrate. Analytical modeling to investigate warpage by Armillotta et al. [97] indicated maximum stress concentration at the 2-4 mm zone regarding part height. Zhang and Chou developed a finite element analysis tool to investigate residual stresses as a function of trajectory planning [98]. A follow up study on the same FEA tool, incorporated a designed experiment to validate the impact of layer thickness, strand width and printing speed with respect to warpage. Increase in printing speed and layer thickness was found to increase stress accumulation, those factors being the most influential. An experimental study on Poly-lactic acid (PLA) thin plate by Xinhua et al. [92] presented some practical guidelines for thin feature design in extrusion-based AM. Specifically, small layer thickness and low printing speed introduced heavier deformation on the plates. Regarding trajectory, an offset tool-path style was validated as the most appropriate for such thin features. A validation tool for reinforced material, demonstrated for carbon fiber reinforced PPS, is proposed in [99]. Fitzharris et al. investigated poly-propylene (PP) and poly-phenylene sulfide (PPS) materials using finite element analysis, in an attempt to correlate their properties to the warpage tendency. Overall, coefficient of thermal expansion (CTE) is found to be the critical property. Material reinforcement fillers, which decrease CTE, also reduce the composite's tendency to deform. This observation was experimentally validated in [100] upon utilization of optic fiber Bragg grating (FBG) sensors. Optic FBG is characterized an accurate sensor for in-situ measurement of temperature and strain, with proven use in similar studies [101, 102]. Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is coupled with drilling hole method [103], in order to measure residual stress in a way to achieve reduced interference with the fabricated part. Acoustic emission is another pertinent measuring method that was presented in [104]. Although it is a completely non-intrusive method, its accuracy needs to be further investigated, in order to improve reliability of the measurements. Following non-intrusion rationale, a vibration sensor based technique is investigated in [105]. This data-driven method involves training of back propagation neural network in order to on-line identify successfully warpage occurrences, for parts manufacture with ME.

## ***2.6 Surface roughness***

Surface roughness in FFF has attracted particular attention. A recent study by Rahmati et al. [106] compares five theoretical predictive models against experimental  $R_a$  measurements on

surfaces which are inclined at an angle in the range  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  relative to the horizontal plane; notably, Pandey's method [107] demonstrated the lowest prediction error in comparison with actual measurements. A mathematical model for surface roughness by Reeves and Cobb [108], that was initially proposed for Stereolithography (SLA), is utilized by Campbell et al. [109] for various AM techniques including FFF. Another theoretical model was developed by Boschetto et al. [110], with the aim to represent roughness profile. A function that depends on process parameters was formulated, achieving good results for angles to the horizontal in the range  $30^{\circ}$  -  $150^{\circ}$ . The region outside this range, termed 'indeterminate', is related to non-intersection of deposited material beads, forming the current and the preceding layers [111]. Surface roughness prediction in this region has been tackled by artificial neural networks (ANN), their input being layer thickness and build orientation [112]. Visualization of surface roughness based on selected parameter settings is predicted via a developed process planning tool presented in [113], including different build orientations of the fabricated part. Optimising build orientation is thoroughly investigated by numerous researchers in an effort to reduce manufacturing cost and maintain low surface roughness [86, 107].

Several studies to estimate surface roughness in extrusion-based additive manufacturing were based on design of experiments (DoE) techniques. Armillotta [114] created a benchmark model with dome-shaped features of different diameter and height distributed over a planar surface to capture the well-known staircase effect. Anitha et al. [115] employed Taguchi DoE method to conclude that layer thickness reduction may increase surface roughness, in contradiction to the majority of other researchers. Raol et al. [116] utilized Response Surface Methodology (RSM) with a central composite design (CCD) consisting of 20 experiments, and reported that build orientation and layer thickness are the most influential parameters in surface roughness formation.

Parameters influencing surface roughness are often studied together with build time and cost because of their strong correlation. Minimizing layer thickness, in order to ensure lower surface roughness, results in increased build time and cost, whereas re-orienting the part, in order to achieve lower build time, may result in larger volume of material required to support overhangs. In [117], Alexander et al. describe this contradiction among process parameters as a multi-factor optimisation problem. In [118], Byun et al. developed a decision-support tool with the aim to define optimal build orientation according to surface roughness, build time and cost with user-assigned weights to each criterion. Adaptive slicing methods [119] have been employed as a remedy to this optimisation problem with good results. Therefore, the majority of modern AM process planning software include this feature. In addition, an approach that employs variable



nozzle diameter for more intriguing part regions has been proposed [120], yet increasing the complexity of the material extrusion system.

## ***2.7 Materials and properties***

In this section, an overview of available polymers for ME is presented, along with the evaluation regarding their structural performance. All belong to the family of thermoplastics, their common characteristic being the moldable material state above glass-transition point and rapid solidification when cooled. This inherent property renders thermoplastics capable of being processed via extrusion. According to their micro-structure, thermoplastic polymers are divided in amorphous [40] and semi-crystalline [121]. The common characteristic for ME process is the anisotropy in mechanical properties of the fabricated parts. Typically, bonding between layers present inferior strength in comparison with planar deposition, thus resulting in parts that are weaker along their build direction. This is a fact that needs to be taken into consideration during design of engineering applications.

Poly-lactic acid (PLA) is probably the most common material for ME method due to the favorable processing ability even on low-cost systems. It is a biodegradable and recyclable material belonging to aliphatic polyester family [122], widely used for biomedical purposes [123]. General characteristics for PLA, including thermal, mechanical and rheological properties that are of special interest for the current study are reported by Sin et. al. [124]. Numerous studies have investigated resulting properties, especially with experimental methods. In [125, 126], tensile strength of poly-lactic acid (PLA) specimens is experimentally investigated for controlled variation of layer thickness, infill angle deposition, strand width and skin thickness of the part. Fatigue of PLA structures is experimentally validated in [127], indicating infill density and layer thickness as the most impactful factors. Cooling of strands upon deposition in PLA printing is commonly employed, therefore Lee et al. [128] suggested that increasing cooling rate, negatively affects bonding quality with respect to tensile strength. Chacon et al. [129] evaluated ductility of PLA specimens, correlating increased nozzle velocity with brittle structures. Defects during ME process that pertain to random void formation in the parts are typically quantified to lead to a 20.5% reduction in tensile strength, 9.6% in modulus, and 11.5% in failure strain [130]. Apart from pure material, composite PLA, filled with graphene particles is evaluated regarding how varying layer thickness and infill density affect tensile strength, flexural strength and impact energy [131]. PLA reinforced by short carbon fibers [132], demonstrated doubled tensile modulus and increased brittleness comparing to pure PLA.

PLA is the material that is used throughout all experiment studies in this thesis and therefore the reported references pertain to it. However, there is large number of available studies in literature for other FFF materials, as well.

The meso-structure of extruded specimens was analytically modeled by Rodriguez et al. [21] for acrylonitrile butadiene styrene (ABS). For the same material Abbott et al. [133] correlated print parameters, thermal history between strands and meso-structure with tensile strength. Polyethylene terephthalate glycol (PETG) specimens, both pure and reinforced with 20% short carbon fibers, were tested for cyclic compression and modal characteristics. It was found that reinforced PETG was more brittle than pure PETG and presented moderately decreased damping capacity [134]. Poly-amide-12 (PA12) filament, processed with FFF was compared with counterpart specimens produced with injection molding. The results indicated reduced flexural strength by 25% and reduced elastic modulus by 22% for the former processing method [135]. A study by Domingo-Espin et al. [136], focused on identifying the most suitable finite element analysis model for the bending test of poly-carbonate (PC). They concluded that anisotropic modeling of material properties should be considered when the yield strength is exceeded; however, for elastic deformations isotropic models are adequate. Material extrusion of poly-propylene (PP) with increasing infill densities, indicated proportional increase at 30 MPa for tensile strength and 1 GPa for elastic modulus, approximately.

Regarding high-performance polymers, studies for the structural properties of poly-ether-ether-ketone (PEEK) [137, 138] and poly-ether-imide (PEI) [139, 140] are available, where anisotropic properties according to process parameters are evaluated and also comparison with bulk molded material is presented. These materials have attracted increased research interest in the last years and they represent the state-of-the-art for ME process. Due to their elevated properties they are considered promising for more demanding applications, i.e. the aerospace sector, however, presenting challenges regarding their processing ability.

To conclude with the range of most used materials that are currently available for ME, comprehensive reviews regarding mechanical properties for pure [141, 142] and composite filaments [143] are pointed to.

# 3

## *Trajectory design in extrusion-based AM*

### *3.1 Porous lattice structures*

The need to represent the macro-pore structure of a porous lattice model, instead of designing it explicitly in a 3D CAD environment, derives from the CAD software's inadequacy to model and edit such complex objects.

#### *3.1.1 Tissue engineering scaffolds*

Tissue-engineering scaffolds, used in regenerative medicine, are typical paradigms of high complexity porous structures. They serve as matrices, inside which cells differentiate, proliferate and physically regenerate the tissue, while the scaffold, made of biomaterials [144], degrades into non-toxic products [145]. The number of internal pores in a tissue-engineering scaffold depends on the pore size. The term "pore" is used to describe controlled void spaces, unlike the random voids that are described in section 2.1.2. The pore is included in specially designed geometric structures, referred to as unit cells. The dimensions of a unit cell may vary between a few tens of micrometers and a few millimeters; however, there is a list of specific requirements [146] and critical parameters [147] that unit cells must fulfill in order to contribute to successful tissue regeneration. Various forms of unit cells for tissue engineering have been defined and structured into libraries. Convex polyhedra are typical examples due to their ability to be repeated in 3D space regularly and the small number of faces which points to ease of production via Additive Manufacturing (AM) techniques [148].

AM techniques are suitable for porous object fabrication due to the layer by layer building process [149]; however they present disadvantages that should be mentioned. In powder-material based AM methods (SLS, BJ), fabrication resolution is strongly connected with the powder size,

which plays an important role in both pore size and porosity. According to experiments performed by Williams et al. [150], large particles dictate the granularity of edges and layers, and often result in a rough surface. Conversely, particles smaller than 10  $\mu\text{m}$  in size are connected to poor liquid flow and cause material entrapment inside pores resulting in dimensional inaccuracy since they can be easily fused to scaffold interior surfaces. Moreover, achieving low wall-thickness (e.g.  $<100 \mu\text{m}$ ) inside the porous structure depends on laser spot diameter (or nozzle diameter in the case of FFF etc.) and may be beyond typical feature resolution capabilities of the equipment.

In the case of parts possessing internal pores, extremely large CAD files may result that are difficult to handle, or even impossible to create and store even in state-of-the-art systems. Due to the detailed external boundary surface of a tissue scaffold, the complexity of the model is high, containing a huge number of entities. In addition, even if such a complex scaffold is successfully modeled, analogous problems will be encountered with its conversion to an STL file. Recently, a more efficient STL file format, named STL 2.0 or Additive Manufacturing File (AMF) format has been developed [151, 152]. It is an XML-based file format dealing with some of the unsolved AM issues so far in STL. AMF tackles, among others, functionally graded material representation, internal structure definition and multiple object fabrication [153]. Most of all, AMF provides the opportunity to define void regions inside the object and is considered promising, with respect to porous object manufacturing using AM techniques.

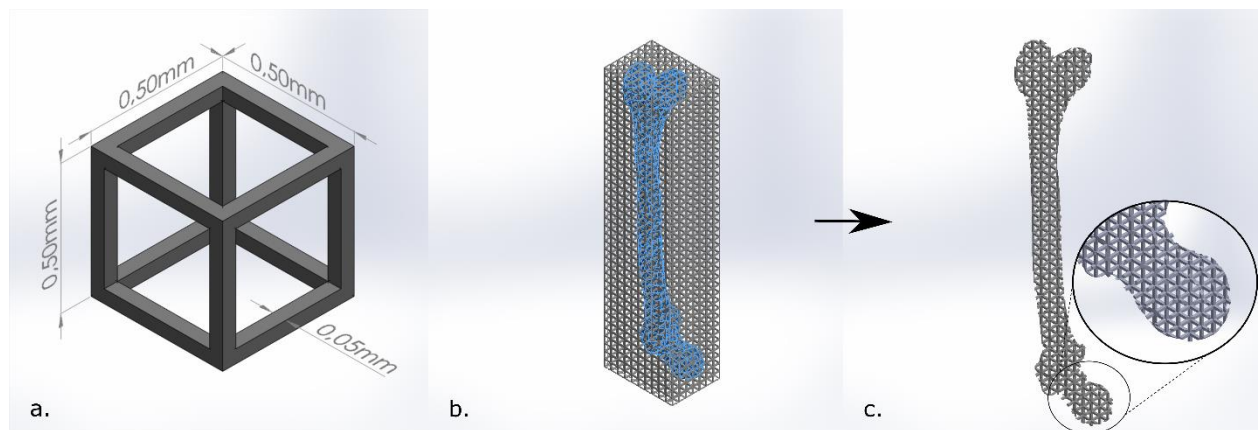
Researchers have shown intense interest in methods that represent the external geometry and the internal architecture of a tissue scaffold. Starly et al. [154] proposed an algorithm that uses characteristic patterns to represent individual 2D unit cell interior architecture and combines them into 2D layered patterns. Effectively, the slices that form the unit cell are placed on the appropriate layer of the scaffold block. Yoo [155–157] moved a step forward by providing mathematical definition of the internal scaffold structure. Triply periodic minimal structures (TPMS) are employed in order to create a parametric unit cell library. A voxelized model of the scaffold is sliced to generate 2D printing maps that are converted to AM machine instructions. Another voxel-based approach, tailored for fabricated variable infill densities is proposed by Vassilakos et al. [158]. Kang et al. [159] developed unit cell-based CAM software that exports an SFF toolpath for every slice of the input tissue STL file, according to a predefined unit cell data structure. In addition, it seems that no partial unit cells are used to fill a slice because an appropriate choice of unit cell types and sizes is made. One of the recent achievements in the field of tissue-engineering scaffold design is biomimetic modeling of tissue scaffolds. According to this, pore size varies inside the same structure resulting in functionally graded scaffolds (FGS) that represent tissues, such as bones, with great fidelity. Comprehensive reviews, including this

and many other achievements was written by Giannitelli et al. [160], Giannatsis et al. [161] and An et al. [162].

### 3.1.2 Difficulty in modeling and tessellation

When adopting an STL representation, the model surfaces are approximated with triangular facets. However, when it comes to very complex models, the computational power that is needed to tessellate the original modeled surfaces into STL facets may be practically insufficient. In particular, highly curved surfaces must employ a large number of small triangular facets, resulting in extremely large STL files [163]. Besides, approximation of such complex surfaces leads to errors in STL files that must be repaired.

These issues were examined practically in a standard CAD environment (in this case Solidworks™) relating to modeling of a tissue-engineering scaffold with pores. The latter were represented as unit cells. A square prism unit cell with 500 μm external side length and 400 μm internal (pore) side length was utilized, see Fig. 3-1(a) to generate two different scaffold blocks with dimensions 6.85x4.83x28.07 mm and 11.43x8.05x46.78 mm, see Fig. 3-1(b), enclosing a femur bone model that was scaled down uniformly to 6% and 10% of its original dimensions. In this way, an attempt to explore the CAD system's and the computing system's capacity was made, regarding different model dimensions while keeping a unit cell of constant size. The internally structured scaffold was obtained by a boolean intersection between the scaffold block and the bone model, Fig. 3-1(c).



**Fig. 3-1 (a) Square prism unit cell (b) Unit cell boolean addition (c) Boolean Intersection.**

The tests were carried out on a computer of the following specifications (Pentium® Dual Core CPU E5200 2.5 GHz, 3 GB RAM), via Solidworks™ API by disabling graphic representation in order to achieve better performance and lower consumption of computer resources. The results are shown in Table 3-1 and verify that full 3D modeling of tissue-engineering scaffolds produces large files that are difficult to handle, even though models of small dimensions are concerned. Moreover, failure in scaffold modeling is observed when femur model is scaled down to even

1/10 of its original size, due to increased number of generated pores that would lead to a geometrically too complex model and an associated crash of the CAD software while reaching an obviously prohibitive model size.

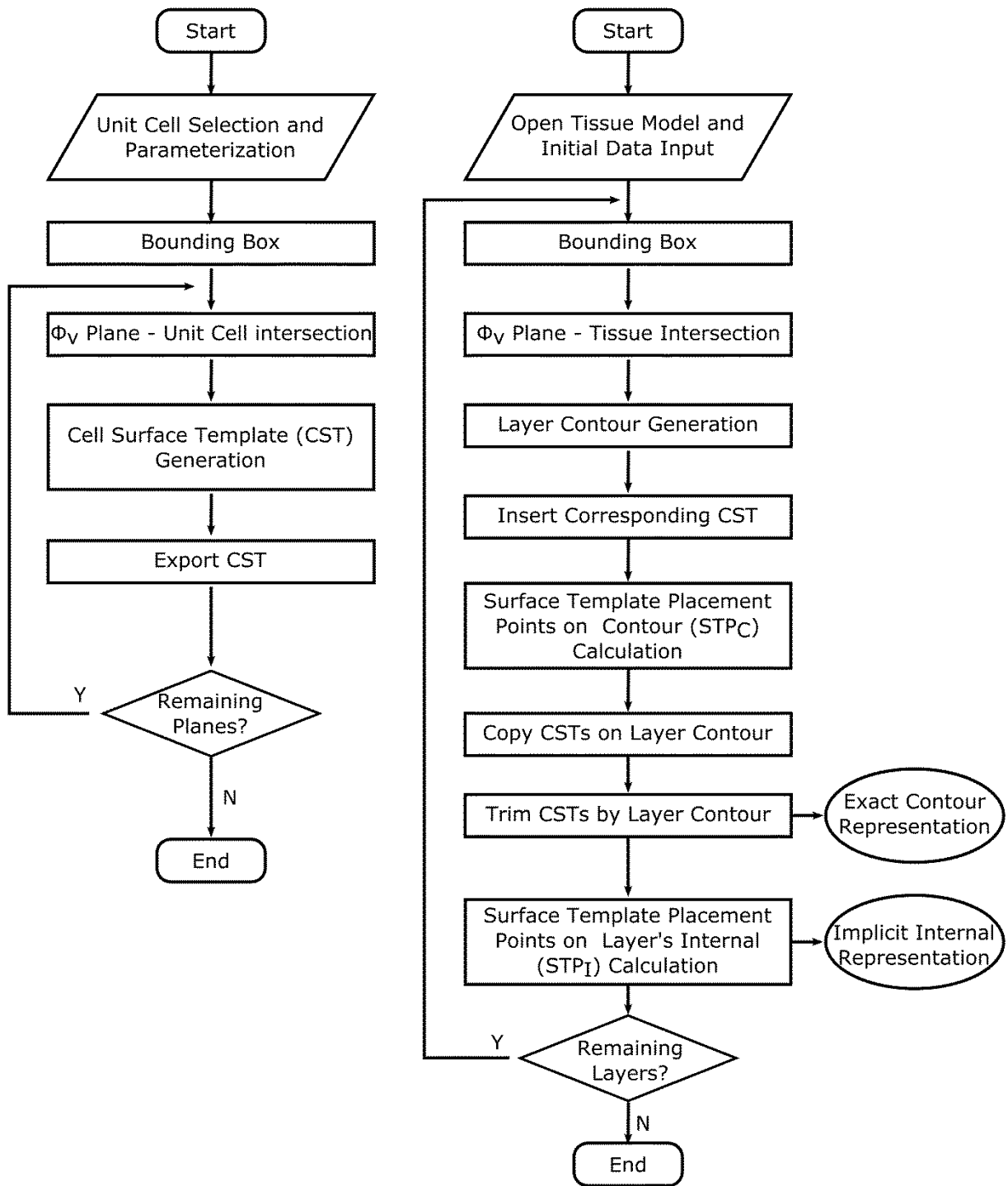
**Table 3-1 Tissue-engineering scaffold modeling test results.**

Scaffold Dimensions (mm)	Success in CAD modeling	File Size (MB)	Success in STL Conversion	Number of STL triangles	STL file size (MB)	Execution time (min)
6.85x4.83x28.07	Yes	157	Yes	58000	2.85	23
11.43x8.05x46.78	No	-	No	-	-	-

## ***3.2 Representation of porous lattice structure***

### ***3.2.1 Overview***

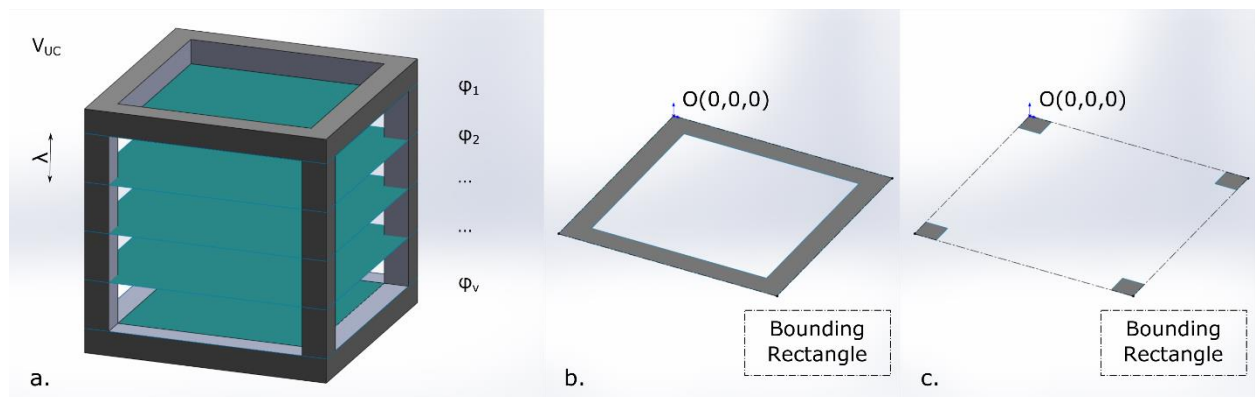
A developed algorithm that simplifies 3D modeling of large and complex tissue-engineering scaffolds on existing commercially available CAD systems is proposed as an alternative solution in this chapter. In brief, the algorithm slices the 3D model and calculates the position of cell surface templates (CST) with respect to every layer's contour. The calculations derive from equidistant unit cell surface representation with a constantly transposed plane in the vertical direction. The layer's contour pattern (LCP) is generated as follows: a representative 2D drawing of the CST's cross section is iteratively translated in order to calculate intersection locations with the layer's contour at every position. The layer's internal structure is similarly generated by section template placement points inside each layer (STP<sub>l</sub>), representing a periodical layer internal pattern (LIP). In both cases the explicit representation of the full geometry either in native CAD or in STL format is bypassed. As a next step LCP and LIP is converted to G-code commands for manufacturing on an extrusion-based AM system. The algorithm has been optimized in order to involve minimal explicit modeling of entities in the CAD environment during code execution in order to mitigate performance bottlenecks. The algorithm's flow chart is presented in Fig. 3-2.



a. b.  
**Fig. 3-2 Algorithm flow charts (a) Cell Surface Template (CST) generation (b) Layer filling.**

### 3.2.2 Algorithm

The unit cell is modeled in 3D CAD environment. According to distance  $\lambda$ , see Fig. 3-3(a), parallel planes  $\phi_v$  are created, where  $v=1,2,\dots,n$  and  $n$  is the number of CSTs that represent a single unit cell. Each CST results from the intersection of the solid unit cell  $V_{uc}$  with the  $v$ -th plane. In order to determine distance  $\lambda$  between successive parallel planes, two conditions must be satisfied. First, the division of unit cell's height with  $\lambda$  must result in an integer quotient, providing equidistant parallel planes  $\phi_v$  in the first place and also ensure that when CSTs are printed one upon the other, they will accurately represent unit cell's height. The second condition is connected to AM machine's ability to achieve layer thickness equal to  $\lambda$  during manufacturing process. Each CST is represented as a face entity. The bounding rectangle's upper left vertex see Fig. 3-3 (b,c) is determined as the CST's reference point.



**Fig. 3-3 (a) Unit cell slicing process (b) Cell Surface Template (CST) 1 and (c) Cell Surface Template (CST) 2.**

Layer filling, see Fig. 3-4(a), starts by selecting the tissue model which is to be sliced and perform the calculations regarding each CST location. Note that one-high blocks of unit cells correspond to  $n$  layers, see Fig. 3-4(b), and the complete tissue model extends over  $k*n$  layers. Initial data input includes determination of layer thickness  $\lambda$ , ensuring that this matches the respective distance  $\lambda$  applied to unit cell slicing as well as that of the AM system. The layer filling vector is input, too, defining the distance along X and Y axes used for CST's reference point translation within the layer, as in Fig. 3-5. Thus, periodicity of the pores on the same layer as well as the interconnection among the pores between successive layers is ensured. The layer from which the scaffold design process is to start is also indicated. This enables resuming from the same point after possible interruption of the design process.



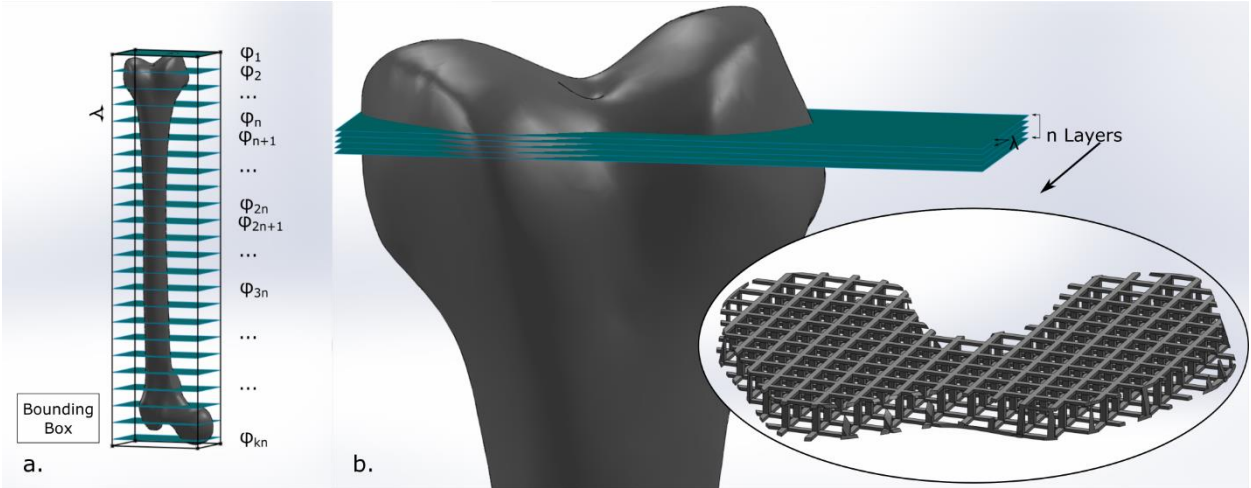


Fig. 3-4 (a) Successive layers at step distance  $\lambda$  (scaled up in the interest of visibility) for a sample tissue (b) one-high block of unit cells formed every n layers.

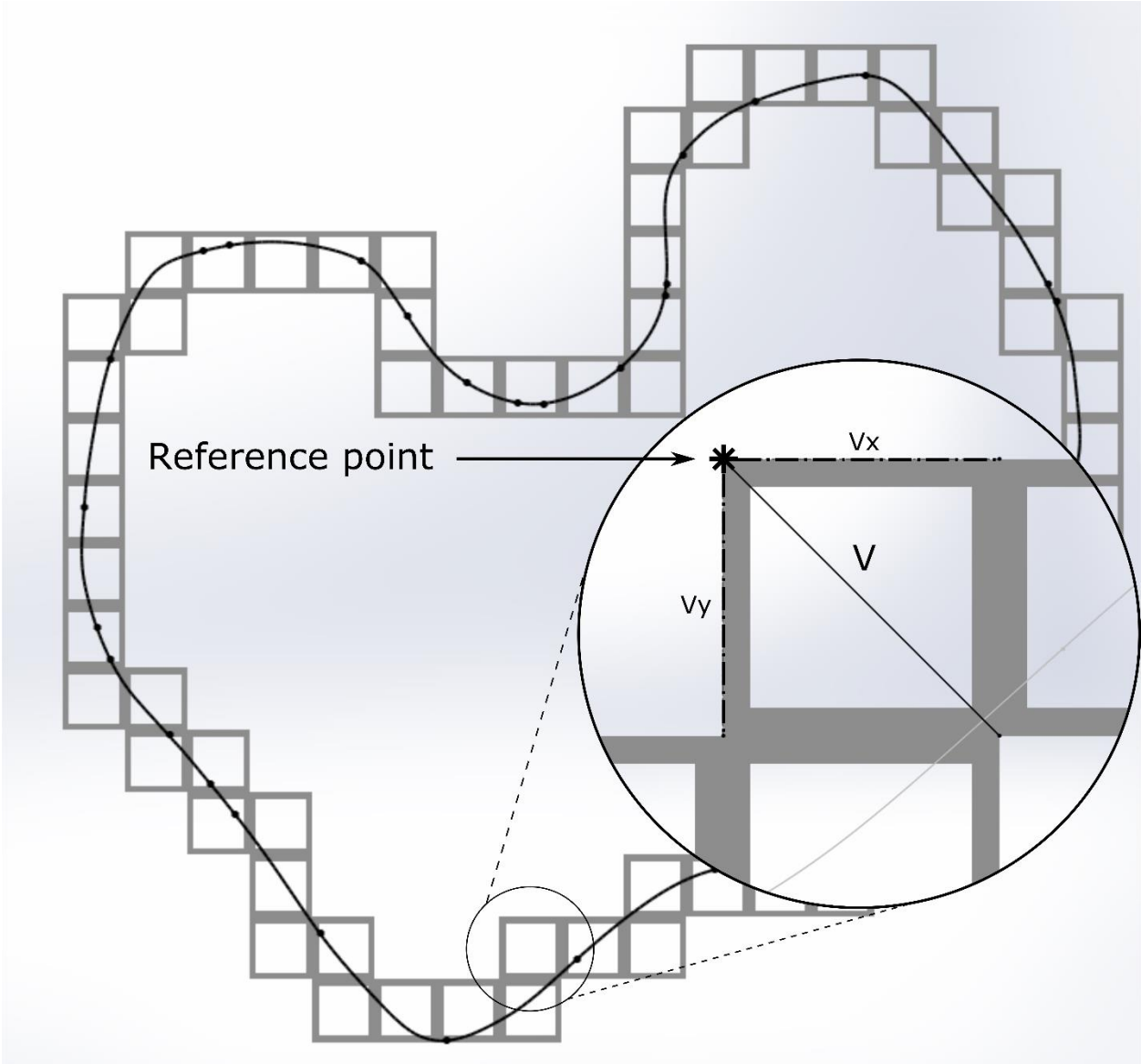
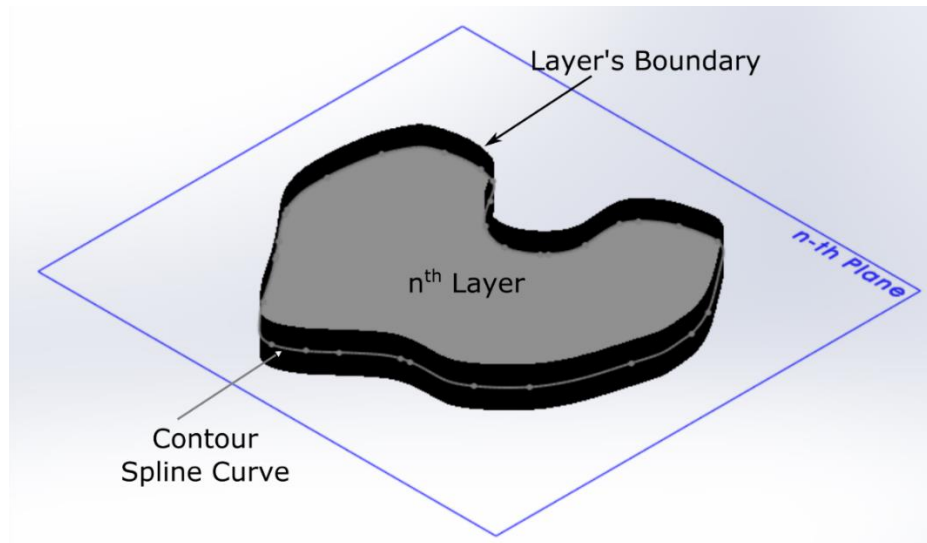


Fig. 3-5 CSTs placed on layer contour according to layer filling vector (V).

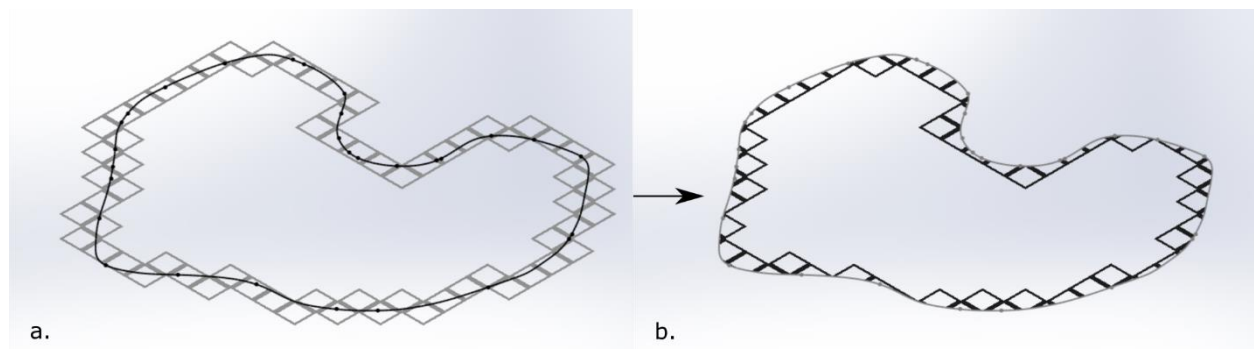
Once the design process is initiated, the selected model is loaded and its bounding box is created. The bounding box is the reference for calculation of each layer's CSTs. Its upper face defines plane  $\phi_1$  and by offsetting through distance equal to successive multiples of layer thickness ( $\lambda$ ), all slicing/intersection planes are produced. The layer's contour, see Fig. 3-6, divides the corresponding plane into the layer's internal and external half-planes. CSTs that are intended to intersect with contour spline curve are referenced as the surface template placement points on contour (STP<sub>C</sub>). These points are calculated based on the intersection of structured rays, casting from the layer's external and the layer's boundary, as detailed in section 3.2.5.1.



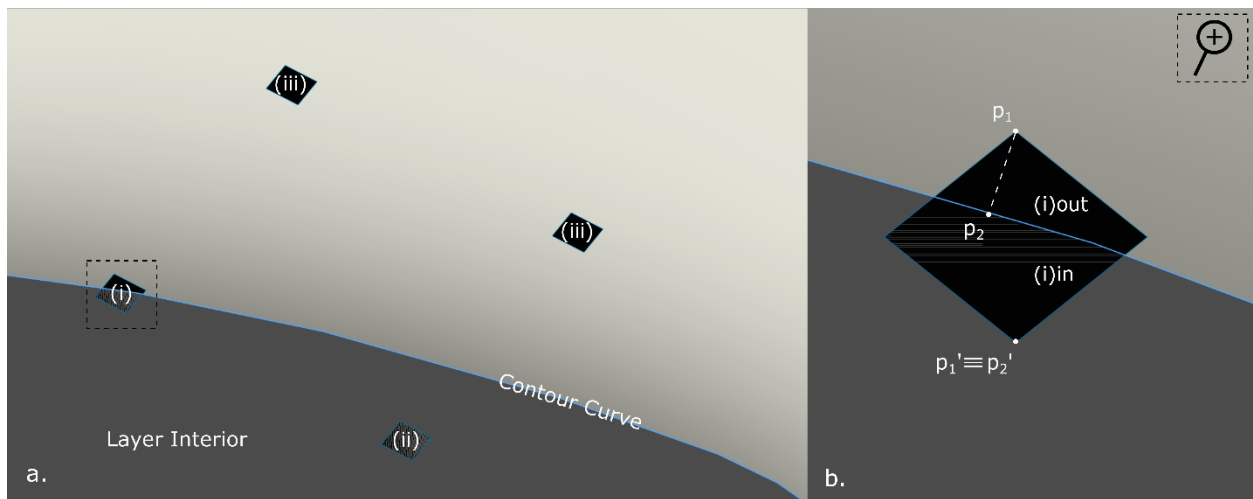
**Fig. 3-6 Contour spline curve and extruded boundary surface.**

The CSTs placed along the contour have to be trimmed in order to follow it exactly. For each CST only the lines that lie inside the contour are accounted in order to generate G-code commands, see Fig. 3-7.

A commonly encountered case concerns CSTs that are represented by multiple faces. Therefore, some of the faces may lie (i) on (ii) inside or (ii) outside the layer's contour, see Fig. 3-8(a). As a result, the respective face is respectively (i) intersected and trimmed with layer's contour, (ii) kept intact and represented implicitly or (iii) ignored.



**Fig. 3-7 Contour representation (a) before and (b) after trimming by the contour spline curve.**



**Fig. 3-8 (a) Possible location of surface bodies that define a non-continuous CST (b) comparison between two points in order to determine if the selected entities i(in) or i(out) lies inside or outside layer's contour.**

### 3.2.3 Implementation

The proposed approach is implemented on Solidworks™ CAD software, using Visual Basic for Application (VBA) and Solidworks™ Application Programming Interface (API). During code development, Solidworks™ API built-in methods were included and utilised in the developed code. Throughout this section, these methods will be described and referred by their actual Solidworks™ API name in parenthesis.

### 3.2.4 Cell surface template (CST) generation

Implementation of CST generation algorithm follows an interactive mode to control unit cell parameters, see Fig. 3-9(a). A perforated square prism is created as a unit cell example. The unit cell bounding box is created by a dedicated method (GetPartBox). Generation of the top intersection surface requires three points, e.g. the upper bounding box vertices in order to define the plane, and the method to create a planar surface (InsertPlanarRefSurface). The surface is offset vertically (InsertOffsetSurface), with step equal to the selected layer thickness until the whole unit cell is covered. At every step a CST is created due to the surface-unit cell intersection (Sketch3DIntersections) and the resulting curves are grouped in two dimensional sketches. Then, the closed curve of the 2D sketch is converted into a planar surface (InsertPlanarRefSurface) thus generating a CST. CST is transposed (InsertMoveCopyBody2) to Solidworks™ part's origin point O, see Fig. 3-3(b,c), according to bounding rectangle's upper left vertex. Each CST is saved as a separate part.

### 3.2.5 CST location calculation

The algorithm is implemented as follows, noting that the process takes place in the CAD software's background, with no graphic display or update, to improve performance. Initial configuration data, is entered in a form, see Fig. 3-9.

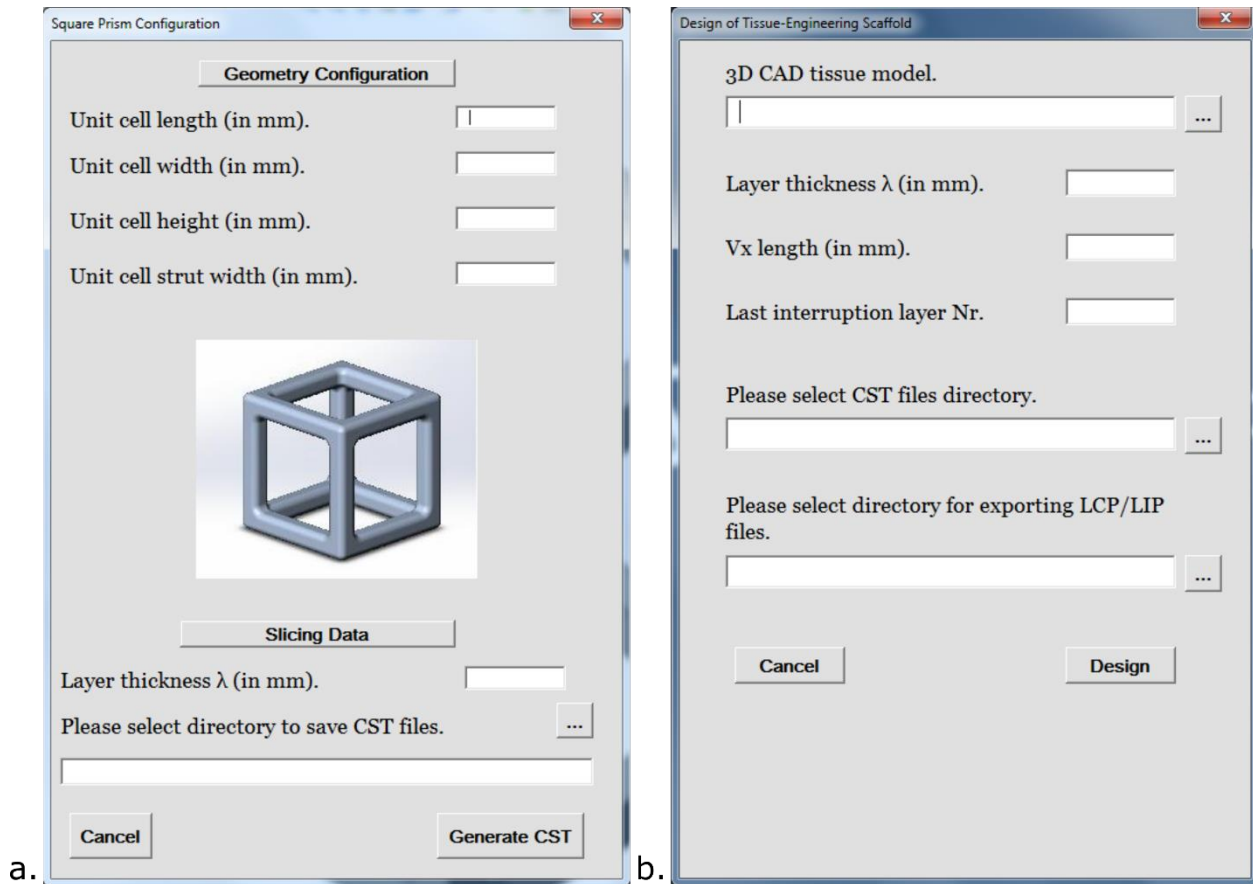


Fig. 3-9 Data input for the direct porous structure generation.

The model's bounding box is created by a dedicated method (GetPartBox). Generation of the top intersection surface requires three points, e.g. the upper bounding box vertices in order to define the plane, and the method to create a planar surface (InsertPlanarRefSurface). The surface is offset vertically (InsertOffsetSurface), with step equal to the selected layer thickness until the whole model is covered. At every step, the intersection between the offset surface and the model produces a set of contour spline curves grouped in a 2D sketch, named "Intersection Curve". The latter is extruded to a small depth (FeatureExtruRefSurface2) in order to yield a surface body (layer's boundary in Fig. 3-6) and be used as the target body for the ray casting process described in the following section.

#### 3.2.5.1 Surface template placement points on contour ( $STP_C$ )

The next step is to obtain the  $STP_C$ s and use them as CST placement guide. A ray casting method (RayIntersections) is employed to determine these points as intersection of the layer's boundary

with rays defined effectively as a horizontal grid in the bounding box. Every intersection returns a point which belongs to the layer's contour.

The returned point is adjusted as follows in order to yield CST's location point, see Fig. 3-10. For rays cast in x direction, the CSTs location point A' x-coordinate is found as in Eqn. (3-2). Location point's y coordinate coincides with ray's starting point y coordinate.

$$a = \frac{(A_x - BasePt_x)}{V_x} \quad (3-1)$$

$$A'_x = BasePt_x + \text{floor}(a) * V_x \quad (3-2)$$

where:

- BasePt<sub>x</sub>: x coordinate of ray starting point, located on bounding box side
- A<sub>x</sub>: x coordinate of returned point, if ray hits the target body
- V<sub>x</sub>: length of CST in x axis
- a: the number of intervening CSTs that would fit between BasePt and A
- A'<sub>x</sub>: x-coordinate of STP<sub>C</sub>

Since the ray penetrates the layer, intersection point B is also retrieved and, as a result, a new STP<sub>C</sub>, represented by point B' in Fig. 3-10, will be registered.

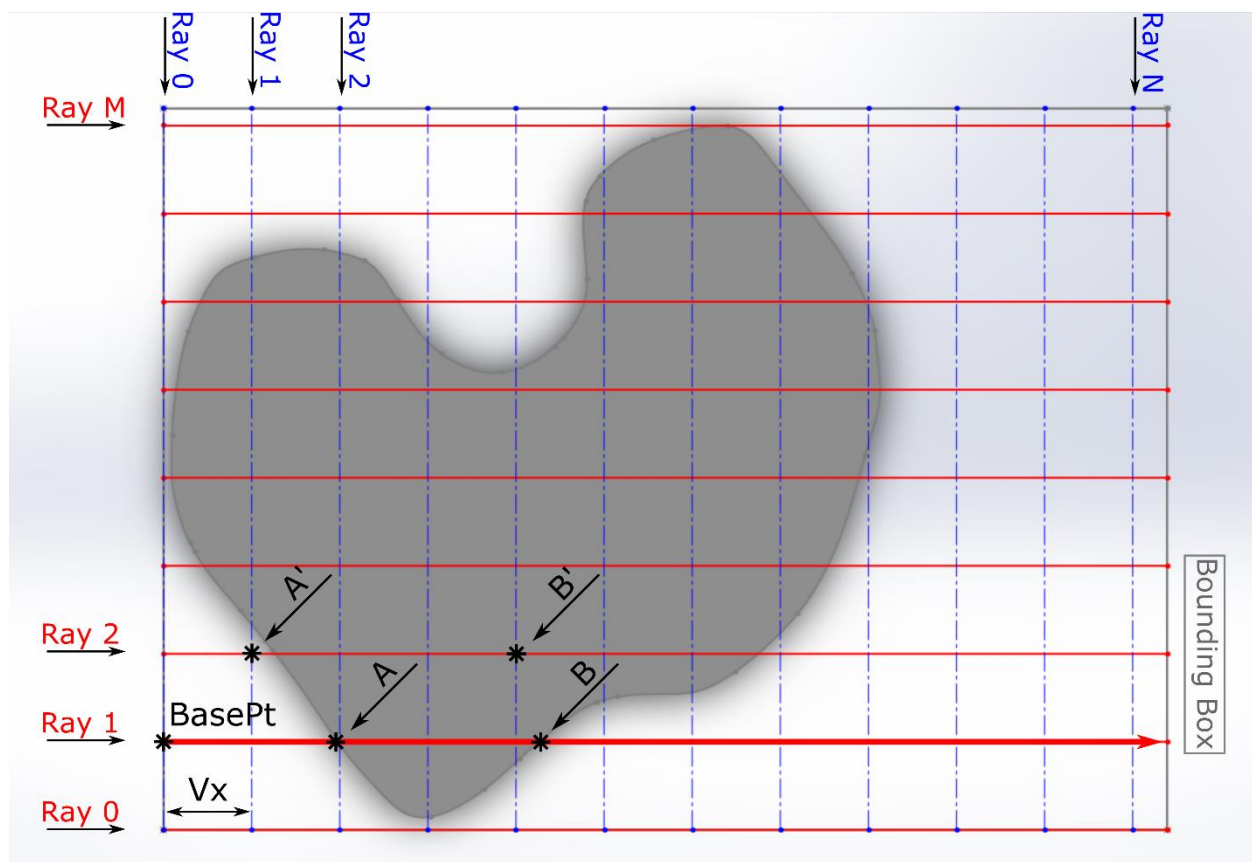
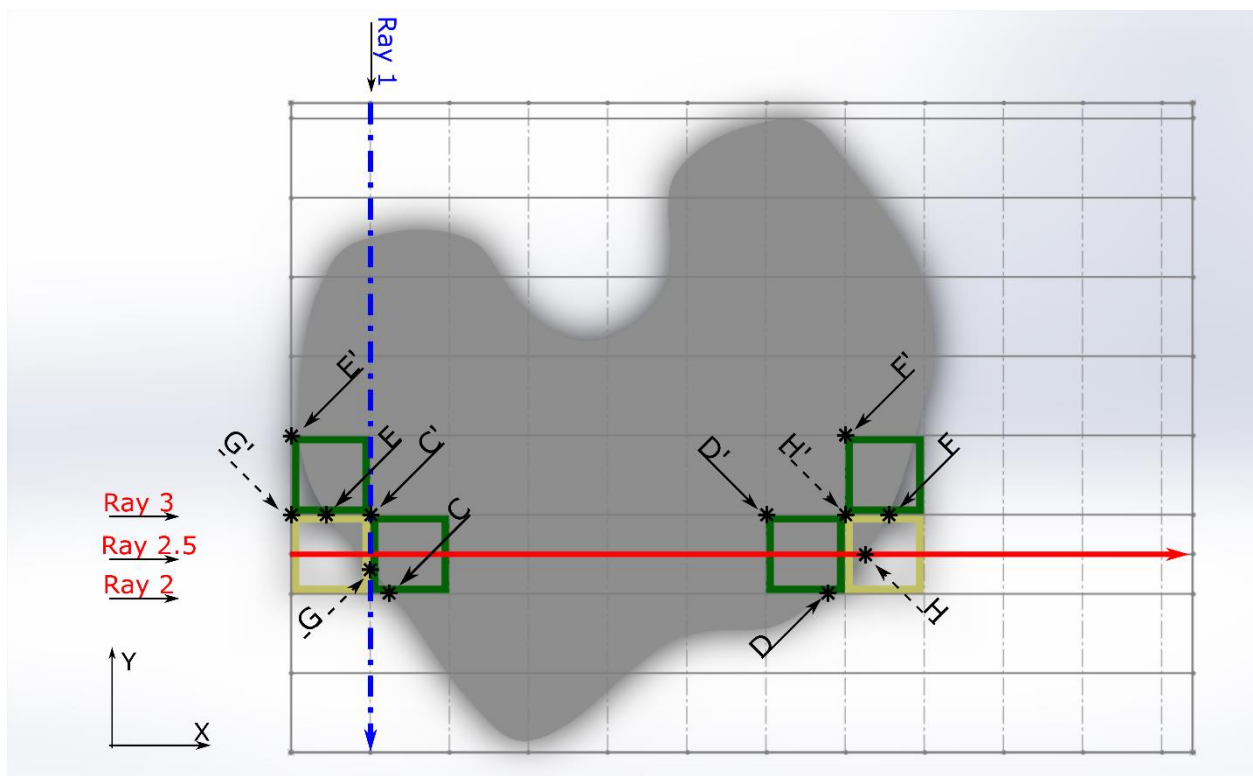


Fig. 3-10 Ray casting process to yield STPC according to Eqns. (3-1) and (3-2)

Note that spacing between ray starting points is inadequate in the existence of missing CSTs. In Fig. 3-11, Ray 2 is launched and intersects with layer's boundary at points C and D when entering and exiting the body, respectively. Then, the  $STP_C$  C' and D' are registered. Ray 3 comes next, intersecting with the layer's boundary at points E and F and new points E' and F' are registered as  $STP_C$ s. However, the layer's contour is not properly filled because  $STP_C$  G' and H' (dashed arrows in Fig. 3-11) have not been included. This is rectified by scanning the layer along y-axis (Ray 1 in Fig. 3-11). In this way, point G is retrieved during the application and  $STP_C$  G' is registered. However, H' is still missing. To overcome this, the density of rays is increased by means of the resolution variable, which is a variable fraction of CST side dimension depending on the contour's gradient at each point. As the tangent to the contour approaches the ray's direction the resolution variable should increase in order to reveal missing patterns, noting, however, that the higher the scanning resolution becomes, the slower the code is executed. In this way point H is retrieved, see Ray 2.5 in Fig. 3-11, and  $STP_C$  H' is registered. Generating an excessive number of rays will apparently lead to many intersection points mapped to the same  $STP_C$ . In any case, to prevent data redundancy in arrays a search routine traverses the array from its last registered value and deletes duplicates.



**Fig. 3-11** Light-coloured CSTs are missing and are only retrieved after Ray 1 (y-direction) and Ray 2.5 (x-direction) is launched.

As soon as each  $STP_C$  is calculated the CST reference point is translated accordingly to coincide with  $STP_C$  and thus the trajectory for the layer's contour is directly registered as G-code commands in a target txt file, by the pertinent VBA function.

### *3.2.5.2 Surface template placement points in layer's interior ( $STP_I$ )*

$STP_I$ s are calculated in a very similar way to  $STP_C$  calculation that has been already described. The main parameters are  $STP_C$  and layer filling vector  $V$ .

Based on the layer filling vector and the  $STP_C$  array, sorted according to Y coordinate, the algorithm registers the  $STP_I$ s. Traversing every row of CSTs with common Y coordinate, the number and the coordinates of equidistant  $STP_I$ s is identified. These points represent the location of every intact CST that needs to be created during the manufacturing process in order to fill the interior of the layer. Thus, an implicit representation of the layer internal pattern (LIP) is created. This can be saved as a separate TXT file containing the registered coordinates for each layer.

In case of multiple closed contour curves, describing a given layer, the even-odd rule is applied in order to determine whether the  $STP_I$  belong to one of the closed contours or not. Ray intersection is used again, counting the hit numbers of a ray starting from the  $STP_I$  under consideration and cast towards the layer's boundary.

## **3.3 Code performance validation**

An attempt to quantify the efficiency of the proposed method is made through four tests. The approach is tested with two models, namely a femur and a hip bone, to examine its efficiency on a PC equipped with an Intel® i7-4790 3.60 GHz CPU and 16 GB RAM that runs Solidworks™ 2013 in Windows 7 64-bit OS.

In the first test, the unit cell is a 500  $\mu\text{m}$  square prism, with a 400  $\mu\text{m}$  cubic pore and 50  $\mu\text{m}$  strut width. Layer thickness on the AM system is set to 100  $\mu\text{m}$ . As far as the femur model is regarded, see Fig. 3-12, contour perimeter varies between 97 and 283 mm and layer area vary between 710 and 3918  $\text{mm}^2$ , approximately. The results are presented in Table 3-2. In addition, Fig. 3-14 represents  $STP_I$  for a particular layer of the femur model as a set of sketch points in Solidworks™. Results concerning the hip bone model are shown in Fig. 3-13 and Table 3-2.



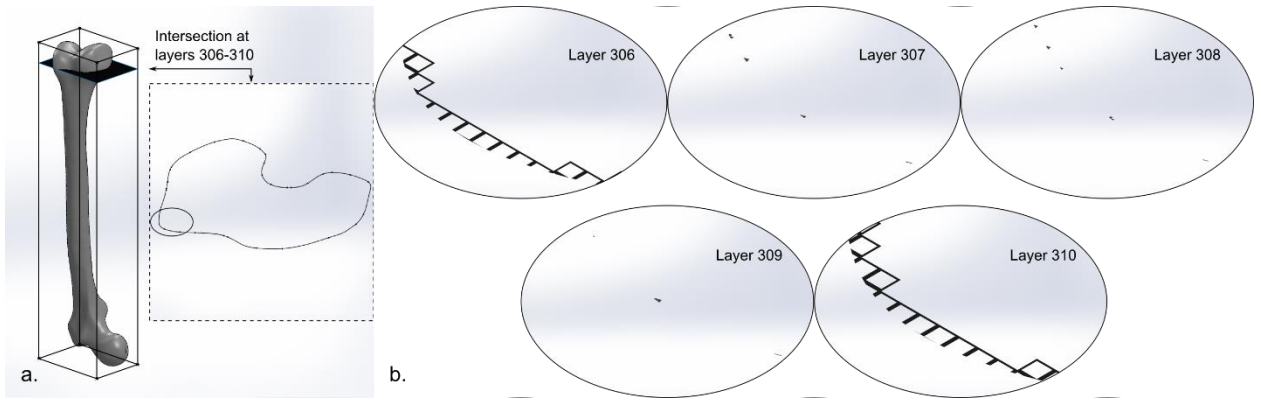


Fig. 3-12 (a) Femur model (b) five LCP on successive layers.

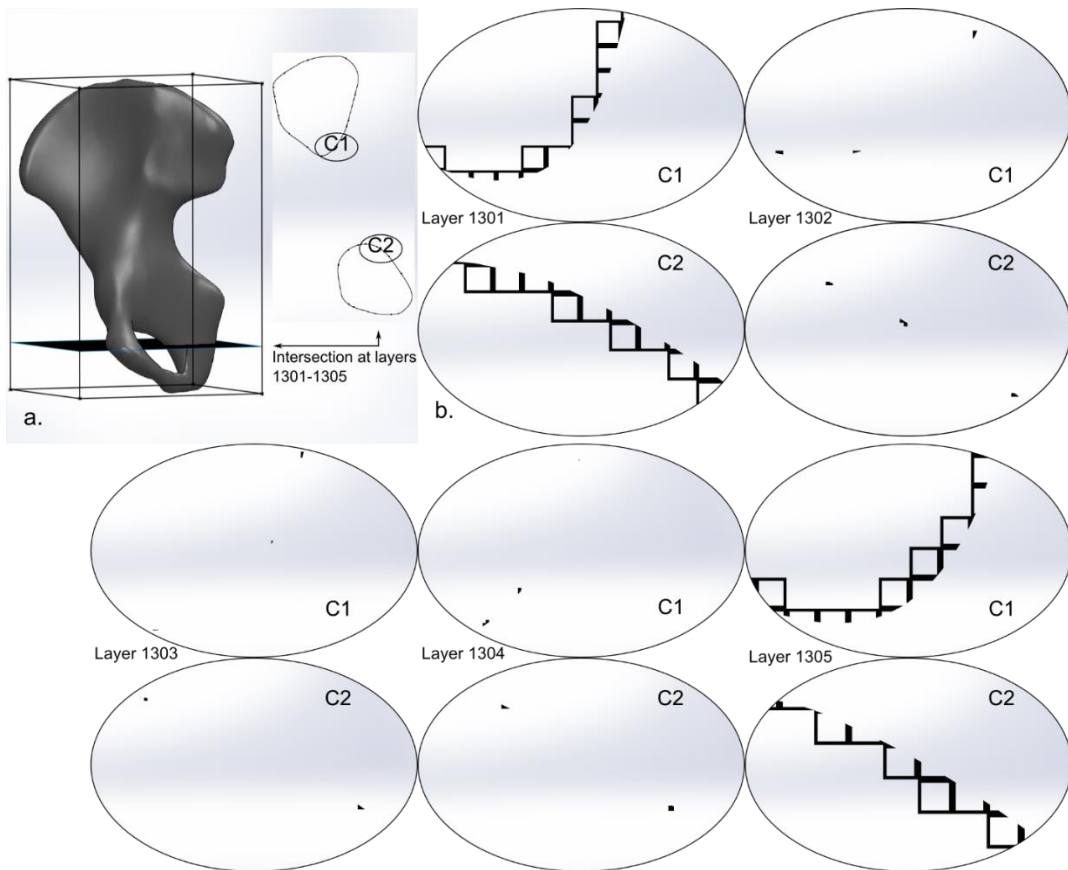


Fig. 3-13 (a) Hip model (b) five LCP on successive layers.

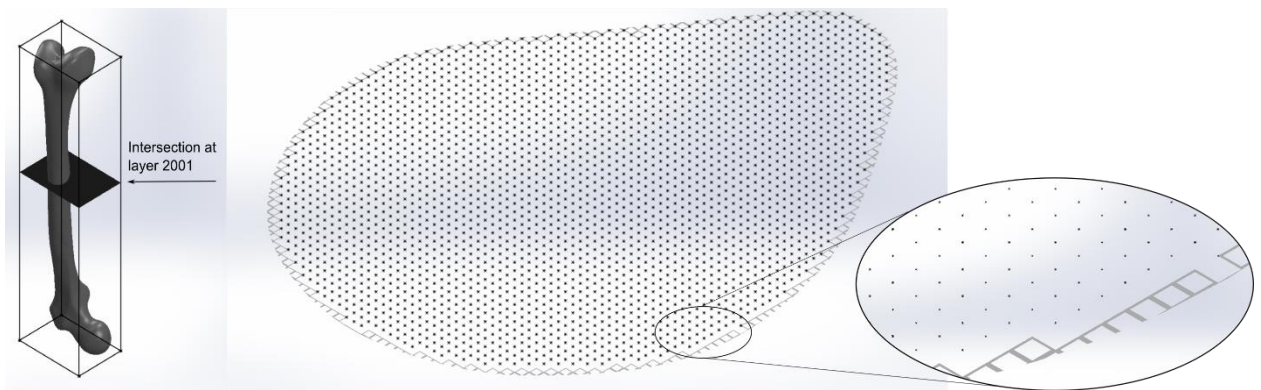


Fig. 3-14 STPI for a femur layer, modeled as Solidworks™ sketch points.



**Table 3-2 Indicative results for two scaffold models (Unit Cell Side Length: 500 $\mu$ m/ Pore Size: 400 $\mu$ m/ Layer Thickness: 100 $\mu$ m).**

<b>Tissue Model</b>	<b>Scaffold Dimensions (mm)</b>	<b>Slices</b>	<b>File Size (MB)</b>	<b>Execution time (min)</b>
Femur	114.26x80.53x468	4677	1300	1980
Hip	85x98.24x153.36	1530	349	840

The second test is executed in order to investigate the influence of layer thickness on total execution time and resulting file size for the hip model. Unit cell is a 1mm square prism with 200  $\mu$ m strut width and 600  $\mu$ m pore size. The results are presented in Table 3-3.

The third test concerns the femur model with 1 mm square prism unit cell, 100  $\mu$ m strut width and 800  $\mu$ m pore size. Four variants of the model are tried, i.e. at 100%, 50%, 20% and 8% uniform scaling of the original dimensions. Results are presented in

Table 3-4.

The fourth test is carried out in order to compare the efficiency between the proposed and the conventional tissue scaffold modeling method. Femur model is scaled down to dimensions that both modeling methods can accomplish. Results are shown in Table 3-5. However, the conventional method is unable to function for large models (compared to unit cell size), i.e. above 30% scaling. Table 3-5 indicates that the proposed method is favored as model dimensions increase within the scaling range 8-30%. Note that this comparison is of limited interest. Indeed, the main interest is for algorithms capable of tackling large models compared to the unit cell size employed, which clearly is not achievable by the conventional method.

**Table 3-3 Impact of layer thickness on file size and execution time. (Hip Model size: 85x98.24x153.36 mm/ Unit Cell Side Length: 1mm/ Pore Size: 600 $\mu$ m).**

<b>Layer Thickness (<math>\mu</math>m)</b>	<b>Slices</b>	<b>File Size (MB)</b>	<b>Execution time (min)</b>
200	760	48.4	185
100	1530	97.2	354
50	3060	194.0	698

**Table 3-4 Impact of model's dimensions on file size and execution time. (Unit Cell Side Length: 1mm/ Pore Size: 800 $\mu$ m/ Layer Thickness: 100 $\mu$ m).**

<b>Femur Model scaled down to:</b>	<b>Slices</b>	<b>File Size (MB)</b>	<b>Execution time (min)</b>
8%	370	0.7	24
20%	940	5.1	90
50%	2339	49.8	368
100%	4677	328.3	855

**Table 3-5 Comparison between conventional and proposed modeling method.**

<b>Femur Model scaled down to:</b>	<i>Conventional</i>		<i>Proposed</i>	
	<b>File Size (MB)</b>	<b>Execution time (min)</b>	<b>File Size (MB)</b>	<b>Execution time (min)</b>
8%	1.5	3	0.7	24
13%	3.0	36	1.9	51
15%	4.1	83	2.7	61
20%	-*	464	5.1	90
30%	-	-	13.6	131

\* Femur scaffold was successfully modeled however, it was impossible to convert it to STL due increased size and complexity.

Even though code execution is time consuming for large tissue models, the approach is off-line, i.e. does not keep the AM machine from processing other parts. Moreover, the process can start or resume from whichever layer the user wants and is open to parallel execution on different PCs. Layer thickness can be varied, if necessary, for just one or for a range of layers, as this may be required for reasons of compatibility with AM equipment or simply for reasons of productivity.

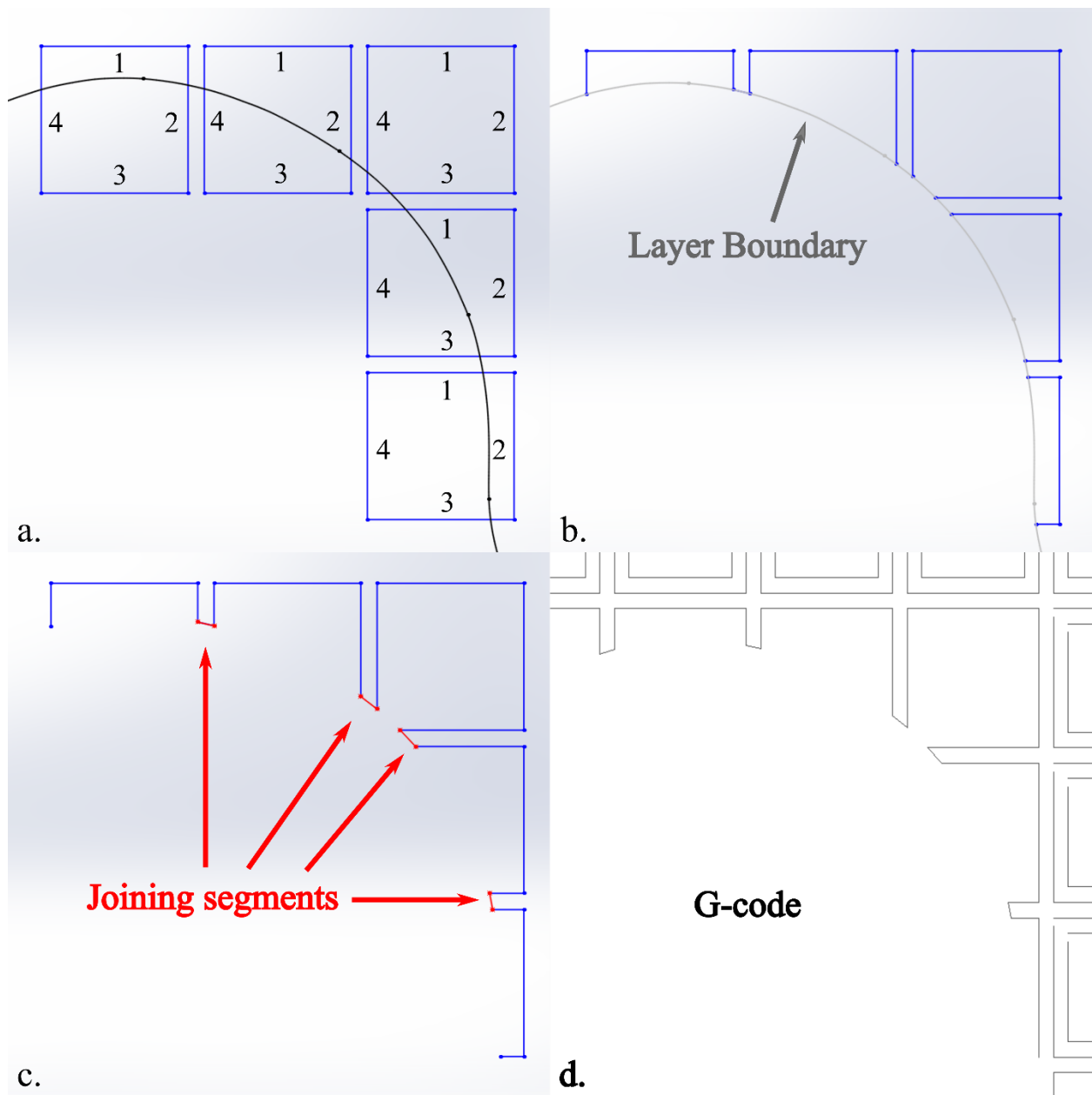
### ***3.4 Manufacturing of porous lattice structure***

The presented solution examines porous structures within the modeling scope; however, it is recognized that a few challenges concerning the transition to manufacturing stage must be overcome. After the successful representation of large and complex CAD model implicitly, the next step involves trajectory generation for manufacturing in an AM system. For this reason, the developed code was updated to accommodate the required changes.

Each layer is divided in two regions: layer internal pattern (LIP) and layer contour pattern (LCP), as already described in section 3.2. The former consists of intact unit cell patterns (resembling a fully closed shape) and they are expressed by a local reference point that pertains to the starting point of the cross-section pattern of the unit-cell. The latter is stored as an STL file of minimal size, representing the contour pattern for each layer. Unfortunately, there is no direct way for separate STL files to be exported as a continuous ready-to-print G-code file by any standard commercial slicer, in order to compose the entire model.

The most challenging yet significant update in the code implementation refers to the G-code generation for the LCP directly from the model, totally omitting STL file. The contour consists of trimmed unit-cell patterns according to the layer's boundary as depicted in Fig. 3-7(b). Although the explicit representation of the contour as a separate STL file was sufficient for solving model representation problem of large and complex porous structure, it was not ideal for efficient trajectory generation in G-code format. In this light, the entire approach was reviewed,

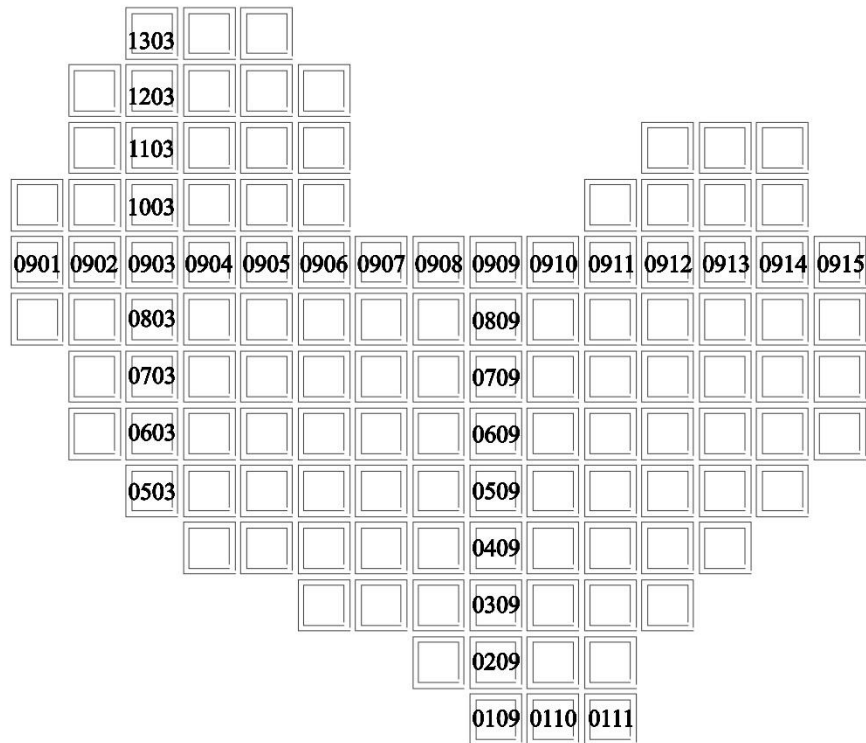
according to the following facts: each square unit cell surface template (CST) consists of line-segments arranged in closed square loop(s) that accurately follow intended nozzle trajectory. The number of closed-loops are arranged as concentric offset, thus defining the unit cells strut width and pore size. In Solidworks™ environment, the line-segments are implemented as two-dimensional sketch entities and they are consistently coded as depicted in Fig. 3-15(a).



**Fig. 3-15** a) Sequential code assignment for each line segment, b) intersection points for each coded line segment, c) joining of neighboring segment pairs with a straight line and d) plot of the exported G-code commands.

Another major change in the implemented code is the utilization of VBA classes and objects for unit cell handling. The “square unit cell” class implements all properties, attributes and functions that are connected to the square CST. Each CST is handled as a separate VBA object, that belongs to the “square unit cell” class, and as a result each CST attributes and properties can be

allocated, registered, modified or used as input to execute pertinent functions. For each CST, the reference position, the pore size and the calculation of the intersection points with the layer's contour are some of the stored characteristics. An additional and crucial object property of all CSTs is the assignment of a unique ID number, as a means of mapping and tracing the relative position of the CST with respect to the others, see Fig. 3-16.



**Fig. 3-16 Identification number for mapping and tracing of internal layer unit cell patterns.**

Returning to the updated intersection method for layer contour pattern (LCP), the face trimming operation, as described in section 3.2.2, is replaced by sketch line-segments. Each line segment is consistently assigned a reference number, see Fig. 3-15(a). Each segment has registered start-point and end-point and is intersected with the layer's boundary, using (RayIntersections) method, in order to calculate intersection points, Fig. 3-15(b). The intersection points as well as the segment's reference number on which the intersection occurred is stored as object property for the CST. It is observed that for neighbouring CSTs there are certain line segments that are paired, i.e. one next to the other, according to their relative position. For instance, when reference is at the upper right CST in Fig. 3-15(a), the possible pairs are:

1. the 3<sup>rd</sup> line segment (reference CST) with the 1<sup>st</sup> line segment (bottom CST).
2. The 4<sup>th</sup> line segment (reference CST) with the 2<sup>nd</sup> line segment (left CST).

Their relative position is explicitly defined from the unique ID number that was discussed in the previous paragraph. Finally, the intersection points that correspond to neighbouring pairs of line segment are connected, Fig. 3-15(c), thus generating a continuous trajectory path that is directly

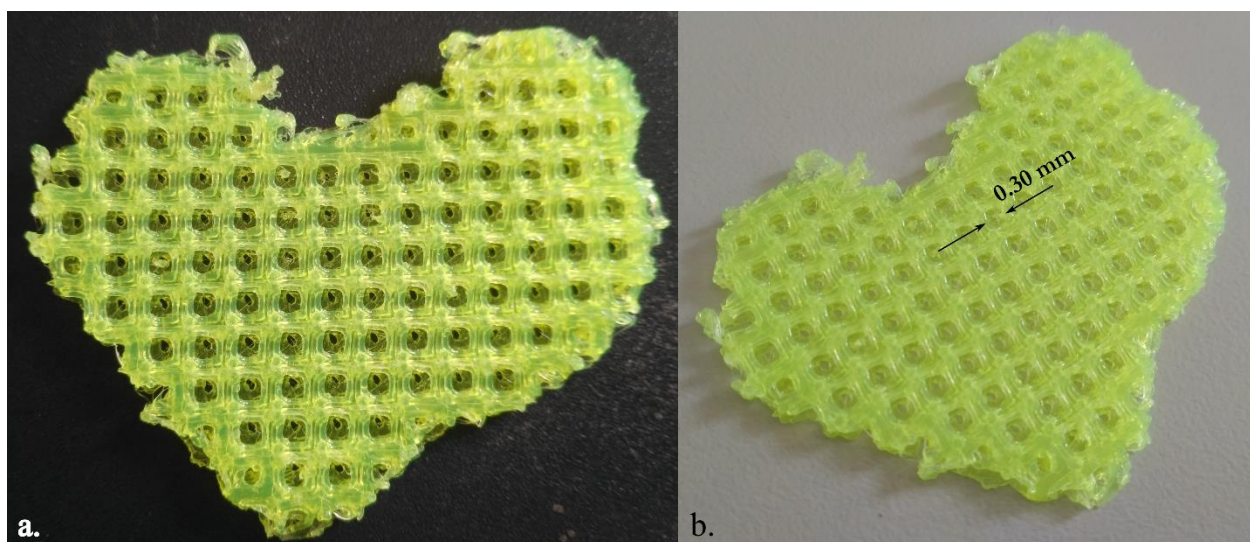


To test exported code, a segment of the femur bone, consisting of ten layers is directly exported, generating G-code instructions for manufacturing on a Material Extrusion AM system (3D Systems™ CubeX), Fig. 3-18. The execution of the G-code was successful throughout the whole printing process and no errors occurred.

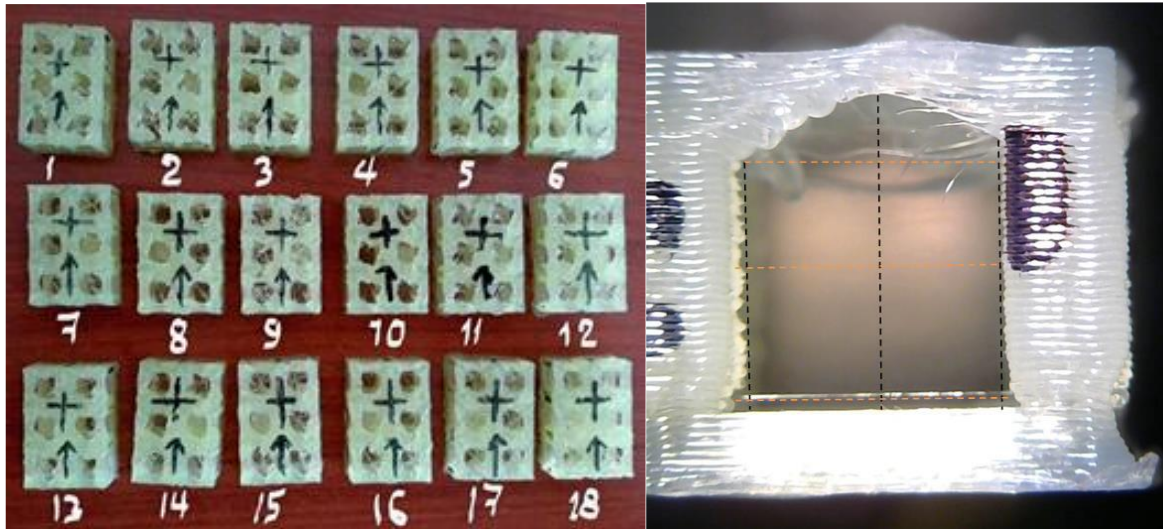
The part is made from PLA. Regarding the quality of the part, it is observed in Fig. 3-18, the outline of the bone segment is rough and with mediocre shape sharpness. This is mainly attributed to lack of optimisation regarding the printing settings. In addition, the short-length segments that compose the layer's contour pattern are challenging to deposit in general.

Regarding the part's interior, the pores are open when observing the part from the top, Fig. 3-18(a), and almost closed at the bottom. This is because of squished material on the base, due to the loading of the newly deposited material. Another, reason may be increased printing temperature that facilitates base bulging defect. A thin rod was used to verify interconnectivity among the pores. The result was encouraging since most of them were connected, whilst in most cases where blocked pores were found these were located on the contour. All above issues pertain mainly to lack of process optimisation and the challenging task of designing optimal paths for the trimmed pores that are located on the layer's contour.

A follow-up study, performed by Filippidis et al. [164], utilized the same code to print and test dimensions of the pores as well as to verify the capability of fabricating bridges in ME, see Fig. 3-19. Due to the free-form shape and the defects that were likely to occur, stereoscope and image-based measurement methods were employed. The dimensions of the pore, as well as the quality of bridging on the top was optimised using Taguchi design of experiments method, coupled with grey relational analysis for the optimisation of multiple objectives.



**Fig. 3-18** Direct export of G-code for femur bone segment, that is manufactured on a ME system.



**Fig. 3-19 a) Pore quality optimisation experiment and b) assessment of bridging capability for porous lattice specimens.**

### ***3.5 Discussion***

The proposed algorithm provided a solution against CAD software inadequacy to model complex porous objects three-dimensionally with an aim to manufacture them following the AM paradigm. The implementation of the developed algorithms on tissue-engineering scaffolds, which are typical paradigms of complex porous objects, was successful.

The implicit representation and the direct generation of the trajectory allow for a faster and more efficient algorithm for large tissue models. Execution time depends on the number of layers that form the scaffold in combination with the model's size. A micro level pore size was selected in order to test the code's capability according to real scaffold design challenge. The proposed method has successfully dealt with large scaffold models of high complexity that could not be modelled via the conventional method.

The developed algorithm is flexible, in terms of the variety of unit cells and tissue models that can be handled, layer thickness, as well as in terms of the ability to separate the layer filling task in segments for parallel execution on different computers. Code-user interaction is easy and comprehensive via simple user interfaces and since this is an automated procedure, user input is necessary only during initial setting of process parameters. The proposed design approach is suitable for structures with equally-sized pores that are placed periodically.

The implemented code was substantially updated to its third version, where total independence from STL is achieved and hence G-code can be directly exported and loaded on an extrusion-based AM system for fabrication. The utilization of VBA objects and classes provides great



flexibility to further expand functionality and easily integrate new unit cell shapes to the main algorithm. The functions that are included in the unit cell VBA class, parameterize the characteristics of the unit cell objects, for which the trajectory will be exported in G-code. Different attributes can be given to individual unit cells with respect to its location and their pore size, even on the same layer. In this way, the code could be applicable to functionally graded porous structures as an immediate next step [165]. Furthermore, due to mapping capability of individual unit cell, alternative tool-path arrangements could be employed, targeting more efficient temperature distribution during manufacturing.

To verify manufacturability and validity of the exported trajectory a small porous segment was manufactured. The functionality of the G-code was verified, the trajectory ran smoothly with the employed 3d-printer and a part was successfully printed. The visual verification, revealed deviation in the shape and the dimension of the pores thus affecting interconnection of the unit cells. This was the initiative to focus the research work on optimizing the extrusion-based AM process in order to control quality of parts, keeping the resulting product within specifications.



# 4

## *Defect-free material extrusion*

### *4.1 Process operational window*

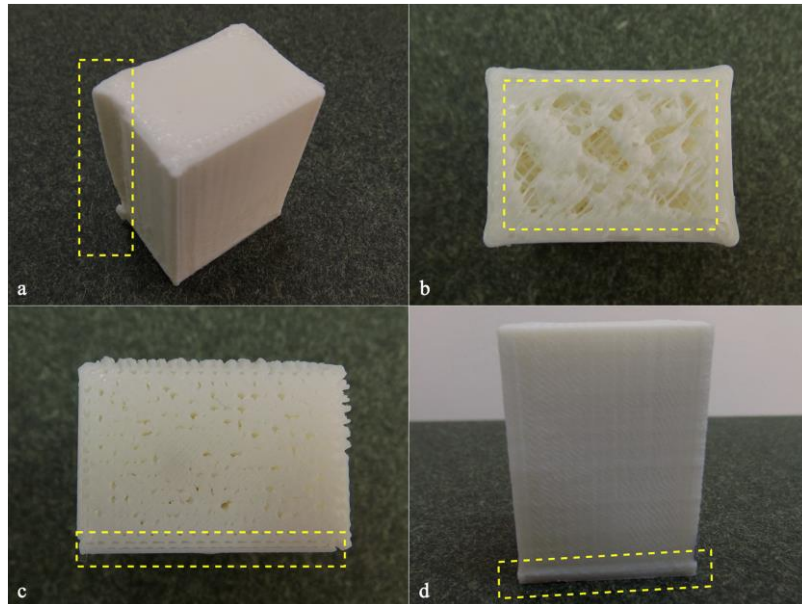
This chapter presents a methodology for exploring material extrusion of a 3D printer over a wide operational range of user selectable process parameters in order to identify its capability in terms of part shape fidelity. Herein shape fidelity (SF) refers to the material extrusion stability that ensures flatness during fabrication of outer surfaces and safeguards their integrity from defect formulation throughout fabrication process. Taguchi design of experiments is robustly planned to estimate, not only the effect of each factor on shape fidelity separately, but also the interactions between process parameters, which are typically overlooked or assumed of low impact on the result. An artificial neural network (ANN) is trained to fit through a minimal number of experimental data, covering inherent Taguchi method's inability to optimize response on the entire range of investigated parameter levels.

### *4.2 Motivation and concept*

Preliminary 3D printing experiments led to the observation that fabrication under specific process parameter settings induced heavy shape deformation. Shape deformation is correlated to material properties and composition [166, 167], extrusion inefficiencies [27] and residual stresses developed due to non-uniform cooling of the fabricated part [96]. Residual stresses may induce part warpage, which is further facilitated by poor adhesion on the build platform [168], and results in deformed part shape. These facts triggered the need for a decision-making tool to predict unacceptable part shape before proceeding to actual fabrication and move towards right-the-first-time fabrication strategy. The following defects have been identified, see Fig. 4-1 and also [41], and termed accordingly:

- deformed edges (DE)
- under-extrusion (UE)
- weak fiber bonding (WFB) and
- base bulging (BB)

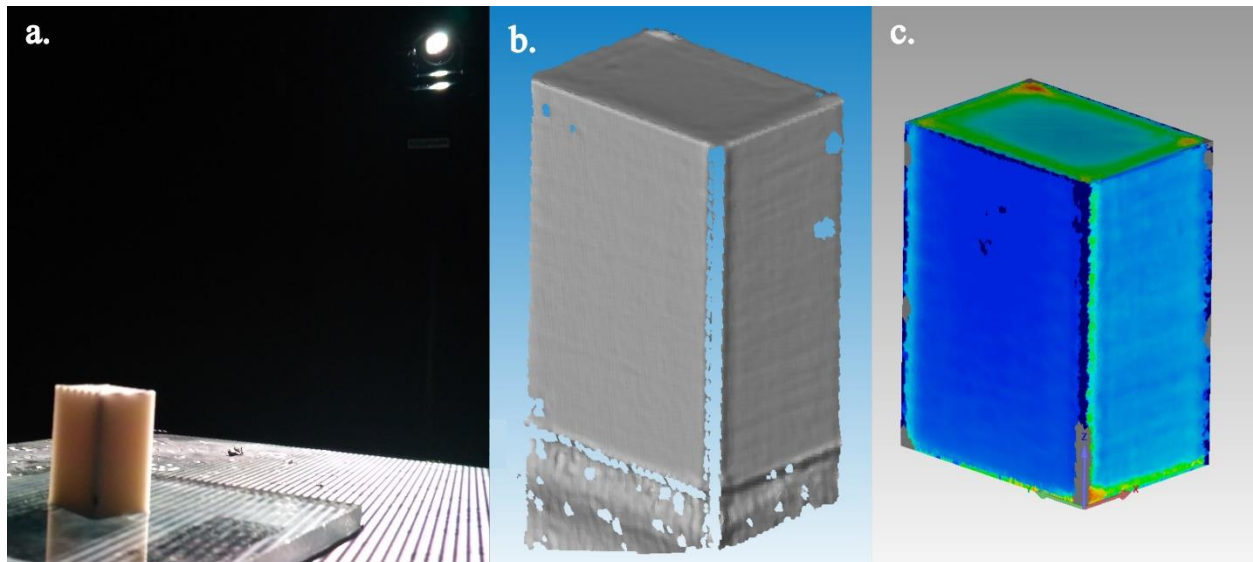
Under specific setting combinations, these defects are so pronounced that they render a fabricated part a priori non-functional.



**Fig. 4-1 Material extrusion defect types (a) deformed edges (DE)(b) under-extrusion (UE)(c) weak fiber bonding (WFB)(d) base bulging (BB).**

Thus, the methodology advocated consists of a series of experiments to investigate the influence of a number of factors on shape fidelity on any specific 3D printer. Factors are selected according to their pertinence to the 3D printer at hand. In the experiment, factor level ranges are intentionally broadened in order to reveal the extent up to which part shape is acceptable. Actual parts are reverse engineered as a series of point clouds utilizing white light 3D scanning technology [169]. The derived model is overlaid by the nominal CAD model and point-to-point comparison is conducted, see Fig. 4-2. Standard deviation within the point-to-point comparison indicates variation in fabrication consistency of the specimen's surfaces and therefore is adopted as performance response throughout the experiment.

The chapter is structured as follows: section 4.3 describes in detail the developed methodology and the process parameters that are investigated via Taguchi DoE. In Section 4.4 the experiment results for shape fidelity are presented and discussed in an attempt to correlate parameter setting effects with respect to the underlying process physics. In Section 4.5, the prediction ability of the proposed ANN on new factor levels is verified and the optimum settings to compromise shape fidelity and increased productivity are presented. In section 4.6 the main achievements of this work as well as the limitations are summarized.



**Fig. 4-2 Reverse engineering (a) white light scanning (b) model generation (c) comparison between actual and reference model.**

## ***4.3 Methodology***

### ***4.3.1 Equipment and materials***

A rectangular prism of dimensions 20 mm x 28 mm x 38 mm (LxWxH) is designed in Solidworks™, see Fig. 4-3. Specimen is fabricated from PLA with filament diameter of 1.75 mm, supplied by 3D Prima™. To avoid the need of support material it was decided to fabricate specimen in the printing orientation as in Fig. 4-3. A low-cost material extrusion system was employed, namely 3D Systems™ CubeX. Process parameters were set in Kisslicer™ software generating tool-paths in G-code format to drive the 3D printer. Other constant factors include extruding temperature set at  $T=195^{\circ}\text{C}$ , cooling fans operating at 100% and 50% of their duty-cycle during perimeter and infill fabrication, respectively, and percentage infill density  $p$  set to 50%. Reverse engineering of the actual parts is realized by IMetric™ IScan M300 3D scanning equipment. Best-fit algorithm provided in Geomagic™ software is employed to compare actual and reference models. A 20000-point sample is used for comparison, covering approximately one-third of the generated point cloud for each specimen.

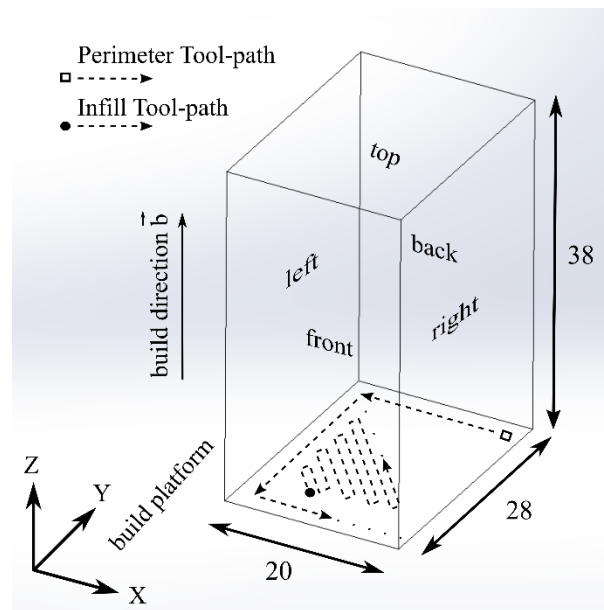


Fig. 4-3 Designed specimen for the experiment.

#### 4.3.2 Process parameters examined

Four process parameters are investigated as control factors, pertaining to the 3D printer used:

- Layer Thickness (LT), representing the distance between the tip of extrusion nozzle and the build platform, on which material is deposited, as well as the thickness between adjacent layers.
- Flow Tweak (FT), essentially modifying material flow, inducing percentage changes in strand width. FT value equals to 1.00 when strand width corresponds to nominal nozzle diameter, in this case  $d_n=0.50\text{ mm}$ .
- Printing Speed (PS), determining nozzle velocity during fabrication on the horizontal X-Y plane. It is user-defined as a single value in the range of 0-100, which is automatically registered by the slicing software to G-Code to three different speed profiles corresponding to three tool paths: perimeter, infill and sparse infill, see Fig. 4-3 and Table 4-1, according to user-defined infill percentage  $p$ , see section 4.3.1.
- Orientation ( $O_z$ ), representing part rotation about Z axis, noting that it has been hardly investigated in existing literature.

Three levels are selected for each factor. LT level range is selected according to minimum and maximum values set by the printer's manufacturer, in this case:  $LT_{\min}=0.10\text{ mm}$  and  $LT_{\max}=0.40\text{ mm}$ . Inequality  $LT_{\max} < d_n$  is always respected, otherwise strand cross-section becomes circular, gradually degenerating adhesion region between strand and substrate to a line of minimum width, which makes material adhesion impossible [53]. FT levels represent the percentage variation of deposited strand width, 1.00 corresponding to nominal nozzle diameter  $d_n$ . According to the authors' experience, practical FT values typically lie near nominal  $d_n$ . Furthermore, a detailed study in [45] describes how the  $LT/(FT*d_n)$  ratio determines the cross-section shape of the deposited strand producing varying results by adjusting those factors. Hence,

FT factor is explored over a sufficiently wide range between  $0.80d_n$  –  $1.20d_n$ . For PS factor, actual velocity set for perimeter, solid infill and sparse infill pattern is indicated in parentheses, see Table 4-1 and Fig. 4-3.  $O_z$  levels denote front face rotation around Z-axis; thus, deposition angles are selected to investigate linear interpolation for single axis function at  $0^\circ$  and for simultaneous two-axis function at  $22^\circ$  and  $45^\circ$ , see Fig. 4-3. Support structure is not necessary regardless the different  $O_z$  levels.

Deposition strategy of material strands is expected to impact shape fidelity. Note that the product of factors LT, FT and PS represents flow rate Q which is practically the volume of deposited material per unit time. As a result, these factors are reasonably considered to influence the part's outer profile and to contribute, to some extent, to the formation quality of external surface. Flow rate is limited by nozzle diameter, material viscosity, and slippage between extruder gear and solid filament. On the other hand, LT and PS directly affect fabrication time.

**Table 4-1 Factors and levels included in the experiment.**

Factors	LT (mm)	FT	PS	$O_z$ ( $^\circ$ )
Level 1	0.10	0.80	0 (10.00-15.00-30.00 mm/s )	$0^\circ$
Level 2	0.25	1.00	50 (40.00-45.00-55.00 mm/s)	$22^\circ$
Level 3	0.40	1.20	100 (70.00-75.00-80.00 mm/s)	$45^\circ$

### 4.3.3 Taguchi DoE

Taguchi DoE method [170] is employed to plan the experiments. It is a well-established statistical tool, widely used to improve material extrusion process [75, 171, 172]. Taguchi method involves registering selected factors in specially designed 'standard' orthogonal arrays (OA) in a systematic way dictated by linear graphs. Orthogonality ensures that factors (independent variables) are uncorrelated and hence the effect a factor is not biased by the effect of another factor to the response (dependent variable). Different settings of a factor are considered as factor levels. Existence of interaction between two factors, A and B, implies that the level setting for factor A alters the way in which factor B impacts the measured response. The number of factors, the levels of each factor and the interactions between factors that the user intends to investigate possess certain degrees of freedom (DoF). Each Taguchi OA has certain DoF that must be equal to or higher than the sum of factors and interactions. Therefore, the OA size, the total number of required trials and consequently the design resolution [173], are determined. Design resolution of value IV is at least required to estimate 2-factor interactions with reliability. Registering factors in OA according to linear graphs alleviate confounding effect

among factors, which is the inability to clearly determine each factor's impact on the measured response. Measured response of the designated performance criterion is the outcome of each trial and is expressed as the signal-to-noise ratio (SNR). For different applications, measured response needs to be minimized, as in Eqn. (4-1), to be maximized, as in Eqn. (4-2), or to achieve a target-value, as in Eqn. (4-3). SNR is calculated accordingly and for every case the highest SNR reveals the optimum factor combination.

In the present work 'minimum-the-best' response equation is utilized for shape fidelity.

$$SNR = -10 * LOG \left( \sum_{i=1}^n (Y_i^2) / n \right) \quad (4-1)$$

$$SNR = -10 * LOG \left( \sum_{i=1}^n (1/Y_i^2) / n \right) \quad (4-2)$$

$$SNR = 10 * LOG \left( (Y_{mean}) / \sigma^2 \right) \quad (4-3)$$

where,

$n$  : total number of measurements

$Y_i$  : measured response

$Y_{mean}$ : mean of observations  $Y_i$

$\sigma^2$ : variance of observations  $Y_i$

The significance and contribution of each factor and interaction to the response is calculated by ANOVA method which commonly couples with Taguchi analysis for increased reliability. In this work, all Taguchi and ANOVA calculations were performed on Minitab™ software.

#### 4.3.4 Artificial Neural Network

Artificial neural networks (ANN) are highly appreciated performance prediction tools that are widely used for manufacturing processes where nonlinearities and complex phenomena cannot be analytically described, such as AM processes [112]. They consist of a network of interconnected processing elements called neurons, located across the input, hidden and the output layers. The output of each neuron is multiplied by a weight, and all weighted outputs forming the input to another neuron are summed up and processed by an activation function. ANN involves identification of the different weights by a special optimisation algorithm working on an adequate number of training examples, i.e. inputs and corresponding outputs. ANN performance is judged not only by its training error, but primarily by its generalization error, i.e. its ability to predict outputs corresponding to inputs that have not been used in the training process.

In this work the results of the Taguchi experiments are used as ANN inputs and outputs. A focused ANN is preferred [174] including only the significant factors as input as identified by ANOVA. The ANN is trained by a subset of 15 input-output vectors, i.e. 56% of the total number of vectors. Two equally divided subsets of 6 inputs each are utilized for validation and testing. The “early-stopping” technique terminates ANN training once validation error begins to increase [175], hence minimizing training time and protecting against over-fitting. Over-fitting implies that the ANN is accurately trained on the training subset, memorizing also the noise that is induced by the experimental data and therefore resulting in poor generalization ability. A plethora of ANN training parameters led to decide for a systematic way to obtain the most reliable network. According to [176–178] five fundamental ANN parameters are distinguished, namely number of neurons (NN), number of hidden layers (HL), activation function (AF), learning rate (LR) and momentum constant (MC), see Table 4-2. A MATLAB™ script was developed to randomly initialize weights and iteratively train the ANN until training, validation and testing mean squared error (MSE) fall below  $10^{-2}$ . Errors (RMS) among training, validation and testing subset should not vary excessively in order to avoid over-fitting or extrapolation issues [179] and therefore a pertinent condition to restrict error range among the three subsets is also supplied to the script.

In order to drastically reduce the total possible combinations in ANN training process, an L18 mixed-level OA is employed to identify the optimum ANN settings with respect to Taguchi DoE principles, see Table 4-3.

**Table 4-2 ANN training parameters and their investigated levels.**

Factors	Neurons	Hidden Layers	Activation function	Learning rate	Momentum constant
Level 1	2	1	Linear (LN)	0.001	0.1
Level 2	4	2	Tan-Sigmoid (TS)	0.005	0.5
Level 3	6	3	Log-Sigmoid (LS)	0.01	0.9
Level 4	8				
Level 5	10				
Level 6	12				

Table 4-3 L18 for ANN training.

Trial	Neurons	Hidden Layers	Activation function	Learning rate	Momentum constant	Response
1	2	1	Linear (LN)	0.001	0.1	0.217
2	2	2	Tan-Sigmoid (TS)	0.005	0.5	0.099
3	2	3	Log-Sigmoid (LS)	0.010	0.9	0.098
4	4	1	Linear (LN)	0.005	0.5	0.223
5	4	2	Tan-Sigmoid (TS)	0.010	0.9	0.069
6	4	3	Log-Sigmoid (LS)	0.001	0.1	0.072
7	6	1	Tan-Sigmoid (TS)	0.001	0.9	0.096
8	6	2	Log-Sigmoid (LS)	0.005	0.1	0.078
9	6	3	Linear (LN)	0.010	0.5	0.222
10	8	1	Log-Sigmoid (LS)	0.010	0.5	0.095
11	8	2	Linear (LN)	0.001	0.9	0.224
12	8	3	Tan-Sigmoid (TS)	0.005	0.1	0.089
13	10	1	Tan-Sigmoid (TS)	0.010	0.1	0.066
14	10	2	Log-Sigmoid (LS)	0.001	0.5	0.095
15	10	3	Linear (LN)	0.005	0.9	0.219
16	12	1	Log-Sigmoid (LS)	0.005	0.9	0.092
17	12	2	Linear (LN)	0.010	0.1	0.222
18	12	3	Tan-Sigmoid (TS)	0.001	0.5	0.100

The response for each experiment includes testing error RMS which is calculated according to Eqn. (4-4). Optimum levels are used to train the proposed ANN.

$$RMSE_{test} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - x_i)^2} \quad (4-4)$$

where,

$n$ : the number of experiment trials included in the testing subset

$t$ : the target value according to experiment results

$x$ : the predicted value from the trained ANN



## 4.4 Experimental results

### 4.4.1 Shape fidelity

The complex nature of material extrusion process requires investigation of 2<sup>nd</sup> order interactions between factors: LTxFT, LTxPS and FTxPS. Thus, L27 OA is selected, as it requires the minimum possible number of trials whilst still keeping design resolution at level IV. Experiment runs and results regarding shape fidelity (SF) of fabricated specimens are presented in Table 4-4. SF value is calculated as the standard deviation of the point cloud that represents specimen surfaces in comparison to the reference CAD model. The higher the standard deviation the lower is the flatness of the outer surface of the fabricated specimen. Furthermore, the appearance of surface defects further contributes to the increase in standard deviation. Hence, response pursued is of the type ‘the minimum-the-best’, see Eqn. (4-1). Graphs in Fig. 4-4(a) provide an overview regarding the effect of individual factors on SF and are briefly explained next.

Reducing PS from 100 to 50 drastically improves SF; however, a turning point is present for settings below 50. High PS setting causes material deposition inconsistency. This relates to the higher angular velocity of the extruder motor in order to meet the demand for larger material volume per unit time. Higher motor velocity develops higher pressure, applied from the solid filament to the material melt in the nozzle resulting in the so-called ‘die swell’ phenomenon [27]: material melt swelling is guided by the build platform to expand radially. In addition, higher flow rate imposed by high PS setting deposits excessive material at the 90° corners of each layer where acceleration/deceleration of the moving gantry is required in order to change motion direction [61]. Without adjusting acceleration and jerk settings in the firmware of the material extrusion system, flow rates over a critical limit cause severe DE defect, see Fig. 4-1(a).

Regarding LT factor, the lower the layer thickness the more precise the part shape, although LT values above 0.25 mm present only slight deterioration according to corresponding SNR values, see Table 4-4. FT presents minor effect on the response when it is separately investigated, delivering a better result when it matches nozzle diameter. In addition, FT setting below nominal nozzle diameter is connected with WFB defect which causes insufficient bonding between adjacent material strands resulting in poor mechanical properties [41]. Similarly, variations in Oz level are not expected to significantly contribute to the result.

**Table 4-4 L27 orthogonal array with results on shape fidelity (SF) and flow rate (Q).**

<b>Trial</b>	<b>LT (mm)</b>	<b>FT</b>	<b>PS</b>	<b>Oz (°)</b>	<b>StDev X</b>	<b>StDev Y</b>	<b>StDev Z</b>	<b>SF (SNR)</b>	<b>Q (mm<sup>3</sup>/s)</b>
1	0.10	0.80	100	0	0.104	0.071	0.067	21.674	2.80
2	0.10	0.80	50	22	0.073	0.130	0.092	19.904	1.60
3	0.10	0.80	0	45	0.200	0.110	0.108	16.725	0.40
4	0.10	1.00	100	22	0.082	0.081	0.076	21.989	3.50
5	0.10	1.00	50	45	0.067	0.051	0.041	25.358	2.00
6	0.10	1.00	0	0	0.272	0.128	0.114	14.635	0.50
7	0.10	1.20	100	45	0.232	0.192	0.189	13.756	4.20
8	0.10	1.20	50	0	0.059	0.071	0.082	22.927	2.40
9	0.10	1.20	0	22	0.087	0.100	0.036	22.011	0.60
10	0.25	0.80	100	22	0.092	0.091	0.254	15.679	7.00
11	0.25	0.80	50	45	0.145	0.090	0.049	19.789	4.00
12	0.25	0.80	0	0	0.107	0.147	0.082	18.768	1.00
13	0.25	1.00	100	45	0.148	0.199	0.385	11.553	8.75
14	0.25	1.00	50	0	0.086	0.068	0.079	22.182	5.00
15	0.25	1.00	0	22	0.074	0.092	0.075	21.867	1.25
16	0.25	1.20	100	0	0.210	0.300	0.263	11.695	10.50
17	0.25	1.20	50	22	0.097	0.096	0.108	19.935	6.00
18	0.25	1.20	0	45	0.065	0.088	0.042	23.432	1.50
19	0.40	0.80	100	45	0.258	0.175	0.243	12.826	11.20
20	0.40	0.80	50	0	0.083	0.091	0.117	20.165	6.40
21	0.40	0.80	0	22	0.085	0.146	0.085	19.242	1.60
22	0.40	1.00	100	0	0.228	0.163	0.212	13.859	14.00
23	0.40	1.00	50	22	0.097	0.082	0.087	21.055	8.00
24	0.40	1.00	0	45	0.079	0.091	0.072	21.838	2.00
25	0.40	1.20	100	22	0.203	0.256	0.179	13.351	16.80
26	0.40	1.20	50	45	0.086	0.080	0.175	18.312	9.60
27	0.40	1.20	0	0	0.061	0.075	0.061	23.642	2.40

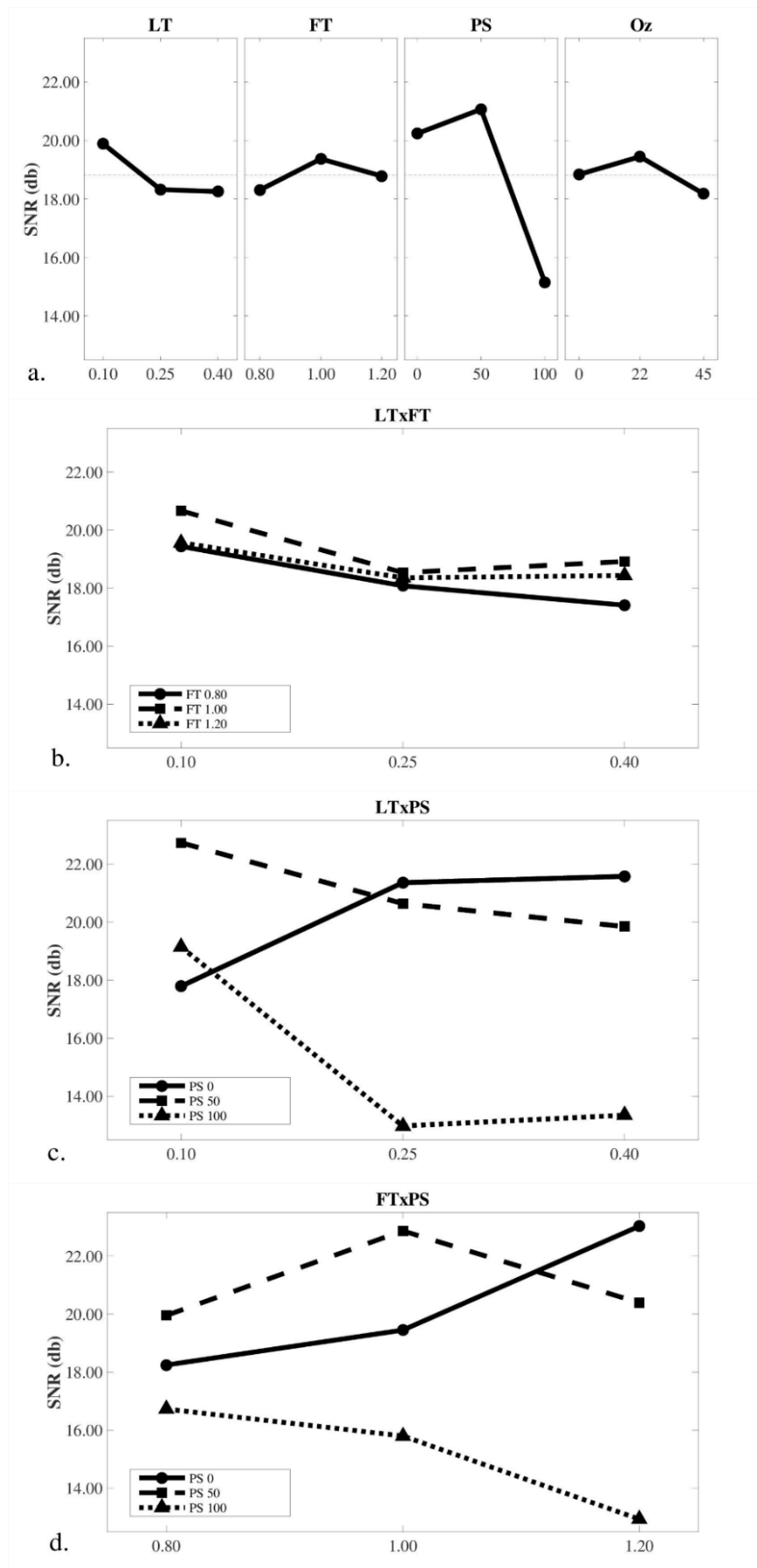
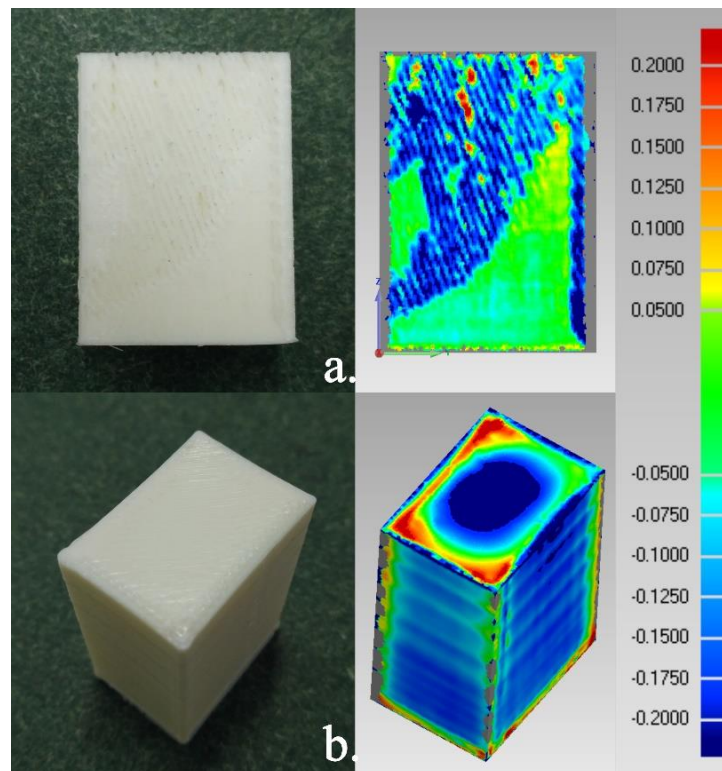


Fig. 4-4 Main effects for shape fidelity expressed in SNR for (a) Individual factors (b) LTxFT interaction (c) LTxPS interaction (d) FTxPS interaction.

As far as factor interactions are concerned, referring to LTxFT graph in Fig. 4-4(b), nearly-parallel curves are noticed and as a result it is assumed that no interaction exists between them.

Referring to LTxPS graph in Fig. 4-4 (c), it is observed that reducing LT while setting PS to minimum cause the part shape to deteriorate. Extruder motor is commanded to provide low material volume per second and consequently lower force is applied from the solid filament to the melt. Hence, extrusion is prevented by the friction between melt material and the nozzle bore, caused by the increased viscosity of the polymer melt due to shear thinning behavior of the material [28]. On the other hand, when the highest deposition speed is coupled with the thickest layer, demand for material rises beyond extrusion limits, resulting in obvious UE defect in the form of holes on specimen's top face, see Fig. 4-1(b).

FTxPS interaction graph in Fig. 4-4(d) reveals an interesting convergence between FT settings above nozzle diameter and PS levels between settings 0 and 50. Increased strand width is capable of producing improved shape quality when combined with lower deposition speed, aiding at the same time inter-filament bonding. UE defect, appearing as visible roughness on specimen's lateral faces, see Fig. 4-5(a), derives from combinations of lower LT, lower FT and lower PS settings. However, once deposition speed is increased the strand width should be set closer to nozzle diameter in order to avoid over-extrusion and material flooding on horizontal layers, see Fig. 4-5 (b).



**Fig. 4-5 a) Effect of material under-extrusion on lateral face and b) over-extrusion causing material flooding effect on top face.**

WFB defect develops under low settings FT (=0.80 and 1.00), resulting in poor mechanical properties. The problem is rectified as soon as the aforementioned FT settings are coupled with high PS and/or high LT settings. In practice, FT settings define material strand width and, therefore, they relate to the size of air gap between adjacent strands that impacts the bonding quality across the layer.

In Table 4-5, factors and interactions are quantified as the percentage contribution to the measured response using ANOVA at significance level 95%, indicating that factors and interactions are insignificant when P-Value>0.05. Taguchi technique suggests to pool low-contribution sources until error DoF becomes approximately half of OA DoF [170]. In this case, LTxFT interaction whose contribution is below 1%, is eliminated.

**Table 4-5 ANOVA results for shape fidelity at 95% significance level.**

Source	Deegres of Freedom	Sum of Squares	Contribution (%)	F-Value	P-Value
LT	2	15.347	3.62	1.71	0.229
FT	2	5.098	1.20	0.57	0.583
PS	2	184.678	43.53	20.63	0.000
Oz	2	7.282	1.72	0.81	0.471
LTxFT <sup>a</sup>	-				
LTxPS	4	96.762	22.81	5.40	0.014
FTxPS	4	70.299	16.57	3.93	0.036
Error	10	44.756	10.55		
Total	26	424.224	100.00		

<sup>a</sup> Pooled factor

#### 4.4.2 Material flow rate

Factors LT, FT and PS determine the required material volume per time unit as:

$$Q = LT * FT * d_n * PS \quad (4-5)$$

where PS values correspond to actual nozzle speed values during perimeter fabrication, see Section 4.3.2. Flow rate  $Q$ , see Table 4-4, blends factors LT, FT and PS into a single value and according to the observations listed in Section 4.4.1, quantifies the lowest and highest critical flow rate limits  $Q_l$  and  $Q_h$ , outside which defects are likely to develop and shape fidelity is not preserved. To determine the aforementioned limits, standard deviation below 0.1 mm for all

specimen surfaces is assumed as the critical value, which corresponds to  $SNR_{cr}=20.0$  db. Among level combinations which yield SNR value over  $SNR_{cr}$  in Table 4-4,  $Q_l = 0.60$  mm<sup>3</sup>/s and  $Q_h = 6.40$  mm<sup>3</sup>/s flow rate limits are determined, corresponding to the 9<sup>th</sup> and the 20<sup>th</sup> specimen, respectively. However, it is noted that in specimens fabricated within those limits defects or poor flatness may also emerge.

#### ***4.5 Shape fidelity and material flow rate optimisation***

A known limitation of Taguchi method is that the derived optimum level combination refers to levels that are already included in the experimental design. In addition, referring to limitations explained in Section 4.4.2, it is important to construct a continuous mapping between factor level combinations and response in order to avoid defect formulation and unstable material deposition. To overcome these problems, optimum 3D printer settings are better to select by developing a tool with lower granularity than Taguchi charts, i.e. an ANN in order to map shape fidelity along the entire material extrusion factor range. In addition, material flow rate that each combination yields, is also obtainable, and therefore the decision over shape fidelity and productivity is facilitated. Thus, optimisation is based on examining the entire range of parameters, evaluating all possible combinations by using the ANN as a response calculation tool. The proposed ANN is trained under optimum settings determined after Taguchi experiment conduction, as already presented in Section 4.3.4, see also Table 4-3. The pertinent analysis of means is depicted in Fig. 4-6. ANN parameter levels that minimize  $RMSE_{train}$  in Eqn. (4-4) are read off Fig. 4-6 charts and adopted accordingly. Therefore, the trained ANN consists of 2 hidden layers with 4 neurons in each layer. Tan-sigmoid activation function is selected, learning rate is set at 0.01 and momentum constant is set at 0.1. The efficient and fast Levenberg-Marquardt training algorithm is employed. Material extrusion factor levels and shape fidelity response are normalized to the same scale in order to serve as input and target values for the ANN, respectively.

A set of five untrained level combinations is fed to the trained ANN in order to evaluate its prediction ability. The levels are intentionally selected to fall intermediately within the factor range. Training and generalization performance results are quite satisfactory, see Table 4-6, mean prediction error being 6.57% with standard deviation of 3.75.

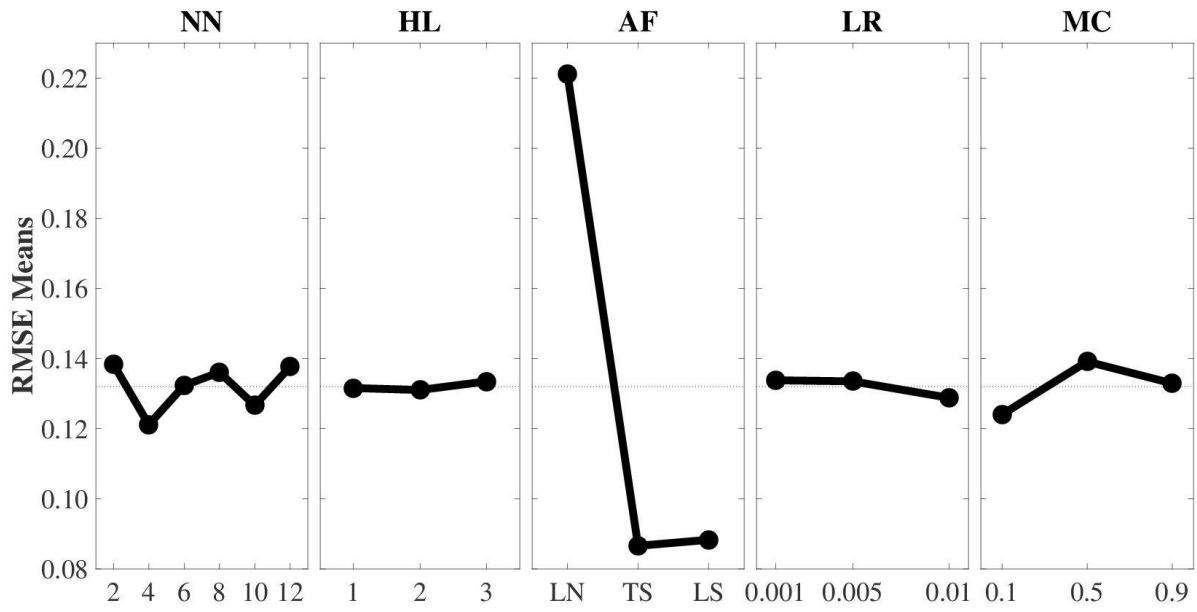


Fig. 4-6 Analysis of means to obtain optimum ANN training parameter levels with respect to root mean square error (vertical axis).

Table 4-6 Training and performance results for the proposed ANN.

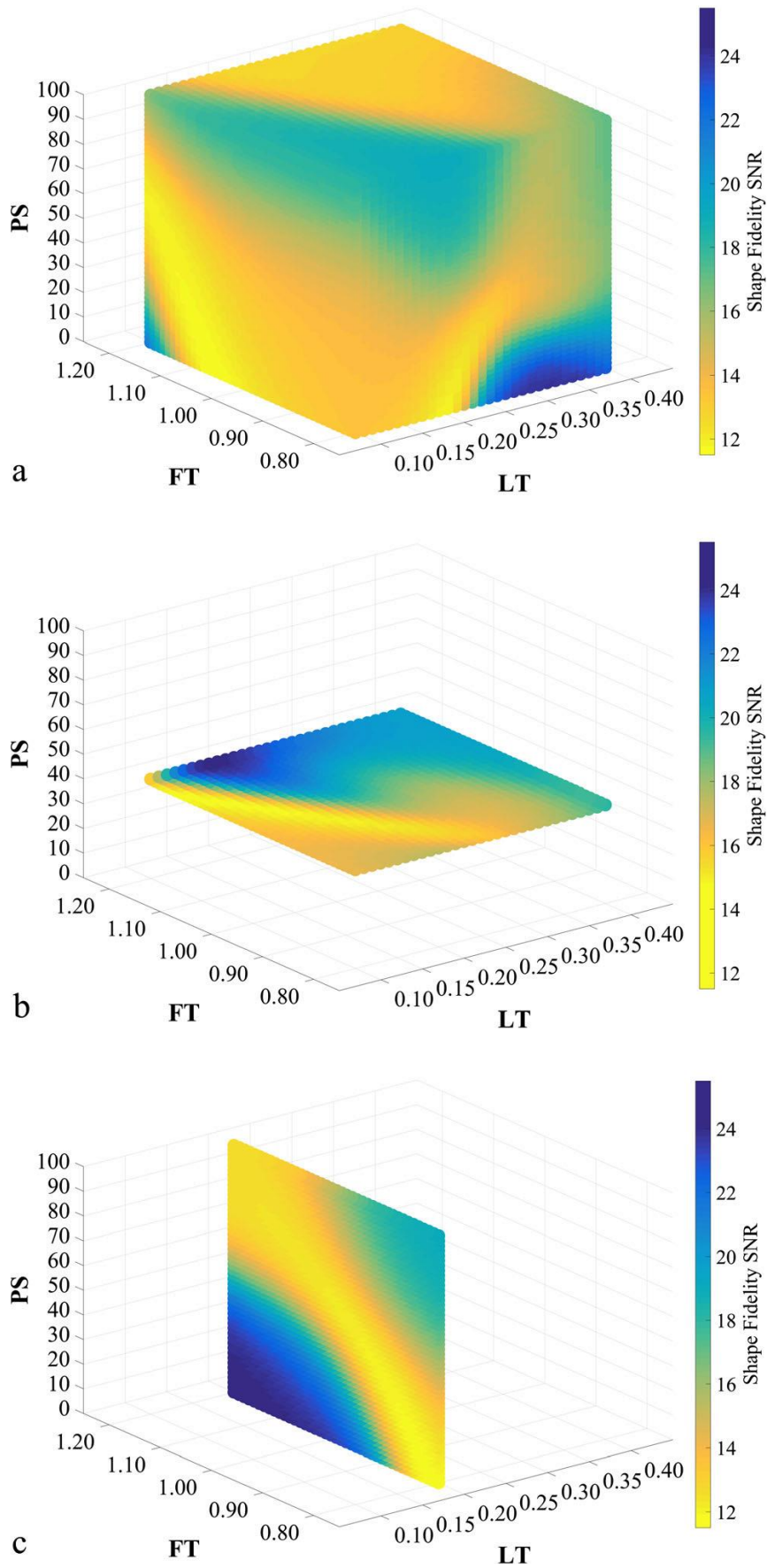
ANN Training Results		
	<i>R</i>	<i>RMSE</i>
Training	0.963	6.829e-02
Validation	0.903	7.735e-02
Testing	0.958	8.593e-02
ANN Performance Results		
<i>Normalized Actual Measurement - (SNR)</i>	<i>Normalized ANN Prediction - (SNR)</i>	<i>Error (%)</i>
0.8151 - (23.893)	0.7999 - (23.630)	1.90
0.5378 - (19.107)	0.4848 - (18.193)	10.93
0.8448 - (24.407)	0.7755 - (23.209)	9.01
0.7949 - (23.544)	0.7773 - (23.240)	2.26
0.6413 - (20.893)	0.7029 - (21.957)	8.76
	<b>Mean</b>	6.57
	<b>Standard Deviation</b>	3.75

To map shape fidelity for all possible combinations according to ANN predictions, LT level range (0.10 - 0.40 mm) is equally divided in 0.01 mm intervals, FT level range (0.80 – 1.20) is equally divided in 0.01 intervals and PS level range (0-100) is increased with step 2. Note that increasing PS level represents 1.2 mm/s increase in actual deposition velocity at every interval. The response of each possible combination is calculated by using ANN and the results are mapped in Fig. 4-7(a).

For the particular 3D printer tested, which is typical of the medium quality machines available, it is concluded that increasing fabrication speed over 40 mm/s generally increases deposition instability. When combined carefully with optimized settings, the nozzle velocity can safely reach 43.6 mm/s. Conservative settings in LT contribute to stable deposition, however existence of interactions suggests that care should be exercised in coupling with PS value. Although fabricating thin layers has been proven beneficial for minimizing staircase effect, the inevitable reduction in flow rate can be compensated by increasing deposition speed without sacrificing shape fidelity. If fabrication of thin layers is not the case, LT can be increased even up to its maximum capacity in order to increase flow rate and produce accurate surfaces when slightly reducing strand width by adjusting FT factor. Generally, FT yields better results when it matches nozzle diameter however, this may have negative effect on part's mechanical properties since the larger the air gap, the weaker the bond between adjacent strands. It is proven that FT does not affect the response when examined separately and does not drastically alter flow rate within its range. However, slight adjustments in FT compensate for shape fidelity when LT and PS are set beyond safe limits.

To demonstrate use of shape fidelity map, two separate plots for constant PS=40 and for constant LT=0.20 mm are indicatively presented, see Fig. 4-7(b) and (c). Similar plots are easily extracted according to user requirements. The color of each region indicates the predicted shape fidelity of the part with reference to the color-bar available, whilst material flow rate is easily calculated for each level combination according to Eqn. (4-5). Material flow rate limits are calculated by an iterative search routine that identifies the lowest and highest material flow among all factor level combinations, which simultaneously yield SNR value above  $SNR_{cr}=20.0$  db. Thus, the most extreme Q values that guarantee flat and defect-free parts are:  $Q_l = 0.60$  mm<sup>3</sup>/s and  $Q_h = 8.07$  mm<sup>3</sup>/s. To reach the lowest rate  $Q_l$ , settings LT=0.10 mm, FT=1.20 and PS=0 should be selected. To reach the highest rate  $Q_h$ , settings LT=0.37 mm, FT=1.00 and PS=56 should be selected. Note that low Q limit does not improve productivity but safeguards defect-forming such as under-extrusion. In practice, low Q may be used to print thin features [180].





**Fig. 4-7a) Shape fidelity map for all factor level combinations b) contour plot for constant printing speed (PS=40) and c) contour plot for constant layer thickness (LT=0.20mm) according to ANN predictions.**

## **4.6 Discussion**

A methodology based on Taguchi design of experiments and a trained ANN in order to optimize shape fidelity and material flow rate on material extrusion AM systems is advocated in the present study. Factor windows are identified in which material deposition stability is retained and defect-free parts are produced. The methodology was demonstrated for a particular machine, but it can be applied to any machine without any constraint.

An artificial neural network was trained on 27 inputs taking advantage of the special design of Taguchi OA to best represent the data range. The ability to recognize complex relationships between factors and measured response renders ANN a reliable tool in material extrusion process planning stage. Furthermore, ANN architecture optimisation according to Taguchi technique has undoubtedly enhanced its performance. According to ANN predictions, the maximum and minimum flow rate that can be reached is calculated. Optimisation methods relying only on factor main effects should be avoided in favor of result reliability. Interactions between factors are present and their effect is more significant than the effect of the corresponding main factors alone. Therefore, flow rate value deriving from random level combination within the identified factor window is not a sufficient condition to ensure shape fidelity. Since the extrusion process and, in particular, deposition stability is mapped to different parameter settings, the results are also applicable to parts with surfaces more intricate than the flat ones adopted for the sake of simplicity.

Limitations of the proposed work refer to the inability to predict which specific defect is expected. This can only be suspected based on the insight gained from the detailed Taguchi analysis on each factor effect. In addition, phenomena that take place during extrusion, deposition and fusion of material strands are tightly connected to properties, such as material viscosity. Thus, investigation on different materials is prone to alter the calculated rate limits but not the entire process trends.

Several future work directions emerge from this work. Factors related to part temperature profile are suspected to interact with those investigated so far. Additional geometric characteristics such as angularity and cylindricity as well as AM-specific manufacturing challenges such as porous structures and overhangs may be investigated on more complex specimens. To conclude, the proposed optimisation method may be considered as a first step of a larger hierarchically-structured methodology which filters conditions tied to unacceptable part shape before proceeding to investigation of the rest of the quality characteristics such as dimensional accuracy, surface roughness and mechanical strength.

# 5

## *Adaptive settings for improved dimensional accuracy*

### *5.1 Variable material extrusion*

An attempt to evaluate a novel approach, consisting in varying parameter settings on specific regions of the same layer or even on continuous trajectory, by contrast to global settings obtained from multiple-objective optimisation, is assessed in this chapter. In both cases, minimization of deviation from the nominal dimensions is sought via statistical models that are generated from strategically designed experiments.

### *5.2 Motivation and concept*

Slicing is the standard process planning routine for all additive manufacturing processes. Typically, parameter settings are set at this stage and they are kept constant throughout the manufacturing process. Parameterization flexibility is dictated by the capabilities of the available slicing software. Regarding enhanced flexibility, a more progressive slicing feature that tends to become standard among available software packages is adaptive slicing [181]. This refers to variable settings for subgroups of entire layers. This was initially proposed as remedy against increased surface roughness caused by the staircase effect along building direction, and is typically applied to reduce thickness in a group of layers, but also to modify thermal parameters, such as extrusion temperature. Note that state-of-the-art slicers use specific settings for entire layers but not on a continuous trajectory within each layer.

Multiple-objective optimisation usually provides a direct answer when multiple, yet contradicting, responses must be satisfied. In general, the more the responses, the more severe the compromise may become [182]. Varying strand width was recently proposed by Wang et al. [183] as a strategy to tackle over- and under-filled regions in the part's interior, facilitate thin

feature fabrication and enhance self-supporting capability. Along the same lines the approach of adaptive material deposition on individual features and different regions of a continuous trajectory on the same layer is investigated in the present work, in order to improve dimensional accuracy of a specimen containing multiple features. For the first time, adaptive strategy applicability and efficiency are further evaluated through comparison with the de-facto multiple-objective optimisation practice, in an attempt to fabricate the specimen closer to its nominal dimensions.

The chapter is organized as follows: In section 5.3 the process parameters and the employed experimental design are reviewed. The derived models according to experimental results, as well as the two different optimisation strategies are presented in section 5.4, while in section 5.5 the obtained results are discussed in detail. Finally, section 5.6 summarizes the main achievements and the limitations of this work.

### 5.3 Methodology

#### 5.3.1 Process parameters and equipment

A multiple feature specimen was designed in Solidworks™ as depicted in Fig. 5-1 and was used as a test specimen. A central composite design (CCD), which belongs to the RSM family, was conducted [184]. Five empirical models were retrieved to predict dimensional accuracy along X, Y and Z axes and two common features: thin walls (TW) and holes (H).

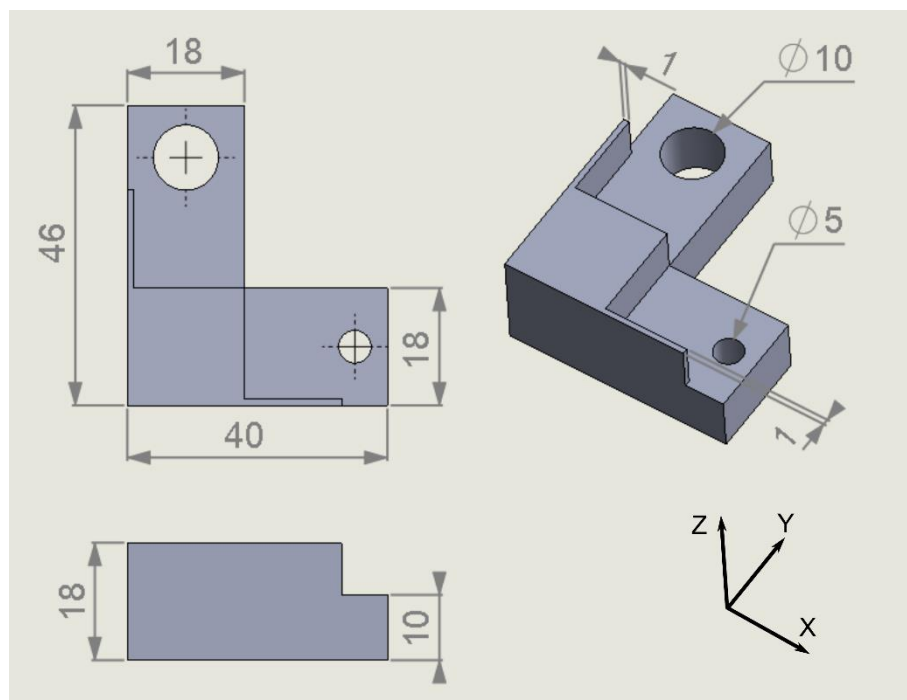
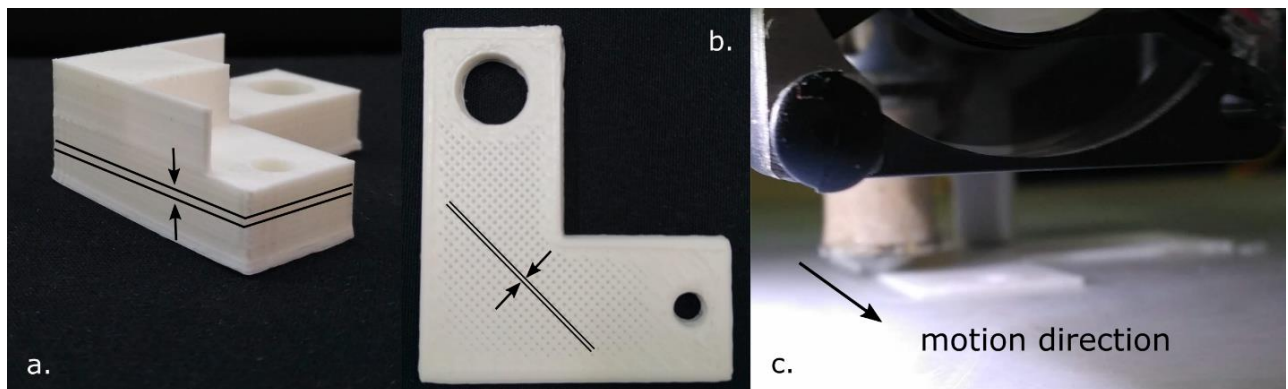


Fig. 5-1 Designed specimen for evaluation of dimensional accuracy.

To validate dimensional accuracy in material extrusion, three fundamental process parameters were modified at different levels (Table 5-1) throughout the experiments in controlled manner according to CCD. The process parameters coincide with those include in defect-free material extrusion work as described in chapter 4, and their levels are updated to match the feasible operational window that was identified there:

- Layer thickness (LT), representing the vertical distance between the nozzle's orifice and the build platform or the substrate formed by the previous layer. LT also determines the thickness of each new layer that is stacked upon the previous to fabricate the part, Fig. 5-2a.
- Flow tweak (FT), essentially modifying strand width without re-arranging the distance between adjacent strands, Fig. 5-2b. FT value equals to 1.00 when strand width corresponds to nominal nozzle diameter, in this case  $d_n=0.50$  mm. FT settings induce a percentage change in strand width, resulting in varying airgap, as it is also known from literature [88].
- Printing speed (PS), determining nozzle velocity during layer fabrication on the horizontal X-Y plane, Fig. 5-2c.



**Fig. 5-2 Investigated process parameters: a) layer thickness b) strand width adjusted by flow tweak parameter and c) nozzle velocity determined by printing speed parameter.**

**Table 5-1 Parameters and levels included in the central composite design experiment.**

<b>Factors</b>	<b>Coded</b>	<b>LT (mm)</b>	<b>FT</b>	<b>PS (mm/s)</b>
Low Axial Point	-a	0.10	1.00	14.80
Low Factorial Point	-1	0.14	1.04	20.20
Central Point	0	0.20	1.10	28.00
High Factorial Point	+1	0.26	1.16	35.80
High Axial Point	+a	0.30	1.20	41.20

The rest of the parameters were kept constant throughout the experiments, the most important of which are stated below. Specimen tool-paths fabricate a solid outer shell of nominal thickness 1 mm. The number of fully-dense layers was dictated by the layer thickness setting to add up to 1 mm thickness. Regarding the inner part of the specimen, it was fabricated with 50% material infill, which is considered a fair compromise between dense parts designated for engineering applications and reduction in total experiment time that is required. Linear infill pattern was employed for the internal structure, consisting of straight parallel strands that are inclined by 45°. Infill material overlaps by 50% with the contour strands.

Dimensional accuracy was measured as the average deviation from the nominal dimensions of the specimen, given that multiple measurements were conducted for the same feature. Dimension measurements were performed by a Starrett™ micrometer of 0.01 mm resolution whilst diameter measurements were performed on an Etalon™ coordinate measuring machine (CMM). Measured dimensions are categorized, with respect to Fig. 5-1 and the denoted coordinate system as:

- 40 mm and 18 mm length dimensions to evaluate X-axis accuracy,
- 46 mm and 18 mm length dimensions to evaluate Y-axis accuracy,
- 10 mm and 18 mm length dimensions to evaluate Z-axis accuracy,
- $\Phi 10$  and  $\Phi 5$  diameter dimensions to evaluate accuracy of holes (H),
- 1 mm thickness dimension to evaluate accuracy of thin walls (TW).

The specimen was fabricated from PLA with filament diameter of 1.75 mm. 3D Systems™ CubeX system was employed. Process parameters were set in Kisslicer™ software generating tool-paths in G-code format. G-code commands were modified via a text-handling script, developed in VBA. To achieve this, the developed script is equipped with a search routine responsible for locating and classifying G-code sections according to the features and part regions they pertain to. The command lines that define each feature and part region were retrieved with the aid of NC-Plot™ G-code viewer, and were accordingly modified upon script execution.

### 5.3.2 Central composite design and model validation

The approximation of a response  $y$  with empirical models is utilized when the investigated process is too complex to describe analytically. Response surface methodology (RSM) generates one such approximation based on designed experiments. Response surface methodology (RSM) approximates an investigated response ( $y$ ) with regard to a set of parameters  $x_j$  with  $j=\{1,2,\dots,k\}$ , in the form of a second-order model that is fitted through observations of designed experiments, see Eqn. (5-1). Typically, a first-order or a second-order polynomial, including the factors that were adjusted during experimentation, suffices to describe the underlying processes.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (5-1)$$

Constant term  $\beta_0$  and  $\beta_j$ ,  $\beta_{jj}$  and  $\beta_{ij}$ , with  $i=\{1,2,\dots,k\}$  and  $j=\{1,2,\dots,k\}$ , are the estimated coefficients for the linear, quadratic and interaction model terms respectively. They denote the magnitude of change in response  $y$  when the corresponding parameter level is modified.

During preliminary  $2^3$  full factorial experiment, aiming to quantify the effect of LT, FT and PS on dimensional accuracy of the specimens, additional center point runs indicated curvature in response. Therefore, a second-order model is required to better approximate the process and a central composite design (CCD) is selected. A 20-run CCD equipped with 8 factorial points, 6 axial points and 6 center points is constructed. Factor levels are appropriately decided to form a rotatable design and still generate level combinations that are feasible regarding the available material extrusion system, namely 3D Systems™ CubeX. Rotatability is an important CCD property which guarantees consistent variance of predicted response throughout the experiment region. A rotatable design is determined by value  $a$ , which is the distance of axial points from the center and it is calculated as:

$$a = \sqrt[4]{f} \quad (5-2)$$

where  $f$  is the total runs of the design's factorial portion. In the present case  $f=2^3$  and  $a=1.682$ . The experiment sequence is presented in Table 5-2. An artificial neural network that is developed by the authors in previous work was advocated for all CCD factor level combinations in order to safeguard defect formation during fabrication.

**Table 5-2 Central composite design to investigate dimensional accuracy.**

<i>Std. Order</i>	<i>Run Order</i>	<i>LT (mm)</i>	<i>FT</i>	<i>PS (mm/s)</i>	<i>LT</i>	<i>FT</i>	<i>NS</i>	<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Z (mm)</i>	<i>TW (mm)</i>	<i>H (mm)</i>
18	1	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.130	-0.039	-0.050	0.068	-0.027
9	2	0.10	1.10	28.00	-a	0	0	-0.137	-0.020	-0.122	0.053	-0.070
17	3	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.143	-0.016	-0.224	0.053	-0.074
7	4	0.14	1.16	35.85	-1	1	1	-0.023	0.074	-0.054	0.135	-0.192
13	5	0.20	1.10	14.80	0	0	-a	-0.151	-0.076	-0.200	0.045	-0.090
10	6	0.30	1.10	28.00	a	0	0	-0.123	-0.064	-0.284	0.210	-0.100
16	7	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.146	-0.031	-0.298	0.048	-0.035
4	8	0.26	1.16	20.15	1	1	-1	-0.084	-0.021	-0.344	0.128	-0.089
19	9	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.106	-0.057	-0.192	0.108	-0.079
5	10	0.14	1.04	35.85	-1	-1	1	-0.080	-0.004	-0.090	0.125	-0.035
2	11	0.26	1.04	20.15	1	-1	-1	-0.181	-0.080	-0.374	0.015	-0.045
3	12	0.14	1.16	20.15	-1	1	-1	-0.134	-0.010	-0.072	0.055	-0.029
11	13	0.20	1.00	28.00	0	-a	0	-0.153	-0.089	-0.306	0.003	-0.046
1	14	0.14	1.04	20.15	-1	-1	-1	-0.209	-0.113	-0.260	-0.030	-0.045
15	15	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.114	-0.021	-0.216	0.090	-0.038
14	16	0.20	1.10	41.20	0	0	a	0.034	0.136	-0.044	0.217	-0.305
12	17	0.20	1.20	28.00	0	a	0	0.041	0.127	-0.086	0.245	-0.242
8	18	0.26	1.16	35.85	1	1	1	-0.001	0.104	-0.108	0.297	-0.328
20	19	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.064	-0.060	-0.214	0.108	-0.035
6	20	0.26	1.04	35.85	1	-1	1	-0.184	-0.026	-0.204	0.110	-0.137

Response surface model is fitted according to the ordinary least squares (OLS) method, which belongs to regression analysis. This is one of the commonest tools to estimate correlation between response and a set of independent variables or factors, as well as to predict response based on new and unknown factor settings. This well-established method results in a polynomial equation, typically of first or second order, that represents a surface model. The model describes response  $y$  with regards to a set of predictors or factors  $x_j$  with  $j=\{0,1,\dots,k\}$ , and it is based on data collected during experiments. Regression utilizes experimental results of a process in order to obtain empirical models, rather than analytical formulas describing the process mechanism and physics. Empirical models are expected to capture occurrences that are difficult to model



analytically or that are neglected on purpose in favor of assumptions and simplification of the theoretical model. On the other hand, in-depth knowledge of the underlying process physics is always a prerequisite in order to validate the results and the applicability of the empirical model.

For a set of  $n$  experimental observations, with  $n > k$ , the model equation for every experiment response  $y_i$  with  $i = \{1, 2, \dots, n\}$  is written as in Eqn. (5-3). Terms  $\beta_j$  with  $j = \{0, 1, \dots, k\}$  are called regression coefficients and they denote the magnitude of change in response  $y$  when the corresponding factor is modified. Regression coefficients in coded units are useful when comparing contribution of predictors and each coefficient's sign reveals the direction of change. Terms  $\varepsilon_i$  with  $i = \{1, 2, \dots, n\}$  represent the residual error, which is the deviation between the actual and the estimated response  $y_i$  by the fitted model. To estimate terms  $\beta_j$  the least squares method is employed. In simpler terms, coefficients  $\beta_j$  are calculated with the aim to minimize function  $L$ , see Eqn. (5-4), which represents the squared sum of errors  $\varepsilon_i$ .

$$y_i = \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (5-3)$$

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad (5-4)$$

For the OLS-generated model to be valid, it is essential that specific assumptions are not violated. The first assumption is the normal distribution of residuals which is confirmed by Anderson-Darling normality test. Insignificant lack-of-fit denotes that the generated model sufficiently describes the process and no additional or higher order terms should be included. Coefficient of determination  $R^2$  increases as terms are added to the model and although a high  $R^2$  is desirable  $R^2$ -adjusted is more suitable when comparing model with unequal number of terms. Generally, high values of  $R^2$  and  $R^2$ -adjusted, indicate a powerful model. A model with satisfactory prediction ability should provide a difference below 20% between  $R^2$ -adjusted and  $R^2$ -prediction [88]. Note that pure error is the process variability that is not explained by the model.

### 5.3.3 Desirability function

A well-established method, adopted to optimize multiple responses is desirability function, introduced by Derringer and Suich [185]. As a first step, desirability function is calculated for each  $i$ -th response individually, as a value between 0 and 1, and according to the intended performance characteristic, see Eqn. (5-5). Unacceptable performance is denoted by value 0

whereas the optimum performance is denoted by value 1. In the present study, measured deviation is both negative and positive. Optimal dimensional accuracy is obtained when the deviation from the nominal dimension equals to 0, and therefore this is considered as target value.

$$d_i = \begin{cases} 0, & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{w_i}, & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{w_i}, & T \leq y \leq U \\ 0, & y > U \end{cases} \quad (5-5)$$

where,  $y$  is the predicted response according to the corresponding model,  $T$  is the target value,  $w_i$  is the assigned weight for the  $i$ -th response,  $L$  and  $U$  are the user-defined lower and upper bounding values, respectively. Outside these bounds, desirability for  $i$ -th response equals to 0 and so does the global desirability  $D$  for a total of  $m$  responses, see Eqn. (5-6), signifying an unacceptable solution. Otherwise, the higher the value of  $D$ , the more satisfactory is the obtained parameter level combination.

$$D = \left( \prod_{i=1}^m d_i \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5-6)$$

## 5.4 Experimental results

All results presented below have been derived by use of the Minitab™ software, which incorporates a comprehensive DoE and optimisation section.

### 5.4.1 Generated models and model validity check

The experimental results are presented in Table 5-2. Parameter level combinations are listed both with their levels expressed in actual units, as well as in coded values according to Table 5-1. Five prediction models, see Eqns. (5-7)-(5-11), are generated to describe dimensional accuracy along X, Y, Z axes, TW and H features. Estimated term coefficients  $\beta$  are expressed in coded values throughout the derived models. These are normalized values to the same scale facilitating comparison among the pertinent parameters regarding their contribution to the part's dimensional accuracy.

$$X = -0.114 + 0.054FT + 0.046PS + 0.015FT^2 - 0.02LTxPS \quad (5-7)$$

$$Y = -0.041 + 0.054FT + 0.053PS + 0.017FT^2 + 0.021PS^2 \quad (5-8)$$

$$Z = -0.187 - 0.061LT + 0.053FT + 0.063PS \quad (5-9)$$

$$TW = 0.104 + 0.039LT + 0.059FT + 0.058PS + 0.026LTxFT \quad (5-10)$$

$$H = -0.054 - 0.026LT - 0.052FT - 0.062PS - 0.026FT^2 - 0.045PS^2 - \\ 0.012LTxFT - 0.022LTxPS - 0.04FTxPS \quad (5-11)$$

Regarding models for X and Y axes, it is easily noticed that coefficients are close to each other, which is reasonable since material deposition on a horizontal build platform is expected to present common characteristics. However, the arithmetically lower constant term for Y axis denotes that material extrusion along Y is more precise than X on average. Dimensional accuracy along Z axis is expressed by a first-order model, facilitating the understanding of the main effects of the parameters on the response. In this light, increasing FT and PS value tends to increase part height, which is constantly lower than nominal, as seen in Table 5-2. In addition, dimension along build direction is also dependent on how the infill structure is fabricated. As presented in [72] excessive material accumulation either by increasing FT, PS or material infill percentage, may result in material overfilling and expansion of the layers, leading to part height increase. Regarding TW, it is concluded that the wall width is typically larger than nominal by approximately 0.1 mm. Furthermore, manufacturing of holes in material extrusion is described by a complex model, containing significant interactions of main parameters as well as second-order terms.

According to Table 5-3 all models are significant (P-Value < 0.050) at 95% confidence level, with insignificant lack of fit and normality (P-Value > 0.050). This is a favourable indication that these models sufficiently describe the underlying phenomena and no higher order terms or other non-included parameters are missing. Pure error is below 5% for all performance characteristics except for the model that describes dimensional accuracy along Z axis. The higher error is mainly attributed to the first observation of the design (Table 5-2), which is noted to provide large residual error. Generally, observations that are based on real-life experiments are likely to

contain outliers [186]. Since the observation is a legitimate experiment result, it is deliberately kept in the analysis even though it leverages model formation. A model with higher error, at least as it is validated by model diagnostics, is preferred since it depicts variation of the real process.

Coefficient of determination  $R^2$  is high for accuracy along Y-axis, TW and H, and satisfactory for accuracy along X-axis. A model with higher error is derived for Z-axis due to the reasons stated in the previous paragraph.  $R^2$ -adjusted is advised once insignificant terms are removed from the initial model. Therefore,  $R^2$ -adjusted is always lower than  $R^2$ , yet sufficiently high. The removal of insignificant terms is important in order to increase prediction  $R^2$  and formulate a model that can reliably predict response that is based on new settings.

**Table 5-3 Model validity indices and diagnostics.**

Model	Model significance (P-Value)	Lack of fit (P-Value)	Pure Error (%)	$R^2$ (%)	$R^2$ adjusted (%)	$R^2$ prediction (%)	Normality (P-Value)
X	0.000	0.326	4.85	80.03	75.00	60.78	0.952
Y	0.000	0.306	1.74	92.55	90.57	81.87	0.340
Z	0.000	0.901	16.23	69.29	63.53	55.57	0.584
TW	0.000	0.257	2.64	87.59	84.28	78.60	0.315
H	0.000	0.158	1.52	93.75	89.21	74.36	0.854

#### 5.4.2 Multiple objective optimisation

Optimizing all five models simultaneously enables derivation of a global solution, via the desirability method as explained in Section 5.3.3. In particular, according to the analysis software employed, the optimal solution is reached when LT is set to 0.10 mm, FT is set to 1.12 and PS is set to 30.40 mm/s. The goodness of the solution is depicted in overall desirability index  $D$  and in the present case it is calculated at 0.834 according to Eqn. (5-6). Individual desirability  $d_i$  reveals how close to the target each quality characteristic is expected to be. For dimensional accuracy along Y axis, response is predicted to fall closely on target, with  $d_Y=0.976$ , see also Eqn. (5-5). Desirability for Z and H is characterized as satisfactory,  $d_Z=0.882$  and  $d_H=0.861$ , whereas accuracy along X axis and on TW feature are compromised at  $d_X=0.690$  and  $d_{TW}=0.788$ . To verify predicted results two validation specimens are fabricated under optimal settings. The predicted and the actual deviation from nominal dimension, as well as the optimal parameter settings are listed in Table 5-4.

**Table 5-4 Predicted and actual deviation for validation specimens and optimal parameter settings for multiple-objective and feature-adaptive optimisation strategies.**

	<i>Multiple objective optimisation</i>					<i>Feature-adaptive optimisation</i>				
<b>Feature</b>	<b>Predicted (mm)</b>	<b>Actual (mm)</b>	<b>LT (mm)</b>	<b>FT</b>	<b>PS (mm/s)</b>	<b>Predicted (mm)</b>	<b>Actual (mm)</b>	<b>LT (mm)</b>	<b>FT</b>	<b>PS (mm/s)</b>
X	-0.070	-0.123	0.10	1.12	30.40	-0.004	-0.079	0.1	1.155	32.72
Y	-0.002	-0.011	0.10	1.12	30.40	0.000	0.021	0.1	1.10	32.83
Z	-0.048	-0.026	0.10	1.12	30.40	-0.001	-0.024	0.1	1.152	32.82
TW	0.062	0.090	0.10	1.12	30.40	0.001	0.049	0.1	1.04	24.99
H	-0.040	-0.019	0.10	1.12	30.40	-0.001	-0.009	0.1	1.06	28.02

### 5.4.3 Feature-adaptive optimisation with varying parameters

The purpose of feature-adaptive optimisation is to rectify severely compromised performance characteristics resulting from the multiple-objective optimisation strategy. Regarding dimensional accuracy of parts in material extrusion process, it is evident that the same settings influence dimensional accuracy of different part features in a contradicting manner. The rationale is to identify reliable empirical models for each part feature, regarded as a separate performance characteristic, and employ them to directly adjust machine instructions. In the slicing procedure, when LT is modified, the z-coordinate of each G-code motion command denotes the build platform position with respect to the nozzle's orifice and can be modified accordingly. Furthermore, when PS is modified, G-code feed-rate command, corresponding to linear and circular motions in the horizontal plane, is altered. It should be noted that changes in both LT and PS also impact the G-code command that controls feedstock motor angular velocity and once FT is modified, the angular velocity is further slightly varied, leaving feed-rate intact, thus adjusting material extrusion rate.

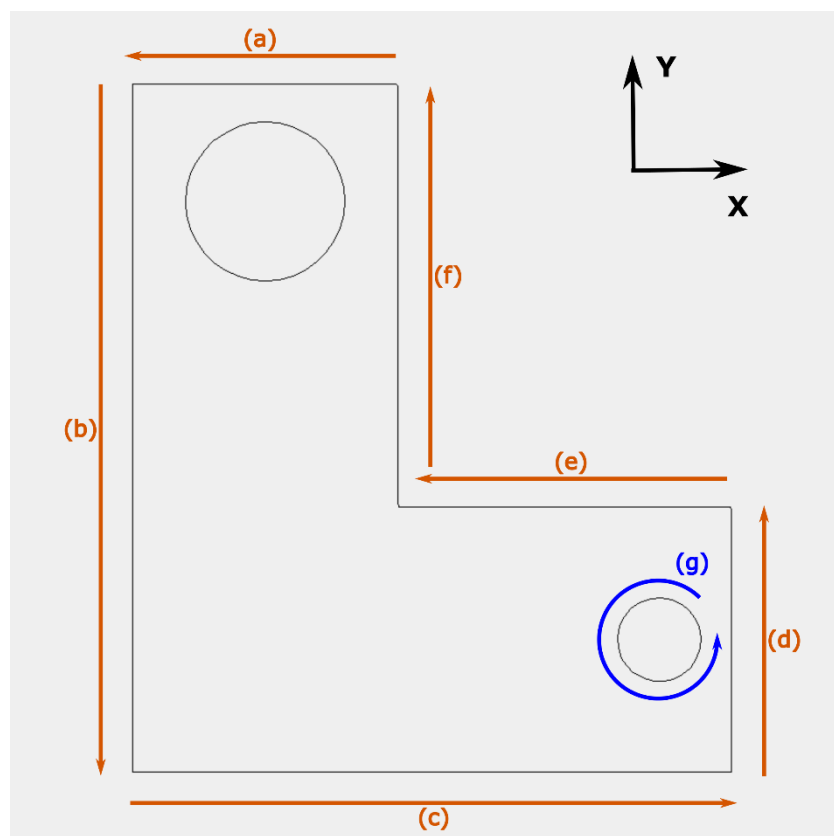
Optimisation of a single performance characteristic provides increased flexibility in terms of the determined optimal settings, and therefore dimensions are predicted to be closer to nominal, in comparison with the optimal settings determined from the desirability method (Table 5-4).

#### 5.4.3.1 G-code modification

To prove the feature-adaptive optimisation concept, a G-code post-processing script was developed in VBA. Given an initially generated G-code file, corresponding to specimen depicted in Fig. 5-1, the developed script locates the tool-path coordinates in respective motion commands (viz. G01) that are responsible for fabrication of:

- part's outer contour along X-axis,
- part's outer contour along Y-axis,
- X-Y coordinates defining the layer's internal structure patterns. Note that due to the layer-wise building strategy accuracy along Z-axis is strongly influenced by these patterns.
- TW region,
- holes.

Afterwards, commands that dictate feed-rate and material extrusion rate are accordingly modified, as presented in Table 5-5 and Fig. 5-3. Note that tool-path segments (a) to (f) in Fig. 5-3 refer to the part's outer contour. G-code commands for material extrusion rate and feed-rate, namely "M108 Sx" and "Fy", where "x" is feedstock motor angular velocity expressed in RPM\*10 and "y" is nozzle velocity on horizontal plane expressed in mm/min, are modified 'on-the-fly' during the continuous trajectory of the contour, varying the deposited strand width in an different manner regarding the printing direction (Table 5-5). Likewise, tool-path segment (g) in Fig. 5-3 is modified in order to fabricate the 5 mm-diameter hole as in Table 5-5, according to optimized settings derived by the corresponding prediction model (Table 5-4). Two validation specimens are manufactured under feature-adaptive settings. The predicted and the actual deviation from nominal dimension, as well as the optimal parameter settings are also listed in Table 5-4.



**Fig. 5-3 Part with regions (a) – (g) referring to G-code commands in Table 5-5 .**

**Table 5-5 Indicative G-code file excerpts referring to Fig. 5-3.**

<i>Multiple objective optimisation</i>	<i>Feature adaptive optimisation</i>
<i>Outer contour</i>	
M108 S9.6 M101 G1 X-51.26 Y-46.33 Z1.19 F1968.9 G1 X-51.36 Y-46.25 Z1.19 F1968.9 G1 X-68.74 Y-46.25 Z1.19 F1968.9 (a)  G1 X-68.74 Y-91.33 Z1.19 F1968.9 (b)  ... G1 X-51.26 Y-46.41 Z1.19 F1968.9 (f) M103	M108 S9.6 M101 G1 X-51.26 Y-46.33 Z1.19 F1963.3 G1 X-51.36 Y-46.25 Z1.19 F1963.3 G1 X-68.74 Y-46.25 Z1.19 F1963.3 (a)  M108 S9.2 G1 X-68.74 Y-91.33 Z1.19 F1969.9 (b)  M108 S9.6 ... G1 X-51.26 Y-46.41 Z1.19 F1969.9 (f) M103
<i>5-mm diameter hole</i>	
M108 S9.6 M101 G1 X-31.97 Y-81.14 Z1.19 F1968.9 (g) start G1 X-32.53 Y-80.66 Z1.19 F1968.9 G1 X-33.17 Y-80.36 Z1.19 F1968.9 ... G1 X-31.61 Y-81.63 Z1.19 F1968.9 G1 X-31.97 Y-81.14 Z1.19 F1968.9 (g) end M103	M108 S7.5 M101 G1 X-31.97 Y-81.14 Z1.19 F1681.3 (g) start G1 X-32.53 Y-80.66 Z1.19 F1681.3 G1 X-33.17 Y-80.36 Z1.19 F1681.3 ... G1 X-31.61 Y-81.63 Z1.19 F1681.3 G1 X-31.97 Y-81.14 Z1.19 F1681.3 (g) end M103

## ***5.5 Manufacturing with variable settings***

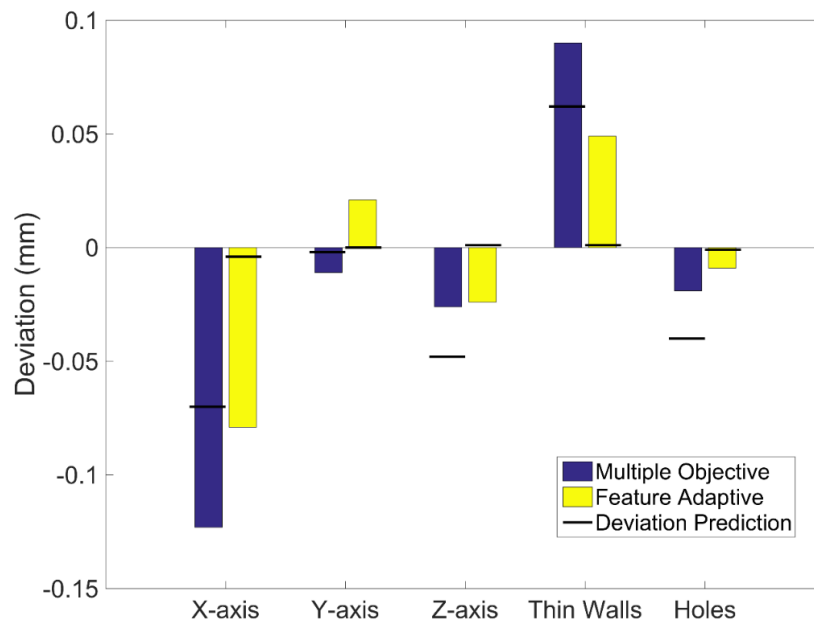
Model validity diagnostics revealed high reliability for Y-axis and H prediction models, whilst the performance of the rest is considered satisfactory. Effectiveness of the models is tested in practice upon verification tests as described next.

The main purpose of the study is to demonstrate the concept and implementation of feature-adaptive settings directly translated as machine instructions and also to compare the results achieved with it against the optimal settings obtained by desirability method. Two verification tests were performed for each case. According to Fig. 5-4, dimensional deviations corresponding

to each group of measurements, as explained in Section 5.3.1, are averaged and organized with respect to the five investigated responses. Each group of bars visually represents the difference in dimensional deviation, for the specimen at hand under optimal settings obtained via desirability method (purple bars) and under adaptively optimized settings for each feature (yellow bars). Horizontal line  $x=0$  indicates zero deviation from nominal dimensions, which is always the target, while individual line segments at each bar reveal the predicted deviation.

It is easily observed that in four out of five responses the deviation is reduced and is closer to zero, the most drastic improvement being for X axis and TW. Holes are fabricated closer to nominal diameter when feature-adaptive settings are employed. The change in dimensional accuracy along Z-axis is minor and close to zero in both cases. Regarding Y-axis response, it is the only feature that presented larger deviation with feature-adaptive strategy; however, this increase is considered minor dimension still being close to nominal dimension.

Prediction of deviation is denoted by the straight line that is drawn on each bar in Fig. 5-4. As far as prediction accuracy is concerned, the results correctly follow the tendency in terms of dimension change for all cases and thus they are highly reliable when employed for this purpose. However, model's resolution may not suffice to predict dimensional changes in the desired order, due to inherent AM system's precision capability and secondarily to the models' prediction ability. Even so, feature-adaptive methodology is still valid and could become even more efficient when equipped with more accurate models or performed on more precise AM systems.

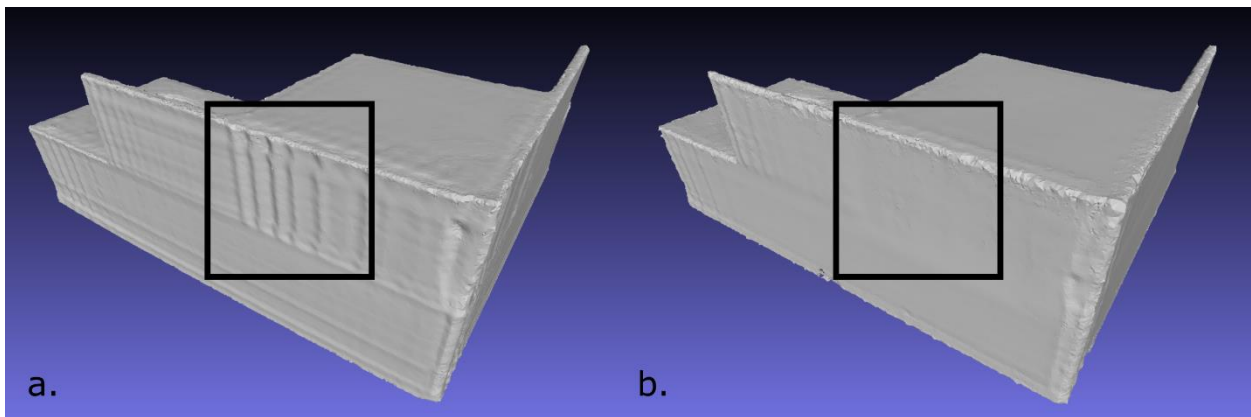


**Fig. 5-4 Deviation between actual and nominal dimensions for multiple-objective and feature-adaptive optimisation strategy.**



In any case, feature-adaptive strategy succeeded to fabricate specimens with reduced dimensional deviation in general and successfully rectified the issue of severe compromise when multiple responses are attempted to reach a global optimum, as in the case of X-axis and TW.

Adaptive material extrusion settings include ‘on-the-fly’ feed-rate and material flow modification on a continuous tool-path. According to the results, this capability is proven beneficial to dimensional accuracy of the part although it may affect the dynamic response of the AM system, due to additional acceleration-deceleration motion phases. Therefore, special handling is required regarding the rate of permitted modification of settings, in order to minimize system vibrations. The vibrations are easily identified by the characteristic ripples on the outer surface of the part. In Fig. 5-5(a), the ripples are caused by nozzle acceleration after finishing fabrication of thin wall region at a slower feed-rate compared to the optimised feed rate pertaining to accuracy improvement along X-axis, whilst in Fig. 5-5(b), the entire layer is fabricated under constant parameter settings and hence the outer surface is affected to a lesser extent.



**Fig. 5-5 Ripples formation during thin wall manufacturing a) due to instant change in feed-rate and material flow and b) with constant settings.**

Direct modifications on AM machine instructions are performed by a simple text handling routine accompanied by a G-code viewing tool. Obviously, features where tool-path is repeated, such as holes and bosses, are easily detected and edited at a post-processing stage.

## ***5.6 Discussion***

In the present chapter, five feature-specific models were generated following the well-known response surface methodology. Experiments were carefully planned according to a CCD, consisting of 20 experiments. The minimal number of experiments in combination with the powerful attributes of a CCD, suggest a solid and efficient design of experiments.

To the best of the authors' knowledge, it is the first time that adaptive settings, not only on discrete regions of the same layer but also on continuous material strand are systematically investigated and compared to the standard multiple-objective optimisation approach. The results are very promising, indicating that parts are manufactured closer to nominal dimensions. The ability to parameterize different regions and features may unlock new capabilities on the way parts are fabricated.

The proposed method is directly applicable by any user via post-processing of the machine instruction file. The type of feature as such does not undermine the approach, as long as its accuracy can be mapped to a specific range of printing parameter values. When it comes to more complex features, it is suggested that feature-adaptive models should be integrated with existing slicing software, so that the adaptive settings are generated during slicing procedure, eliminating the need of file post-processing.

Limitations of the feature-adaptive approach, such as the effect of instantaneous feed-rate modification on the AM system dynamics, is pointed out, guiding to future topics of research in order to move feature adaptive optimisation from a proof-of-concept towards a truly-functional stage.

# 6

## *Uniform material deposition at higher rates*

### *6.1 Inspecting strand deposition*

Material overfills and underfills undermine dimensional accuracy and the structural integrity of the produced part. In some cases, these issues may not be given the required attention because they are hidden in the part's interior. However, in order to enable ME process to be certified for demanding industry needs and requirements, advanced issues should also be considered.

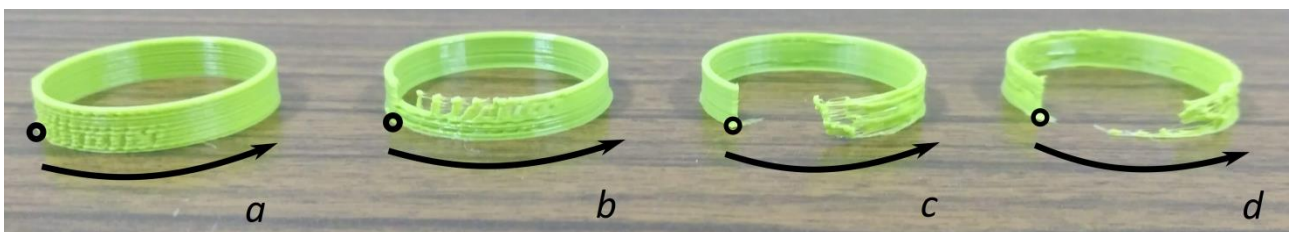
In ME the ultimate goal is quality deposition at the highest possible rates, which simultaneously maintains intended strand shape with reduced process cost. It is well known though that material extrusion at higher rates may induce flow instability and deterioration of part's quality [13, 59, 66].

Various solutions regarding ME process monitoring have been proposed in literature. Acoustic emission technique is employed in order to detect filament blockage due to increased pressure in the hot-end [187, 188]. A data-driven approach, using vibration sensors and a trained neural network is developed in [105] in order to detect manufacturing defects in real-time. Digital image correlation is used in [189], for in-situ detection of defects, such as material overfills and underfills. Another online approach is proposed by Lin et al. [190], where laser-scanning is utilized to create a point cloud that represents the fabricated layer, in order to compare it with the ideal CAD surface and check for deviations. Although online monitoring is essential in ME process, means to prevent defects before they develop is a fundamental requirement. In order to minimize melt temperature fluctuations, a PID system is implemented in [29] to stabilize material flow. Although, PID control performs well at lower extrusion rates, there is still room for improvement when it comes to higher rates. In [191], a prediction machine learning tool is developed. A neural network is trained to classify various local defects in the part in order to

predict future similar occurrences. Greef and Schilling proposed closed-loop control that includes filament tracking in order to reduce underfills when pressure drop in the hot end triggers filament slippage [54].

To understand the phenomena behind material deposition it is best to focus on a single linear strand. In order to deposit a linear strand, ME machine executes the corresponding command line in the supplied G-code, that is generated from an accompanying slicer software. Pertinent G-code commands typically consist of X, Y and Z coordinates that dictate planar displacement from the start to the end point of the path. Each line also includes the feedrate of the nozzle and in some cases the feedstock length that has to be extruded in order to deposit the material strand. Depending on the machine-specific G-code post-processor, the feedstock extrusion could also be interpreted in other forms, such as rotation speed of the extruder motor. Extrusion rate in coordination with machine axes displacement define deposition quality and dimensional accuracy of the manufactured parts. This refers to the basic calibration of the machine and it is achieved with trial and error methods. In its simplest form an easily measurable part, such as a hollow square prism, is fabricated. The wall thickness and the dimensions along X and Y axes are measured and the gain values of the motors that are responsible for planar motion and material extrusion are adjusted, either in slicer software or directly in machine's firmware. Rough accuracy is achieved after this point. However, for precise manufacturing advanced issues should be also considered.

In practice, material extrusion lags behind the planar motion actuation, leading to underfilled regions at the beginning of the strand. Besides, the greater the demanded flow rate the larger the unfilled gap between the strand's start point and the point where extrusion is actually initiated, Fig. 6-1. Another issue is noticed towards the end of the strand where the nozzle decelerates while material keeps oozing for an extended time due to both the accumulated pressure in the hot-end and to gravity. This leads to material overfill and 'stringing', which is characterized by thin material fibres that are left in the part when carriage rapidly relocates towards the next path (traveling).



**Fig. 6-1** Unfilled regions for deposition of circular paths and for increasing flow rates  $Q$  from left to right. The dot and the arrow denote start point and the direction of the path, respectively (a)  $0.59 \text{ mm}^3/\text{s}$  (b)  $1.30 \text{ mm}^3/\text{s}$  (c)  $4.00 \text{ mm}^3/\text{s}$  (d)  $7.00 \text{ mm}^3/\text{s}$ .

Current slicers tackle these issues via filament ‘priming’ and retraction. In simple terms priming refers to predefined filament length that is pushed towards the hot-end just before nozzle displacement begins. This allows the extruder motor sufficient time to apply the demanded force on the viscous melt and develop steady flow. Accordingly, filament retraction is commanded at the end of the tool-path and before the nozzle travel. The extruder motor practically rotates in reverse, retracting the solid segment of the feedstock, thus offering pressure relief to the melt in the hot-end and avoiding material oozing during nozzle travel. The priming/retraction procedure takes place during travel moves and during small time segments, in the order of milliseconds, at the beginning and at the end of a continuous tool-path. This leads another factor that affects synchronization between material extrusion and nozzle’s planar velocity, which is the duration of the travel move. Obviously, this depends on the distance between the end and the start of successive and non-continuous tool-paths, as well as the travel velocity. Here, the interesting fact is that the travel distance depends totally on the generated tool-path and as a result it is not constant.

## ***6.2 Measuring deposited strands***

At first, the limit inside which extrusion and material deposition is sustained has to be identified. According to published literature and the gained insight on ME process, eight factors that contribute to uniform material deposition were identified and investigated in depth. The factors are presented in detail in section 6.4. Uniformity is described by the following criteria: The first one refers to material deposition discontinuity (MDD), which leads to underfills and gaps in the deposited strand. The second one refers to strand width deviation (SWD), as observed at the start, at the middle and at the end of the deposited strand. Two pertinent models are developed in order to investigate these phenomena in detail.

To measure that, the following paradigm is followed: white PLA substrate of 0.2 mm thickness is initially deposited under optimized settings, obtained from earlier pertinent experiments, in order to achieve the highest possible flatness. Then 13 parallel strands and a rectangular pattern in the middle are deposited on the substrate in order to be optically evaluated. The parallel strands are alternately deposited in bidirectional manner. To facilitate image-based evaluation, the parallel strands are fabricated with black PLA filament, thus achieving high contrast in the native image. Images of the specimen are captured with a high resolution DSLR Canon™ EOS camera, generating images of size 5184x3456 pixels. The camera is held steady and leveled on tripod as shown in Fig. 6-2. The specimens are positioned on an adjustable platform on a moving axis. The platform is also leveled to achieve the best possible alignment with the camera lens. Keeping the same focal length, a Johansson gauge is also captured to define real-world scale.

According to the scale and the image resolution, deposited strands are evaluated with 0.02 mm resolution, approximately. Afterwards, images are input in Fiji-ImageJ open-source software for pre-processing and measurements [192]. Pre-processing of the images involve (i) orientation fix, guided by crosshair tool in the software, (ii) 8-bit image conversion and (iii) black-white thresholding. The latter is performed with minimal user intervention, using thresholding tools already included in the software. Therefore, the black PLA strand is separated from the white background and measurements of interest, such as length, width, area and perimeter are automatically performed by the software. Manual measurements on regions of interest are also possible.



Fig. 6-2 Adjustable platform, camera and tripod configuration for specimen measurement.

### ***6.3 Priming and Retraction Measurements***

To gain deeper insight, feedstock displacement is recorded during extrusion with an HD Logitech™ web camera at 20 frames per second. Video frame analysis provides the ability to observe how extruder motor behaves during all stages of material extrusion of a single strand and correlate these observations with the deposition results from specimen analysis. Especially for factors whose impact lasts for a few milliseconds, such as DP, SR and ESR, optical tracking is an effective and low-cost way to obtain information that is not otherwise measurable or indeed conceivable.

A 3D-printed jig was fabricated to mount web camera on the 3D printer carriage. Web camera is secured with screws on the jig, facing the filament, Fig. 6-3(a). White dots are marked on the black PLA filament, to achieve high black-white contrast, Fig. 6-3(b). Ffmpeg open-source software is used to process video captures at 20.83 frames per second. Ffmpeg is operated via command line on Windows operating system. Multiple and advance libraries are easily

implemented. Here, basic conversion tasks are performed. First, the wmv file is converted in avi video format and is also provided with timestamp of each frame, thus facilitating measurement procedure.

Single particle tracking method is performed via TrackMate [193], an intuitive plugin that is executed within Fiji ImageJ software. White dot position is tracked and registered at each frame, Fig. 6-4, and therefore feedstock position and velocity are calculated with respect to time. To minimize the effect of vibrations that are transmitted to the web camera during carriage motion, a reference dot that is marked on a non-moving part is also tracked and its oscillation is used as correction factor to the feedstock position tracking. Furthermore, the web camera position is strategically selected so as to capture part of the machine's frame in the background, thus resolving when nozzle motion on the horizontal plane is actuated.

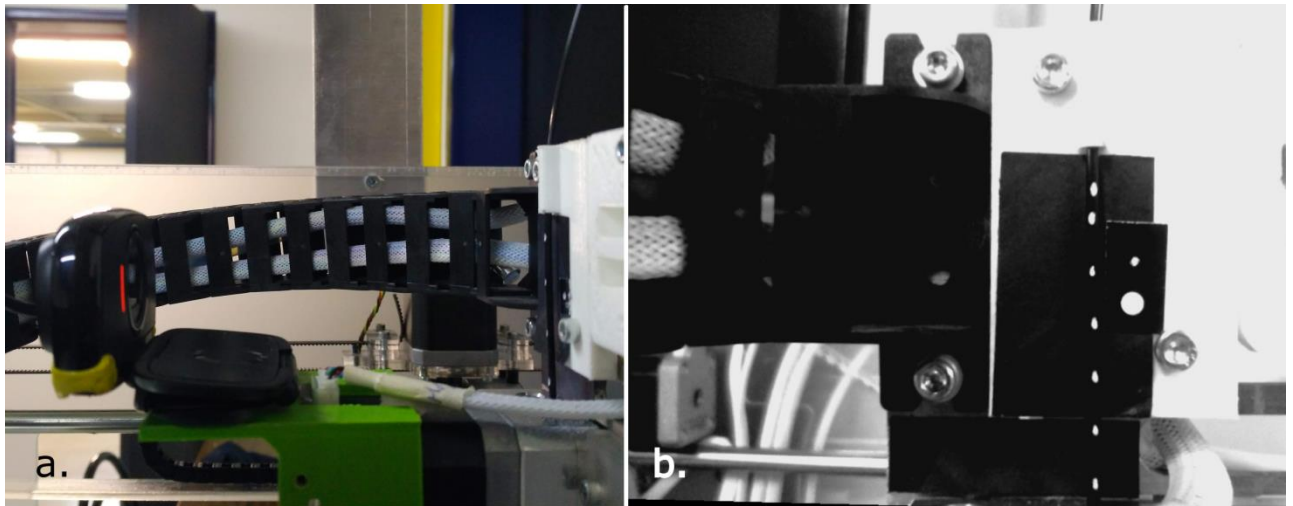


Fig. 6-3 (a) Camera positioning on 3d printer's carriage opposite to feedstock and (b) white dots marked on moving filament for motion profile measurement (camera view).

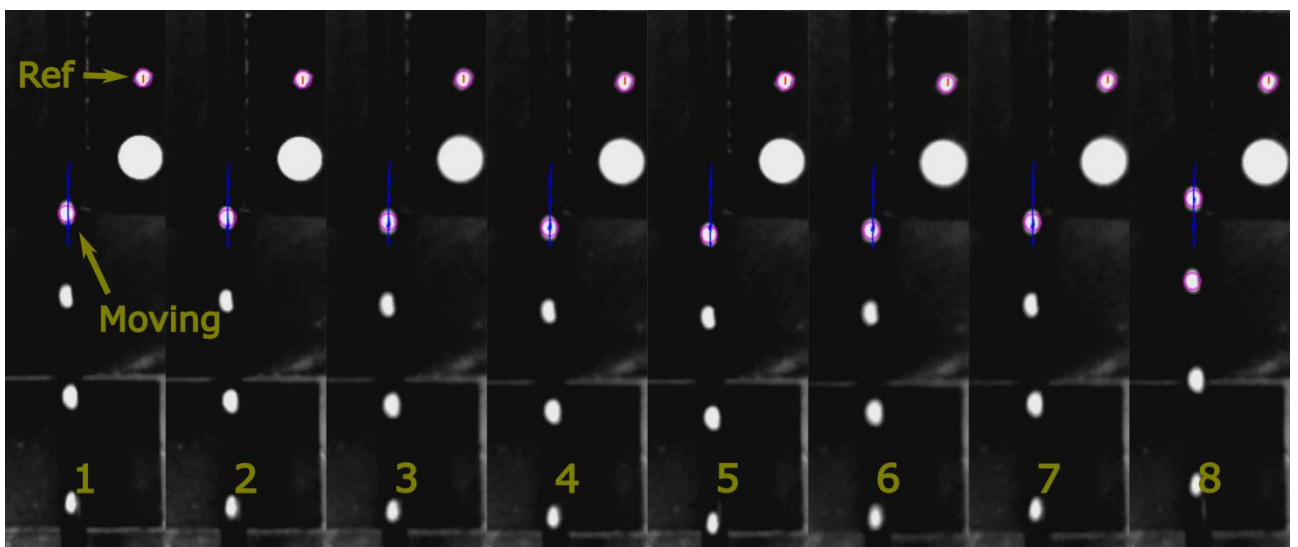


Fig. 6-4 Excerpt of feedstock displacement profile (blue line). The position of the moving dot and the reference (Ref) dot are automatically tracked on eight successive frames.

## 6.4 Experiment Design

Based on existing literature [42, 60, 194, 195], eight factors that affect material deposition according to MDD and SWD criteria were selected as follows:

1. Priming and Retraction Length (LPR) in mm, defines the filament length that is pushed forward before the start of the next path and retracted at the end of a path, respectively.
2. Priming and Retraction Speed (SPR) in mm/s, is the speed at which the filament length is primed and retracted.
3. Dynamic Priming (DP) is the percentage of filament length that is primed while planar motion is initiated along the designed trajectory.
4. Static Retraction (SR) is the percentage of filament length that is retracted while the nozzle stays still over the end-point of the path.
5. Distance to End (DtE) in mm, defines the distance before the path end point, at which extrusion rate is slowed down by reducing the angular velocity of the extruder motor.
6. Extrusion Slow-down Rate (ESR) is the percentage reduction of the extruder motor's angular velocity.
7. Printing Speed (PS) in mm/s is the speed at which the nozzle moves on the horizontal plane parallel to the build platform.
8. Temperature (T) is the material temperature at which the melt is extruded through the nozzle.

A fraction factorial design of 16 runs and 2 center points was selected [196]. Each factor is investigated on two levels. The design's resolution is IV, hence main effects are not confounded with interactions but some interactions are confounded with some others. This is the trade-off between analysis detail and an experimental design with reasonable number of runs given the large number of investigated factors. The level of the factors and their coding is provided in Table 6-1. Factors LPR, SPR, PS and T cover a broad level range in order to investigate material deposition beyond "safe" settings and with respect to the operational capabilities of the ME system and the material. Regarding DP and SR, 0% setting is included to investigate deposition quality upon activation and deactivation of these factors. ESR is limited to 20% maximum rate so as to avoid abrupt extrusion rate changes. Extrusion slow-down initiates at a maximum DtE of 20 mm, thus providing sufficient time to the system to adapt to the adjusted extrusion rate.

**Table 6-1 Parameters and levels included in the fraction factorial design experiment.**

Factors	Coded	LPR (mm)	SPR (mm/s)	DP (%)	SR (%)	DtE (mm)	ESR (%)	PS (mm/s)	T (°C)
Low	-1	1.0	5.0	0	0	2	2	40	195
Central	0	4.8	9.7	33	33	11	11	65	210
High	1	8.6	14.4	66	66	20	20	90	225



Experiments are carried out on a 3D Systems™ CubeX ME machine with a  $d_n=0.50$  mm diameter nozzle mounted on a direct drive extruder configuration. Feedstock filament of 1.75 mm diameter was used. G-code files are generated by Kisslicer™ software. The investigated factors LPR, SPR, PS and T are fundamental among ME systems and they are included in all slicer software packages. The rest of the factors are more involved and not widely covered in literature, to the best of the authors' knowledge. However, their function is intuitive and if not already included under different terminology in other slicers, they are easily implemented through direct editing of the generated G-code. This is the case for DtE and ESR in the present study. Although they are not included as adjustable factors in Kisslicer™, they are easily implemented directly in G-code file via a text-editing routine written in VBA as follows: G-code commands dictating the extruder motor's angular velocity are inserted at the appropriate location before the end of the path, in order to gradually decrease extrusion rate. Other interesting factors that were kept constant during the experiment are the cooling fan operation speed and the layer thickness (LT), that determines the gap between the nozzle and the substrate. The latter is held at 0.24 mm. Note that the unique factor that defines material flow rate  $Q$  is PS, with respect to the following equation:

$$Q = LT \cdot d_n \cdot PS \quad (6-1)$$

## ***6.5 Experimental results, models and analysis***

Experiments are carried out and evaluated according to two criteria, namely material deposition discontinuity (MDD) and strand width deviation (SWD). The experimental runs and the responses are listed in Table 6-2. Two separate regression models, for MDD in (6-2 and for SWD in (6-3, are generated in order to guide towards improved quality deposition. The models are expressed in coded units and they are accompanied by metrics regarding regression model performance in Table 6-3. Low error, insignificant lack-of-fit and curvature ( $p$ -value  $> 0.05$ ) as well as the confirmation of normality assumption ( $p$ -value  $> 0.05$ ), support the validity of the models. The fabricated specimens are demonstrated in Fig. 6-5. Calculations regarding the main effects and the generated models are performed in Minitab™ statistical software. All graphs and plots are generated in Matlab™.

**Table 6-2 Fraction factorial design to investigate material discontinuity and strand width deviation.**

Run	LPR (mm)	SPR (mm/s)	DP (%)	SR (%)	DtE (mm)	ESR (%)	PS (mm/s)	T (°C)	MDD (mm <sup>2</sup> )	SWD (mm)	Q (mm <sup>3</sup> /s)
1	1.0	5.0	0	0	2	2	40	195	2.2900	0.272	4.8
2	8.6	5.0	0	0	2	20	90	225	5.9879	0.518	10.8
3	1.0	14.4	0	0	20	2	90	225	2.1187	0.434	10.8
4	8.6	14.4	0	0	20	20	40	195	0.0003	0.208	4.8
5	1.0	5.0	66	0	20	20	90	195	1.1969	0.212	10.8
6	8.6	5.0	66	0	20	2	40	225	0.0006	0.580	4.8
7	1.0	14.4	66	0	2	20	40	225	0.0015	0.097	4.8
8	8.6	14.4	66	0	2	2	90	195	8.1362	0.468	10.8
9	1.0	5.0	0	66	20	20	40	225	2.0671	0.199	4.8
10	8.6	5.0	0	66	20	2	90	195	1.0979	0.599	10.8
11	1.0	14.4	0	66	2	20	90	195	11.7936	0.306	10.8
12	8.6	14.4	0	66	2	2	40	225	1.2653	0.378	4.8
13	1.0	5.0	66	66	2	2	90	225	3.0734	0.427	10.8
14	8.6	5.0	66	66	2	20	40	195	10.5624	0.535	4.8
15	1.0	14.4	66	66	20	2	40	195	0.0022	0.103	4.8
16	8.6	14.4	66	66	20	20	90	225	15.2716	0.880	10.8
17	4.8	9.7	33	33	11	11	65	210	6.5425	0.356	7.8
18	4.8	9.7	33	33	11	11	65	210	1.7800	0.292	7.8

$$MDD = 4.066 + 1.236 \cdot LPR + 0.77 \cdot SPR + 0.727 \cdot DP + 1.588 \cdot SR - 1.335 \cdot DtE + 1.806 \cdot ESR + 2.03 \cdot PS - 0.331 \cdot T + 2.476 \cdot LPR \times DP + 0.672 \cdot LPR \times T + 0.859 \cdot PS \times T \quad (6-2)$$

$$SWD = 0.381 + 0.132 \cdot LPR - 0.029 \cdot SPR + 0.024 \cdot DP + 0.04 \cdot SR + 0.092 \cdot PS + 0.051 \cdot T + 0.071 \cdot LPR \times DP + 0.033 \cdot LPR \times DtE + 0.034 \cdot LPR \times ESR + 0.038 \cdot DP \times ESR \quad (6-3)$$

**Table 6-3 Statistical metrics that support validity of regression models.**

Model	R <sup>2</sup> (%)	Pure Error (%)	LOF (p-value)	Curvature (p-value)	Normality (p-value)
MDD	96.19 %	3.13	0.988	0.935	0.113
SWD	96.34	0.31	0.554	0.158	0.900

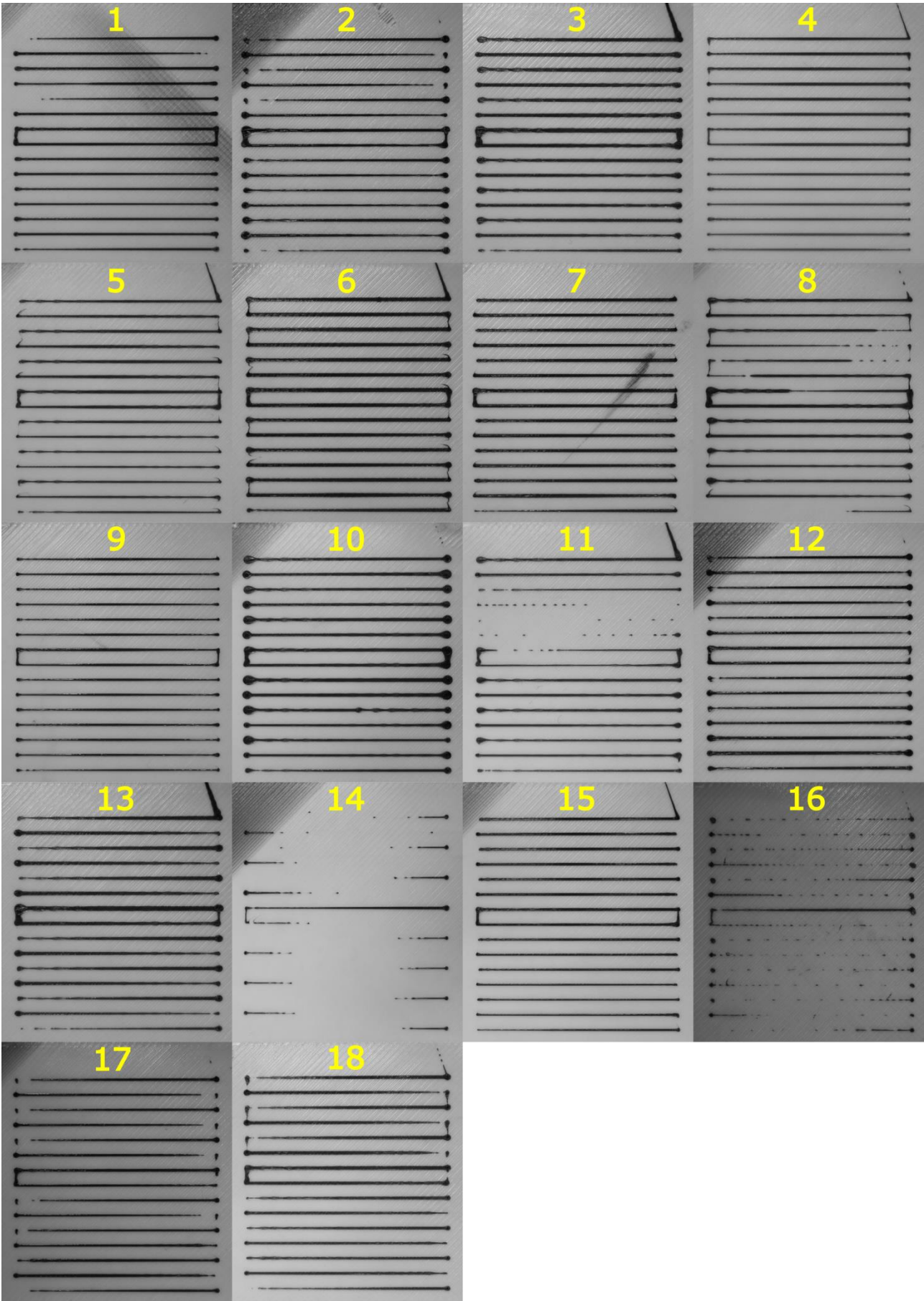
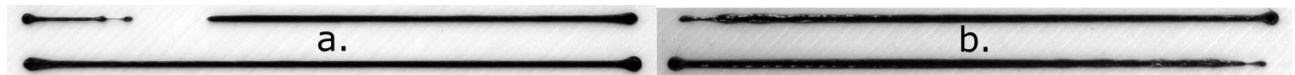


Fig. 6-5 Overview of specimens fabricated according to fraction factorial design.

## 6.6 *Material deposition discontinuity (MDD)*

Part internal voids are commonly perceived in literature as the volume-to-void ratio resulting from the imperfect stacking among adjacent strands and successive layers [21] or from non-optimal toolpath planning [20]. In the present study, underfills occurring in a random manner due to deposition discontinuity are also affecting volume-to-void ratio and their formation mechanism is investigated. Regarding discontinuity in material deposition, two pertinent cases were identified. The first is the inability of the extruder motor to overcome pressure drop in the nozzle, leaving gaps or much thinner strand at random locations during the deposition, Fig. 6-6(a). Observing the extruder, this issue is indicated by instant filament bouncing, clearly captured during filament tracking procedure and slippage between the extruder gear and the filament. The second case is the unfilled regions at the beginning of the strand. Although, no nozzle blockage incident in the extruder motor-filament subsystem is observed, the material discontinuity is attributed to late extrusion with respect to planar motion actuation of the machine carriage, Fig. 6-6(b).

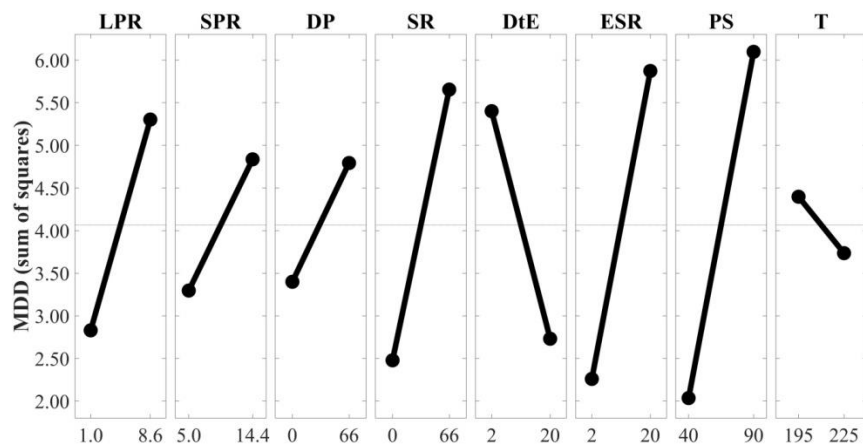


**Fig. 6-6** Deposition interruption cases due to: (a) filament's inability to overcome pressure drop and (b) late extrusion with respect to planar motion actuation.

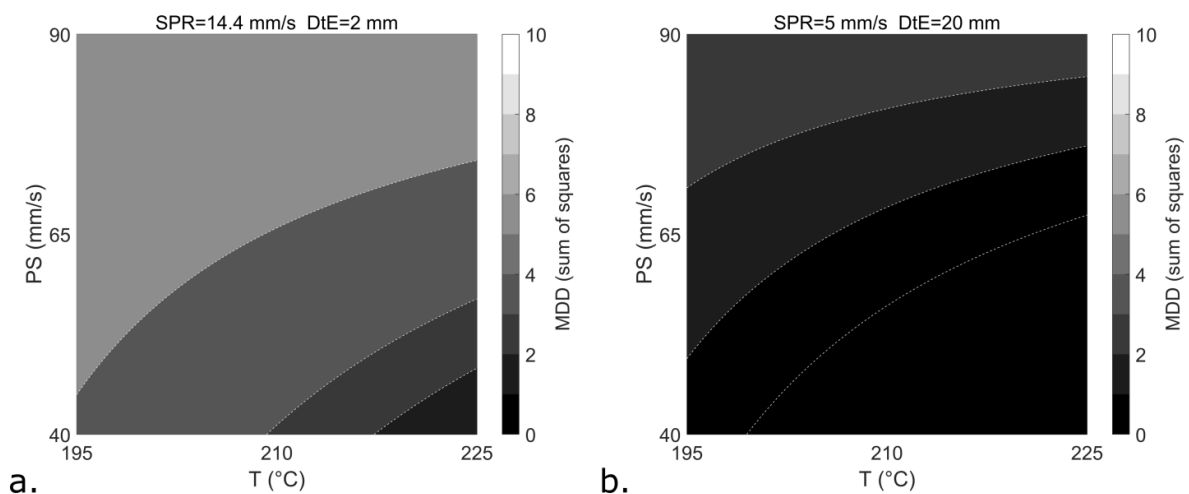
According to experimental results in Table 6-2, near-zero MDD values indicate continuously deposited material strands. These values are obtained as follows: the resulting length of each strand, as calculated in Fiji ImageJ, is subtracted from the nominal length of the strands. The deviation is squared and summed for all 13 strands, penalizing cases when discontinuity occurs. Sum of squares values over 1, highlight issues with material discontinuity of any type. On the other hand, sum of squares values below 1, indicate deviation in the order of magnitude of the typical dimensional inaccuracy of the ME process, due to systematic positioning error of the motors, material shape change during solidification and random error of the system. The latter case is not an issue that is considered in this study.

Furthermore, nozzle blockage due to the extruder's inability to overcome pressure drop in the hot end occurs in experiments 8 and 11. Unsurprisingly, this incidence is directly linked to the highest printing speed and the lowest temperature that were tested. However, the same printing speed and temperature are used for the 5<sup>th</sup> experiment without blockage occurrence. The parameters contributing to this are the increased DtE setting and the decreased SPR setting.

According to main factor effects in Fig. 6-7, the former presents relatively high influence on extrusion interruption due to nozzle blockage. This is explained by the fact that increased DtE setting forces the extruder motor to slow down during a larger time frame, resulting in decreased heat loss due to the material extrusion. However, the noticeable deterioration of MDD response when extrusion rate (ESR) decelerates abruptly indicates that there is an upper limit regarding the reduction rate that must be respected and that gradual slow-down in extrusion rate should be preferred. Furthermore, the solid feedstock portion is pushed towards the hot-end with decreased SPR providing sufficient time to the newly inserted material to absorb the required thermal energy in order to overcome friction forces [37]. This is clearly depicted in Fig. 6-8, where the range of combinations that result in low MDD (darkest regions), widens when SPR decreases and DtE increases. In both plots it is also visible that increase in PS should be accompanied with increase in temperature in order to avoid nozzle blockage.

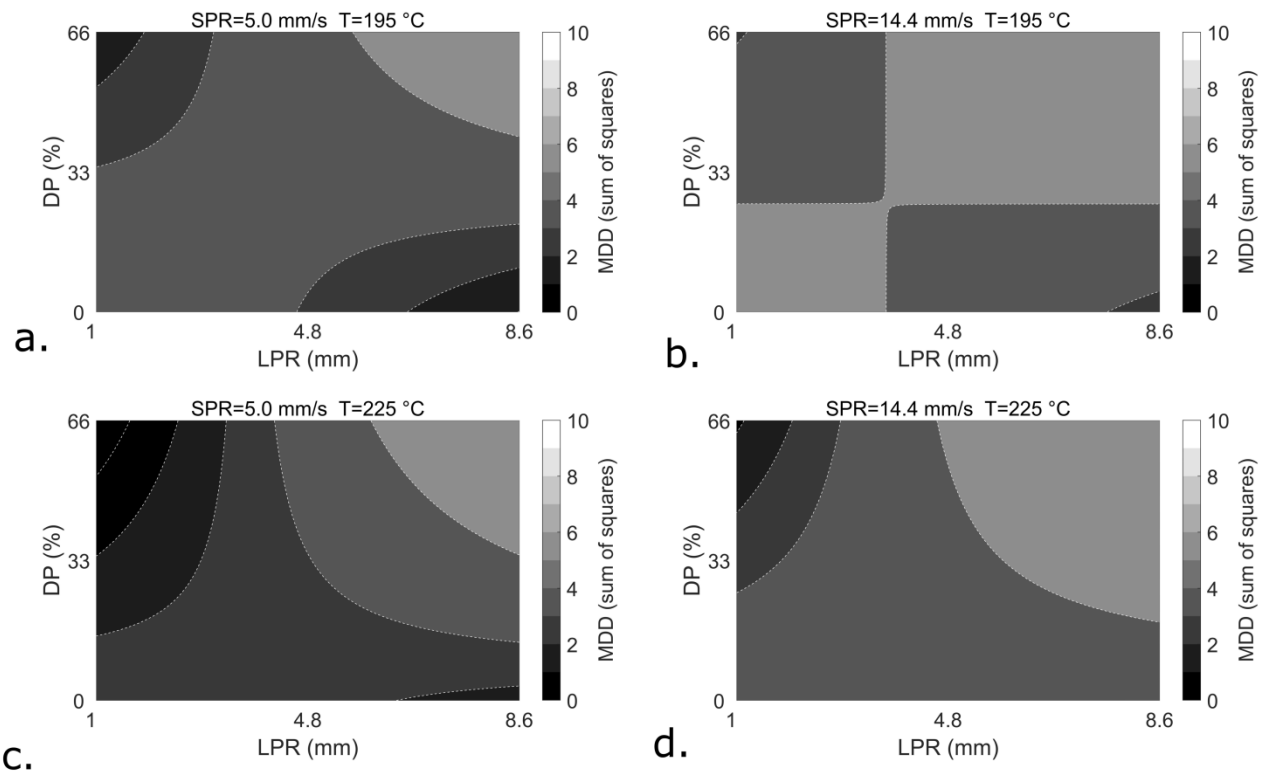


**Fig. 6-7** Main effect plots for investigated factors regarding their contribution to material deposition discontinuity. Lower sum of square values signifies an uninterrupted deposition.



**Fig. 6-8** Discontinuity of material deposition occurs when SPR is high and DtE is low (left), while normal deposition is facilitated when SPR is decreased and DtE is increased (right).

Moving on to the second mechanism that causes material discontinuity, mismatch between planar motion of the carriage and the extruder motor is pinpointed. Typically, when traveling from the end of the previous path towards the new path, the extruder motor retracts the solid filament to minimize oozing. Once reaching the start of the new path, the nozzle stays idle over the starting point, waiting for the same amount of the previously retracted filament to be primed back towards the hot-end in order to re-contact firmly with the melt and extrude it. However, in some cases the idling time of the nozzle or the priming speed is higher than needed resulting in overfills at the start of the path. For instance, in experiment 2, see Fig. 6-5, 8.6 mm of filament is primed at 5.0 mm/s speed providing time for material oozing. It is needless to say that high temperature facilitates this behaviour. To rectify this, the planar motion motors are actuated before priming is over, thus distributing the over-extruded material more uniformly along the path. Material overfill issue is discussed in detail in Section 6.7. On the other hand, premature motion actuation leads to unfilled regions of the path which is the case of interest here. For experiments 8, 14 and 16 in Fig. 6-5, half of the path or even the entire path is left unfilled due to late extrusion. The main reason behind this is the large percentage portion of priming that is commanded simultaneously with the planar motion. Furthermore, 8.6 mm of filament is retracted and primed at every path stop and start respectively. Apparently, this LPR value is large enough for the solid part of the feedstock to lose contact with the melt and besides, it cools down due to its displacement towards cooler nozzle region during retraction. Hence, when priming occurs, there is no sufficient time for the filament to absorb the thermal energy required to return to extrudable state in time, due to low temperature setting in the hot end, and due to high SPR. To sum up, the interacting effect between LPR and DP is depicted in Fig. 6-9. Generally, low LPR with high percentage of DP or high LPR with low percentage of DP should be combined in order to avoid unfilled region at the beginning of the deposition. This is indicated by the darkest regions in the plot. Furthermore, it is shown that increasing SPR, Fig. 6-9(b) and (d) and decreasing temperature, Fig. 6-9(a) and (b), limits the effective range (darkest regions) between LPR and DP pointing to avoidance of material discontinuity. The rest of the factors are kept at middle setting for all plots in Fig. 6-9.



**Fig. 6-9** LPR and DP interaction effect on MDD for (a) low SPR and low T, (b) high SPR and low T, (c) low SPR and high T, (d) high SPR and high T.

## 6.7 Strand width deviation (SWD)

Once uninterrupted deposition is ensured, the next objective is to minimize strand width deviation (SWD). To measure SWD, strand area and length calculations from image analysis were used to define mean strand width  $\bar{W}$  as follows:

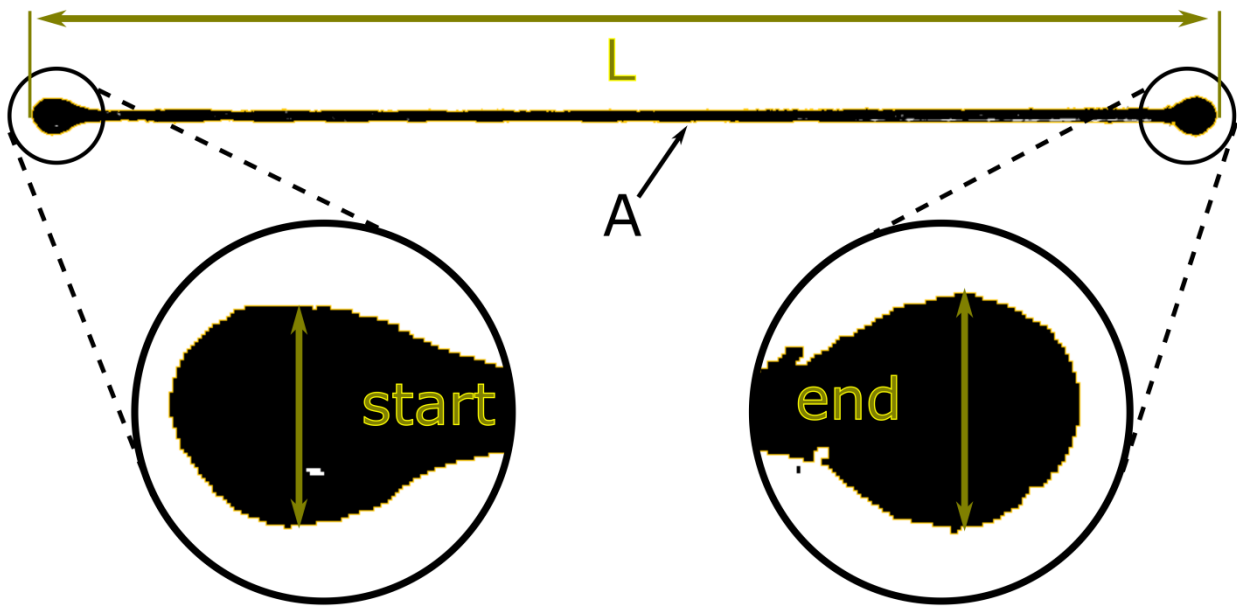
$$\bar{W} = A/L \quad (6-4)$$

where,

A: the strand area and

L: the strand length.

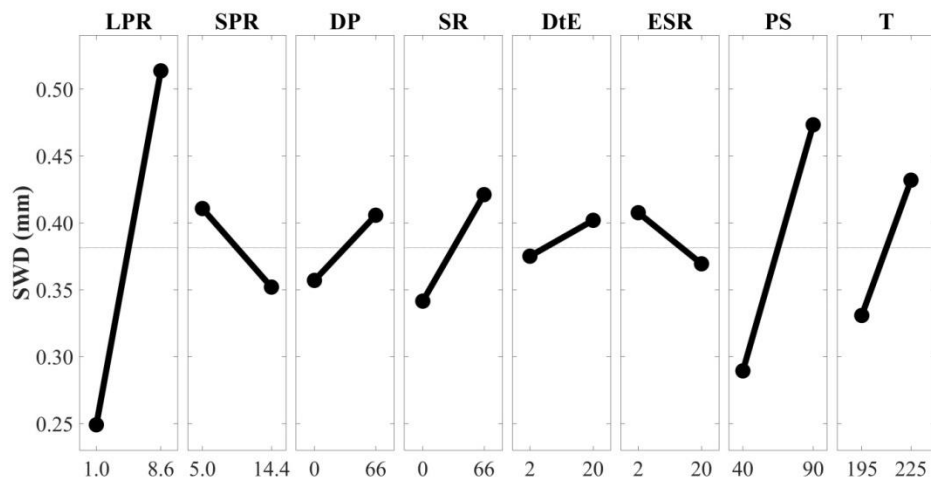
Then, two localized measurements at the beginning and at the end of the strand were performed in Fiji ImageJ in order to evaluate start-stop artefacts, Fig. 6-10. Standard deviation of all three measurements is registered as the SWD response that must be minimized in order to achieve uniform material deposition. For those experimental runs where deposition interruption occurs, see Fig. 6-5, a continuous strand was selected for SWD evaluation whenever possible.



**Fig. 6-10** Localized measurements at the start and at the end of the strand and calculation of mean strand width according to strand area ( $A$ ) and length ( $L$ ) values.

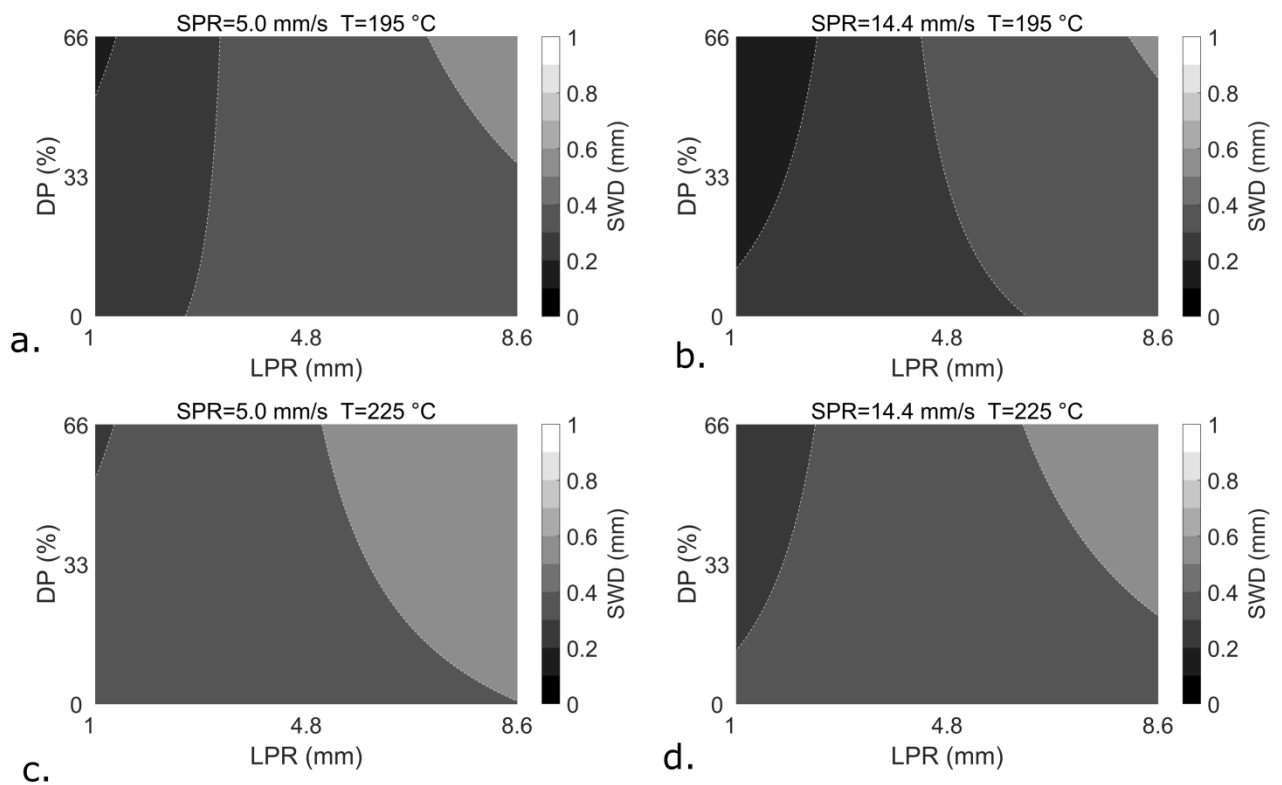
The first conclusion from the results is that the longer time the nozzle stays idle over the start or the end of the path, the higher the probability of material oozing. Apparently, LPR is the factor that determines the idling time and that is the reason that impacts the most on the response, see Fig. 6-11. PS comes as the second most significant factor, deteriorating strand uniformness as printing velocity increases. Not much interest has been given yet to motion dynamics of low-cost and even more expensive 3d-printers. Typically, trapezoid velocity profile is defined by the firmware, meaning that stepper motors use all available power to reach target PS when actuated. The larger the target PS, the longer the time required to reach it and the more difficult it becomes for the carriage to stop and change direction at the end of the path. On the other hand, material extrusion motor requires time to reach the target angular speed, which is again directly proportional to the value. However, this time is typically provided via priming and as soon as priming completes extrusion will remain steady without adapting to planar motion changes. Melt temperature  $T$  is another high-contributing factor as expected, as it is inversely proportional to material viscosity which facilitates flow when decreasing, hence unwanted oozing.





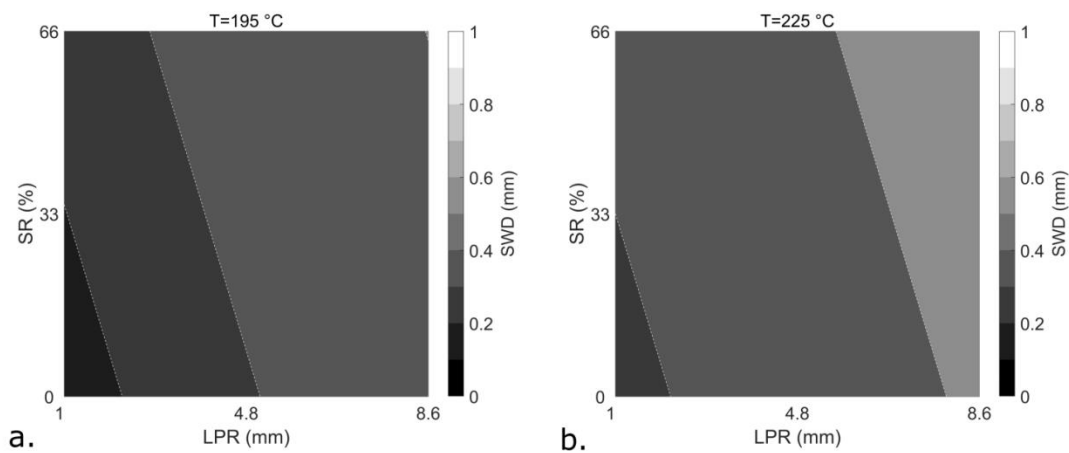
**Fig. 6-11** Main effect plots for investigated factors regarding their contribution to strand width deviation. Lower values indicate more uniform deposition.

Dynamic priming directly affects the initial part of the strand. An identified interaction with LPR indicates that motion actuation before priming completion favors uniform deposition. As shown in Fig. 6-12 increasing SPR, Fig. 6-12(b) and (d), or lowering T, Fig. 6-12(a) and (b) widens the range of possible combinations (darkest regions in the plot) which signify more uniform deposition. The rest of the factors are kept at middle setting for all plots in Fig. 6-12. As the end of the path is approached, extrusion motor needs to stop and invert rotation so as to retract filament and prevent it from being extruded uncontrollably.

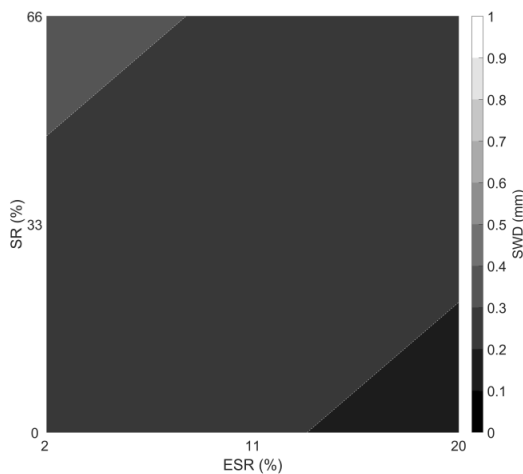


**Fig. 6-12** LPR and DP interaction effect on SWD for (a) low SPR and low T, (b) high SPR and low T, (c) low SPR and high T, (d) high SPR and high T.

As with the DP case, the prevailing factor that determines the idling time of the nozzle at the end of the path is LPR and this is clearly seen in Fig. 6-11. The more time the nozzle stays idle over the same location for static retraction, the largest the unwanted material oozing becomes, especially when  $T$  is high Fig. 6-13(b). Smaller LPR allows greater retraction with the nozzle at stance Fig. 6-13(a), which has proved useful for stringing elimination during traveling. Another interesting observation is that although SPR is also expected to play a similar role as LPR, its importance here is reduced. As measured during feedstock tracking, for small LPR, the priming/retraction speed is not given sufficient time to fully develop and therefore SPR makes less difference to the outcome. Regarding ESR, see Fig. 6-14, its impact is intuitively explained: when extruder motor slows down rapidly, static retraction can be prolonged without sacrificing uniformity of deposited strand; however, as noted in section 6.6, abrupt changes in extrusion rate may induce material discontinuity. DtE factor's effect is the least significant, making marginal difference in the strand width variation. Generally, DtE and ESR are not considered highly influential in comparison with the rest of the factors according to main effects in Fig. 6-11.



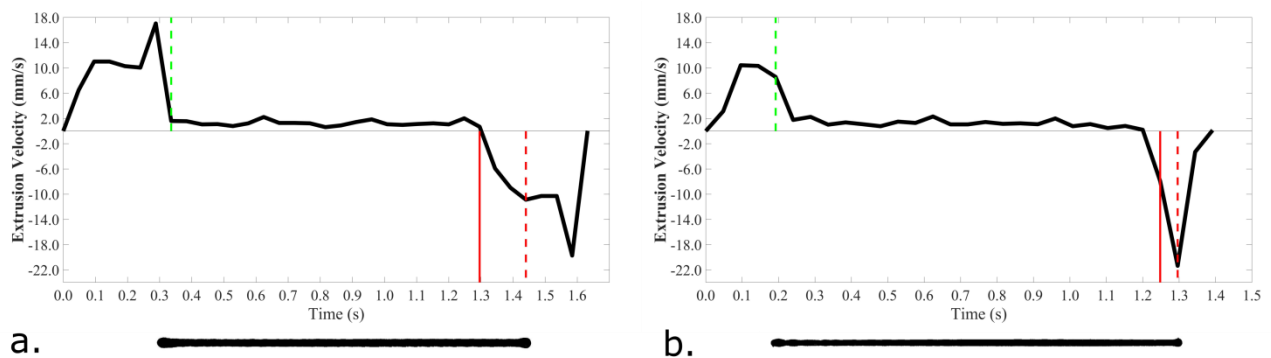
**Fig. 6-13 (a) Relationship between LPR and SR at (a)  $T=195^{\circ}\text{C}$  and (b)  $T=225^{\circ}\text{C}$ .**



**Fig. 6-14 Relationship between ESR and SR. The rest of the factors are set at their center points.**

## 6.8 Remarks on strand width consistency

The main scope of this study is to understand how extrusion and planar motion are synchronized in order to produce continuous strands of uniform width. Separate models for material deposition interruption and strand width deviation are developed. PS is strategically included in the experiment because it is a scaling factor for material flowrate and consequently process productivity. It is obvious that for both responses, PS is highly influential and introduces issues when it is increased. However, even at lower flowrate there is still margin for improvement regarding strand uniformity, as seen in Fig. 6-15. The graph represents feedstock velocity with respect to time. Positive velocity corresponds to filament priming whilst negative velocity corresponds to filament retraction. The green and red lines indicate start and stop of the nozzle motion along the direction of the path respectively, as they are captured during the feedstock motion video recordings. Dashed lines indicate planar motion actuation of the nozzle whilst the solid line indicates that the nozzle stops over a point of the path. It is evident that time periods between the solid and the dashed line imply nozzle idleness. In addition, the resulting strand is presented under the corresponding graph. Each strand is evaluated with respect to width deviation as shown in Fig. 6-10. The factor settings, the localized measurements and the strand width deviation are listed in Table 6-4.



**Fig. 6-15 Feedstock velocity vs Time graphs for printing at 40mm/s: (a) without special care on priming and retraction functions and (b) under improved priming and retraction functions. The actual strands are presented under the corresponding graph.**

**Table 6-4 Factor settings corresponding to graphs and strands in Fig. 6-15.**

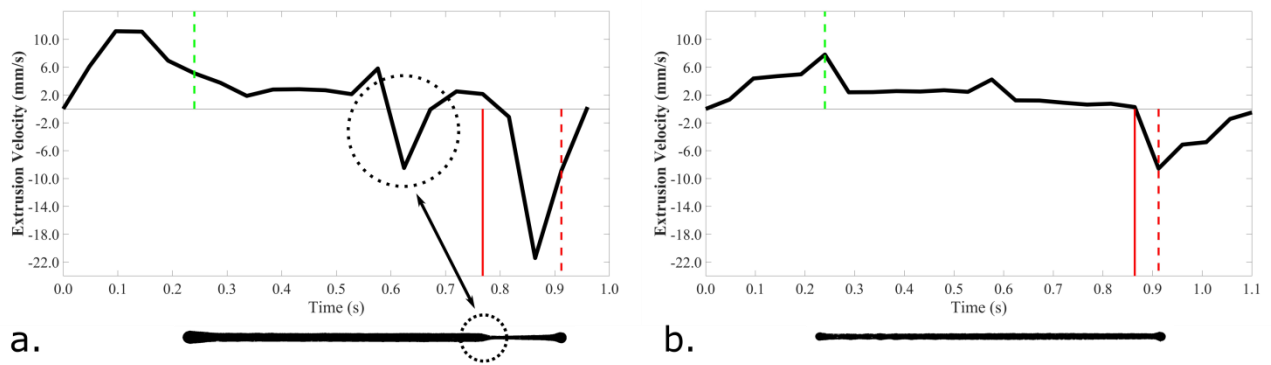
	LPR	SPR	DP	SR	DtE	ESR	PS	T	start	W	stop	SWD
Fig. 6-15 (a)	4.3	14.4	-*	-	-	-	40	195	1.165	0.830	1.144	0.1532
Fig. 6-15 (b)	2.1	14.4	30	30	10	2	40	195	0.807	0.617	0.848	0.1006

\*not adjusted

To achieve quality deposition at higher rates, the models that are generated from the fraction factorial design are exploited. Although their prediction ability is limited, they still serve as a reliable roadmap with respect to the factors and their effect on material deposition quality. Therefore, specific improvement steps have been identified and are used as guidelines:

- LPR is set to minimum since it is proven beneficial both for deposition continuity and uniformity.
- Because of the low LPR setting, SPR effect is minimized in practice, since there is not enough time for the extruder motor to reach its target angular speed.
- According to Fig. 6-9(a) and Fig. 6-9(c), DP efficient range (black region) widens as T increases. For T=195°C, DP=50 is a reasonable starting point. For higher temperature, reduced DP may also suffice.
- Although high SR setting favors overfills, it cannot be reduced to zero because of the stringing that occurs during travel towards the next start-point. For T=195°C, a mid-range SR value is a good starting point.
- When DtE is set at maximum tested distance, continuous deposition is aided, especially at lower melt temperature. At higher melt temperature, large DtE still helps the extruder to retract filament efficiently.
- ESR is moderately set in order to avoid abrupt deceleration of the extrusion.
- When PS is increased, T should be increased with caution. The need to facilitate flow at higher rates is constrained by difficulty to control overfills both at the start and the end of the path.

To demonstrate a case where higher deposition rate with improved width uniformity is possible, PS is initially increased to 65 mm/s. This corresponds to  $Q=7.8 \text{ mm}^3/\text{s}$  according to Eqn. (6-1) or feedstock velocity  $V_f=2.6 \text{ mm/s}$  during strand deposition, according to graphs in Fig. 6-16. LPR is set to 1.0 mm. Temperature is slightly increased to 200 °C, as it is proven that it facilitates deposition continuity. Material overfill at the beginning of the strand is reduced when 40% of the priming length is deposited upon motion actuation. Regarding the end point, SR at 40% is required to avoid stringing during travelling; however, this extends the time for which the nozzle stays idle over the same point. To aid retraction, extrusion speed is gradually reduced, 20 mm before the end of the path. As soon as the significant factors are carefully selected, the results in Fig. 6-16 and Table 6-5 indicate actual improvement in strand uniformity and in particular uninterrupted deposition, which is not always feasible at higher rates.



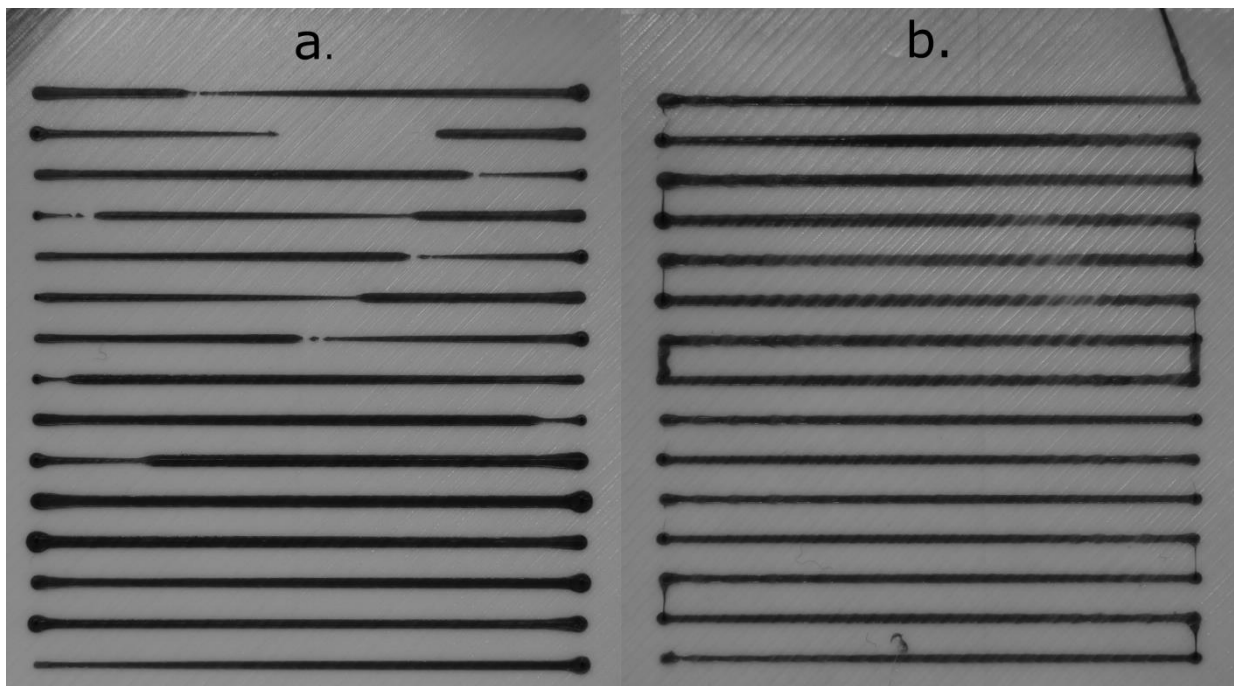
**Fig. 6-16 Feedstock velocity vs Time graphs for printing at 65mm/s: (a) overfills and deposition discontinuity (dotted circles) due to nozzle blockage and (b) lower SWD under improved priming and retraction settings. The actual strands are also presented under the corresponding graph.**

**Table 6-5 Factor settings corresponding to graphs and strands in Fig. 6-16.**

	LPR	SPR	DP	SR	DtE	ESR	PS	T	start	W	stop	SWD
Fig. 6-16(a)	4.3	14.4	-*	-	-	-	65	195	1.393	0.889	1.158	0.2059
Fig. 6-16(b)	1.0	5.0	40	40	20	2	65	200	0.927	0.704	1.111	0.1664

\*not adjusted

For both cases presented in Fig. 6-15 and Fig. 6-16, it is evident that early motion actuation during priming, favors uniform deposition at the beginning of the strand. Likewise, at the endpoint of the improved strands, Fig. 6-15(b) and Fig. 6-16(b), the nozzle stays idle only for 0.05 ms approximately which is about three times less than in the original cases, Fig. 6-15(a) and Fig. 6-16(a). In addition, gradual reduction in extrusion speed is clearly noticed in Fig. 6-16(b), after 0.6 sec approximately. In both cases the extrusion reduction is responsive and occurs timely. Finally, an overview of the specimens tested at increased flowrate is presented in Fig. 6-17, where material continuity is clearly depicted and deposition of successive strands at  $Q=7.80 \text{ mm}^3/\text{s}$  is considered successful.



**Fig. 6-17** Comparison of deposition quality at  $PS=65$  mm/s and  $Q=7.80\text{mm}^3/\text{s}$  for (a) non-optimized and (b) optimized settings.

## 6.9 Discussion

A fraction factorial design was carefully planned and performed to investigate the effect of eight parameters on the nozzle capability to deposit material with continuous flow and on their potential to minimize strand width deviation. Machine vision measurement methods were employed both for filament velocity tracking and for evaluation of the deposited strand. The generated models provide adequate information regarding the main effects but some interactions are confounded with each other. As a result, models are adequate for mapping and guiding towards improved performance, yet not for accurate predictions.

A number of valuable remarks are made for both responses. Two different cases which are responsible for material deposition discontinuity are identified and their root cause is analysed. A technique of pressure relief (ESR and DtE factors) is investigated, which is not standard for all slicers, yet it is easily applicable via minimal G-code editing.

LPR is of great importance as its increase typically boosts material overfills both at the beginning and at the end of the path. SPR depends on LPR setting in the case of high SPR and small LPR combination. Temperature is a significant factor and at the same time impacts responses on a contradicting manner, so its optimisation is of vital importance. Deposition interruption is apparently avoided when temperature is increased; however complementary factors should be optimized to compensate for uniformity deterioration. Generally, ESR and DtE

have negligible contribution to SWD criterion however, they aid continuous deposition by offering pressure relief on the material melt. Printing at high planar speed results in deterioration both criteria so it is a challenge to increase productivity and retain quality of deposition.

After material continuity is ensured, uniform deposition is improved at a speed of 65 mm/s. To prove the effectiveness of the method an initial and an optimized set of parameters were presented. It is observed that dynamic priming resolves material overfill at the beginning of the path. Regarding the same issue at the end of the strand, although low SR is beneficial, it cannot be reduced to zero as stringing effect is likely to emerge and therefore a time period of 0.05 ms for static retraction appears to be adequate. For printing at 40 mm/s speed under improved settings, a 34.33% reduction in strand width deviation has been achieved whilst for printing at 65 mm/s, a 19.18% reduction along with continuous material flow has been achieved.

Finally, an attempt to obtain the motion profile of the carriage, through integration of acceleration signal, was conducted along with the study presented in this chapter. The initial strategy was to utilize the obtained linear velocity and displacement of the carriage with respect to time, for the optimal synchronization between planar motion and the extrusion-profile. In brief, the sensor-based approach did not achieve the required accuracy and therefore was excluded from the presented results in this chapter. However, the initial remarks and the lessons learned from this approach, could serve as a first step for future investigation, given the lack of relative information in the literature. For reasons of completion, the methodology, the obtained results and the limitations are presented in ANNEX C.

# 7

## *Conclusions*

### *7.1 Achievements and limitations*

The first issue refers to the elimination of the STL format in the AM workflow. Although this format is still prevailing as the intermediate step between CAD model and AM process planning, it is widely accepted that it brings limitations and is disproportionally functional with respect to the increased design flexibility that additive methods provide. In particular, the case of large and complex structures, containing a large number of pores, in the order of magnitude of a few hundreds of  $\mu\text{m}$ , is employed as use case. For the aforementioned models, there are two possible cases. The first is the inability to convert such a model to a manageable and/or error-free STL file for slicing at later stage, whilst the second possible issue pertains to total inability to model such a structure in a standard CAD environment. The proposed solution for this, is the development of an API code, embedded in Solidworks™ software. Requiring only the outer shell of a model, implied as a fully-dense structure, and no matter how complex that would be, the code utilizes a user-defined pore unit-cell as a template structure that would be iteratively located inside the boundaries of the model. Therefore, a very complex porous geometry can be implicitly modelled. The main achievement is not limited to alternative representation of the model, but it also extends to generating fully-functional G-code that is ready to be input to the ME system. The main slicing parameters, are input by the user before the execution of the code, thus rendering it a CAD-direct slicer, specialized for porous structures. The performance of the code is fair for small models, comparing to the available slicer alternatives, but as the model becomes larger the advantages of the proposed solution become apparent. The code structure is highly modular, meaning that new unit cell shapes can be easily integrated. So far, cubic unit cells have been tested; however, the same algorithmic logic can be followed to develop classes



of new unit cells. Although the code is executed smoothly in Solidworks™ software, extra effort will be needed to transfer it to other CAD packages. This is because of the proprietary API that involves software specific commands and objects. The extra effort pertains only to implementation of the code, otherwise the same algorithm is perfectly valid for all standard CAD packages. In order to verify the generated G-code, a specific ME system with its proprietary firmware and certain G-code idiosyncratic variation is employed. Thus, minor modifications will be required for transferring an operational G-code file to another system. Regarding G-code validity, it is proven that the exported file was fully functional and operated smoothly when input to the AM system. A segment of a complex porous model was fabricated for demonstration. The trajectory path was followed as expected, starting from internal layer pores and fabricating layer contour at the end. The contour presented challenges in manufacturing, especially for short segments. The internal pores were very-well arranged and interconnected, yet presenting shape deviations due to non-optimal process settings, as well as due to the challenges associated with printing overhangs in ME.

The next part of the thesis investigated material deposition quality with the aim to obtain the operational window within which printing was performed without inducing defects. Four fundamental process parameters, namely layer thickness, flow tweak, printing speed and orientation were varied in a controlled manner using Taguchi design of experiments method of 27 runs. The L27 orthogonal array was the most suitable choice in order not only to evaluate main factor effects but also to investigate interaction between parameters. Indeed, a statistically significant interaction, according to ANOVA, between layer thickness and printing speed was obtained: although conservative settings for both factors appeared to improve stable deposition according to main effects evaluation, thin layers printed at slow speed are likely to encounter under-extrusion issues. Taguchi method is a perfect way to identify the optimum set of parameter values for optimized response but only among already tested parameter levels. To overcome this issue, an artificial neural network was trained on the results. The experimental study coupled with the ANN achieved formulation of a map over a wide parameter level range, in order to predict defect-free boundaries of the ME process. Its performance was evaluated at 6.57% mean generalization error with 3.75% standard deviation for new predictions. Apart from this, the trained ANN was utilized for prediction of non-tested parameter levels thus covering Taguchi limitation. Since layer thickness and printing speed totally define material flow-rate, the defect free operational window was also supplemented with information on the minimum feasible flow rate and maximum achieved productivity of the process, identified at  $Q_l = 0.60 \text{ mm}^3/\text{s}$  and  $Q_h = 8.07 \text{ mm}^3/\text{s}$ . The maximum printing speed is identified in terms of the maximum feasible flow rate at 43.6 mm/s. One limitation for the trained neural network, is the inability to predict which

specific type of defect will emerge for a given set of parameter levels. Furthermore, thermal process parameters, such as nozzle temperature or fan cooling intensity were not included, although they might be expected to play a role in the behavior of material deposition, given that occurrences during in-nozzle flow and deposition are tightly connected to temperature-dependent properties, such as material viscosity. This is another limitation, attributed to the need for a reasonable number of experiments to be conducted.

The identified defect-free region through the trained ANN, is used as the basis for the conduction of a second experimental study in order to optimize dimensional accuracy within feasible limits. A central composite design of 20 runs was employed and five regression models were fitted for predicting dimensional accuracy along X, Y, Z axes as well as for hole and thin wall features fabrication. The novelty presented here is the adoption of variable settings for different features on the same layer or even during the same trajectory path. Comparing with multiple-objective optimisation with desirability function, the adaptive approach presented decreased dimensional deviation by 32.3% for all examined features (mean absolute deviation) and along all directions except from Y-axis, yet still with minor difference from nominal. The prediction ability of the models was reasonably good and, in every case, following the correct tendency. The G-code modification took place as a post-processing stage with a custom script, since adaptive settings at the same trajectory is not an option for the available slicers. For more complex features, classification of G-code tool-path segments with the corresponding feature is expected to become challenging. Another limitation is the localized defects that appear at the external surface of the specimen in the form of ripples coinciding with the point of speed/deposition variation on the same trajectory path. This behavior is attributed partially to machine vibrations, due to abrupt change in the motion profile of the carriage, and also to disruption of smooth extrudate flow, due to the velocity and shear rate change of the melt in the nozzle. Therefore, there is a limit in the magnitude of step-like changes for printing speed and extrusion rate parameters.

The last part of the thesis is devoted to inspection of individual material strands via analysis of high-resolution images, in order to identify start-stop defects, material discontinuities during deposition and strand uniformity. At the same time, the motion of the feedstock in the extruder was recorded and analyzed frame-by-frame, in order to obtain extrusion motor velocity-time graph, during the strand deposition. Extrusion motor velocity-time graphs were captured with very good results, allowing for identification of actual velocities and lengths during (dynamic) priming and (static) retraction, typically occurring for some ms. In addition, blockage effect could also be identified clearly. Appropriate location of the camera, allowed for simultaneous capture of feedstock advancement in the nozzle and the linear motion of the carriage. As a result,

a large number of process parameters were effectively correlated with the quality of deposition at each point of the strand. The included parameters were: priming/retraction velocity and length, dynamic priming, static retraction, extrusion slow-down rate, distance-to-end slow-down, printing speed and melt temperature. Some of them were tested for the first time in literature. A fraction-factorial design of 18 runs was employed and regression models were fit for prediction of material deposition discontinuity (MDD) and strand width deviation (SWD), both with 96% coefficient of correlation, approximately. Eight factors, pertaining to motion and thermal characteristics of the process were tested. For the first-time, pressure relief in the nozzle towards the end of the trajectory path was quantified with respect to its role in eliminating overfills at instant stops at the end of the path. It was found that this setting was not as influential as the priming and retracting length that is commanded. This is because, when larger priming/retraction lengths are commanded, the nozzle stays idle over the start and end points of the trajectory for longer time, thus forming material overfills underneath or stringing traces upon traveling. The models were consulted in order to achieve the maximum nozzle speed at which continuous and uniform strand was deposited. This occurred for 65 mm/s which corresponds to flow-rate  $Q=7.80 \text{ mm}^3/\text{s}$  that is slightly lower than the operational window identified by the ANN. This is attributed to the better insight and detail that was possible when inspecting single strands rather than entire specimens. In addition, it was proven that although temperature increase could cause flow-rate increase, the management of the facilitated flow of the material is challenging as it is associated with uncontrolled extrusion, causing overfills and stringing effects.

## ***7.2 Future work***

Substantial and novel steps were presented, in terms of trajectory design and material extrusion optimisation, but it is practically impossible to cover the whole spectrum. Therefore, future work directions are presented next, either for further development of a proposed solution or motivated by limitations that were encountered.

Regarding direct generation porous trajectory, new unit-cell geometries can be designed and added to the developed trajectory design code as standard modules, thus populating a library and providing the user with more infill pattern options. Furthermore, taking advantage of the individual handling capability for each designed pore, the immediate next step is to implement variable pore size in the model, in an effort to achieve functionally graded structures. Variable elasticity and impact absorbing capability suggest a potential solution for lightweight and topologically optimized parts.

The inherent flexibility of the developed CAD-direct slicer can be utilized for different trajectory arrangement. This could be a way to efficiently control thermal gradients during ME, therefore mitigating part deformation due to warpage.

Regarding defect-free region identification, the main limitation of the trained ANN is its inability to predict the specific type of defect, given a set of parameter levels. In addition to this, thermal parameters could be investigated in a future study, in order to include a wider range of fundamental ME process parameters and better understand the defect formation mechanism.

Reverse-engineering of the specimen's geometry, using 3d-scanning was effectively used to quantify the intensity of the defects, as the standard deviation of the captured point-cloud, representing the external surfaces of the specimen, with respect to the ideal surface. The same rationale could be extended to other geometric characteristics deviations, such as angularity, cylindricity or AM-related features, such as lattices and overhangs.

Adaptive settings during ME were proven to be beneficiary for the dimensional accuracy of the parts. This is the initiative for increased flexibility of the available slicers, in contrast with determination of global process parameters for a part. The proposed solution was presented through a proof-of-concept specimen, for which different regions and features were obtained in a post-processing stage through a developed macro-code. The next step would incorporate a sophisticated method to locate features, even during slicing, in order to obtain adaptive setting in-situ. However, the complexity of features, such as non-prismatic internal channels or lattices, will be a challenge for the successful implementation.

Inspection of strand deposition, in order to ensure continuous and uniform deposition of strands at higher rates was successfully implemented. The assessment of strands was performed off-line after printing the specimens. One of the most desirable features, aiming to enhance reliability of ME process, is real-time monitoring of quality. As a next step, image-based evaluation of the deposited material could be ideally performed during the process. Machine vision tools and intelligent algorithms that are trained to identify defect formation in-situ, can be developed. This possibility would set a threshold for early detection of manufacturing discrepancies and consequently autonomous decision regarding go-no go status of printing. To extend it even further, a closed-loop system could be developed in order to adjust parameter settings on-the-fly and eventually save a wasted build. Furthermore, this comes in perfect agreement with the adaptive settings approach that was discussed in the previous paragraph.

Finally, motion profile identification through integration of acceleration signals is another potential approach for better comprehension of ME process. Although this method was attempted during the present thesis in a preliminary stage, the obtained information could not be

fully exploited for the purpose of material deposition optimisation, due to the low achieved accuracy. However, the preliminary results and limitations are presented in ANNEX C for the sake of completeness and in order to indicate the improvement margin of the method, given that further investigation is conducted. Pertinent future directions include the utilization of industrial-grade sensors as well as advanced filtering and signal processing techniques, thus rendering the method beneficial for material deposition optimisation.

# 8

## *References*

1. Gibson I, Rosen DW, Stucker B (2010) Additive Manufacturing Technologies. CIRP Encycl Prod Eng. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9
2. ISO/ASTM 52900 (2015) Additive manufacturing - General principles - Terminology. International Standard Organization (ISO), ASTM International
3. Boschetto A, Bottini L, Veniali F (2016) Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining. Robot Comput Integr Manuf 41:92–101. doi: 10.1016/j.rcim.2016.03.004
4. Orme M, Madera I, Gschweitzl M, Ferrari M (2018) Topology Optimization for Additive Manufacturing as an Enabler for Light Weight Flight Hardware. Designs 2:51. doi: 10.3390/designs2040051
5. Yang S, Zhao YF (2015) Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. Int J Adv Manuf Technol 80:327–342. doi: 10.1007/s00170-015-6994-5
6. Lušić M, Barabanov A, Morina D, et al (2015) Towards Zero Waste in Additive Manufacturing: A Case Study Investigating one Pressurised Rapid Tooling Mould to Ensure Resource Efficiency. Procedia CIRP 37:54–58. doi: 10.1016/j.procir.2015.08.022
7. Kim S, Moon SK (2020) A part consolidation design method for additive manufacturing based on product disassembly complexity. Appl Sci. doi: 10.3390/app10031100
8. Nie Z, Jung S, Kara LB, Whitefoot KS (2020) Optimization of Part Consolidation for Minimum Production Costs and Time Using Additive Manufacturing. J Mech Des. doi: 10.1115/1.4045106
9. Monzón MD, Ortega Z, Martínez A, Ortega F (2015) Standardization in additive

- manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. *Int J Adv Manuf Technol* 76:1111–1121. doi: 10.1007/s00170-014-6334-1
10. Seifi M, Gorelik M, Waller J, et al (2017) Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification. *JOM* 69:439–455. doi: 10.1007/s11837-017-2265-2
  11. Szilvsi-Nagy M, Mátyási G (2003) Analysis of STL files. *Math Comput Model* 38:945–960. doi: 10.1016/S0895-7177(03)90079-3
  12. Papazetis G, Vosniakos G-C (2016) Direct porous structure generation of tissue engineering scaffolds for layer-based additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 86:871–883. doi: 10.1007/s00170-015-8237-1
  13. Papazetis G, Vosniakos G-C (2019) Mapping of deposition-stable and defect-free additive manufacturing via material extrusion from minimal experiments. *Int J Adv Manuf Technol* 100:2207–2219. doi: 10.1007/s00170-018-2820-1
  14. Papazetis G, Vosniakos G-C (2019) Feature-based process parameter variation in continuous paths to improve dimensional accuracy in three-dimensional printing via material extrusion. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 095440541983836. doi: 10.1177/0954405419838361
  15. ISO 6983-1 (1982) Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words — Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems. International Standard Organization (ISO), Geneva
  16. Baumann F, Bugdayci H, Grunert J, et al (2016) Influence of slicing tools on quality of 3D printed parts. *Comput Aided Des Appl* 13:14–31. doi: 10.1080/16864360.2015.1059184
  17. Šljivic M, Pavlovic A, Kraišnik M, Ilić J (2019) Comparing the accuracy of 3D slicer software in printed enduse parts. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. doi: 10.1088/1757-899X/659/1/012082
  18. Álvarez K, Lagos RF, Aizpun M (2016) Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ing e Investig* 36:110. doi: 10.15446/ing.investig.v36n3.56610
  19. Qiu D, Langrana NA (2002) Void eliminating toolpath for extrusion-based multi-material layered manufacturing. *Rapid Prototyp J* 8:38–45. doi: 10.1108/13552540210413293
  20. Eiliat H, Urbanic RJ (2018) Minimizing voids for a material extrusion-based process.

- Rapid Prototyp J 24:485–500. doi: 10.1108/RPJ-05-2017-0092
21. Jose F. Rodriguez, James P. Thomas, John E. Renaud (2000) Characterization of the mesostructure of fused deposition acrylonitrile butadiene styrene materials. *Rapid Prototyp J* 6:175–186.
  22. Serdeczny MP, Comminal R, Pedersen DB, Spangenberg J (2019) Numerical simulations of the mesostructure formation in material extrusion additive manufacturing. *Addit Manuf* 28:419–429. doi: 10.1016/j.addma.2019.05.024
  23. Adams D, Turner CJ (2018) An implicit slicing method for additive manufacturing processes. *Virtual Phys Prototyp* 13:2–7. doi: 10.1080/17452759.2017.1392684
  24. Sun SH, Chiang HW, Lee MI (2007) Adaptive direct slicing of a commercial CAD model for use in rapid prototyping. *Int J Adv Manuf Technol* 34:689–701. doi: 10.1007/s00170-006-0651-y
  25. Roschli A, Messing A, Borish M, et al (2017) Ornl Slicer 2: a Novel Approach for Additive Manufacturing Tool Path Planning. *Solid Free Fabr Symp* 896–902.
  26. Zhao G, Ma G, Xiao W, Tian Y (2018) Feature-based five-axis path planning method for robotic additive manufacturing. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf*. doi: 10.1177/0954405417752508
  27. Turner BN, Strong R, Gold SA (2014) A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyp J* 20:192–204. doi: 10.1108/RPJ-01-2013-0012
  28. Bellini A, Güçeri S, Bertoldi M (2004) Liquefier Dynamics in Fused Deposition. *J Manuf Sci Eng* 126:237. doi: 10.1115/1.1688377
  29. Anderegg DA, Bryant HA, Ruffin DC, et al (2019) In-situ monitoring of polymer flow temperature and pressure in extrusion based additive manufacturing. *Addit Manuf* 26:76–83. doi: 10.1016/j.addma.2019.01.002
  30. Ramanath HS, Chua CK, Leong KF, Shah KD (2008) Melt flow behaviour of poly- $\epsilon$ -caprolactone in fused deposition modelling. *J Mater Sci Mater Med* 19:2541–2550. doi: 10.1007/s10856-007-3203-6
  31. Mostafa N, Syed HM, Igor S, Andrew G (2009) A study of melt flow analysis of an ABS-Iron composite in fused deposition modelling process. *Tsinghua Sci Technol* 14:29–37. doi: 10.1016/S1007-0214(09)70063-X
  32. Dine A, Vosniakos G-C (2018) On the development of a robot-operated 3D-printer. *Procedia Manuf* 17:6–13. doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.004



33. Toth G, Nagy D, Bata A, Belina K (2018) Determination of polymer melts flow-activation energy a function of wide range shear rate. *J Phys Conf Ser* 1045:012040. doi: 10.1088/1742-6596/1045/1/012040
34. Costa SF, Duarte FM, Covas JA (2017) Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition techniques. *J Mater Process Technol* 245:167–179. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.02.026
35. Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, Gu P (2008) Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyp J* 14:72–80. doi: 10.1108/13552540810862028
36. Go J, Schiffres SN, Stevens AG, Hart AJ (2017) Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design. *Addit Manuf* 16:1–11. doi: 10.1016/j.addma.2017.03.007
37. Go J, Hart AJ (2017) Fast Desktop-Scale Extrusion Additive Manufacturing. *Addit Manuf* 18:276–284. doi: 10.1016/j.addma.2017.10.016
38. Venkataraman N, Harper B, Matthewson MJ, et al (2002) Feedstock material property – process relationships in fused deposition of ceramics (FDC). *Rapid Prototyp J* 6:244–253. doi: 10.1108/13552540010373344
39. Tlegenov Y, Wong YS, Hong GS (2017) A dynamic model for nozzle clog monitoring in fused deposition modelling. *Rapid Prototyp J* 23:391–400. doi: 10.1108/RPJ-04-2016-0054
40. Lindahl J, Duty C, Kishore V, et al (2018) Determination of melt processing conditions for high performance amorphous thermoplastics for large format additive manufacturing. *Addit Manuf* 21:125–132. doi: 10.1016/j.addma.2018.03.004
41. Agarwala MK, Jamalabad VR, Langrana NA, et al (1996) Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyp J* 2:4–19. doi: 10.1108/13552549610732034
42. Alafaghani A, Qattawi A (2018) Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method. *J Manuf Process* 36:164–174. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.09.025
43. Holzer C, Schuschnigg S, Spoerk M, et al (2018) Optimisation of the Adhesion of Polypropylene-Based Materials during Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Polymers (Basel)* 10:490. doi: 10.3390/polym10050490
44. Bellehumeur C, Li L, Sun Q, Gu P (2004) Modeling of Bond Formation Between Polymer

- Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. *J Manuf Process* 6:170–178. doi: 10.1016/S1526-6125(04)70071-7
45. Comminal R, Serdeczny MP, Pedersen DB, Spangenberg J (2018) Numerical modeling of the strand deposition flow in extrusion-based additive manufacturing. *Addit Manuf* 20:68–76. doi: 10.1016/j.addma.2017.12.013
  46. Xia H, Lu J, Dabiri S, Tryggvason G (2018) Fully resolved numerical simulations of fused deposition modeling. Part I: fluid flow. *Rapid Prototyp J* 24:463–476. doi: 10.1108/RPJ-12-2016-0217
  47. Yardimci M a, Guceri SI, Agarwala M, Danforth SC (1996) Part quality prediction tools for fused deposition processing. *Solid Free Fabr Proceedings*, Sept 1996 539–548.
  48. Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, Gu P (2003) Experimental study of the cooling characteristics of polymer filaments in FDM and impact on the mesostructures and properties of prototypes. *Solid Free Fabr Proc* 313–323.
  49. R.S.Crockett PDC (1997) Rheology and Solid Freeform Fabrication: Modeling Material Flow in Deposition Techniques. *Int Solid Free Fabr Symp* 717–724.
  50. Crockett RS, Calvert PD (1996) The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques. In: *Solid Free. Fabr. Proc.* Austin, TX, pp 257–264
  51. Michaeli W (2012) Extrusion Dies for Plastics and Rubber. *Extrus Dies Plast Rubber*. doi: 10.3139/9783446401815
  52. Xia H, Lu J, Tryggvason G (2019) Simulations of fused filament fabrication using a front tracking method. *Int J Heat Mass Transf* 138:1310–1319. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.132
  53. Holzer C, Spoerk M, Sapkota J, et al (2017) Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly(lactic acid). *J Appl Polym Sci* 134:45401. doi: 10.1002/app.45401
  54. Greeff GP, Schilling M (2017) Closed loop control of slippage during filament transport in molten material extrusion. *Addit Manuf* 14:31–38. doi: 10.1016/j.addma.2016.12.005
  55. Greeff GP, Schilling M (2018) Single print optimisation of fused filament fabrication parameters. *Int J Adv Manuf Technol*. doi: 10.1007/s00170-018-2518-4
  56. Tronvoll SA, Welo T, Elverum CW (2018) The effects of voids on structural properties of fused deposition modelled parts: a probabilistic approach. *Int J Adv Manuf Technol* 97:3607–3618. doi: 10.1007/s00170-018-2148-x
  57. Costa AE, Ferreira da Silva A, Sousa Carneiro O (2018) A study on extruded filament

- bonding in fused filament fabrication. *Rapid Prototyp J*. doi: 10.1108/RPJ-03-2018-0062
58. Pollard D, Ward C, Herrmann G, Etches J (2017) Filament Temperature Dynamics in Fused Deposition Modelling and Outlook for Control. *Procedia Manuf* 11:536–544. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.147
59. Bakrani Balani S, Chabert F, Nassiet V, Cantarel A (2019) Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid. *Addit Manuf* 25:112–121. doi: 10.1016/j.addma.2018.10.012
60. Comminal R, Serdeczny MP, Pedersen DB, Spangenberg J (2019) Motion planning and numerical simulation of material deposition at corners in extrusion additive manufacturing. *Addit Manuf* 29:100753. doi: 10.1016/j.addma.2019.06.005
61. Ertay DS, Yuen A, Altintas Y (2018) Synchronized material deposition rate control with path velocity on fused filament fabrication machines. *Addit Manuf* 19:205–213. doi: 10.1016/j.addma.2017.05.011
62. Jin Y, He Y, Fu G, et al (2017) A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing. *Robot Comput Integr Manuf* 48:132–144. doi: 10.1016/j.rcim.2017.03.008
63. Li W, Ghazanfari A, Leu MC, Landers RG (2017) Extrusion-on-demand methods for high solids loading ceramic paste in freeform extrusion fabrication. *Virtual Phys Prototyp* 12:193–205. doi: 10.1080/17452759.2017.1312735
64. Kuznetsov VE, Solonin AN, Tavitov A, et al (2019) Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process. *Rapid Prototyp J*. doi: 10.1108/RPJ-01-2019-0017
65. Ravi AK, Deshpande A, Hsu KH (2016) An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. *J Manuf Process* 24:179–185. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.08.007
66. Geng P, Zhao J, Wu W, et al (2019) Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. *J Manuf Process* 37:266–273. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.11.023
67. Turner BN, Gold SA (2015) A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyp J* 21:250–261. doi: 10.1108/RPJ-02-2013-0017
68. Boschetto A, Bottini L (2014) Accuracy prediction in fused deposition modeling. *Int J Adv Manuf Technol* 73:913–928. doi: 10.1007/s00170-014-5886-4

69. Du J, Wei Z, Wang X, et al (2016) An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts. *J Mater Process Technol* 234:332–341. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.005
70. Serdeczny MP, Comminal R, Pedersen DB, Spangenberg J (2018) Experimental validation of a numerical model for the strand shape in material extrusion additive manufacturing. *Addit Manuf* 24:145–153. doi: 10.1016/j.addma.2018.09.022
71. Huang B, Singamneni S (2014) Adaptive slicing and speed-and time-dependent consolidation mechanisms in fused deposition modeling. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 228:111–126. doi: 10.1177/0954405413497474
72. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS (2010) Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 224:135–145. doi: 10.1243/09544054JEM1565
73. Chang D-Y, Huang B-H (2011) Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modeling process. *Int J Adv Manuf Technol* 53:1027–1037. doi: 10.1007/s00170-010-2882-1
74. Srivastava M, Rathee S (2018) Optimisation of FDM process parameters by Taguchi method for imparting customised properties to components. *Virtual Phys Prototyp* 13:203–210. doi: 10.1080/17452759.2018.1440722
75. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS (2009) Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Mater Des* 30:4243–4252. doi: 10.1016/j.matdes.2009.04.030
76. Cruz Sanchez FA, Boudaoud H, Muller L, Camargo M (2014) Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing. *Virtual Phys Prototyp* 9:151–167. doi: 10.1080/17452759.2014.919553
77. Minetola P, Iuliano L, Marchiandi G (2016) Benchmarking of FDM Machines through Part Quality Using IT Grades. *Procedia CIRP* 41:1027–1032. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.075
78. Noriega A, Blanco D, Alvarez BJ, Garcia A (2013) Dimensional accuracy improvement of FDM square cross-section parts using artificial neural networks and an optimization algorithm. *Int J Adv Manuf Technol* 69:2301–2313. doi: 10.1007/s00170-013-5196-2
79. Peng A, Xiao X, Yue R (2014) Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system. *Int J Adv Manuf Technol* 73:87–100. doi: 10.1007/s00170-014-5796-5

80. Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL (2017) Experimental investigation for dynamic stiffness and dimensional accuracy of FDM manufactured part using IV-Optimal response surface design. *Rapid Prototyp J* 23:736–749. doi: 10.1108/RPJ-10-2015-0137
81. Lieneke T, Denzer V, Adam GAO, Zimmer D (2016) Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP* 43:286–291. doi: 10.1016/j.procir.2016.02.361
82. Rupal BS, Ahmad R, Qureshi AJ (2018) Feature-Based Methodology for Design of Geometric Benchmark Test Artifacts for Additive Manufacturing Processes. *Procedia CIRP* 70:84–89. doi: 10.1016/j.procir.2018.02.012
83. Huang Q, Xu K, Sosina S, et al (2014) Statistical Predictive Modeling and Compensation of Geometric Deviations of Three-Dimensional Printed Products. *J Manuf Sci Eng* 136:061008. doi: 10.1115/1.4028510
84. Wang CC, Lin TW, Hu SS (2007) Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. *Rapid Prototyp J* 13:304–315. doi: 10.1108/13552540710824814
85. Gurralla PK, Regalla SP (2014) Multi-objective optimisation of strength and volumetric shrinkage of FDM parts. *Virtual Phys Prototyp* 9:127–138. doi: 10.1080/17452759.2014.898851
86. Vosniakos GC, Maroulis T, Pantelis D (2007) A method for optimizing process parameters in layer-based rapid prototyping. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 221:1329–1340. doi: 10.1243/09544054JEM815
87. Sahu RK, Mahapatra SS, Sood AK (2014) A Study on Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modeling (FDM) Processed Parts using Fuzzy Logic. *J Manuf Sci Prod* 13:183–197. doi: 10.1515/jmsp-2013-0010
88. Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL (2016) Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion. *Meas J Int Meas Confed* 81:174–196. doi: 10.1016/j.measurement.2015.12.011
89. Spoerk M, Holzer C, Gonzalez-Gutierrez J (2020) Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. *J Appl Polym Sci* 137:48545. doi: 10.1002/app.48545
90. Kousiatza C, Chatzidai N, Karalekas D (2017) Temperature Mapping of 3D Printed Polymer Plates: Experimental and Numerical Study. *Sensors* 17:456. doi: 10.3390/s17030456

91. Wolszczak P, Lygas K, Paszko M, Wach RA (2018) Heat distribution in material during fused deposition modelling. *Rapid Prototyp J* 24:615–622. doi: 10.1108/RPJ-04-2017-0062
92. Xinhua L, Shengpeng L, Zhou L, et al (2015) An investigation on distortion of PLA thin-plate part in the FDM process. *Int J Adv Manuf Technol* 79:1117–1126. doi: 10.1007/s00170-015-6893-9
93. Yardimci MA, Selçuk G (1996) Conceptual framework for the thermal process modelling of fused deposition. *Rapid Prototyp J* 2:26–31. doi: 10.1108/13552549610128206
94. Yardimci M a, Hattori T, Gucerı SI, Danforth SC (1997) Thermal analysis of Fused Deposition. *Solid Free Fabr Proceedings*, Sept 1997 689–698.
95. Yardimci MA, Selçuk G, Danforth S (1995) A phenomenological numerical model for fused deposition processing of particle filled parts. *Solid Free Fabr Symp* 189–195.
96. Wang TM, Xi JT, Jin Y (2007) A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *Int J Adv Manuf Technol* 33:1087–1096. doi: 10.1007/s00170-006-0556-9
97. Armillotta A, Bellotti M, Cavallaro M (2018) Warpıge of FDM parts: Experimental tests and analytic model. *Robot Comput Integr Manuf* 50:140–152. doi: 10.1016/j.rcim.2017.09.007
98. Zhang Y, Chou Y (2006) Three-dimensional finite element analysis simulations of the fused deposition modelling process. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 220:1663–1671. doi: 10.1243/09544054JEM572
99. Brenken B, Barocio E, Favaloro A, et al (2019) Development and validation of extrusion deposition additive manufacturing process simulations. *Addit Manuf* 25:218–226. doi: 10.1016/j.addma.2018.10.041
100. Kousiatza C, Tzetzis D, Karalekas D (2019) In-situ characterization of 3D printed continuous fiber reinforced composites: A methodological study using fiber Bragg grating sensors. *Compos Sci Technol* 174:134–141. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.02.008
101. Kantaros A, Karalekas D (2013) Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process. *Mater Des* 50:44–50. doi: 10.1016/j.matdes.2013.02.067
102. Kousiatza C, Karalekas D (2016) In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process. *Mater Des* 97:400–406. doi: 10.1016/j.matdes.2016.02.099
103. Casavola C, Cazzato A, Moramarco V, Pappalettera G (2017) Residual stress

- measurement in Fused Deposition Modelling parts. *Polym Test* 58:249–255. doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.01.003
104. Li F, Yu Z, Yang Z, Shen X (2019) Real-time distortion monitoring during fused deposition modeling via acoustic emission. *Struct Heal Monit.* doi: 10.1177/1475921719849700
105. Li Y, Zhao W, Li Q, et al (2019) In-situ monitoring and diagnosing for fused filament fabrication process based on vibration sensors. *Sensors (Switzerland)* 19:0–18. doi: 10.3390/s19112589
106. Rahmati S, Vahabli E (2015) Evaluation of analytical modeling for improvement of surface roughness of FDM test part using measurement results. *Int J Adv Manuf Technol* 79:823–829. doi: 10.1007/s00170-015-6879-7
107. Pandey PM, Thrimurthulu K, Reddy NV (2004) Optimal part deposition orientation in FDM by using a multicriteria genetic algorithm. *Int J Prod Res* 42:4069–4089. doi: 10.1080/00207540410001708470
108. Reeves PE, Cobb RC (1997) Reducing the surface deviation of stereolithography using in-process techniques. *Rapid Prototyp J* 3:20–31. doi: 10.1108/13552549710169255
109. Campbell RI, Martorelli M, Lee HS (2002) Surface roughness visualisation for rapid prototyping models. *Comput Des* 34:717–725. doi: 10.1016/S0010-4485(01)00201-9
110. Boschetto A, Giordano V, Veniali F (2013) 3D roughness profile model in fused deposition modelling. *Rapid Prototyp J* 19:240–252. doi: 10.1108/13552541311323254
111. Ahn D, Kweon JH, Kwon S, et al (2009) Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *J Mater Process Technol* 209:5593–5600. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016
112. Boschetto A, Giordano V, Veniali F (2013) Surface roughness prediction in fused deposition modelling by neural networks. *Int J Adv Manuf Technol* 67:2727–2742. doi: 10.1007/s00170-012-4687-x
113. Boschetto A, Bottini L, Veniali F (2016) Integration of FDM surface quality modeling with process design. *Addit Manuf* 12:334–344. doi: 10.1016/j.addma.2016.05.008
114. Armillotta A (2006) Assessment of surface quality on textured FDM prototypes. *Rapid Prototyp J* 12:35–41. doi: 10.1108/13552540610637255
115. Anitha R, Arunachalam S, Radhakrishnan P (2001) Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *J Mater Process Technol* 118:385–388. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3

116. Raol TS, Dave KG, Patel DB, Talati VN (2014) An Experimental Investigation of Effect of Process Parameters on Surface Roughness of Fused Deposition Modeling Built Parts. *Int J Eng Technol* 3:2270–2274.
117. Alexander P, Allen S, Dutta D (1998) Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *CAD Comput Aided Des* 30:343–356. doi: 10.1016/S0010-4485(97)00083-3
118. Byun HS, Lee KH (2006) Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robot Comput Integr Manuf* 22:69–80. doi: 10.1016/j.rcim.2005.03.001
119. Song HC, Ray N, Sokolov D, Lefebvre S (2017) Anti-aliasing for fused filament deposition. *CAD Comput Aided Des* 89:25–34. doi: 10.1016/j.cad.2017.04.001
120. McGovern J, Brooks H, Abram T, et al (2012) Variable Fused Deposition Modelling – analysis of benefits, concept design and tool path generation. *Innov Dev Virtual Phys Prototyp* 511–517. doi: 10.1201/b11341-83
121. McIlroy C, Graham RS (2018) Modelling flow-enhanced crystallisation during fused filament fabrication of semi-crystalline polymer melts. *Addit Manuf* 24:323–340. doi: 10.1016/j.addma.2018.10.018
122. Imran M, Jacquot M, Tehrani EA, et al (2010) Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 9:552–571. doi: 10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x
123. Farah S, Anderson DG, Langer R (2016) Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Adv Drug Deliv Rev* 107:367–392. doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012
124. Sin LT, Rahmat AR, Rahman WAWA (2012) *Poly(lactic Acid) PLA Biopolymer Technology and Applications*, 1st ed. doi: 10.1016/B978-1-4377-4459-0.00002-0
125. Lanzotti A, Grasso M, Staiano G, Martorelli M (2015) The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyp J* 21:604–617. doi: 10.1108/RPJ-09-2014-0135
126. Rajpurohit SR, Dave HK (2019) Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer. *Int J Adv Manuf Technol* 101:1525–1536. doi: 10.1007/s00170-018-3047-x
127. Gomez-Gras G, Jerez-Mesa R, Travieso-Rodriguez JA, Lluma-Fuentes J (2018) Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. *Mater Des* 140:278–285. doi:



- 10.1016/j.matdes.2017.11.072
128. Lee C-Y, Liu C-Y (2019) The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication. *Addit Manuf* 25:196–203. doi: 10.1016/j.addma.2018.11.012
129. Chacón JM, Caminero MA, García-Plaza E, Núñez PJ (2017) Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Mater Des* 124:143–157. doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.065
130. Fayazbakhsh K, Movahedi M, Kalman J (2019) The impact of defects on tensile properties of 3D printed parts manufactured by fused filament fabrication. *Mater Today Commun* 18:140–148. doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.12.003
131. Camargo JC, Machado ÁR, Almeida EC, Silva EFMS (2019) Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *Int J Adv Manuf Technol*. doi: 10.1007/s00170-019-03532-5
132. Ferreira RTL, Amatte IC, Dutra TA, Bürger D (2017) Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. *Compos Part B Eng* 124:88–100. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013
133. Abbott AC, Tandon GP, Bradford RL, et al (2018) Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication. *Addit Manuf* 19:29–38. doi: 10.1016/j.addma.2017.11.002
134. Mansour M, Tsongas K, Tzetzis D, Antoniadis A (2018) Mechanical and Dynamic Behavior of Fused Filament Fabrication 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Reinforced with Carbon Fibers. *Polym - Plast Technol Eng* 57:1715–1725. doi: 10.1080/03602559.2017.1419490
135. Rahim TNAT, Abdullah AM, Akil HM, Mohamad D (2016) Comparison of mechanical properties for polyamide 12 composite-based biomaterials fabricated by fused filament fabrication and injection molding. p 020007
136. Domingo-Espin M, Puigoriol-Forcada JM, Garcia-Granada A-A, et al (2015) Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Mater Des* 83:670–677. doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.074
137. Reese R (2015) Mechanical Properties of Additively Manufactured Peek Components Using Fused. 1–11.
138. Arif MF, Kumar S, Varadarajan KM, Cantwell WJ (2018) Performance of biocompatible

- PEEK processed by fused deposition additive manufacturing. *Mater Des* 146:249–259. doi: 10.1016/j.matdes.2018.03.015
139. Zaldivar RJ, Witkin DB, McLouth T, et al (2017) Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D-Printed ULTEM® 9085 Material. *Addit Manuf* 13:71–80. doi: 10.1016/j.addma.2016.11.007
140. Padovano E, Galfione M, Concialdi P, et al (2020) Mechanical and Thermal Behavior of Ultem ® 9085 Fabricated by Fused-Deposition Modeling. 1–15. doi: 10.3390/app10093170
141. Tanikella NG, Wittbrodt B, Pearce JM (2017) Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Addit Manuf* 15:40–47. doi: 10.1016/j.addma.2017.03.005
142. Goh GD, Yap YL, Tan HKJ, et al (2020) Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Crit Rev Solid State Mater Sci* 45:113–133. doi: 10.1080/10408436.2018.1549977
143. Brenken B, Barocio E, Favaloro A, et al (2018) Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review. *Addit Manuf* 21:1–16. doi: 10.1016/j.addma.2018.01.002
144. Eisenbarth E (2007) Biomaterials for Tissue Engineering. *Adv Eng Mater* 9:1051–1060. doi: 10.1002/adem.200700287
145. Langer R, Vacanti J (1993) Tissue engineering. *Science* (80- ) 260:920–926. doi: 10.1126/science.8493529
146. Liebschner MAK (2012) Computer-Aided Tissue Engineering. doi: 10.1007/978-1-61779-764-4
147. Cheah CM, Chua CK, Leong KF, Chua SW (2003) Development of a Tissue Engineering Scaffold Structure Library for Rapid Prototyping. Part 2: Parametric Library and Assembly Program. *Int J Adv Manuf Technol* 21:302–312. doi: 10.1007/s001700300035
148. Chua CK, Leong KF, Cheah CM, Chua SW (2003) Development of a Tissue Engineering Scaffold Structure Library for Rapid Prototyping. Part 1: Investigation and Classification. *Int J Adv Manuf Technol* 21:291–301. doi: 10.1007/s001700300034
149. Melchels FPW, Domingos M a N, Klein TJ, et al (2012) Additive manufacturing of tissues and organs. *Prog Polym Sci* 37:1079–1104. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007
150. Williams JM, Adewunmi A, Schek RM, et al (2005) Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering. *Biomaterials* 26:4817–

4827. doi: 10.1016/j.biomaterials.2004.11.057
151. ISO / ASTM52915-16 (2016) Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2. ASTM International, West Conshohocken, PA
  152. Hiller JD, Lipson H (2009) STL 2.0: A Proposal for a Universal Multi-Material Additive Manufacturing File Format. *Solid Free Fabr Symp* 266–278.
  153. Giannatsis J, Vassilakos A, Canellidis V, Dedoussis V (2015) Fabrication of graded structures by extrusion 3D Printing. In: 2015 IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag. IEEE, pp 175–179
  154. Starly B, Lau W, Bradbury T, Sun W (2006) Internal architecture design and freeform fabrication of tissue replacement structures. *Comput Des* 38:115–124. doi: 10.1016/j.cad.2005.08.001
  155. Yoo D-J (2011) Computer-aided porous scaffold design for tissue engineering using triply periodic minimal surfaces. *Int J Precis Eng Manuf* 12:61–71. doi: 10.1007/s12541-011-0008-9
  156. Yoo D-J (2012) Heterogeneous porous scaffold design for tissue engineering using triply periodic minimal surfaces. *Int J Precis Eng Manuf* 13:527–537. doi: 10.1007/s12541-012-0068-5
  157. Yoo D (2012) New paradigms in internal architecture design and freeform fabrication of tissue engineering porous scaffolds. *Med Eng Phys* 34:762–776. doi: 10.1016/j.medengphy.2012.05.008
  158. Vassilakos A, Giannatsis J, Dedoussis V (2019) 3D Printing of Parts with Intra-Layer Variable Density. *Key Eng Mater* 799:288–293. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.288
  159. Kang H-W, Park JH, Kang T-Y, et al (2012) Unit cell-based computer-aided manufacturing system for tissue engineering. *Biofabrication* 4:015005. doi: 10.1088/1758-5082/4/1/015005
  160. Giannitelli SM, Accoto D, Trombetta M, Rainer A (2014) Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering. *Acta Biomater* 10:580–594. doi: 10.1016/j.actbio.2013.10.024
  161. Giannatsis J, Dedoussis V (2009) Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 40:116–127. doi: 10.1007/s00170-007-1308-1
  162. An J, Ee Mei Teoh J, Suntornnond R, Kai Chua C (2015) Design and 3D Printing of

- Scaffolds and Tissues. *Engineering* 1:261. doi: 10.15302/J-ENG-2015061
163. Starly B (2006) Biomimetic Design and Fabrication of Tissue Engineered Scaffolds Using Computer Aided Tissue Engineering. doi: 10.1.1.90.903
164. Filippidis P, Papazetis G, Vosniakos G (2020) Process parameter investigation for 3D printing of cellular structured parts.
165. Leong K, Chua C, Sudarmadji N, Yeong W (2008) Engineering functionally graded tissue engineering scaffolds. *J Mech Behav Biomed Mater* 1:140–152. doi: 10.1016/j.jmbbm.2007.11.002
166. Fitzharris ER, Watanabe N, Rosen DW, Shofner ML (2018) Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts. *Int J Adv Manuf Technol* 95:2059–2070. doi: 10.1007/s00170-017-1340-8
167. Stoof D, Pickering K (2018) Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene. *Compos Part B Eng* 135:110–118. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.005
168. Spoerk M, Gonzalez-Gutierrez J, Sapkota J, et al (2018) Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication. *Plast Rubber Compos* 47:17–24. doi: 10.1080/14658011.2017.1399531
169. Gu Q, Herakleous K, Poullis C (2014) 3DUNDERWORLD-SLS: An Open-Source Structured-Light Scanning System for Rapid Geometry Acquisition. 1–30.
170. Roy RK (1990) *A Primer on the Taguchi Method*. Van Nostrand Reinhold, New York
171. Mahmood S, Qureshi AJ, Talamona D (2018) Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling. *Addit Manuf* 21:183–190. doi: 10.1016/j.addma.2018.03.009
172. Liu X, Zhang M, Li S, et al (2017) Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol* 89:2387–2397. doi: 10.1007/s00170-016-9263-3
173. Czitrom V (1989) Taguchi methods: linear graphs of high resolution. *Commun Stat - Theory Methods* 18:4583–4606. doi: 10.1080/03610928908830176
174. Wilcox JAD, Wright DT (1998) Towards pultrusion process optimisation using artificial neural networks. *J Mater Process Technol* 83:131–141. doi: 10.1016/S0924-0136(98)00052-1
175. Dias FM, Antunes A, Vieira J, Mota AM (2004) Implementing the Levenberg-Marquardt Algorithm On-line: A sliding window approach with early stopping. *IFAC Proc Vol* 0:6.

- doi: 10.1016/S1474-6670(17)30849-2
176. Yalcin U, Karaoglan AD, Korkut I (2013) Optimization of Cutting Parameters in Face Milling with Neural Networks and Taguchi based on Cutting Force, Surface Roughness and Temperatures. *Int J Prod Res* 51:3404–3414. doi: 10.1080/00207543.2013.774482
  177. Madić M, Madić MJ, Radovanović MR (2011) Optimal Selection of ANN Training and Architectural Parameters Using Taguchi Method: A Case Study. *FME Trans* 39:79–86.
  178. Benardos PG, Vosniakos GC (2007) Optimizing feedforward artificial neural network architecture. *Eng Appl Artif Intell* 20:365–382. doi: 10.1016/j.engappai.2006.06.005
  179. Hagan MT, Demuth HB, Beale MH, De Jesús O (2014) *Neural network design*. Martin Hagan
  180. Suiker ASJ (2018) Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments. *Int J Mech Sci* 137:145–170. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.01.010
  181. Danjou S, Kohler P (2010) Improving part quality and process efficiency in layered manufacturing by adaptive slicing. *Virtual Phys Prototyp* 5:183–188. doi: 10.1080/17452759.2010.527010
  182. Strano G (2012) *Multi-objective Optimisation in Additive Manufacturing*.
  183. Wang J, Chen T, Jin Y, He Y (2019) Variable bead width of material extrusion-based additive manufacturing. *J Zhejiang Univ A* 20:73–82. doi: 10.1631/jzus.A1700236
  184. Montgomery DC (2006) Design and Analysis of Experiments. *Technometrics* 48:158–158. doi: 10.1198/tech.2006.s372
  185. Derringer G, Suich R (1980) Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *J Qual Technol* 12:214–219. doi: 10.1080/00224065.1980.11980968
  186. Hawkins DM (1980) *Identification of Outliers*. Chapman & Hall, London-New York
  187. Yang Z, Jin L, Yan Y, Mei Y (2018) Filament breakage monitoring in fused deposition modeling using acoustic emission technique. *Sensors (Switzerland)* 18:1–16. doi: 10.3390/s18030749
  188. Wu H, Wang Y, Yu Z (2016) In situ monitoring of FDM machine condition via acoustic emission. *Int J Adv Manuf Technol* 84:1483–1495. doi: 10.1007/s00170-015-7809-4
  189. Holzmond O, Li X (2017) In situ real time defect detection of 3D printed parts. *Addit Manuf* 17:135–142. doi: 10.1016/j.addma.2017.08.003
  190. Lin W, Shen H, Fu J, Wu S (2019) Online quality monitoring in material extrusion additive manufacturing processes based on laser scanning technology. *Precis Eng* 60:76–

84. doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.06.004
191. Gardner JM, Hunt KA, Ebel AB, et al (2019) Machines as Craftsmen: Localized Parameter Setting Optimization for Fused Filament Fabrication 3D Printing. *Adv Mater Technol* 4:1800653. doi: 10.1002/admt.201800653
192. Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E, et al (2012) Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* 9:676–682. doi: 10.1038/nmeth.2019
193. Tinevez J-Y, Perry N, Schindelin J, et al (2017) TrackMate: An open and extensible platform for single-particle tracking. *Methods* 115:80–90. doi: 10.1016/j.ymeth.2016.09.016
194. Dong G, Wijaya G, Tang Y, Zhao YF (2018) Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures. *Addit Manuf* 19:62–72. doi: 10.1016/j.addma.2017.11.004
195. Bähr F, Westkämper E (2018) Correlations between Influencing Parameters and Quality Properties of Components Produced by Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP* 72:1214–1219. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.048
196. Montgomery DC (2006) Design and Analysis of Experiments. *Technometrics* 48:158–158. doi: 10.1198/tech.2006.s372
197. Earl B (2018) ADXL345 Digital Accelerometer Assembly and Wiring Assembly : I2C Wiring : Programming and Calibration Install the Library : Test : Calibrate : Library Reference Constructor : Initialization () Sensor Details : Getting and Setting the operating range : Get.
198. Gees A (1996) Accelerometer-Enhanced Speed Estimation for Linear-Drive Machine Tool Axes. *École Polytechnique Federale de Lausanne*
199. Analog Devices (2009) ADXL345 Digital Accelerometer Data Sheet.
200. Pedley M (2015) High-Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer. 34.
201. Pedley M (2013) Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. *Free Semicond Appl notes* 1–22. doi: 10.3390/s17010187
202. Brandt A (2011) Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures. *Noise Vib Anal Signal Anal Exp Proced*. doi: 10.1002/9780470978160
203. Zhang P, Chang J, Qu B, Zhao Q (2016) Denoising and Trend Terms Elimination Algorithm of Accelerometer Signals. *Math Probl Eng* 2016:1–9. doi: 10.1155/2016/2759092
204. Han S (2010) Measuring displacement signal with an accelerometer. *J Mech Sci Technol*

- 24:1329–1335. doi: 10.1007/s12206-010-0336-1
205. Brandt A, Brincker R (2014) Integrating time signals in frequency domain – Comparison with time domain integration. *Measurement* 58:511–519. doi: 10.1016/j.measurement.2014.09.004
206. Zhu Y, Jiang W, Kong X, et al (2015) An accurate integral method for vibration signal based on feature information extraction. *Shock Vib*. doi: 10.1155/2015/962793
207. Rangel-Magdaleno JJ, Romero-Troncoso RJ, Osornio-Rios RA, Cabal-Yepez E (2009) Novel oversampling technique for improving signal-to-quantization noise ratio on accelerometer-based smart Jerk sensors in CNC applications. *Sensors* 9:3767–3789. doi: 10.3390/s90503767
208. Kupfer C (2018) Investigation and Measurement of Oscillations of the H . E . S . S . Telescopes.
209. Li W, Wang J (2013) Effective Adaptive Kalman Filter for MEMS-IMU/Magnetometers Integrated Attitude and Heading Reference Systems. *J Navig* 66:99–113. doi: 10.1017/S0373463312000331

# I. ANNEX A

## Square Unit Cell VBA Class

Option Explicit

```
Private pID As String           'mapping ID of pattern
Private pRefLoc(2) As Double   'local reference vertex
Private RefInside As Boolean   'decides if local reference vertex
                                lies inside contour
Private aVer() As Variant      'array containing pattern vertices
Private numInter As Integer    'number of intersections across
                                pattern's segments
Private Intersections() As Variant 'array containing intersections
                                points along with pattern segment that is intersected
Private Side As Double         'pattern's side
Private Strut As Double       'pattern's strut width
Private numSeg As Integer      'pattern's number of segments
Private nSt As Integer         'next pattern's starting segment
Private initSt As Integer      'intersected segment for initial
                                `pattern(s)
```

```
Public Property Get getRefLoc() As Variant
    getRefLoc = pRefLoc
End Property
```

```
Public Property Let setRefLoc(RefPt As Variant)
    pRefLoc(0) = RefPt(0)
    pRefLoc(1) = RefPt(1)
    pRefLoc(2) = RefPt(2)
End Property
```

```
Public Property Get getaVer() As Variant
    getaVer = aVer
End Property
```

```
Public Property Get getID() As String
    getID = pID
End Property
```

```
Public Property Let setID(length As Double)
    pID = CUnitCell_MapUnitCell(pRefLoc(0), pRefLoc(1), length)
End Property
```

```
Public Property Get getRefInside() As Boolean
    getRefInside = RefInside
End Property
```

```
Public Property Let setRefInside(val As Boolean)
    RefInside = val
End Property
```

```
Public Property Get getnumInter() As Integer
    getnumInter = numInter
End Property
```



```

Public Property Let setnumInter(val As Integer)
    numInter = val
End Property
Public Property Get getIntersections() As Variant
    getIntersections = Intersections
End Property

Public Property Let set side(dblSliThi As Double)
    Side = dblSliThi
End Property

Public Property Let set strut(stru As Double)
    Strut = stru
End Property

Public Property Get get strut() As String
    get_strut = Strut
End Property

Public Sub pathIdentify(nozz As Double)
    numSeg = (Strut / nozz) * 4
End Sub

Public Property Let setIntersections(IntSeg() As InterSegment)
    ReDim Intersections(numInter - 1, 3)
    Dim idx As Integer
    For idx = 0 To numInter - 1
        Intersections(idx, 0) = IntSeg(idx).InterLoc(0)
        Intersections(idx, 1) = IntSeg(idx).InterLoc(1)
        Intersections(idx, 2) = IntSeg(idx).InterLoc(2)
        Intersections(idx, 3) = IntSeg(idx).InterSeg
    Next idx
End Property

Private Function CUnitCell MapUnitCell(RefX As Double, RefY As Double, length
As Double)
    Dim left As String
    Dim right As String
    Dim d1, d2 As Double
    d1 = (RefY * 100000 - (swSketchPt(0).y + length) * 100000) \ length *
100000
    left = CStr(d1 * MapCoef)
    d2 = (RefX * 100000 - (swSketchPt(0).x * 100000)) \ length * 100000
    right = CStr(d2 * MapCoef)
    CUnitCell_MapUnitCell = left + right
End Function

Public Property Let setarrVertex(multi As Boolean)

    If multi = False Then
        ReDim aVer(3, 2)
        aVer(0, 0) = Round((pRefLoc(0) + comp) * 1000, prec)
        aVer(0, 1) = Round((pRefLoc(1) - comp) * 1000, prec)
        aVer(0, 2) = Round(pRefLoc(2) * 1000, prec)
        aVer(1, 0) = Round((pRefLoc(0) + Side - comp) * 1000, prec)
        aVer(1, 1) = Round((pRefLoc(1) - comp) * 1000, prec)
        aVer(1, 2) = Round(pRefLoc(2) * 1000, prec)
        aVer(2, 0) = Round((pRefLoc(0) + Side - comp) * 1000, prec)
        aVer(2, 1) = Round((pRefLoc(1) - Side + comp) * 1000, prec)
        aVer(2, 2) = Round(pRefLoc(2) * 1000, prec)
        aVer(3, 0) = Round((pRefLoc(0) + comp) * 1000, prec)
        aVer(3, 1) = Round((pRefLoc(1) - Side + comp) * 1000, prec)
        aVer(3, 2) = Round(pRefLoc(2) * 1000, prec)
    ElseIf multi <> False Then

```

```

ReDim aVer(15, 2)
Dim t As Integer
Dim lprefix, lprefy As Double
For t = 0 To t = 3
    Select Case t
        Case Is = 0
            lprefix = pRefLoc(0)
            lprefy = pRefLoc(1)
        Case Is = 1
            lprefix = pRefLoc(0) + Side - Strut
            lprefy = pRefLoc(1)
        Case Is = 2
            lprefix = pRefLoc(0) + Side - Strut
            lprefy = pRefLoc(1) - Side + Strut
        Case Is = 3
            lprefix = pRefLoc(0)
            lprefy = pRefLoc(1) - Side + Strut
    End Select
    aVer(4 * t + 0, 0) = Round((lprefix + comp) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 0, 1) = Round((lprefy - comp) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 0, 2) = Round(pRefLoc(2) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 1, 0) = Round((lprefix + Side - comp) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 1, 1) = Round((lprefy - comp) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 0, 2) = Round(pRefLoc(2) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 2, 0) = Round((lprefix + Side - comp) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 2, 1) = Round((lprefy - Side + comp) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 0, 2) = Round(pRefLoc(2) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 3, 0) = Round((lprefix + comp) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 3, 1) = Round((lprefy - Side + comp) * 1000, prec)
    aVer(4 * t + 0, 2) = Round(pRefLoc(2) * 1000, prec)
Next t
End If
End Property

```

Public Property Let **set nSt**(res As Integer)

```

If numInter > 0 Then
    Select Case res_
        Case Is = 1 * MapCoef
            nSt = 3
        Case Is = -1 * MapCoef
            nSt = 1
        Case Is = 10 * MapCoef
            nSt = 2
        Case Is = -10 * MapCoef
            nSt = 0
    End Select
End If
End Property

```

Public Property Get **get\_nSt**() As Integer

```

get_nSt = nSt
End Property

```

Public Sub **ContourFullToolPath**(myTP As ToolPath)

```

Dim r, iter, start, st As Integer
For r = 0 To numInter - 1
    If myTP.stSegNo = Intersections(r, 3) Then
        Print #ff, "G1 X" & Round(Intersections(r, 0) * 1000, prec) & "
Y" & Round(Intersections(r, 1) * 1000, prec) & " Z" & Round((Intersections(r,
2) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    End If
Next r

If numInter > 0 Then

```

```

Select Case getRefInside
Case Is = False
  If (myTP.endSegNo - myTP.stSegNo > 0) Then
    For r = myTP.stSegNo + 1 To myTP.endSegNo
      Print #ff, "G1 X" & aVer(r, 0) & " Y" & aVer(r, 1) & " Z" &
aVer(r, 2) + ZOff & "F" & LinearFeed
    Next r
  ElseIf (myTP.endSegNo - myTP.stSegNo < 0) Then
    For r = myTP.stSegNo To myTP.endSegNo + 1 Step -1
      Print #ff, "G1 X" & aVer(r, 0) & " Y" & aVer(r, 1) & " Z" &
aVer(r, 2) + ZOff & " F" & LinearFeed
    Next r
  End If
Case Is = True
  iter = (UBound(aVer) + 1) - Abs(myTP.stSegNo - myTP.endSegNo)
  If myTP.endSegNo - myTP.stSegNo < 0 Then
    start = myTP.stSegNo + 1
    r = 1
    For r = 1 To iter
      If start <= UBound(aVer) Then
        Print #ff, "G1 X" & aVer(start, 0) & " Y" & aVer(start, 1) &
" Z" & aVer(start, 2) + ZOff & " F" & LinearFeed
        start = start + 1
      ElseIf start = UBound(aVer) + 1 Then
        start = 0
        Print #ff, "G1 X" & aVer(start, 0) & " Y" & aVer(start, 1) &
" Z" & aVer(start, 2) + ZOff & " F" & LinearFeed
        start = start + 1
      End If
    Next r
  Else
    start = myTP.stSegNo
    r = 1
    For r = 1 To iter
      If start >= 0 Then
        Print #ff, "G1 X" & aVer(start, 0) & " Y" & aVer(start, 1) &
" Z" & aVer(start, 2) + ZOff & " F" & LinearFeed
        start = start - 1
      ElseIf start < 0 Then
        start = UBound(aVer)
        Print #ff, "G1 X" & aVer(start, 0) & " Y" & aVer(start, 1) &
" Z" & aVer(start, 2) + ZOff & " F" & LinearFeed
        start = start - 1
      End If
    Next r
  End If
End Select
End If
For r = 0 To numInter - 1
  If myTP.endSegNo = Intersections(r, 3) Then
    Print #ff, "G1 X" & Round(Intersections(r, 0) * 1000, prec) & "
Y" & Round(Intersections(r, 1) * 1000, prec) & " Z" & Round((Intersections(r,
2) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
  End If
Next r
End Sub

```

Public Function LastEndSeg(initseg As Integer) As Integer

```

Dim p As Integer
For p = 0 To numInter - 1
  If (Intersections(p, 3) <> initseg) And (Intersections(p, 3) < 4)
Then
  LastEndSeg = Intersections(p, 3)
End If

```

```
Next p
End Function
```

```
Public Property Let set_initSt(myTP As ToolPath)
```

```
Dim t As Integer
For t = 0 To numInter - 1
    If (myTP_.endSegNo <> Intersections(t, 3)) And (myTP_.endSegNo < 4)
Then
        initSt = Intersections(t, 3)
    End If
Next t
End Property
```

```
Public Property Get get_initSt() As Integer
```

```
get_initSt = initSt
End Property
```

```
Public Function toMatch(iHave As Integer) As Boolean
```

```
Dim s As Integer
toMatch = False
Select Case iHave
Case Is = 0
    For s = 0 To numInter - 1
        If Intersections(s, 3) = 2 Then
            toMatch = True
        End If
    Next s
Case Is = 1
    For s = 0 To numInter - 1
        If Intersections(s, 3) = 3 Then
            toMatch = True
        End If
    Next s
Case Is = 2
    For s = 0 To numInter - 1
        If Intersections(s, 3) = 0 Then
            toMatch = True
        End If
    Next s
Case Is = 3
    For s = 0 To numInter - 1
        If Intersections(s, 3) = 1 Then
            toMatch = True
        End If
    Next s
End Select
End Function
```

```
Public Sub SqFullToolPath(LocalRefX As Double, LocalRefY As Double, LocalRefZ  
As Double, intID As Integer)
```

```
Dim i As Integer: i = 0
```

```
set_strut = PlanningCubeX.Strutvalue / 1000
```

```
For i = 1 To Strut / nozzle
```

```
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
```

```
'in Zsafe over the local ref
```

```
    Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &  
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((((LocalRefZ + ZSafe) *  
1000) + ZOff), prec) & " F" & Rapid
```

```
'in layer Z ready to feed
```

```

Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ) * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'nozzle open
Print #ff, "M101"
'1st seg horizontal top left->right
Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Side) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'2nd seg vertical right top->bottom
Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Side) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - Side) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'3rd seg horizontal bottom right->left
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Side) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'4th seg vertical left bottom->top ----- "(3/2*comp) in order not to
overlap the starting point
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - (nozzle / 2)) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'nozzle close
Print #ff, "M103"
'in Zsafe over previous point
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - (nozzle / 2)) * 1000, prec) & " Z" &
Round(((LocalRefZ + ZSafe) * 1000) + ZOff), prec) & " F" & Rapid
If i = numSeg Then
    comp = nozzle / 2
End If
Next i
End Sub

```

```

Public Sub SqFullToolPathMulti(LocalRefX As Double, LocalRefY As Double,
LocalRefZ As Double, intID As Integer)

```

```

    Dim i As Integer: i = 0

    set_strut = PlanningCubeX.Strutvalue / 1000
    Dim TranStrut As Double
    Dim adjbead As Integer
    Dim adjbeadtype As Boolean "'TRUE" INDICATES ODD NUMBER OF ADJACENT BEADS.
"FALSE" INDICATES EVEN NUMBER OF ADJACENT BEADS
    Dim curEnd(11) As Double
    TranStrut = Side - Strut
    comp = nozzle / 2
    adjbead = Strut / nozzle

    If (adjbead Mod 2) = 1 Then
        adjbeadtype = True
    Else
        adjbeadtype = False
    End If

```

```

Select Case adjbeadtype
Case Is = False
'in Zsafe over the local ref
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round(((LocalRefZ + ZSafe) *
1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
'in layer Z ready to feed 1st sub-square
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
For i = 1 To Strut / (2 * nozzle)
comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
If i = 1 Then Print #ff, "M101" 'nozzle open
'1st seg horizontal top left->right
Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'2nd seg vertical right top->bottom
Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'3rd seg horizontal bottom right->left
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
If i < Strut * 1000 Then
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - nozzle) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
End If
Next i
'nozzle close
Print #ff, "M103"
'in Zsafe over the 1st sub-square local ref
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round(((LocalRefZ +
ZSafe) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid

comp = nozzle / 2
LocalRefX = LocalRefX + TranStrut

'in Zsafe over the 2nd sub-square local ref
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round(((LocalRefZ + ZSafe) *
1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
'in layer Z ready to feed 2nd sub-square
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
For i = 1 To Strut / (2 * nozzle)
comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
If i = 1 Then Print #ff, "M101" 'nozzle open
'1st seg horizontal top left->right

```

```

Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'2nd seg vertical right top->bottom
Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'3rd seg horizontal bottom right->left
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
If i < Strut * 1000 Then
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - nozzle) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
End If
Next i
'nozzle close
Print #ff, "M103"
'in Zsafe over the 2nd local ref
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round(((LocalRefZ +
ZSafe) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid

comp = nozzle / 2
LocalRefY = LocalRefY - TranStrut

'in Zsafe over the 3rd local ref
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round(((LocalRefZ + ZSafe) *
1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
'in layer Z ready to feed 3rd sub-square
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
For i = 1 To Strut / (2 * nozzle)
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    If i = 1 Then Print #ff, "M101" 'nozzle open
    '1st seg horizontal top left->right
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    '2nd seg vertical right top->bottom
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    '3rd seg horizontal bottom right->left
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    If i < Strut * 1000 Then
        Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - nozzle) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    End If

```

```

Next i
  'nozzle close
  Print #ff, "M103"
  'in Zsafe over the 3rd local ref
  Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ +
ZSafe) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
  comp = nozzle / 2
  LocalRefX = LocalRefX - TranStrut

  'in Zsafe over the 4th local ref
  Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ + ZSafe) *
1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
  'in layer Z ready to feed 4th sub-square
  Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
For i = 1 To Strut / (2 * nozzle)
  comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
  If i = 1 Then Print #ff, "M101" 'nozzle open
  '1st seg horizontal top left->right
  Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
  '2nd seg vertical right top->bottom
  Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
  '3rd seg horizontal bottom right->left
  Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
  If i < Strut * 1000 Then
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - nozzle) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
  End If
Next i
  'nozzle close
  Print #ff, "M103"
  'in Zsafe over the 4th local ref
  Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ +
ZSafe) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
Case Is = True
  'in Zsafe over the local ref
  Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ + ZSafe) *
1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
  'in layer Z ready to feed 1st sub-square
  Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
  For i = 1 To adjbead \ 2

```



```

    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    If i = 1 Then Print #ff, "M101" 'nozzle open
    '1st seg horizontal top left->right
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    '2nd seg vertical right top->bottom
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    '3rd seg horizontal bottom right->left
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    'preparation for next
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - nozzle) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
Next i
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    'nozzle close
    Print #ff, "M103"
    'in Zsafe over the 1st sub-square local ref
    Print #ff, "G0 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ +
ZSafe) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid

    comp = nozzle / 2
    LocalRefX = LocalRefX + TranStrut

    'in Zsafe over the 2nd sub-square local ref
    Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ + ZSafe) *
1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
    'in layer Z ready to feed 2nd sub-square
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
For i = 1 To adjbead \ 2
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    If i = 1 Then Print #ff, "M101" 'nozzle open
    '1st seg horizontal top left->right
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    '2nd seg vertical right top->bottom
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    '3rd seg horizontal bottom right->left

```

```

Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'preparation for next
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - nozzle) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
Next i
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    'nozzle close
    Print #ff, "M103"
    'in Zsafe over the 2nd local ref
    Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ +
ZSafe) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid

    comp = nozzle / 2
    LocalRefY = LocalRefY - TranStrut

    'in Zsafe over the 3rd local ref
    Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ + ZSafe) *
1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
    'in layer Z ready to feed 3rd sub-square
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
For i = 1 To adjbead \ 2
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    If i = 1 Then Print #ff, "M101" 'nozzle open
    '1st seg horizontal top left->right
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    '2nd seg vertical right top->bottom
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    '3rd seg horizontal bottom right->left
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    'preparation for next
    Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - nozzle) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
Next i
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
    'nozzle close

```

```

Print #ff, "M103"
'in Zsafe over the 3rd local ref
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round(((LocalRefZ +
ZSafe) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
comp = nozzle / 2
LocalRefX = LocalRefX - TranStrut

'in Zsafe over the 4th local ref
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round(((LocalRefZ + ZSafe) *
1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid
'in layer Z ready to feed 4th sub-square
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000) +
ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
For i = 1 To adjbead \ 2
comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
If i = 1 Then Print #ff, "M101" 'nozzle open
'1st seg horizontal top left->right
Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'2nd seg vertical right top->bottom
Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" &
Round((LocalRefZ * 1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'3rd seg horizontal bottom right->left
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'preparation for next
Print #ff, "G1 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round((LocalRefY - comp - nozzle) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ *
1000) + ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
Next i
comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
Print #ff, "G1 X" & Round(((LocalRefX + Strut) - comp) * 1000, prec) & "
Y" & Round((LocalRefY - comp) * 1000, prec) & " Z" & Round((LocalRefZ * 1000)
+ ZOff, prec) & " F" & LinearFeed
'nozzle close
Print #ff, "M103"
'in Zsafe over the 4th local ref
Print #ff, "G0 X" & Round((LocalRefX + comp) * 1000, prec) & " Y" &
Round(((LocalRefY - Strut) + comp) * 1000, prec) & " Z" & Round(((LocalRefZ +
ZSafe) * 1000) + ZOff, prec) & " F" & Rapid

End Select
End Sub

Public Sub UnitSquare(Sk As SldWorks.SketchManager)
set_strut = PlanningCubeX.Strutvalue / 1000
Sk.Insert3DSketch True
Dim i As Integer: i = 0

```

```

    comp = nozzle / 2
    For i = 1 To Strut / nozzle
        comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
        Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2),
(vLocate(1)(0) + Side) - comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
        Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Side) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Side) - comp, (vLocate(1)(1) - Side) + comp,
vLocate(1)(2)
        Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Side) - comp, (vLocate(1)(1) - Side) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Side) + comp,
vLocate(1)(2)
        Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Side) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
        If i = Strut / nozzle Then
            comp = nozzle / 2
        End If
    Next i
    swModel.ClearSelection2 True
End Sub

```

```

Public Sub UnitSquareMulti(Sk As SldWorks.SketchManager)
    set_strut = PlanningCubeX.Strutvalue / 1000
    Sk.Insert3DSketch True
    Dim i As Integer: i = 0
    Dim TranStrut As Double
    Dim adjbead As Integer
    Dim adjbeadtype As Boolean "TRUE" INDICATES ODD NUMBER OF ADJACENT BEADS.
"FALSE" INDICATES EVEN NUMBER OF ADJACENT BEADS
    Dim curEnd(11) As Double
    TranStrut = Side - Strut
    comp = nozzle / 2
    adjbead = Strut / nozzle

    If (adjbead Mod 2) = 1 Then
        adjbeadtype = True
    Else
        adjbeadtype = False
    End If
    curEnd(0) = vLocate(1)(0) + comp
    curEnd(1) = vLocate(1)(1) - comp
    curEnd(2) = vLocate(1)(2)

    Select Case adjbeadtype
    Case Is = False
        For i = 1 To Strut / (2 * nozzle)
            comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
            Sk.CreateLine curEnd(0), curEnd(1), curEnd(2), (vLocate(1)(0) + Strut)
- comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
            Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2)

```

```

    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2)
    If i < Strut * 1000 Then
        Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp - nozzle,
vLocate(1)(2)
        curEnd(0) = vLocate(1)(0) + comp
        curEnd(1) = vLocate(1)(1) - comp - nozzle
        curEnd(2) = vLocate(1)(2)
    End If
    If i = Strut / (2 * nozzle) Then
        comp = nozzle / 2
    End If
Next i

    vLocate(1)(0) = vLocate(1)(0) + TranStrut
    curEnd(3) = vLocate(1)(0) + comp
    curEnd(4) = vLocate(1)(1) - comp
    curEnd(5) = vLocate(1)(2)
    For i = 1 To Strut / (2 * nozzle)
        comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
        Sk.CreateLine curEnd(3), curEnd(4), curEnd(5), (vLocate(1)(0) + Strut)
- comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
        Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2)
        Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2)
        If i < Strut * 1000 Then
            Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp - nozzle,
vLocate(1)(2)
            curEnd(3) = vLocate(1)(0) + comp
            curEnd(4) = vLocate(1)(1) - comp - nozzle
            curEnd(5) = vLocate(1)(2)
        End If
        If i = Strut / (2 * nozzle) Then
            comp = nozzle / 2
        End If
    Next i

    vLocate(1)(1) = vLocate(1)(1) - TranStrut
    curEnd(6) = vLocate(1)(0) + comp
    curEnd(7) = vLocate(1)(1) - comp
    curEnd(8) = vLocate(1)(2)
    For i = 1 To Strut / (2 * nozzle)
        comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
        Sk.CreateLine curEnd(6), curEnd(7), curEnd(8), (vLocate(1)(0) + Strut)
- comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)

```

```

    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2)

    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2)

    If i < Strut * 1000 Then
        Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp - nozzle,
vLocate(1)(2)
            curEnd(6) = vLocate(1)(0) + comp
            curEnd(7) = vLocate(1)(1) - comp - nozzle
            curEnd(8) = vLocate(1)(2)
    End If
    If i = Strut / (2 * nozzle) Then
        comp = nozzle / 2
    End If
Next i

vLocate(1)(0) = vLocate(1)(0) - TranStrut
curEnd(9) = vLocate(1)(0) + comp
curEnd(10) = vLocate(1)(1) - comp
curEnd(11) = vLocate(1)(2)
For i = 1 To Strut / (2 * nozzle)
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    Sk.CreateLine curEnd(9), curEnd(10), curEnd(11), (vLocate(1)(0) +
Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2)
    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2)
    If i < Strut * 1000 Then
        Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp - nozzle,
vLocate(1)(2)
            curEnd(9) = vLocate(1)(0) + comp
            curEnd(10) = vLocate(1)(1) - comp - nozzle
            curEnd(11) = vLocate(1)(2)
    End If
    If i = Strut / (2 * nozzle) Then
        comp = nozzle / 2
    End If
Next i
vLocate(1)(1) = vLocate(1)(1) + TranStrut
Case Is = True
For i = 1 To adjbead \ 2
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    Sk.CreateLine curEnd(0), curEnd(1), curEnd(2), (vLocate(1)(0) + Strut)
- comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2)

```

```

    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2)
    If i < Strut * 1000 Then
        Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp - nozzle,
vLocate(1)(2)
            curEnd(0) = vLocate(1)(0) + comp
            curEnd(1) = vLocate(1)(1) - comp - nozzle
            curEnd(2) = vLocate(1)(2)
        End If
    Next i
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    Sk.CreateLine curEnd(0), curEnd(1), curEnd(2), (vLocate(1)(0) + Strut) -
comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)

    comp = nozzle / 2
    vLocate(1)(0) = vLocate(1)(0) + TranStrut
    curEnd(3) = vLocate(1)(0) + comp
    curEnd(4) = vLocate(1)(1) - comp
    curEnd(5) = vLocate(1)(2)
    For i = 1 To adjbead \ 2
        comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
        Sk.CreateLine curEnd(3), curEnd(4), curEnd(5), (vLocate(1)(0) + Strut)
- comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
        Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2)
        Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2)
        If i < Strut * 1000 Then
            Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp - nozzle,
vLocate(1)(2)
                curEnd(3) = vLocate(1)(0) + comp
                curEnd(4) = vLocate(1)(1) - comp - nozzle
                curEnd(5) = vLocate(1)(2)
            End If
        Next i
        comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
        Sk.CreateLine curEnd(3), curEnd(4), curEnd(5), (vLocate(1)(0) + Strut) -
comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
        comp = nozzle / 2
        vLocate(1)(1) = vLocate(1)(1) - TranStrut
        curEnd(6) = vLocate(1)(0) + comp
        curEnd(7) = vLocate(1)(1) - comp
        curEnd(8) = vLocate(1)(2)
        For i = 1 To adjbead \ 2
            comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
            Sk.CreateLine curEnd(6), curEnd(7), curEnd(8), (vLocate(1)(0) + Strut)
- comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)

```

```

    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2)

    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2)

    If i < Strut * 1000 Then
        Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp - nozzle,
vLocate(1)(2)

        curEnd(6) = vLocate(1)(0) + comp
        curEnd(7) = vLocate(1)(1) - comp - nozzle
        curEnd(8) = vLocate(1)(2)

    End If
Next i
comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
Sk.CreateLine curEnd(6), curEnd(7), curEnd(8), (vLocate(1)(0) + Strut) -
comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)

    comp = nozzle / 2
    vLocate(1)(0) = vLocate(1)(0) - TranStrut
    curEnd(9) = vLocate(1)(0) + comp
    curEnd(10) = vLocate(1)(1) - comp
    curEnd(11) = vLocate(1)(2)
For i = 1 To adjbead \ 2
    comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
    Sk.CreateLine curEnd(9), curEnd(10), curEnd(11), (vLocate(1)(0) +
Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)

    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, vLocate(1)(1) - comp,
vLocate(1)(2), (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2)

    Sk.CreateLine (vLocate(1)(0) + Strut) - comp, (vLocate(1)(1) - Strut) +
comp, vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2)

    If i < Strut * 1000 Then
        Sk.CreateLine vLocate(1)(0) + comp, (vLocate(1)(1) - Strut) + comp,
vLocate(1)(2), vLocate(1)(0) + comp, vLocate(1)(1) - comp - nozzle,
vLocate(1)(2)

        curEnd(9) = vLocate(1)(0) + comp
        curEnd(10) = vLocate(1)(1) - comp - nozzle
        curEnd(11) = vLocate(1)(2)

    End If
Next i
comp = (nozzle / 2) + (i - 1) * nozzle
Sk.CreateLine curEnd(9), curEnd(10), curEnd(11), (vLocate(1)(0) + Strut)
- comp, vLocate(1)(1) - comp, vLocate(1)(2)
comp = nozzle / 2
vLocate(1)(1) = vLocate(1)(1) + TranStrut
End Select
End Sub

```



## II. ANNEX B

Option Explicit

```
Global swTimer As CTimer
Global swSquare As CSquare
Dim swParam As CSquare
Public swApp As SldWorks.SldWorks
Dim xlApp As Excel.Application
Public swModel As SldWorks.ModelDoc2
Dim xlWB As Excel.Workbook
Dim swModelView As SldWorks.ModelView
Dim swPart As SldWorks.PartDoc
Dim swSketchMgr As SldWorks.SketchManager
Public swSketchPt(7) As SldWorks.SketchPoint
Dim swSkPt As SldWorks.SketchPoint
Dim swSketch As SldWorks.Sketch
Dim swSketchLine As SldWorks.SketchLine
Dim swSelMgr As SldWorks.SelectionMgr
Public swFeat As SldWorks.Feature
Public swFeatMgr As SldWorks.FeatureManager
Dim swBody As SldWorks.Body2
Dim swSurfBody As SldWorks.Body2
Public swSelData As SldWorks.SelectData
Dim swFace As SldWorks.Face2
Public swLayer As SldWorks.Face2
Dim swEdge As SldWorks.Edge
Dim swVertex As SldWorks.Vertex
Dim swEnt As SldWorks.Entity
Dim mathUtils As SldWorks.MathUtility
Dim mathPt As SldWorks.MathPoint
Dim mathBasePt As SldWorks.MathPoint
Dim mathHitPt As SldWorks.MathPoint
Dim mathLocPt As SldWorks.MathPoint
Dim mathIntLocPt As SldWorks.MathPoint
Dim MyVector(2) As Double
Dim box As Variant
Dim iNumLayers As Integer
Dim vBodies As Variant
Dim vSurfBodies As Variant
Dim vSurfaceKnit As Variant
Public vPattern As Variant
Dim vFaces As Variant
Dim vEdges As Variant
Dim vVectors As Variant
```

```
Dim vIntersections(0) As Variant
Public vHitPoints() As Variant
Dim vBase() As Variant
Dim vBasePoints() As Variant
Public vLocate() As Variant
Dim vLocateSc() As Variant
Dim dblLoc() As Double
Dim dblLocate() As Double
Const iPrecision As Integer = 8
Dim lngErrors As Long
Dim lngWarnings As Long
Dim boolstatus As Boolean
Dim count As Integer
Dim crntLayer As Integer
Dim dblslicethickness As Single
Dim dblLayerThickness As Single
Dim Height As Double
Global ff As Integer
Global fff As Integer
Global comp As Double
Global prec As Integer
Global ZSafe As Double
Global Rapid As Double
Global LinearFeed As Double
Global Extrusion As Double
Global MapCoef As Integer
Global nozzle As Double
Global ZOff As Double
Global ZOff2 As Double
Global tempmain As Double
Global Fans As Double
Global Prime As Double
Global Suck As Double
Global GCodeFile As String

Type InterSegment
    InterLoc(2) As Double
    InterSeg As Integer
End Type
Dim myInterSeg() As InterSegment

Type ToolPath
    stSegNo As Integer
    endSegNo As Integer
End Type
Dim myToolPath As ToolPath

Sub Main()
On Error Resume Next

Set swApp = Application.SldWorks
```

```

Set swTimer = New CTimer
Set swParam = New CSquare

ff = 25
MapCoef = 1
prec = 2
ZSafe = 0.0002
Rapid = 12000#
nozzle = 0.0005
comp = nozzle / 2

Set xlApp = Excel.Application
xlApp.Visible = False
xlApp.DisplayAlerts = False
Set xlWB = xlApp.Workbooks.Open("D:LattiSlicer\OpenSWExit.xlsx", False,
False)
Dim strStlPath As String
strStlPath = Cells(11, 5)
swParam.set_side = PlanningCubeX.Sidevalue / 1000
swParam.set_strut = PlanningCubeX.Strutvalue / 1000
swParam.pathIdentify (nozzle)
swTimer.StartCounter
'dblslicethickness = Cells(7, 5) / 1000
dblSlicethickness = PlanningCubeX.Sidevalue / 1000
Height = PlanningCubeX.Heightvalue / 1000
'dblLayerThickness = Cells(8, 5) / 1000
dblLayerThickness = PlanningCubeX.LTvalue / 1000
'LinearFeed = 896.7
LinearFeed = PlanningCubeX.HPvalue * 60
Extrusion = 13.25 - (75.83 * PlanningCubeX.LTvalue) - (13.26 *
PlanningCubeX.FTvalue) - (0.4543 * PlanningCubeX.HPvalue) + (75.87 *
PlanningCubeX.LTvalue * PlanningCubeX.FTvalue) + (2.5983 *
PlanningCubeX.LTvalue * PlanningCubeX.HPvalue) + (0.4541 *
PlanningCubeX.FTvalue * PlanningCubeX.HPvalue)
ZOff2 = PlanningCubeX.Zvalue
ZOff = ZOff2 + 0.2 'LAYER Z-HEIGHT AFTER
FIRST LAYERS
tempmain = PlanningCubeX.Tvalue
Fans = PlanningCubeX.Fanvalue / 100
Prime = 0.2 + 2960 * PlanningCubeX.PrimeValue
Suck = 0.2 + 2960 * PlanningCubeX.SuckValue
GCodeFile = PlanningCubeX.GCodeValue

For crntLayer = 0 To (Height / dblLayerThickness) - 1

    'swApp.Visible = False
    Dim strPath As String
    strPath = Cells(6, 5)
    Set swModel = swApp.OpenDoc6(strPath, swDocPART, swOpenDocOptions_Silent,
_ "", lngErrors, lngWarnings)
    'swModel.Visible = False
    Set swModelView = swModel.GetFirstModelView

```

```

    `swModelView.EnableGraphicsUpdate = False
    If swModel Is Nothing Then
        MsgBox "OpenDoc Method Failed. Error Code = " & lngErrors, vbOKOnly,
"Error"
        start.Main
    End If

    Set swSelMgr = swModel.SelectionManager
    Set swSelData = swSelMgr.CreateSelectData
    Set swPart = swModel
    Set swSketchMgr = swModel.SketchManager

    Call BoundingBox

    `DEFINE FOR LOOP ITERATIONS AND REGISTRATION TO EXCEL
    Dim iOutLoop As Integer
    Dim iInLoop As Integer
    iOutLoop = Abs(swSketchPt(5).Z - swSketchPt(3).Z) / dblslicethickness
    Cells(6, 10) = iOutLoop
    iInLoop = dblslicethickness / dblLayerThickness
    Cells(7, 10) = iInLoop
    Dim iLevel As Integer
    Dim iSlices As Integer
    iLevel = Cells(6, 9)
    iSlices = Cells(7, 9)

    `IN-PROGRESS PLANE NUMBERING
    Dim iCrashFactor As Integer
    Dim lngSliceOnProgress As Integer
    iCrashFactor = Cells(9, 5)
    lngSliceOnProgress = iCrashFactor + iSlices + (iLevel * iInLoop)

    Set swFeatMgr = swModel.FeatureManager

    `REFERENCE PLANE CREATION AND OFFSET TO THE IN-PROGRESS PLANE
    OffsetRefSurface lngSliceOnProgress, dblLayerThickness, iSlices
    Set swSketch = Nothing

    `INTERSECTION CURVE
    IntersectionCurve iSlices, dblLayerThickness
    Set swEnt = Nothing
    swSelData.Mark = 1
    Set mathUtils = swApp.GetMathUtility

    Dim MyPoint(0 To 2) As Double
    Dim MyHitPoint(0 To 2) As Double
    Dim MyLocPoint(0 To 2) As Double
    MyVector(0) = 1
    MyVector(1) = 0
    MyVector(2) = 0
    Set vVectors = mathUtils.CreateVector(MyVector)

```

```

Dim i, j, m, n As Integer
Dim k As Integer: k = 0
n = 0
Dim dblCellResol As Single
Dim iSegmResol As Integer

iSegmResol = 69
dblCellResol = dblslicethickness / iSegmResol
MyLocPoint(0) = 0: MyLocPoint(1) = 0: MyLocPoint(2) = 0
Set mathLocPt = mathUtils.CreatePoint(MyLocPoint)
ReDim Preserve vLocate(k)
vLocate(k) = mathLocPt.ArrayData
ReDim Preserve dblLoc(n)
dblLoc(n) = 0.5

swModel.Extension.SelectByID2 "Intersection Curve " & iNumLayers,
"SKETCH", 0, 0, 0, False, 0, Nothing, 0
swModel.ViewZoomToSelection
Set swFeatMgr = swModel.FeatureManager
swFeatMgr.FeatureExtruRefSurface True, False, False, 6, 0,
dblLayerThickness * 4, dblLayerThickness * 4, False, False, False, False, _
1.74532925199433E-02,
1.74532925199433E-02, False, False, False, False, False, False, False, False
swModel.SelectedFeatureProperties 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, "Surface
Extrude " & iNumLayers
swModel.ClearSelection2 True
Erase vSurfBodies
vSurfBodies = swPart.GetBodies2(swSheetBody, True)
Set swSurfBody = vSurfBodies(0)
swSurfBody.Select2 False, swSelData
swModel.HideSolidBody
swModel.ClearSelection2 True

swModel.Extension.SelectByID2 "Intersection Curve " & iNumLayers,
"SKETCH", 0, 0, 0, False, 0, Nothing, 0
swModel.UnblankSketch
Set swEnt = swFace
swEnt.Select4 False, Nothing
swModel.InsertOffsetSurface 0#, False
swModel.ClearSelection2 True

Set swLayer = Nothing
Dim vLayers As Variant
Erase vLayers
vLayers = swPart.GetBodies2(swSheetBody, True)
Set swSurfBody = Nothing
Erase vFaces
Set swSurfBody = vLayers(0)
vFaces = swSurfBody.GetFaces
Set swLayer = vFaces(0)
swSurfBody.Select2 False, swSelData

```

```

swModel.HideSolidBody
Set swSurfBody = Nothing
Set swSurfBody = vSurfBodies(0)
swSurfBody.Select2 False, swSelData
swModel.ShowSolidBody
swModel.ClearSelection2 True

Dim vSliceBox As Variant
vSliceBox = swLayer.GetBox

Dim iScanMin As Integer
Dim iScanMax As Integer
iScanMin = Abs((vSliceBox(1) * 1000000) - (box(1) * 1000000)) \
(dblslicethickness * 1000000)
iScanMax = 1 + Abs((vSliceBox(4) * 1000000) - (box(1) * 1000000)) \
(dblslicethickness * 1000000)

Dim UnitCells As Collection
Dim tUC As Collection
Dim tUC2 As Collection
Dim intUnitCells As Collection
Set UnitCells = New Collection
Set tUC = New Collection
Set tUC2 = New Collection
Set intUnitCells = New Collection

`SCANNING ALONG X DIRECTION
For j = iScanMin To iScanMax

    m = 0

    For m = 0 To iSegmResol - 1
        MyPoint(0) = swSketchPt(0).x                                'KORYFH TOU BOUNDING
BOX WS SHMEIO ANAFORAS
        MyPoint(1) = swSketchPt(0).y + ((m * dblCellResol) + (j *
dblSlicethickness))
        MyPoint(2) = swSketchPt(0).Z + (lngSliceOnProgress *
dblLayerThickness)
        Set mathPt = mathUtils.CreatePoint(MyPoint)
        Set mathBasePt = mathUtils.CreatePoint(MyPoint)
        count = swModel.RayIntersections(vSurfBodies, MyPoint, MyVector,
0, 0, 0)
        If count <> 0 Then
            n = n + 1
            ReDim Preserve vBase(n)
            vBase(n) = mathPt.ArrayData
            vIntersections(0) = swModel.GetRayIntersectionsPoints
            ReDim Preserve dblLoc(n)
            dblLoc(n) = (((vIntersections(0)(3) * 100000# - vBase(n)(0) *
100000#) \ dblSlicethickness * 100000#) * dblSlicethickness) + vBase(n)(0)

            ReDim Preserve vHitPoints(n)

```

```

MyHitPoint(0) = vIntersections(0)(3)
MyHitPoint(1) = vIntersections(0)(4)
MyHitPoint(2) = vIntersections(0)(5)
Set mathHitPt = mathUtils.CreatePoint(MyHitPoint)
vHitPoints(n) = mathHitPt.ArrayData
MyLocPoint(0) = Round(dblLoc(n), iPrecision)
MyLocPoint(1) = Round(swSketchPt(0).y + (j + 1) *
dbslicethickness, iPrecision)
MyLocPoint(2) = vIntersections(0)(5)

If bUniqueElement(vLocate, k, MyLocPoint(0), MyLocPoint(1)) =
False Then
    k = k + 1
    ReDim Preserve vBasePoints(k)
    vBasePoints(k) = mathBasePt.ArrayData
    ReDim Preserve vLocate(k)
    Set mathLocPt = mathUtils.CreatePoint(MyLocPoint)
    vLocate(k) = mathLocPt.ArrayData
    Set swSquare = New CSquare
    swSquare.setRefLoc = MyLocPoint
    swSquare.setID = dbslicethickness
    UnitCells.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
    tUC.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
    tUC2.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
End If

For i = 1 To count - 1

    n = n + 1
    ReDim Preserve vBase(n)
    vBase(n) = mathPt.ArrayData
    ReDim Preserve dblLoc(n)
    dblLoc(n) = (((vIntersections(0)(3 + i * 6) * 100000# _
- vBase(n)(0) * 100000#) \ dbslicethickness
* 100000#) _
+ vBase(n)(0)
* dbslicethickness)

    ReDim Preserve vHitPoints(n)
    MyHitPoint(0) = vIntersections(0)(3 + i * 6)
    MyHitPoint(1) = vIntersections(0)(4 + i * 6)
    MyHitPoint(2) = vIntersections(0)(5 + i * 6)
    Set mathHitPt = mathUtils.CreatePoint(MyHitPoint)
    vHitPoints(n) = mathHitPt.ArrayData
    MyLocPoint(0) = Round(dblLoc(n), iPrecision)
    MyLocPoint(1) = Round(swSketchPt(0).y + (j + 1) *
dbslicethickness, iPrecision)
    MyLocPoint(2) = vIntersections(0)(5)

    If bUniqueElement(vLocate, k, MyLocPoint(0),
MyLocPoint(1)) = False Then
        k = k + 1
        ReDim Preserve vBasePoints(k)

```

```

        vBasePoints(k) = mathBasePt.ArrayData
        ReDim Preserve vLocate(k)
        Set mathLocPt = mathUtils.CreatePoint(MyLocPoint)
        vLocate(k) = mathLocPt.ArrayData
        Set swSquare = New CSquare
        swSquare.setRefLoc = MyLocPoint
        swSquare.setID = dblslicethickness
        UnitCells.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
        tUC.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
        tUC2.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
    End If
Next i
End If
Next m
Next j

`SCANNING ALONG Y
MyVector(0) = 0           'X
MyVector(1) = 1           'Y
MyVector(2) = 0           'Z
Set vVectors = mathUtils.CreateVector(MyVector)
iSegmResol = 73
iScanMin = Abs((vSliceBox(0) * 1000000) - (box(0) * 1000000)) \
(dblslicethickness * 1000000)
iScanMax = 1 + Abs((vSliceBox(3) * 1000000) - (box(0) * 1000000)) \
(dblslicethickness * 1000000)

For j = iScanMin To iScanMax

    m = 0

    For m = 0 To iSegmResol - 1
        MyPoint(0) = swSketchPt(0).x + ((m * dblCellResol) + (j *
        dblslicethickness))           'KORYFH TOU BOUNDING BOX WS SHMEIO ANAFORAS
        MyPoint(1) = swSketchPt(0).y
        MyPoint(2) = swSketchPt(0).Z + (lngSliceOnProgress *
        dblLayerThickness)
        Set mathPt = mathUtils.CreatePoint(MyPoint)
        Set mathBasePt = mathUtils.CreatePoint(MyPoint)
        count = swModel.RayIntersections(vSurfBodies, MyPoint, MyVector,
        0, 0, 0)

        If count <> 0 Then
            n = n + 1
            ReDim Preserve vBase(n)
            vBase(n) = mathPt.ArrayData
            vIntersections(0) = swModel.GetRayIntersectionsPoints
            ReDim Preserve dblLoc(n)
            dblLoc(n) = (((vIntersections(0)(4) * 100000# - vBase(n)(1) *
            100000#) \ dblslicethickness * 100000#) * dblslicethickness) + vBase(n)(1) +
            dblslicethickness
            ReDim Preserve vHitPoints(n)
        End If
    Next m
Next j

```



```

MyHitPoint(0) = vIntersections(0)(3)
MyHitPoint(1) = vIntersections(0)(4)
MyHitPoint(2) = vIntersections(0)(5)
Set mathHitPt = mathUtils.CreatePoint(MyHitPoint)
vHitPoints(n) = mathHitPt.ArrayData
MyLocPoint(0) = Round(swSketchPt(0).x + j *
dblslicethickness, iPrecision)
MyLocPoint(1) = Round(dblLoc(n), iPrecision)
MyLocPoint(2) = vIntersections(0)(5)

If bUniqueElement(vLocate, k, MyLocPoint(0), MyLocPoint(1)) =
False Then
    k = k + 1
    ReDim Preserve vBasePoints(k)
    vBasePoints(k) = mathBasePt.ArrayData
    ReDim Preserve vLocate(k)
    Set mathLocPt = mathUtils.CreatePoint(MyLocPoint)
    vLocate(k) = mathLocPt.ArrayData
    Set swSquare = New CSquare
    swSquare.setRefLoc = MyLocPoint
    swSquare.setID = dblslicethickness
    UnitCells.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
    tUC.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
    tUC2.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
End If

For i = 1 To count - 1
    n = n + 1
    ReDim Preserve vBase(n)
    vBase(n) = mathPt.ArrayData
    ReDim Preserve dblLoc(n)
    dblLoc(n) = ((vIntersections(0)(4) * 100000# -
vBase(n)(1) * 100000#) \ dblslicethickness * 100000#) * dblslicethickness +
vBase(n)(1) + dblslicethickness
    ReDim Preserve vHitPoints(n)
    MyHitPoint(0) = vIntersections(0)(3 + i * 6)
    MyHitPoint(1) = vIntersections(0)(4 + i * 6)
    MyHitPoint(2) = vIntersections(0)(5 + i * 6)
    Set mathHitPt = mathUtils.CreatePoint(MyHitPoint)
    vHitPoints(n) = mathHitPt.ArrayData
    MyLocPoint(0) = Round(swSketchPt(0).x + j *
dblslicethickness, iPrecision)
    MyLocPoint(1) = Round(dblLoc(n), iPrecision)
    MyLocPoint(2) = vIntersections(0)(5)

    If bUniqueElement(vLocate, k, MyLocPoint(0),
MyLocPoint(1)) = False Then
        k = k + 1
        ReDim Preserve vBasePoints(k)
        vBasePoints(k) = mathBasePt.ArrayData
        ReDim Preserve vLocate(k)
        Set mathLocPt = mathUtils.CreatePoint(MyLocPoint)

```

```

        vLocate(k) = mathLocPt.ArrayData
        Set swSquare = New CSquare
        swSquare.setRefLoc = MyLocPoint
        swSquare.setID = dblslicethickness
        UnitCells.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
        tUC.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
        tUC2.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
    End If
Next i
End If
Next m
Next j

```

```
'SORTING ACCORDING TO Y VALUES
```

```
QuickSort vLocate, 1, k
```

```

Dim tmpList() As Variant
Dim vInteriorLoc() As Variant
Dim iIntPieces As Integer
Dim distance As Double
Dim q As Integer: q = k

swSurfBody.Select2 False, swSelData
swModel.ShowSolidBody
swModel.ClearSelection2 True
MyVector(0) = 1
MyVector(1) = 0
MyVector(2) = 0
Set vVectors = mathUtils.CreateVector(MyVector)
Dim ZLevel As Double

```

```

While q > 0
    i = 0
    ReDim tmpList(i)
    ZLevel = vLocate(q)(2)
    Do
        ReDim Preserve tmpList(i)
        tmpList(i) = vLocate(q)(0)
        q = q - 1
        i = i + 1
    Loop While (vLocate(q + 1)(1) = vLocate(q)(1))

```

```
'SORTING ACCORDING TO X VALUES
```

```
BubbleSort tmpList
```

```
Dim CompZ As Double: CompZ = 0#
```

```

For j = 0 To i - 2
    distance = Round(tmpList(j + 1) - tmpList(j), 8)
    If distance <> dblslicethickness Then
        MyPoint(0) = (tmpList(j + 1) + tmpList(j)) / 2
        MyPoint(1) = vLocate(q + 1)(1)
    End If

```

```

        MyPoint(2) = vLocate(q + 1)(2)
        count      = swModel.RayIntersections(vSurfBodies, MyPoint,
MyVector, 0, 0, 0)
        If count Mod 2 = 1 Then
            iIntPieces = (tmpList(j + 1) - tmpList(j)) /
dblslicethickness
            m = 0
            While m < iIntPieces - 1
                Set swSquare = New CSquare
                m = m + 1
                MyLocPoint(0) = tmpList(j) + (m * dblslicethickness)
                MyLocPoint(1) = vLocate(q + 1)(1)
                MyLocPoint(2) = vLocate(q + 1)(2) + CompZ
                ReDim Preserve vInteriorLoc(m)
                Set mathIntLocPt = mathUtils.CreatePoint(MyLocPoint)
                vInteriorLoc(m) = mathIntLocPt.ArrayData
                swSquare.setRefLoc = MyLocPoint
                swSquare.set_side = PlanningCubeX.Sidevalue / 1000
                swSquare.setID = dblslicethickness
                swSquare.setRefInside = True
                intUnitCells.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
            Wend
        End If
    End If
Next j
Wend

swSurfBody.Select2 False, swSelData

Dim y As Integer: y = 0
Dim Z As Integer: Z = 0
Dim vSkSeg As Variant
Dim SPt(2) As Double
Dim EPt(2) As Double
Dim oSPt As Variant
Dim oEPt As Variant
Dim Intersection As Variant
Dim intercount As Integer
Dim XVec(0 To 2) As Double
XVec(0) = 1: XVec(1) = 0: XVec(2) = 0
Dim YVec(0 To 2) As Double
YVec(0) = 0: YVec(1) = 1: YVec(2) = 0
Dim ZVec(0 To 2) As Double
ZVec(0) = 0: ZVec(1) = 0: ZVec(2) = 1

Dim swXVec As SldWorks.MathVector
Dim swYVec As SldWorks.MathVector
Dim swZVec As SldWorks.MathVector
Dim swTransVec As SldWorks.MathVector
Dim swMathTrans As SldWorks.MathTransform
Dim swSketchSeg As SldWorks.SketchSegment

```

```

Set swXVec = mathUtils.CreateVector(XVec)
Set swYVec = mathUtils.CreateVector(YVec)
Set swZVec = mathUtils.CreateVector(ZVec)
Dim TransVec(0 To 2) As Double
Dim swCurve As SldWorks.Curve
Dim swContour As SldWorks.Curve
Dim swConPar As SldWorks.CurveParamData
Dim slicetype As Integer
Dim lboundstrut As Integer
Dim uboundstrut As Integer

slicetype = lngSliceOnProgress Mod iInLoop
lboundstrut = iInLoop - (swParam.get_strut / dblLayerThickness)
uboundstrut = swParam.get_strut / dblLayerThickness

If (slicetype <= uboundstrut) Or (slicetype > lboundstrut) Then
    swParam.UnitSquare swSketchMgr
Else
    swParam.UnitSquareMulti swSketchMgr
End If

Set swSketch = swModel.GetActiveSketch2
vSkSeg = swSketch.GetSketchSegments
vEdges = swLayer.GetEdges
'Set swSketchSeg = vSkSeg(7)
'swSketchSeg.Select4 False, Nothing
Dim co As Integer
Dim updco As Integer: updco = 0

For co = 1 To UnitCells.count
    intercount = 0
    Set swSquare = UnitCells.Item(co)
    TransVec(0) = swSquare.getRefLoc(0) - vLocate(1)(0): TransVec(1) =
swSquare.getRefLoc(1) - vLocate(1)(1): TransVec(2) = 0
    Set swTransVec = mathUtils.CreateVector(TransVec)
    Set swMathTrans = mathUtils.ComposeTransform(swXVec, swYVec, swZVec,
swTransVec, 1)
    MyPoint(0) = swSquare.getRefLoc(0): MyPoint(1) =
swSquare.getRefLoc(1): MyPoint(2) = swSquare.getRefLoc(2)
    MyVector(0) = 1: MyVector(1) = 0: MyVector(2) = 0
    count = swModel.RayIntersections(vSurfBodies, MyPoint, MyVector, 0,
0, 0)
    If count Mod 2 = 1 Then
        swSquare.setRefInside = True
    ElseIf count Mod 2 = 0 Then
        swSquare.setRefInside = False
    End If
    swSquare.set_side = dblslicethickness
    swSquare.set_strut = PlanningCubeX.Strutvalue / 1000

    If (slicetype <= uboundstrut) Or (slicetype > lboundstrut) Then

```

```

swSquare.setarrVertex = False
Else
swSquare.setarrVertex = True
End If

For y = 0 To UBound(vSkSeg)
  Set swSketchSeg = vSkSeg(y)
  Set swCurve = swSketchSeg.GetCurve
  swCurve.ApplyTransform swMathTrans
  Set swSketchLine = swSketchSeg
  Set swSkPt = swSketchLine.GetStartPoint2
  SPt(0) = (swSkPt.x) + TransVec(0) 'TO
TRANSFORMATION PREPEI NA DEI
  SPt(1) = (swSkPt.y) + TransVec(1) 'TA ORIA TOU
EUTHYGRAMMOU TMHMATOS
  SPt(2) = (swSkPt.Z) + TransVec(2)
  Set swSkPt = swSketchLine.GetEndPoint2
  EPt(0) = (swSkPt.x) + TransVec(0)
  EPt(1) = (swSkPt.y) + TransVec(1)
  EPt(2) = (swSkPt.Z) + TransVec(2)
  For Z = 0 To UBound(vEdges)
    Set swEdge = vEdges(Z)
    Set swContour = swEdge.GetCurve
    Set swConPar = swEdge.GetCurveParams3
    oSPt = swConPar.StartPoint
    oEPt = swConPar.EndPoint
    Intersection = swContour.IntersectCurve(swCurve, oSPt, oEPt,
SPT, EPt)
    If Not Intersection = Null Then
      intercount = intercount + 1
      ReDim Preserve myInterSeg(intercount - 1)
      myInterSeg(intercount - 1).InterLoc(0) = Intersection(0)
      myInterSeg(intercount - 1).InterLoc(1) = Intersection(1)
      myInterSeg(intercount - 1).InterLoc(2) = MyLocPoint(2)
      myInterSeg(intercount - 1).InterSeg = y
    End If
  Next Z
Next y
If intercount > 0 Then
  swSquare.setnumInter = intercount
  swSquare.setIntersections = myInterSeg()
ElseIf intercount = 0 Then
  MyPoint(0) = swSquare.getaVer(0, 0) / 1000
  MyPoint(1) = swSquare.getaVer(0, 1) / 1000
  MyPoint(2) = swSquare.getaVer(0, 2) / 1000
  count = swModel.RayIntersections(vSurfBodies, MyPoint, MyVector,
0, 0, 0)
  If count Mod 2 = 1 Then
    intUnitCells.Add Item:=swSquare, Key:=swSquare.getID
    tUC.Remove (co - updco)
    updco = updco + 1
  End If
End If

```

```

        End If
    End If
Next co

'   For Each swSquare In intUnitCells
'       Print #fff, swSquare.getRefLoc(0) & " " & swSquare.getRefLoc(1)
& " " & swSquare.getRefLoc(2)
'   Next
'   Close #fff
Print #ff, "M109 S" & tempmain
Print #ff, "M108 S" & Round(Extrusion, 1)
'G CODE GENERATION FOR INTERNAL POINTS
For Each swSquare In intUnitCells
    If (slicetype <= uboundstrut) Or (slicetype > lboundstrut) Then
        MyLocPoint(0) = swSquare.getRefLoc(0)
        MyLocPoint(1) = swSquare.getRefLoc(1)
        MyLocPoint(2) = swSquare.getRefLoc(2)
        swSquare.SqFullPath          MyLocPoint(0),          MyLocPoint(1),
MyLocPoint(2), swSquare.getID
    Else
        MyLocPoint(0) = swSquare.getRefLoc(0)
        MyLocPoint(1) = swSquare.getRefLoc(1)
        MyLocPoint(2) = swSquare.getRefLoc(2)
        swSquare.SqFullPathMulti     MyLocPoint(0),          MyLocPoint(1),
MyLocPoint(2), swSquare.getID
    End If
Next
Print #ff, "M103"
Dim path() As String
Dim ip As Integer: ip = 0
Dim temp, temp2, res As String
Dim swSquare2 As CSquare
Set swSquare2 = New CSquare
Set swSquare = tUC.Item(1)
ip = 0
ReDim Preserve path(ip)
path(ip) = swSquare.getID
temp = swSquare.getID
tUC.Remove (1)

Dim colcount As Integer: colcount = 1
Dim retract As Boolean: retract = True
Dim isMatch As Boolean

While tUC.count > 0
    For co = colcount To tUC.count
        Set swSquare2 = tUC.Item(co)
        temp2 = swSquare2.getID
        res = temp2 - temp
        isMatch = False
        Select Case res

```

```

    Case Is = 1 * MapCoef
        myToolPath.endSegNo = 1
        isMatch = swSquare2.toMatch(myToolPath.endSegNo)
    Case Is = -1 * MapCoef
        myToolPath.endSegNo = 3
        isMatch = swSquare2.toMatch(myToolPath.endSegNo)
    Case Is = 10 * MapCoef
        myToolPath.endSegNo = 0
        isMatch = swSquare2.toMatch(myToolPath.endSegNo)
    Case Is = -10 * MapCoef
        myToolPath.endSegNo = 2
        isMatch = swSquare2.toMatch(myToolPath.endSegNo)
End Select
If isMatch = True Then
    ip = ip + 1
    ReDim Preserve path(ip)
    path(ip) = swSquare2.getID
    Debug.Print temp2
    temp = swSquare2.getID
    tUC.Remove (co)
    Set swSquare = tUC.Item(1)
    co = 0
Else
    temp2 = swSquare2.getID
End If
Next co

co = 0
Set swSquare = tUC.Item(1)
temp = swSquare.getID
If tUC.count > 0 Then
    ip = ip + 1
    ReDim Preserve path(ip)
    path(ip) = swSquare.getID
    Debug.Print temp
    tUC.Remove (1)
End If
Wend

Dim ind As Integer
For ind = 0 To UBound(path)
    res = path(ind + 1) - path(ind)
    If retract = False Then
        Select Case res
            Case Is = 1 * MapCoef
                myToolPath.stSegNo = swSquare.get_nSt
                myToolPath.endSegNo = 1
                co = 0
                Do
                    co = co + 1
                    Set swSquare = tUC2.Item(co)

```

```

    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    swSquare.set_nSt = res
Case Is = -1 * MapCoef
    myToolPath.stSegNo = swSquare.get_nSt
    myToolPath.endSegNo = 3
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    swSquare.set_nSt = res
Case Is = 10 * MapCoef
    myToolPath.stSegNo = swSquare.get_nSt
    myToolPath.endSegNo = 0
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    swSquare.set_nSt = res
Case Is = -10 * MapCoef
    myToolPath.stSegNo = swSquare.get_nSt
    myToolPath.endSegNo = 2
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    swSquare.set_nSt = res
Case Else
    myToolPath.stSegNo = swSquare.get_nSt
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    myToolPath.endSegNo = swSquare.LastEndSeg(myToolPath.stSegNo)
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    Print #ff, "M103"
    retract = True
End Select
If swSquare.getnumInter = 0 Then
    retract = True
End If
ElseIf retract <> False Then
    'Set swSquare = tUC.Item(ind)
    'MONO GIA TO PRWTO PATTERN ITEM

```



```
Print #ff, "M101"
res = path(ind + 1) - path(ind)
Select Case res
Case Is = 1 * MapCoef
    myToolPath.endSegNo = 1
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    swSquare.set_initSt = myToolPath
    myToolPath.stSegNo = swSquare.get_initSt
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    swSquare.set_nSt = res
    If swSquare.getnumInter > 0 Then
        retract = False
    End If
Case Is = -1 * MapCoef
    myToolPath.endSegNo = 3
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    swSquare.set_initSt = myToolPath
    myToolPath.stSegNo = swSquare.get_initSt
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    swSquare.set_nSt = res
    If swSquare.getnumInter > 0 Then
        retract = False
    End If
Case Is = 10 * MapCoef
    myToolPath.endSegNo = 0
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    swSquare.set_initSt = myToolPath
    myToolPath.stSegNo = swSquare.get_initSt
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    swSquare.set_nSt = res
    If swSquare.getnumInter > 0 Then
        retract = False
    End If
Case Is = -10 * MapCoef
    myToolPath.endSegNo = 2
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
```

```

    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    swSquare.set_initSt = myToolPath
    myToolPath.stSegNo = swSquare.get_initSt
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    swSquare.set_nSt = res
    If swSquare.getnumInter > 0 Then
        retract = False
    End If
Case Else
    co = 0
    Do
        co = co + 1
        Set swSquare = tUC2.Item(co)
    Loop Until swSquare.getID = path(ind)
    If swSquare.getnumInter > 0 Then
        myToolPath.stSegNo = swSquare.getIntersections(0, 3)
    End If
    myToolPath.endSegNo = swSquare.LastEndSeg(myToolPath.stSegNo)
    swSquare.ContourFullToolPath myToolPath
    Print #ff, "M103"
End Select
End If
Next ind

If iSlices < iInLoop Then
    Cells(7, 9) = iSlices + 1
Else
    Cells(7, 9) = 1
    Cells(6, 9) = iLevel + 1
End If
xlWB.Save
swModel.HideSolidBody
swModel.ClearSelection2 True

Set swPart = Nothing
Set swFeatMgr = Nothing
Set swBody = Nothing
Set swVertex = Nothing
Set vBodies = Nothing
Set vSurfBodies = Nothing
Set swSurfBody = Nothing
Set vFaces = Nothing
swModel.ClearUndoList
Set swSelData = Nothing
Set swSelMgr = Nothing
Erase vHitPoints, vBase, vBasePoints, vLocate, vLocateSc, dblLoc,
dblLocate, tmpList, vInteriorLoc, vSurfaceKnit, vSurfBodies, vPattern
swApp.CloseAllDocuments True
Next crntLayer

```

```
Debug.Print "Layer " & lngSliceOnProgress & ": " & Round(swTimer.TimeElapsed / 1000, prec) & " sec."
swModelView.EnableGraphicsUpdate = True
swModel.Visible = True
swApp.Visible = True
Close #ff
Dim txtln, newtxtln As String
Open strStlPath & "\" & GCodeFile & ".bfb" For Input As #ff
    While Not EOF(ff)
        Line Input #ff, txtln
        txtln = Trim(txtln)
        If Len(txtln) > 0 Then
            newtxtln = newtxtln & txtln & vbCrLf
        End If
    Wend
Close #ff
Open strStlPath & "\" & GCodeFile & ".bfb" For Output As #ff
Print #ff, newtxtln
Close #ff
xlWB.Close True, "D:\Lattislicer\OpenSWExit.xlsx", False
Set xlWB = Nothing
Set swModelView = Nothing
Set swModel = Nothing
Set swApp = Nothing
xlApp.Quit
Set xlApp = Nothing
End

End Sub
```

Sub **BoundingBox** ()

```

box = swPart.GetPartBox(True)
swSketchMgr.Insert3DSketch True
swModel.SetAddToDB True
swModel.SetDisplayWhenAdded False
'X-Y PLANE
Set swSketchPt(0) = swModel.CreatePoint2(box(0), box(1), box(2))
Set swSketchPt(1) = swModel.CreatePoint2(box(3), box(1), box(2))
Set swSketchPt(2) = swModel.CreatePoint2(box(3), box(4), box(2))
Set swSketchPt(3) = swModel.CreatePoint2(box(0), box(4), box(2))
Set swSketchPt(4) = swModel.CreatePoint2(box(0), box(1), box(5))
Set swSketchPt(5) = swModel.CreatePoint2(box(3), box(1), box(5))
Set swSketchPt(6) = swModel.CreatePoint2(box(3), box(4), box(5))
Set swSketchPt(7) = swModel.CreatePoint2(box(0), box(4), box(5))

swModel.SetAddToDB False
swModel.SetDisplayWhenAdded True
swSketchMgr.Insert3DSketch True
swModel.ClearSelection2 True

```

End Sub

Sub **OffsetRefSurface**(lngSliceOnProgress As Integer, dblLayerThickness As Single, iSlices As Integer)

```

swSketchMgr.Insert3DSketch (True)
Set swSketch = swModel.GetActiveSketch2()
'X-Y PLANE
swSketch.SetWorkingPlaneOrientation swSketchPt(0).x, swSketchPt(0).y,
swSketchPt(0).Z, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1
swModel.SketchManager.CreateCornerRectangle swSketchPt(0).x,
swSketchPt(0).y, swSketchPt(0).Z, swSketchPt(2).x, swSketchPt(2).y,
swSketchPt(2).Z
swSketchMgr.Insert3DSketch (True)
'Make the selections using IModelDocExtension::SelectByID2 before
InsertPlanarRefSurface method.
'See the Solidworks Help for more information about what entities are
valid for selection.
boolstatus = swModel.InsertPlanarRefSurface
swModel.SelectedFeatureProperties 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, "Surface 0"
swModel.Extension.SelectByID2 "Surface 0", "SURFACEBODY", 0, 0, 0, False,
0, Nothing, 0
swModel.InsertOffsetSurface lngSliceOnProgress_ * dblLayerThickness_,
False
swModel.SelectedFeatureProperties 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, "Surface " &
iSlices_
swModel.Extension.SelectByID2 "Surface " & iSlices_, "REFSURFACE", 0, 0,
0, False, 0, Nothing, 0
swModel.InsertCutSurface False, 0
swModel.SelectedFeatureProperties 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, "Face" &
iSlices_
swModel.ClearSelection

```

```

    swModel.Extension.SelectByID2 "Surface 0", "SURFACEBODY", 0, 0, 0, False,
0, Nothing, 0
    swModel.HideSolidBody
    swModel.ClearSelection
End Sub

```

Sub **IntersectionCurve**(iSlices As Integer, dblLayerThickness As Single)

```

    Dim Z As Integer
    Dim e As Integer: e = -1
    vBodies = swPart.GetBodies2(swSolidBody, True)

    For Z = 0 To UBound(vBodies)
        Set swBody = vBodies(Z)
        vFaces = swBody.GetFaces
        Dim vNormal As Variant
        While e < swBody.GetFaceCount - 1
            e = e + 1
            Set swLayer = vFaces(e)
            vNormal = swLayer.Normal
            If vNormal(2) = -1 Then
                iNumLayers = iNumLayers + 1
                Set swFace = vFaces(e)
                Set swEnt = swFace
                swEnt.Select4 True, Nothing
                swSketchMgr.InsertSketch True
                swModel.SetAddToDB True
                swModel.SetDisplayWhenAdded False
                swSketchMgr.SketchUseEdge2 False
                swModel.SetAddToDB False
                swModel.SetDisplayWhenAdded True
                swSketchMgr.InsertSketch True
                Set swFeat = swModel.Extension.GetLastFeatureAdded
                swModel.SelectedFeatureProperties 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0,
"Intersection Curve " & iNumLayers
                swModel.ClearSelection2 True

                End If
            Wend
            e = -1
            Erase vFaces
        Next Z

        swModel.Extension.SelectByID2 "Surface " & iSlices_, "SURFACEBODY", 0, 0,
0, False, 0, Nothing, 0
        swModel.HideSolidBody
        swSelData.Mark = 1
        For Z = 0 To UBound(vBodies)
            Set swBody = vBodies(Z)
            swBody.Select2 True, swSelData
        Next Z
        swModel.HideSolidBody

```

```

    swModel.ClearSelection2 True
End Sub

```

```

Function bUniqueElement(vLoca, k As Integer, CoordX As Double, CoordY As Double) As Boolean

```

```

    Dim p As Integer
    bUniqueElement = False
    For p = k_ To 0 Step -1
        If CoordX = vLoca(p) (0) And CoordY = vLoca(p) (1) Then
            bUniqueElement = True
            Exit Function
        End If
    Next p

```

```
End Function
```

```

Function bExists(vL, kk As Integer, cX As Double) As Boolean

```

```

    Dim pp As Integer

    bExists = True
    For pp = kk To 0 Step -1
        If Abs(cX - vL(pp)) < 0.00000001 Then
            bExists = False
            Exit Function
        End If
    Next pp
End Function

```

```

Public Function QuickSort(arr, Lo As Integer, Hi As Integer)

```

```

    Dim varPivot As Variant
    Dim varTmp As Variant
    Dim tmpLow As Integer
    Dim tmpHi As Integer
    tmpLow = Lo
    tmpHi = Hi
    varPivot = arr((Lo + Hi) \ 2) (1)

    Do While tmpLow <= tmpHi
        Do While arr(tmpLow) (1) < varPivot And tmpLow < Hi
            tmpLow = tmpLow + 1
        Loop
        Do While varPivot < arr(tmpHi) (1) And tmpHi > Lo
            tmpHi = tmpHi - 1
        Loop
        If tmpLow <= tmpHi Then
            varTmp = arr(tmpLow)
            arr(tmpLow) = arr(tmpHi)
            arr(tmpHi) = varTmp
            tmpLow = tmpLow + 1
            tmpHi = tmpHi - 1
        End If
    Loop

```

```
    End If
Loop
If Lo < tmpHi Then QuickSort arr, Lo, tmpHi
If tmpLow < Hi Then QuickSort arr, tmpLow, Hi
End Function
```

Function **BubbleSort**(list)

```
Dim first As Integer, last As Integer
Dim w As Integer, Z As Integer
Dim temp As Double
first = LBound(list)
last = UBound(list)
For w = first To last - 1
    For Z = w + 1 To last
        If list(w) > list(Z) Then
            temp = list(Z)
            list(Z) = list(w)
            list(w) = temp
        End If
    Next Z
Next w
End Function
```

### III. ANNEX C

#### *C.1 Motion profile identification*

A low-cost Micro- Electrical Mechanical System (MEMS) is employed, namely ADXL345 [197]. This is a capacitive acceleration sensor, the operation of which is based on a micro-machined mass on a silicon wafer that is suspended by polysilicon springs. The mass acts as an electrode with respect to a second electrode that is fixed on the sensor. The displacement of the mass due to its inertia alters the capacitance between the two electrodes, which in turn is translated to a change in the output voltage and this is how acceleration is obtained. Their main advantages are –among others- their high sensitivity and their low cost. The latter is connected to low-frequency phenomena that are likely to occur in linear axes motions [198]. On the other hand, greater effort is typically required in signal processing of capacitive sensors, in comparison with piezo-resistive and piezo-electric accelerometers.

The sensor is connected to an Arduino™ Uno programmable micro-controller, communicating via I2C protocol in order to receive sensor signal and store it in an SD-card. The SD-card complements as an additional module (shield) on the Arduino™ Uno board. The main characteristics of the signal reception are controlled via customizable scripts that are available as libraries by the sensor manufacturer. These libraries are uploaded on the micro-controller and the user can easily parameterize frequency, bandwidth, range and other signal characteristics that pertain to each application. According to ADXL345 specifications [199], the sensor's maximum frequency is 3200Hz; however, the signal input rate is bottlenecked by the storing rate to the SD card. In brief, the ADXL345 library script that is uploaded in the micro-controller serves three main purposes:

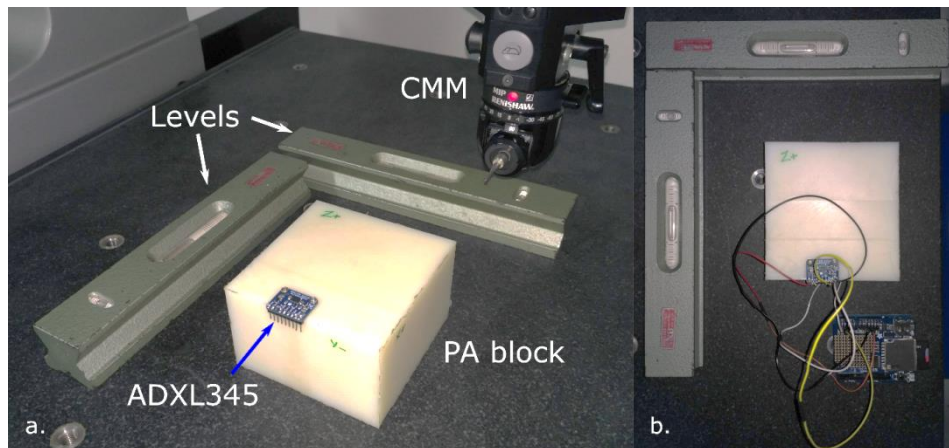
- a) configuring signal characteristics,
- b) assigning time stamp to each measurement using micro-controller's internal clock and
- c) storing measurements to the SD card.

Since ADXL345 is a tri-axial sensor, an effective way to identify linear acceleration of the carriage along one axis is necessary. While being idle and aligned to earth's reference frame, the sensor should ideally read 0 g acceleration for the two horizontal axes and acceleration equal to 1 g for the axis that is aligned with the earth gravity vector. However, in practice, inherent noise in combination with the actual orientation of the accelerometer with respect to the global reference



frame impacts the quality of measurements. Therefore, a thorough calibration procedure is required in order to increase the reliability of accelerometer measurements.

A polyamide (PA) block was machined with precision in order to achieve increased flatness on all faces, which was assessed with a Coordinate Measurement Machine (CMM). The sensor is bolted on one of the faces and multiple measurements are obtained by reorienting the block along X-, X+, Y-, Y+, Z- and Z+ directions, FigC. III-1(a).



**FigC. III-1 a) Instruments used for calibration of the accelerometer and b) levelled and connected accelerometer.**

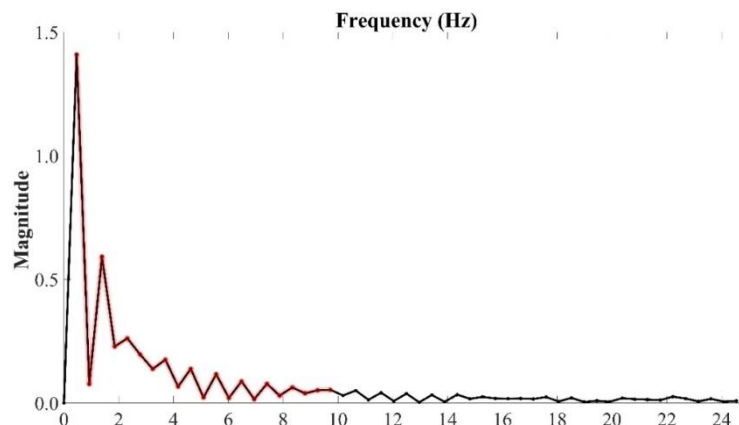
To ensure alignment of the block with the earth's reference frame, the CMM's table is meticulously levelled, FigC. III-1(b). The measurements on each direction are used to compensate error in sensor's readings by calculation of the sensitivity (gain) and the offset factors [200]. The calibration is satisfactory when the sensor axes that are parallel to CMM platform indicate (as close as possible) 0.0 g and the vertical axis (as close as possible) 1 g. Given that sensors are mechanical devices with manufacturing imperfections, inter-axis alignment error is also present. For ADXL345, this error equals to  $\pm 0.1^\circ$ , as provided in its technical specification [199].

Once calibrated, the sensor is mounted on machine's carriage with X axis pointing at the motion direction and Z axis pointing at the gravity direction. It is almost certain that the carriage will not be perfectly aligned with the earth's reference frame however the calibrated sensor permits alignment error corrections in order to obtain the purely linear acceleration signal along the axis motion. To achieve this, post-processing of the signal is required and was implemented by a developed Matlab™ script that is presented at the end of this Annex. The rationale is to calculate the angles roll ( $\varphi$ ), pitch ( $\theta$ ) and yaw ( $\psi$ ) of the acceleration vector  $\vec{G}_p = \{rawX; rawY; rawZ\}$  according to the raw sensor readings in g units, with respect to the earth's reference frame XYZ [201]. Angles  $\varphi$ ,  $\theta$  and  $\psi$  denote rotation about X, Y and Z-axis of the earth's reference frame respectively. Afterwards,  $\vec{G}_p$  is rotated according to these angles, yielding  $\vec{rG}_p =$

$\{accX; accY; accZ\}$  in g units, in order to align with the earth's gravity vector  $\vec{G} = \{0,0,1\}$ , in g units. Ideally, subtraction of vectors  $\overrightarrow{rG_P} - \vec{G}$  must result in 0 g for Y and Z axes throughout the entire horizontal motion of the carriage along X-axis. In practice though, inherent noise in the signal and the inter-axis alignment error of the sensor deviate from this ideal assumption thus inducing inaccuracy in the calculation of carriage velocity via integration of the acceleration signal that follows.

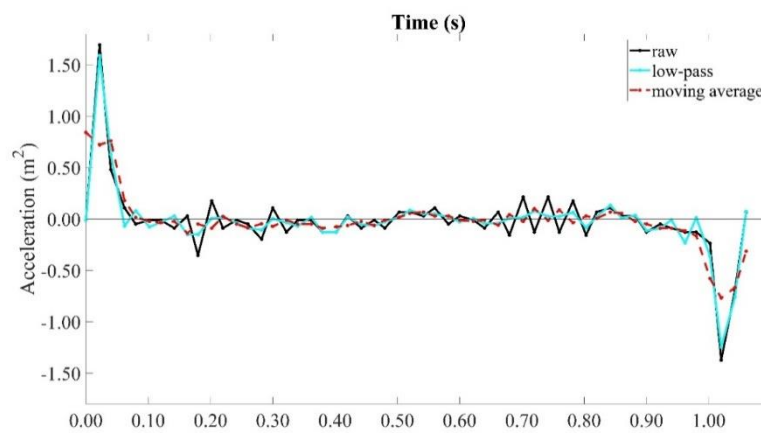
## C.2 Signal characteristics and noise suppression

One of the biggest challenges in extracting useful information from sensor readings is the appropriate signal processing. Accelerometer signal is typically noisy which is indicated with spikes in the waveform. A pertinent example is when the sensor stays stable the signal oscillates around 0 rather reading a flat waveform aligned with 0, as in the ideal case. For ADXL345 sensor resolution is rated at 4 mg. Widely known de-noising techniques, such as moving average window or high-pass filtering have been applied in this case and typically result in smoother curves. The real challenge is encountered when the acceleration signal needs to be integrated in order to calculate velocity. The integration of noise magnifies the error and velocity signal typically diverts from the real profile. This error is cumulative with the duration of the signal; in this case it is fortunate that signal duration of a few seconds is enough to derive velocity profile along a nominal straight line. The best way to process the signal before integrating is as follows: In the acceleration and deceleration phases, clearly larger spikes prevail among noise that oscillates about zero. Thus, the signal is manually cropped / delimited between the start and end of these spikes. Since motion of linear axes imply a low-frequency phenomenon, as seen in FigC. III-2, low bandwidth should suffice in obtaining all useful information and, as a result, sampling rate of 50 Hz is selected.



**FigC. III-2 Power spectrum of the integrated acceleration signal, pertaining to velocity of the carriage for a 40 mm linear displacement at 40mm/s carriage speed.**

Raw and de-noised acceleration signals are shown in FigC. III-3 for a linear 40 mm displacement along the X-axis of the carriage. A digital low-pass filter [202] with 20Hz cut-off frequency and a moving average filter with averaging window of size 3 [203] are applied. The moving average sequential acceleration readings in groups of three, according to the averaging window set by the user, thereby smoothing the waveform and suppressing noise. Apparently, low-pass filter does not severely suppress the acceleration/deceleration peaks at the beginning and the end of the movement. Therefore, high-pass filtering is applied with cut-off frequency slightly above zero in order to remove DC component [204]. DC component is depicted as a spike with much higher magnitude compared to the rest of the spectrum and therefore, is hiding useful information if not suppressed, see FigC. III-2.

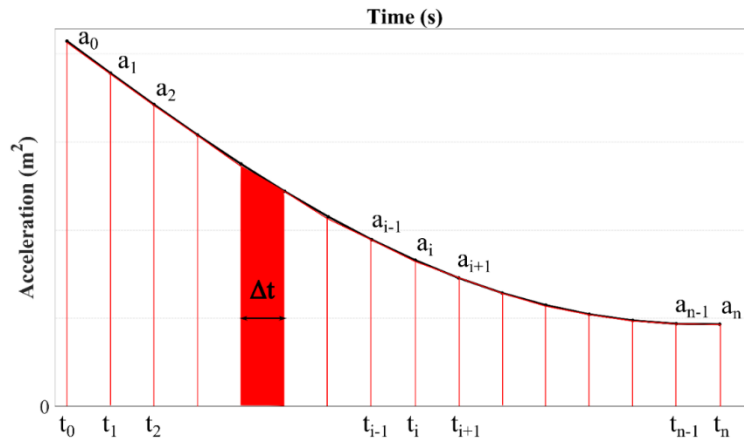


**FigC. III-3 Influence of low-pass filter and the moving average filter on the raw acceleration signal.**

### ***C.3 Integration in the time-domain***

A comprehensive analysis of time-domain and frequency domain integration of signals is found in [205, 206]. Regarding linear-axis motion literature mainly focuses on the understanding of jerk [198, 207] pointing out the challenge to capture low-frequency phenomena.

Mathematical integration of acceleration  $a(t)$  in time domain, yields velocity  $v(t)$  and similarly, integration of  $v(t)$  produces displacement  $d(t)$ . Although this is true for an ideal and continuous curve, in our case acceleration of the carriage is captured as a discrete signal by the sensor. The trapezoidal rule [208] is performed to calculate velocity at each time step  $t_n$ , according to Eqn. (III-1) and FigC. III-4. In reality the error term  $e_i$  is the deviation due to the linear approximation of the acceleration signal. In addition, the inherent noise in the discrete signal as well as the DC component in the signal induces errors during integration. Since, calculations in Eqn. (III-1) are recursive, the error accumulates with time, typically yielding irrational results.



**FigC. III-4 Approximation of continuous acceleration signal with trapezoids fit between successive sensor readings.**

$$\int_{t_0}^{t_n} a(t)dt = \sum_{i=1}^n \left( \frac{a(i-1) + a(i)}{2} \right) \Delta t + e_i \quad (\text{III-1})$$

where,

$a(t)$ : continuous time domain acceleration curve

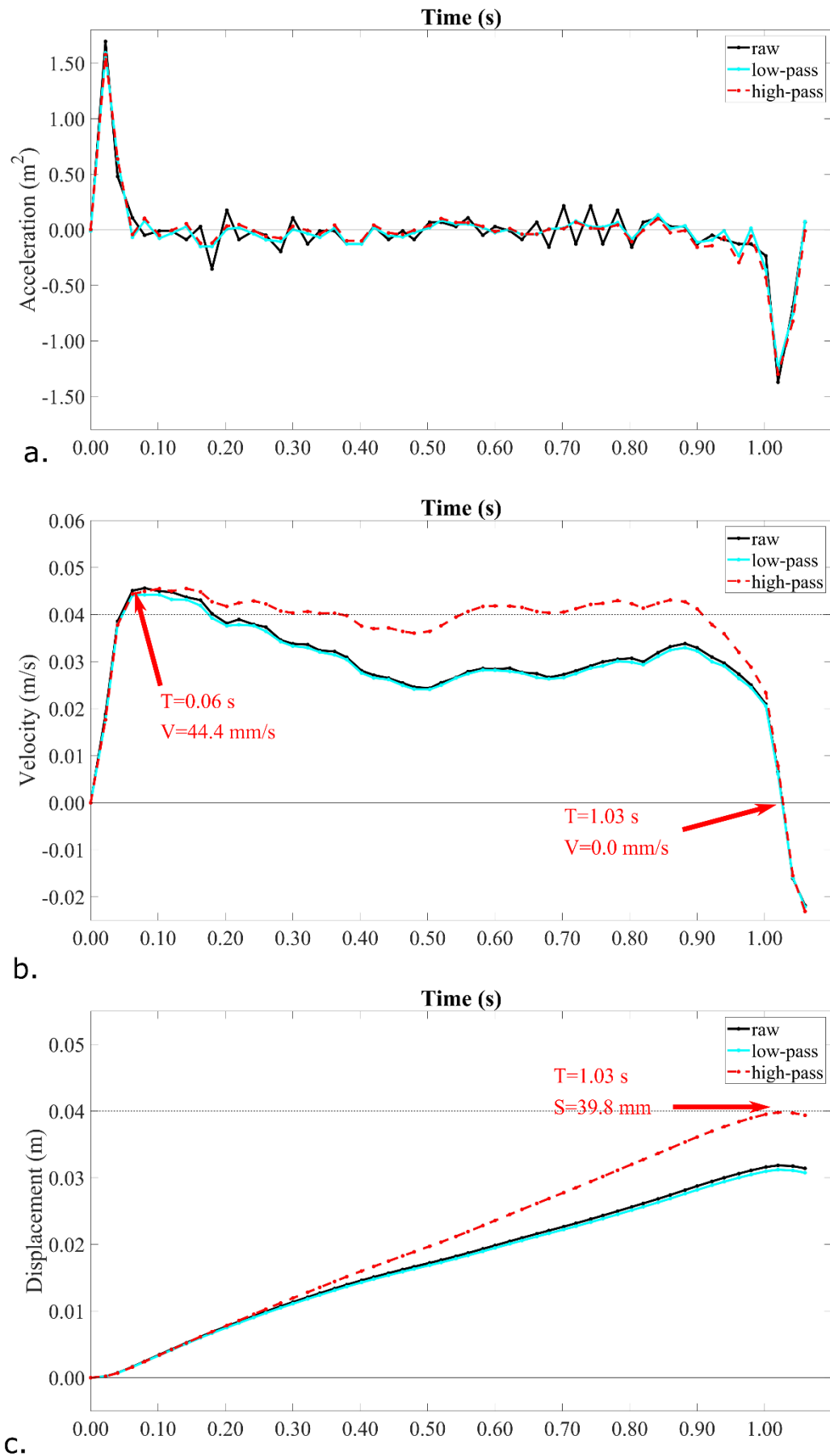
$a(i)$ :  $i$ -th sample of the discrete acceleration signal

$\Delta t$ : time increment between successive samples

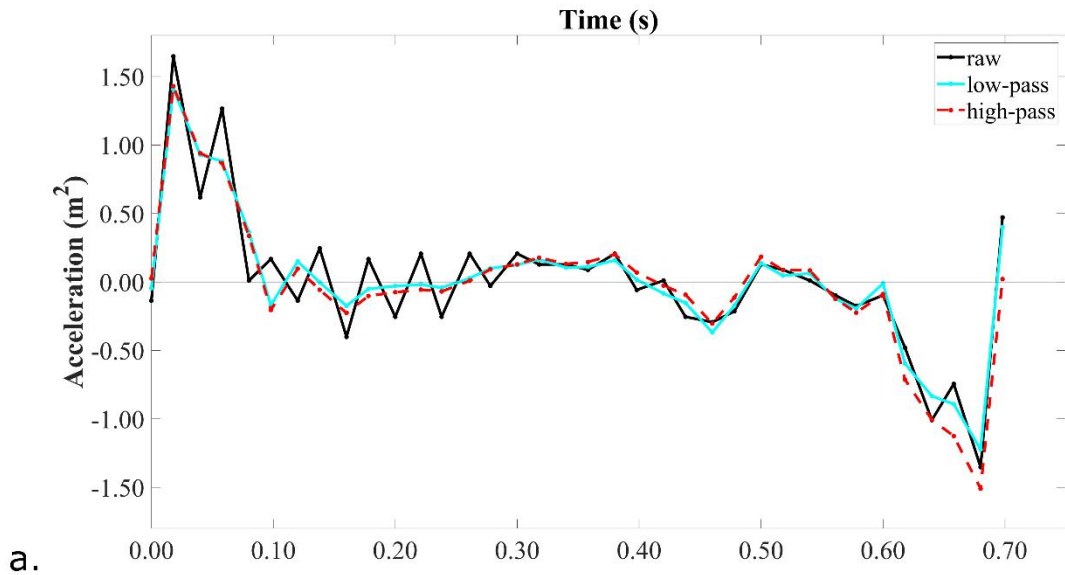
$n$ : number of samples in the discrete signal

$e_i$ : error due to linear approximation of the continuous acceleration curve

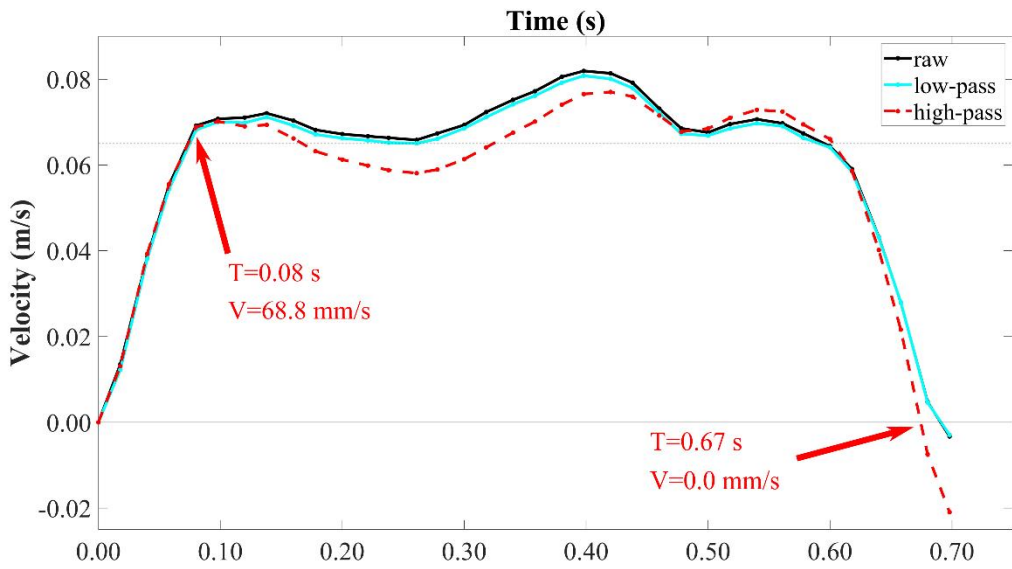
The results of acceleration integration for  $V=40$  mm/s and  $V=65$  mm/s are depicted in FigC. III-5 and FigC. III-6, respectively. Three waveforms are presented for each graph, representing the raw signal (black), the low-pass filtered signal (cyan) and the high-pass filtered signal (red dotted). The most successful results are obtained for the red dotted waveform where low-pass filtering is performed later accompanied by high-pass filtering. To verify validity of the results, the signal is integrated again and the total distance covered by the carriage is also presented. Given the position accuracy of the AM system that was evaluated at 0.3 mm with a Laser Doppler Displacement Meter (LDDM™), results for 40 mm/s seem reasonable (0.2 mm deviation) whilst results for 65 mm/s have an increased deviation of 1 mm.



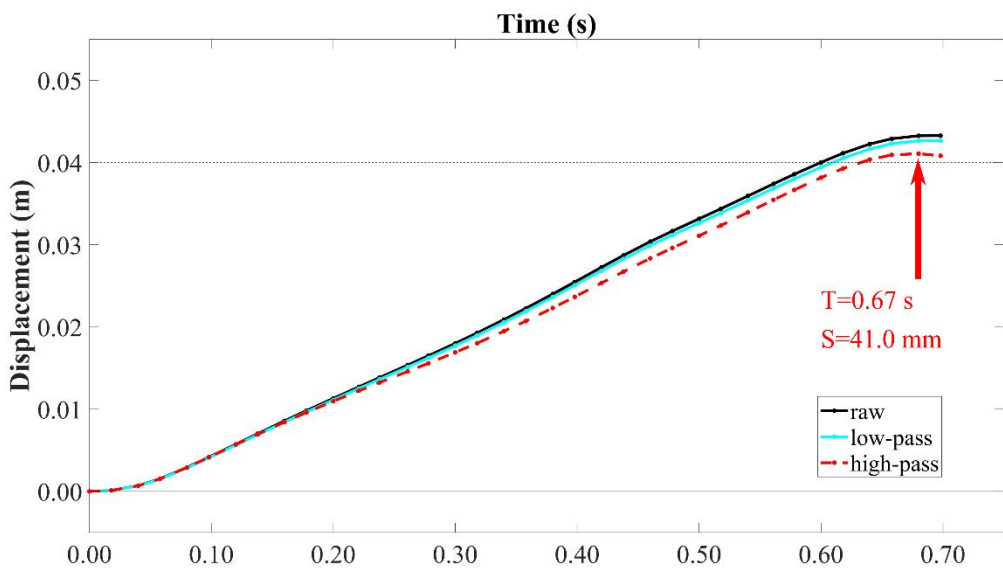
FigC. III-5 (a) Acceleration signal and the obtained motion profile of the carriage via time-domain integration (b) at target velocity 40 mm/s (c) for 40 mm linear displacement.



a.



b.



c.

FigC. III-6 (a) Acceleration signal and the obtained motion profile of the carriage via time-domain integration (b) at target velocity 65 mm/s (c) for 40 mm linear displacement.

### C.4 Integration in the frequency domain

Integration of signal in the frequency domain is another well-known method for obtaining velocity and displacement from acceleration signals. The workflow starts with Fourier transformation of the acceleration signal. In Matlab™ this is performed by the built-in Fast Fourier Transformation (FFT) routine for discrete signals. For the discrete acceleration signal  $a(t)$ , with length  $t=\{0,1, \dots,N-1\}$  and sampling frequency  $f_s$ , the FFT is calculated as in Eqn. (III-2), resulting in the algebraic representation of the signal's frequency spectrum [206]. The signal is transformed in the frequency domain with signal length  $k$  and is then processed as described in Eqns. (III-5) and (III-4).  $V(k)$  represents the integrated signal in the frequency domain. If angular frequency equals to zero the division is indefinite and thus  $V(0)=0$ . This function is equivalent to the removal of the signal's mean value in the time-domain, which results in the attenuation of the DC component in order to minimize errors in signal integration. In order to obtain velocity  $v(t)$ , the  $V(k)$  signal is transformed back to the time domain according to the inverse Fourier transformation, as calculated in Eqn. (III-5). Again, the transformation is performed using the corresponding built-in function in Matlab™.

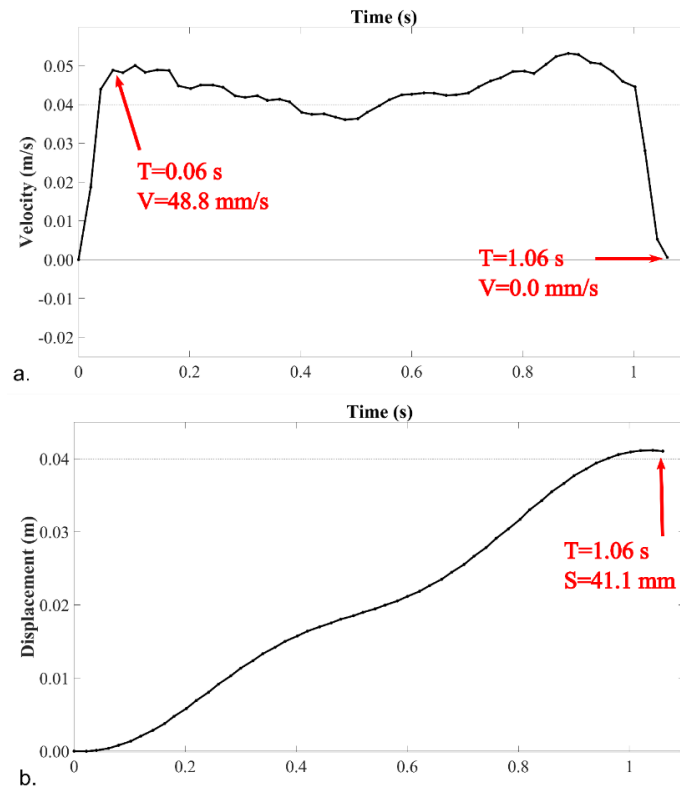
$$A(k) = \sum_{t=0}^{N-1} a(t)e^{-j2\pi kt/(N)} \quad (\text{III-2})$$

$$j\omega(k) = \begin{cases} j2\pi k f_s/N, & k = 1, 2, \dots, N \\ 0, & k = 0 \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

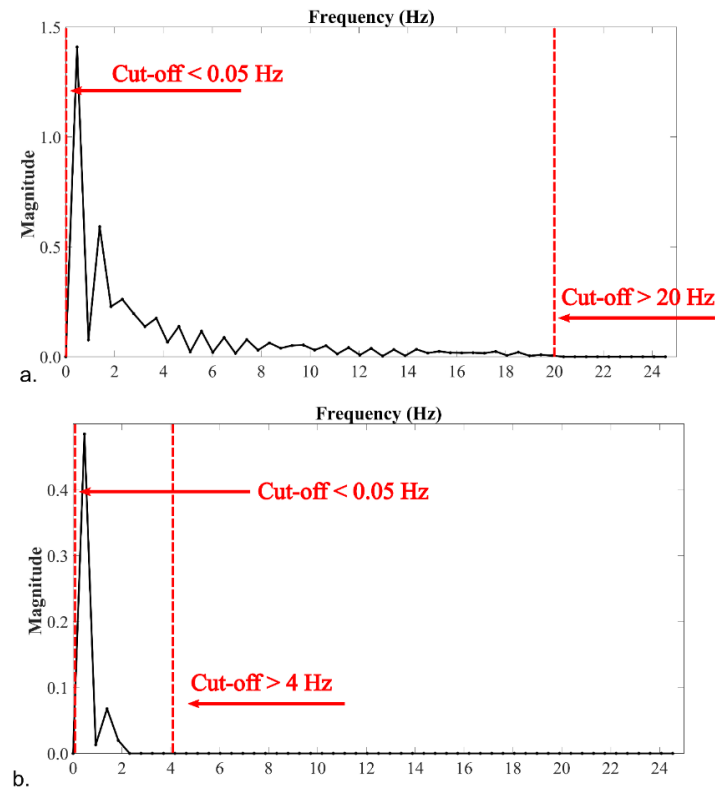
$$V(k) = A(k)/(j\omega(k)) \quad (\text{III-4})$$

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} V(k)e^{j2\pi kt/(N)} \quad (\text{III-5})$$

For frequency-domain integration, a pertinent script is developed in Matlab™, presented at the end of this Annex, in order to test the same acceleration signals used in time-domain integration corresponding to target velocity of 40 mm/s and 65 mm/s, respectively for total carriage displacement of 40 mm. The obtained velocity and displacement curve, as well as their corresponding spectra are depicted in FigC. III-7, FigC. III-8, FigC. III-9 and FigC. III-10.

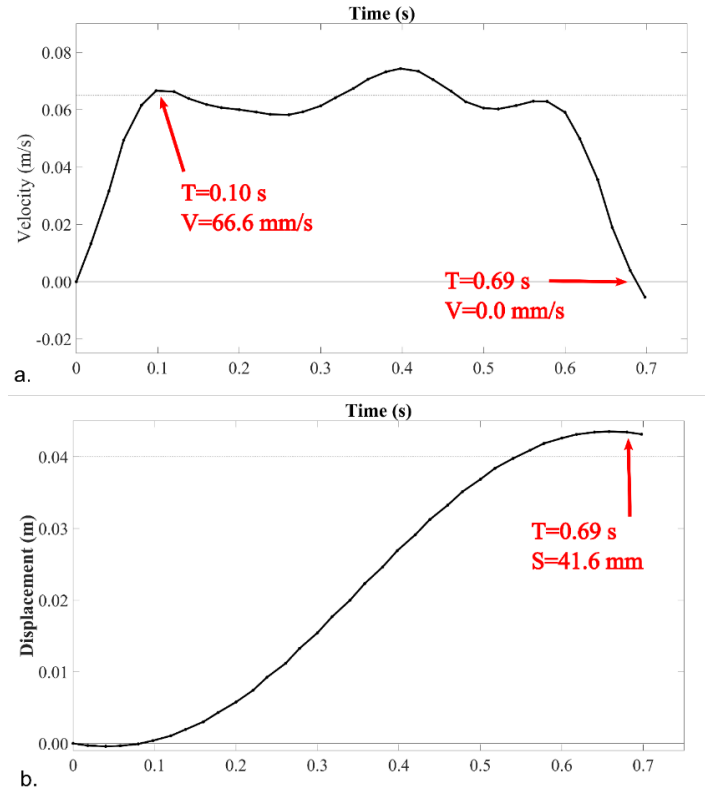


FigC. III-7 Motion profile of the carriage obtained by frequency-domain integration at (a) target velocity 40 mm/s (c) for 40 mm displacement.

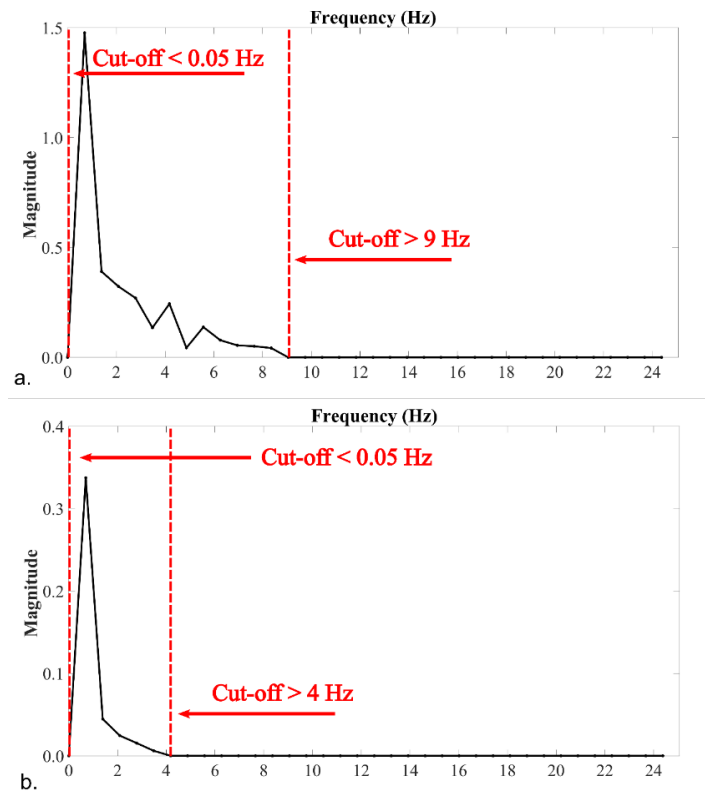


FigC. III-8 Power spectrum and their filtered frequency ranges for (a) the integrated and (b) the double-integrated acceleration signal in the frequency domain at target velocity 40 mm/s for 40 mm displacement.





FigC. III-9 Motion profile of the carriage obtained by frequency-domain integration at (a) target velocity 65 mm/s (c) for 40 mm displacement.



FigC. III-10 Power spectrum and their filtered frequency ranges for (a) the integrated and (b) the double-integrated acceleration signal in the frequency domain at target velocity 65 mm/s for 40 mm displacement.

### ***C.5 Remarks and basis future investigation***

Motion profile acquirement, using low-cost MEMS accelerometer, provided insight regarding how motion profile evolves. Two different methods are investigated, namely time-domain integration and frequency-domain integration of the discrete acceleration signal. Linear motion of the carriage of the tested AM system is received by calibrated ADXL345 capacitive accelerometer, transmitted to Arduino™ Uno micro-controller and stored in an SD-card at 50 Hz rate. Digital filtering is performed prior to integration in Matlab™. The derived velocity-time and displacement-time graphs depict motion profile of the moving carriage fairly. Time-domain integration presented better results than frequency-domain integration and the following procedure is proposed:

1. High-pass filter application, in order to get rid of the DC component, which causes irrational trends and low-frequency oscillations in the integrated signal.
2. High-pass filter application, in order to get rid of the DC component, which causes irrational trends and low-frequency oscillations in the integrated signal.
3. Low-pass filter application in order to remove inherent noise of the signal (sequential spikes) and smoothen motion profile curves.

Filtering of the signal is vital and therefore visualization of the velocity power spectrum drastically contribute to the effective selection of the cut-off frequencies in the acceleration signal.

Observing velocity-time graphs in FigC. III-5(b) and FigC. III-6(b), the time required to reach target velocity and the time to halt motion can be estimated. In both cases, the required time is less than 1 s, which is directly proportional to the target velocity, and the maximum acceleration is approximately  $730 \text{ mm/s}^2$ . A slight overshoot of approximately 6-8 mm/s, occurs during acceleration. Afterwards, in the case of 40mm/s motion, the velocity oscillates around target value in less than 10 mm/s range, whereas in the case of 65 mm/s, the oscillation is approximately 15 mm/s. The time required to perform the 40 mm linear displacement is reasonable, considering the acceleration/deceleration stages.

Regarding displacement-time graphs in FigC. III-5 (c) and FigC. III-6 (c), the curves follow the expected trend. This is a good indication that signal integration is correctly performed in general. In addition, displacement-time graphs are used to assess the accuracy of the method and what is more the potential to utilize the results for material deposition optimisation purposes. Judging from the estimated distance, the accuracy of the method is reasonable for the first case, with 39.8 mm estimated displacement (0.2 mm deviation from target), see FigC. III-5 (c), whereas for the

latter case, see FigC. III-6 (c), the 1 mm deviation is unacceptable according to the verified positioning accuracy of the employed AM system under.

Overall, the potential to obtain such detailed insight in the motion profile of the system is highly attractive. In this study, basic filtering techniques are followed. In general, motion profiles reflect to reality; however, the accuracy and repeatability of the results does not provide a reliable solution for fine tuning of the process, that was initially intended. A possible next step, that would enhance the accuracy of the results, is the design and optimisation of signal filters, using even advanced filtering techniques, such as Kalman filtering [209].

## C.6 Matlab scripts

```

% *****
% created by George Papazetis in MATLAB™ 2018
%
% 3D Rotation of Acceleration Vector
% (align acceleration vector with global coordinate system
% and subtract it from the gravity vector)
% *****

% Raw sensor readings from the ADXL345 accelerometer are denoted as aXraw, %
aYraw and aZraw. Time array is denoted with T.

gravity=9.7998;
fs=1/mean(diff(T)); %sensor reading rate
aXraw_fl=lowpass(aXraw,20,fs); %filtering signal - 20Hz cut-off
aXraw_fh=highpass(aXraw_fl,0.5,fs); %filtering signal - 0.5Hz cut-off

for i=1:length(T)
    % register acceleration readings for x,y and z axes.
    xGp=aXraw_fh(i);
    yGp=aYraw(i);
    zGp=aZraw(i);
    Gp=[xGp;yGp; ;zGp];

    % register gravity vector in the Earth Frame.
    xGrav=0.0;
    yGrav=0.0;
    zGrav=1.0;
    Grav=[xGrav;yGrav;zGrav;];

    % Calculation of  $\phi$ ,  $\Theta$  and  $\psi$  according to Application Note AN1057
    % "Using Accelerometer for Inclination Sensing" by Christopher J.
    Fischer.
    % Calculate  $\phi$  (roll) in rad, which is rotation about X-axis (global) &
    % determines the angle between gravity vector and z-axis(accelerometer.
    phi=atan(yGp/zGp);

    % Calculate  $\Theta$  (pitch) in rad which is rotation about Y-axis (global) &
    % determines the angle between horizon (0g-plane) and x-
    axis(accelerometer).
    theta=atan(-xGp/sqrt(yGp^2+zGp^2));

    % Calculate rotation matrix R according to Application Note AN3461
    % "Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer" by Mark Pedley
    % Rotation succession is XYZ (Eqn 6-8 in AN3461).
    rGp=[-sin(theta); cos(theta)*sin(phi); cos(theta)*cos(phi)];

    % Compensate for gravity
    A(i,1)=rGp(1)-Grav(1);
    A(i,2)=rGp(2)-Grav(2);
    A(i,3)=rGp(3)-Grav(3);
end
A=A*gravity; % convert accelerationg reading from g to mm/s2

% Cumulative Trapezoidal Rule for numerical integration integrate
V=cumtrapz(T,A(:,1)); % obtain velocity V
S=cumtrapz(T,V); % obtain velocity V
% *****
% created by George Papazetis in MATLAB™ 2018
%
% Frequency-Domain Integration

```

```

% *****
dt=mean(diff(Time));
fs=1/dt;
% acceleration signal in mm/s2 as obtained by 3D rotation vector script
a_time=A(:,1);

% resample acceleration signal at higher rate
fs2=200;
dt2=1/fs2;
[a_time, T] = resample(A(:,1),Time,fs2);

N1=length(a_time);
N=2^nextpow2(N1);
    if N > N1
        N=2*N1;
    end

a_time(N1+1:N) = 0;      % pad array with 0's
T=(0:dt2:N*dt2-dt2);
df = 1 / (N*dt2);      % frequency increment
Nyq = 1 / (2*dt2);    % Nyquist frequency
f=-Nyq:df:Nyq-df;

% Fast Fourier Transformation (FFT) for the acceleration signal
a_freq = fftshift(fft(a_time));

% integration of acceleration via division of FFT with omega ( $\omega=2\pi fi$ )
for i = 1 : N
    if f(i) > 0.48 && f(i)<20;
        v_freq(i) = a_freq(i)/(2*pi*f(i)*sqrt(-1));
    else
        % filtering out values by zeroing frequency bands selectively
        v_freq(i) = 0;
    end
end

% double integration of acceleration via division of FFT with omega ( $\omega=2\pi fi$ )2
for i = 1 : N
    if f(i) > 0.1 && f(i)<4;
        d_freq(i) = a_freq(i)/(2*pi*f(i)*sqrt(-1))^2;
    else
        % filtering out values by zeroing frequency bands selectively
        d_freq(i)=0;
    end
end

% inverse Fourier transformation to obtain velocity in the time domain
v_time=ifft(ifftshift(2*v_freq));
v_time=v_time-v_time(1);

% inverse Fourier transformation to obtain displacement in the time domain
d_time=ifft(ifftshift(4*d_freq));
d_time=d_time-d_time(1);
figure(1)
subplot(2,1,1);plot(T(1:N1),a_time(1:N1));
subplot(2,1,2);plot(f,a_freq);
figure(2)
subplot(2,1,1);plot(T(1:N1),v_time(1:N1));
subplot(2,1,2);plot(f,abs(v_freq));
figure(3)
subplot(2,1,1);plot(T(1:N1),d_time(1:N1));
subplot(2,1,2);plot(f,abs(d_freq));

```



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**Κατεργασίες πρόσθεσης υλικού με εξώθηση: σχεδιασμός  
τροχιάς και βελτιστοποίηση εναπόθεσης υλικού**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**  
(ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ)

Συγγραφέας  
**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΠΑΖΕΤΗΣ**

Επιβλέπων  
**Καθ. Γεώργιος -Χ. Βοσνιάκος**

Αθήνα, Ιούλιος 2020



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**Κατεργασίες πρόσθεσης υλικού με εξώθηση: σχεδιασμός  
τροχιάς και βελτιστοποίηση εναπόθεσης υλικού**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**  
(ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ)

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΠΑΖΕΤΗΣ**

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. Γ.-Χ. Βοσνιάκος (Μηχ, Μηχ., Ε.Μ.Π., Επιβλέπων)

Επικ. Καθ. Ι. Γιαννατσής (Βιομ. Διοικ. & Τεχν., ΠΑ.ΠΕΙ)

Καθ. Β. Δεδούσης (Βιομ. Διοικ. & Τεχν., ΠΑ.ΠΕΙ.)

Καθ. Δ. Μανωλάκος (Μηχ, Μηχ., Ε.Μ.Π., Συμβουλευτική Επιτροπή)

Επικ. Καθ. Α. Μαρκόπουλος (Μηχ, Μηχ., Ε.Μ.Π)

Επικ. Καθ. Π. Μπενάρδος (Μηχ, Μηχ., Ε.Μ.Π., Συμβουλευτική Επιτροπή)

Καθ. Ν. Μπιλάλης (Μηχ. Παρ. & Διοικ., Π.Κ.)

Αθήνα, Ιούλιος 2020

## Πίνακας Περιεχομένων

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	VIII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	IX
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>12</b>
1.1 ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ .....	12
1.2 ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ .....	13
1.3 ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	15
1.4 ΔΟΜΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ .....	19
<b>2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ.....</b>	<b>20</b>
2.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΡΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ .....	20
2.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΔΟΜΕΣ .....	26
2.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΛΥΣΗ.....	28
2.4 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ .....	30
2.4.1 Υλοποίηση .....	31
2.4.2 Υπολογισμός σημείων τοποθέτησης CST .....	32
2.4.2.1 Σημεία τοποθέτησης μοτίβου που ανήκουν στο όριο της στρώσης (STPc).....	32
2.4.2.2 Σημεία τοποθέτησης μοτίβου που ανήκουν στο εσωτερικό της στρώσης (STPi).....	34
2.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ.....	34
2.6 ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ.....	36
2.7 ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	40
<b>3 ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>41</b>
3.1 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	41
3.2 ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ .....	41
3.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	43
3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	46
3.4.1 Πιστότητα μορφής.....	46
3.4.2 Ογκομετρική παροχή υλικού.....	50
3.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΙΣΤΟΤΗΤΑΣ ΜΟΡΦΗΣ ΚΑΙ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ .....	50
3.6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	53
<b>4 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΑΚΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ .....</b>	<b>54</b>
4.1 ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ .....	54
4.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	55
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	59



4.3.1	Αξιολόγηση μοντέλων παλινδρόμησης .....	59
4.3.2	Πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση .....	60
4.3.3	Βελτιστοποίηση με προσαρμοστικές ρυθμίσεις .....	61
4.4	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ .....	63
4.5	ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	64
<b>5</b>	<b>ΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΣΕ ΥΨΗΛΟΤΕΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ .....</b>	<b>66</b>
5.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ .....	66
5.2	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ .....	67
5.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	71
5.4	ΔΙΑΚΟΠΗ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (MDD).....	74
5.5	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΛΩΡΙΔΑΣ ΥΛΙΚΟΥ (SWD).....	76
5.6	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ .....	79
5.7	ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	82
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>84</b>
6.1	ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ .....	84
6.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	87
<b>7</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>90</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1-1 (Α) ΓΕΝΙΚΗ ΑΠΟΨΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ (Β) ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ.....	14
ΣΧΗΜΑ 2-1 (Α) ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΚΑΙ (Β) ΠΛΑΤΟΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ.....	21
ΣΧΗΜΑ 2-2 ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΟΡΙΖΕΙ ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	21
ΣΧΗΜΑ 2-3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΓΙΑ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ.....	21
ΣΧΗΜΑ 2-4 (Α) ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΚΑΙ (Β) ΟΚΤΑΓΩΝΙΚΟ ΜΟΤΙΒΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ.....	22
ΣΧΗΜΑ 2-5 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ.....	22
ΣΧΗΜΑ 2-6 ΑΛΛΑΓΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΒΟΥ.....	22
ΣΧΗΜΑ 2-7 ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΤΡΟΧΙΑ) ΚΑΙ ΠΕΡΙΜΕΤΡΟΥ (ΜΠΛΕ ΤΡΟΧΙΑ) ΠΟΥ ΟΡΙΖΕΙ ΤΟ ΒΑΘΜΟ ΤΗΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΤΟΥΣ.....	23
ΣΧΗΜΑ 2-8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ (ΠΗΓΗ: KISSLICER© v1.5 USER MANUAL).....	24
ΣΧΗΜΑ 2-9 (Α) ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟ-ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ (Β) ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΗ ΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΛΟΓΩ ΜΗ-ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ.....	24
ΣΧΗΜΑ 2-10 ΤΟ ΚΙΤΡΙΝΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΘΕΣΗ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΗΔΗ ΑΠΟΤΙΘΕΜΕΝΗ ΣΤΡΩΣΗ.....	25
ΣΧΗΜΑ 2-11 (Α) ΑΡΑΙΑ ΚΑΙ (Β) ΠΥΚΝΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΗ ΔΟΜΗ (ΠΗΓΗ: KISSLICER© v1.5 USER MANUAL).....	25
ΣΧΗΜΑ 2-12 ΡΥΘΜΙΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΣΤΙΣ (Α) 5°, (Β) 40° ΚΑΙ (C) 70°. Η ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΝΤΟΠΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΟΛΟΕΝΑ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΠΡΟΕΞΩΧΗΣ.....	26
ΣΧΗΜΑ 2-13 (Α) ΚΥΒΙΚΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΚΕΛΙ (Β) ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΜΚ ΠΟΥ ΚΑΛΥΠΤΕΙ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΣΤΟΥ (C) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΟΜΗΣ ΒΟΟΛ.....	27
ΣΧΗΜΑ 2-14 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (Α) ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ CELL SURFACE TEMPLATE (CST) ΚΑΙ (Β) ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	29
ΣΧΗΜΑ 2-15 (Α) ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΚΕΛΙΟΥ (Β) ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΤΙΒΟ 1 (CELL SURFACE TEMPLATE, CST 1) ΚΑΙ (C) ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΤΙΒΟ 2 (CELL SURFACE TEMPLATE, CST 2).....	30
ΣΧΗΜΑ 2-16 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΜΟΤΙΒΑ CST ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ.....	30
ΣΧΗΜΑ 2-17 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΤΙΒΟΥ LCP (Α) ΠΡΙΝ ΚΑΙ (Β) ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΟΠΗ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΩΝ CST ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ.....	31
ΣΧΗΜΑ 2-18(Α) ΠΙΘΑΝΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΠΟΥ ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΕ ΜΟΤΙΒΟ CST ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ (Β) ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΟΥ ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΤΗΝ ΙΔΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΓΙΑ ΝΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΕΙ ΕΑΝ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ. .	31
ΣΧΗΜΑ 2-19 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ ΙΔΕΑΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ (RAY CASTING) ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ STPC ACCORDING ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ (3 1) AND (3 2).....	33
ΣΧΗΜΑ 2-20 ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ G' ΚΑΙ H', ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΑ ΑΝΟΙΧΤΟΧΡΩΜΑ ΜΟΤΙΒΑ CST, ΔΕΝ ΕΝΤΟΠΙΖΟΝΤΑΙ ΠΑΡΑ ΜΟΝΟ ΑΝ Η ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ RAY 2 ΚΑΙ 3 ΓΙΝΕΙ ΠΙΟ ΜΙΚΡΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΟΚΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ RAY 2.5 ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ ΤΗΣ (ΜΠΛΕ) ΑΚΤΙΝΑΣ RAY 1 ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ Y.....	34
ΣΧΗΜΑ 2-21 (Α) ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΗΡΙΑΙΟΥ ΟΣΤΟΥ ΚΑΙ (Β) ΠΕΝΤΕ ΜΟΤΙΒΑ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑΤΟΣ LCP ΣΕ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ.....	35
ΣΧΗΜΑ 2-22 ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (STP1) ΓΙΑ ΜΙΑ ΤΥΧΑΙΑ ΣΤΡΩΣΗ ΤΟΥ ΜΗΡΙΑΙΟΥ ΟΣΤΟΥ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΑ ΩΣ SKETCH POINTS ΣΤΟ SOLIDWORKS™ ΓΙΑ ΛΟΓΟΥΣ ΕΠΙΔΕΙΞΗΣ.....	35

ΣΧΗΜΑ 2-23 Α) ΣΕΙΡΙΑΚΗ ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΓΡΑΜΜΗ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙ ΤΟ CST, Β) ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΜΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΟΥ CST, Γ) ΕΝΩΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΠΟΥ ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΕ ΓΕΙΤΟΝΙΚΑ CST ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΤΟΥΣ ΚΑΙ Δ) ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ G-CODE ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ. ....	38
ΣΧΗΜΑ 2-24 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΤΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΩΝ CST. ....	38
ΣΧΗΜΑ 2-25 ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗ G-CODE ΓΙΑ ΕΝΑ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΜΗΡΙΑΙΟΥ ΟΣΤΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ. ....	39
ΣΧΗΜΑ 2-26 Α) ΠΕΙΡΑΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ Β) ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΩΡΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ. ....	39
ΣΧΗΜΑ 3-1 ΤΥΠΟΙ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (Α) ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΕΣ ΑΚΜΕΣ (DEFORMED EDGES, DE)(Β) ΜΗ-ΕΠΑΡΚΗΣ ΕΞΩΘΗΣΗ (UNDER-EXTRUSION, UE)(Γ) ΑΔΥΝΑΜΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΣΕΙΡΩΝ ΥΛΙΚΟΥ (WEAK FIBER BONDING, WFB)(Δ) ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΒΑΣΗΣ (BASE BULGING, BB). ....	42
ΣΧΗΜΑ 3-2 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (Α) ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΑΡΩΣΗ ΜΕ ΠΡΟΒΟΛΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ (Β) ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (Γ) ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΙ ΙΔΕΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟ CAD. ....	43
ΣΧΗΜΑ 3-3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ. ....	44
ΣΧΗΜΑ 3-4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΙΣΤΟΤΗΤΑ ΜΟΡΦΗΣ: (Α) ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ (Β) ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ LTχFT (Γ) ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ LTχPS (Δ) ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ FTχPS. ....	48
ΣΧΗΜΑ 3-5Α) ΜΗ ΕΠΑΡΚΗΣ ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΑΪΝΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΙ Β) ΥΠΕΡ-ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ. ....	49
ΣΧΗΜΑ 3-6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ANN. ....	50
ΣΧΗΜΑ 3-7 ΧΑΡΤΗΣ ΠΙΣΤΟΤΗΤΑΣ ΜΟΡΦΗΣ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥ ΠΙΘΑΝΟΥΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥΣ ΣΤΟ ΕΥΡΟΣ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ Β) ΤΟΜΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ $PS=40$ ΚΑΙ Γ) ΤΟΜΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΟ ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ $LT=0.20MM$ . ....	52
ΣΧΗΜΑ 4-1 ΣΧΕΔΙΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΑΚΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ. ....	56
ΣΧΗΜΑ 4-2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ: Α) ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ Β) ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΗΣ ΑΠΟΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΛΩΡΙΔΑΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ Γ) ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ. ....	56
ΣΧΗΜΑ 4-3 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (Α) – (Γ) ΟΠΩΣ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΕΝΤΟΛΕΣ G-CODE (ΠΙΝΑΚΑΣ 4-5). ....	62
ΣΧΗΜΑ 4-4 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΠΟΛΥ-ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (ΜΩΒ) ΚΑΙ ΓΙΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ (ΚΙΤΡΙΝΟ). ....	64
ΣΧΗΜΑ 4-5 (Α) ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΤΟΥ ΛΕΠΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ (Β) ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΙΔΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ. ....	64
ΣΧΗΜΑ 5-1 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΕΛΛΕΙΨΗ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΙΑ ΖΗΤΟΥΜΕΝΗ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ (Α) $0.59 \text{ mm}^3/\text{s}$ (Β) $1.30 \text{ mm}^3/\text{s}$ (Γ) $4.00 \text{ mm}^3/\text{s}$ (Δ) $7.00 \text{ mm}^3/\text{s}$ . ΤΑ ΒΕΛΗ ΥΠΟΔΕΙΚΝΟΥΝ ΤΗΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΑΙ Η ΤΕΛΕΙΕΣ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ. ....	67
ΣΧΗΜΑ 5-2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ, ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΚΑΙ ΤΡΙΠΟΔΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ. ....	70
ΣΧΗΜΑ 5-3(Α) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΜΕΡΑ ΣΤΗΝ ΚΕΦΑΛΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ (Β) ΣΗΜΑΔΙΑ ΣΤΟ ΝΗΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΞΩΘΗΣΗ (ΠΛΑΝΟ ΜΕΣΩ ΚΑΜΕΡΑΣ). ....	71
ΣΧΗΜΑ 5-4 ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΛΕΥΚΟΥ ΣΗΜΑΔΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ ΚΑΙ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ (ΜΠΛΕ ΔΙΑΔΡΟΜΗ) ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΞΩΘΗΣΗ. ....	71

ΣΧΗΜΑ 5-5 ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	73
ΣΧΗΜΑ 5-6 ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΛΟΓΩ (Α) ΑΔΥΝΑΜΙΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ ΚΑΙ (Β) ΜΗ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΣΤΗΝ ΤΡΟΧΙΑ.....	74
ΣΧΗΜΑ 5-7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ ΥΛΙΚΟΥ.....	75
ΣΧΗΜΑ 5-8 (Α) ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΥΨΗΛΗ SPR ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗ DTΕ (Β) ΣΕ ΑΝΤΙΘΕΣΗ ΜΕ ΟΜΑΛΗ ΕΞΩΘΗΣΗ ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΜΕΙΩΜΕΝΗ SPR ΚΑΙ ΑΥΞΗΜΕΝΗ DTΕ.....	75
ΣΧΗΜΑ 5-9 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ LPR ΚΑΙ DP ΣΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ MDD ΓΙΑ (Α) ΧΑΜΗΛΟ SPR ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΟ T, (Β) ΥΨΗΛΟ SPR ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΟ T, (C) ΧΑΜΗΛΟ SPR ΚΑΙ ΥΨΗΛΟ T, (D) ΥΨΗΛΟ SPR ΚΑΙ ΥΨΗΛΟ T.....	76
ΣΧΗΜΑ 5-10 ΜΗΚΟΣ (L), ΕΜΒΑΔΟ (A) ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ (START) ΚΑΙ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ (END) ΤΗΣ ΑΠΟΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΛΩΡΙΔΑΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	77
ΣΧΗΜΑ 5-11 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΛΩΡΙΔΑΣ ΥΛΙΚΟΥ (SWD). ΟΙ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΥΠΟΔΕΙΚΝΟΥΝ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΘΕΣΗ.....	77
ΣΧΗΜΑ 5-12 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ LPR ΚΑΙ DP ΣΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ SWD ΓΙΑ (Α) ΧΑΜΗΛΗ SPR ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗ T, (Β) ΥΨΗΛΗ SPR ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗ T, (C) ΧΑΜΗΛΗ SPR ΚΑΙ ΥΨΗΛΗ T, (D) ΥΨΗΛΗ SPR ΚΑΙ ΥΨΗΛΗ T.....	78
ΣΧΗΜΑ 5-13(Α) ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ LPR ΚΑΙ SR ΣΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ SWD ΓΙΑ (Α) T=195°C ΚΑΙ (Β) T=225°C.....	79
ΣΧΗΜΑ 5-14 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ESR ΚΑΙ SR. ΟΙ ΥΠΟΛΟΙΠΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΡΥΘΜΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΤΟΥΣ ΤΙΜΗ.....	79
ΣΧΗΜΑ 5-15 ΓΡΑΦΗΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΝΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΩΘΗΣΗ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ 40MM/S: (Α) ΧΩΡΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟ-ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ ΚΑΙ (Β) ΥΠΟ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟ-ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ. ΣΤΟ ΚΑΤΩ ΜΕΡΟΣ ΚΑΘΕ ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΤΙΘΕΤΑΙ Η ΑΠΟΤΙΘΕΜΕΝΗ ΛΩΡΙΔΑ ΥΛΙΚΟΥ.....	80
ΣΧΗΜΑ 5-16 ΓΡΑΦΗΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΝΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΩΘΗΣΗ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ 65MM/S: (Α) ΥΠΕΡ-ΕΞΩΘΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΚΟΠΗ ΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ (ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΟΣ ΚΥΚΛΟΣ) ΚΑΙ (Β) ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΛΩΡΙΔΑΣ (SWD) ΥΠΟ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟ-ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ.....	81
ΣΧΗΜΑ 5-17 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΓΙΑ PS=65 MM/S ΚΑΙ Q=7.80MM <sup>3</sup> /S ΥΠΟ (Α) ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ (Β) ΤΙΣ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	82

## Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΙΚΡΙΩΜΑΤΟΣ.....	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΥΟ ΙΚΡΙΩΜΑΤΑ (ΜΗΚΟΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΚΕΛΙΟΥ: 500ΜΜ/ ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΟΡΟΥ: 400ΜΜ/ ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ: 100ΜΜ).....	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ.....	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΑ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ.....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2 ΟΑ18 ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΑΓΥΧΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ANN.....	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3 ΟΑ27 ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΑΓΥΧΙ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΙΣΤΟΤΗΤΑΣ ΜΟΡΦΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ.....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΜΕΝΟΥ ANN.....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΑ ΠΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΠΕΙΡΑΜΑ CCD.....	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ (CCD) ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΑΚΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ.....	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-4 ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ ΠΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΖΟΝΤΑΙ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΟΛΥ-ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ.....	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-5 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ G-CODE ΜΕ ΤΙΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΕΝΕΣ ΤΡΟΧΙΕΣ ΠΟΥ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ (Α) – (Γ) ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4-3.....	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ.....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2 ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (MDD) ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΠΛΑΤΟΥΣ ΛΩΡΙΔΑΣ ΥΛΙΚΟΥ (SWD).....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ.....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΙΣ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5-15.....	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-5 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΙΣ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5-16.....	81

## Περίληψη

Η Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ) αποτελεί μια οικογένεια κατεργασιών, που αποτελείται από διαφορετικές τεχνικές, με κοινό τους χαρακτηριστικό την κατασκευή του τεμαχίου σε στρώσεις. Η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολείται με μια από αυτές τις τεχνικές, την Προσθετική Κατασκευή με Εξώθηση Υλικού (ΠΚ-ΕΥ). Τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα της κατεργασίας αφορούν στη μεγάλη ευελιξία σχεδιασμού που παρέχει η λογική κατασκευής σε στρώσεις, στη δυνατότητα ενοποίησης συναρμολογημάτων και μηχανισμών σε ένα ενιαίο κομμάτι και στους χρόνους ανάπτυξης των προϊόντων από τη φάση του σχεδιασμού μέχρι την παραγωγή τους. Για αυτούς τους λόγους, το ενδιαφέρον της βιομηχανίας έχει ενταθεί προς την κατεύθυνση της ενσωμάτωσης της ΠΚ-ΕΥ στην παραγωγή τελικών προϊόντων, η οποία περνάει μέσα από την επίλυση θεμάτων τα οποία αποτελούν ανοιχτές προκλήσεις στο δρόμο προς την εδραίωση της κατεργασίας. Σε μια προσπάθεια συμβολής στην ωρίμανση της ΠΚ-ΕΥ, η εν λόγω διδακτορική διατριβή ασχολείται με ανοιχτά θέματα της κατεργασίας από την πλευρά του σχεδιασμού της τροχιάς και της βελτιστοποίησης εναπόθεσης του υλικού.

Η κατασκευή πολύπλοκων γεωμετρικών δομών χάρη στην προαναφερθείσα ευελιξία, περνά μέσα από περιορισμούς που εντοπίζονται στη φάση του σχεδιασμού του μοντέλου στο περιβάλλον CAD ή στη φάση της μετατροπής του σε αρχείο STL (Stereolithography), ιδίως στις περιπτώσεις μοντέλων μεγάλης κλίμακας. Στο **πρώτο στάδιο της διδακτορικής διατριβής**, παρουσιάζεται η μέθοδος έμμεσης αναπαράστασης της πορώδους δομής ενός μοντέλου μεγάλης κλίμακας σε περιβάλλον CAD, καθώς και η απευθείας εξαγωγή εντολών μηχανής (G-code), χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσης μετατροπής του μοντέλου σε αρχείο STL. Ο κώδικας υπολογισμού της τροχιάς και τοποθέτησης των πόρων, στοχεύει στην αναπαράσταση επαναλαμβανόμενου μοτίβου των πόρων, με τη μορφή μοναδιαίου κελιού (unit cell), το οποίο διατάσσεται περιοδικά σε κάθε στρώση. Ο κώδικας αναπτύσσεται στην προγραμματιστική διεπαφή (API) του εμπορικού CAD λογισμικού Solidworks™, αξιολογώντας την έμμεση αναπαράσταση του μοντέλου από την σκοπιά του χρόνου εκτέλεσης, όπως επίσης και από την επιτυχή εξαγωγή σε εντολές G-code και κατασκευής του σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ.

Το επόμενο βήμα της επιτυχούς εκτέλεσης είναι η βελτιστοποίηση της κατεργασίας με σκοπό την παραγωγή των τεμαχίων εντός συγκεκριμένων προδιαγραφών. Ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων της κατεργασίας ΠΚ-ΕΥ σε συνδυασμό με το μεγάλο εύρος επιτρεπόμενων ρυθμίσεων, καθιστούν πιθανή την διαμόρφωση ακατάλληλων συνθηκών εκτύπωσης που οδηγούν σε μη-λειτουργικά κομμάτια λόγω σφαλμάτων κατασκευής. Υπό αυτό το πρίσμα, στο **δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής**, αναπτύχθηκε μεθοδολογία οριοθέτησης της περιοχής βέλτιστης λειτουργίας σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ. Η μέθοδος σχεδιασμού πειραμάτων

Taguchi χρησιμοποιήθηκε ώστε να ταυτοποιηθεί η συσχέτιση τεσσάρων βασικών παραμέτρων με την πιστότητα μορφής, δηλαδή το βαθμό ύπαρξης συγκεκριμένων σφαλμάτων κατασκευής. Η έκταση των σφαλμάτων αξιολογήθηκε μέσω συστήματος αντίστροφης μηχανικής (τρισδιάστατη σάρωση), για την καθολική αποτύπωση της γεωμετρίας. Οι στατιστικά σημαντικές σχέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων και της πιστότητας μορφής αξιολογήθηκαν μέσω ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA). Οι πειραματικές παρατηρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου, το οποίο εντοπίζει τις σχέσεις παραμέτρων και τελικού κριτηρίου, ενώ είναι σε θέση να προβλέπει την απόκριση για νέες και μη δοκιμασμένες παραμετρικές ρυθμίσεις. Οι προβλέψεις του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν για την χαρτογράφηση της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος ΠΚ-ΕΥ, ενώ λειτούργησαν και ως εργαλείο βελτιστοποίησης των παραμετρικών ρυθμίσεων εκείνων που επιτυγχάνουν τόσο τη μέγιστη παραγωγικότητα της κατεργασίας, όσο και την ελάχιστη επιτρεπόμενη ογκομετρική παροχή υλικού.

Στο **τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής** αξιοποιήθηκαν η προαναφερθείσα περιοχή βέλτιστης λειτουργίας, εντός της οποίας αξιολογήθηκε η διαστασιακή ακρίβεια ενός δοκιμίου με πολλαπλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μέσω της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων Response Surface Methodology (RSM). Οι βέλτιστες ρυθμίσεις εκτύπωσης ποικίλουν ανάλογα τη διεύθυνση κατασκευής αλλά και του υπό εκτύπωση γεωμετρικού χαρακτηριστικού. Η εδραιωμένη λύση σε αυτή την περίπτωση είναι η χρήση αλγορίθμων πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης, οι οποίοι υποδεικνύουν τον καλύτερο δυνατό συμβιβασμό μεταξύ πολλαπλών κριτηρίων. Στη συγκεκριμένη μελέτη προτείνεται μια καινοτόμος πρακτική, που αφορά στην υιοθέτηση προσαρμοστικών ρυθμίσεων εκτύπωσης στην ίδια στρώση αλλά και κατά την εκτέλεση ενιαίας τροχιάς, με επιτόπου αλλαγή της ταχύτητας εκτύπωσης ή/και του ρυθμού εξώθησης υλικού. Η υλοποίησης της εν λόγω προσέγγισης γίνεται μέσω μετά-επεξεργασίας του αρχείου G-code με την ανάπτυξη προγραμματιστικής ρουτίνας επεξεργασίας κειμένου. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου κρίνεται επιτυχής, καθώς κατάφερε να αυξήσει τη διαστασιακή ακρίβεια του δοκιμίου σε σύγκριση με την εκτύπωση που πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες ολικού βέλτιστου, προερχόμενες από την πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση.

Η επίδραση των προσαρμοστικών ρυθμίσεων στην ποιότητα απόθεσης υλικού, καθώς και η ανάγκη εποπτείας του συγχρονισμού μεταξύ της οριζόντιας κίνησης της κεφαλής του συστήματος ΠΚ-ΕΥ και του προφίλ εξώθησης υλικού, αποτελούν τα βασικά κίνητρα της μελέτης που παρουσιάζεται στο **τέταρτο μέρος της διδακτορικής διατριβής**. Ένα δοκίμιο εφοδιασμένο με απλές παράλληλες λωρίδες υλικού σχεδιάζεται ώστε να αξιολογηθεί η ομοιομορφία του πλάτους της λωρίδας με εργαλεία ανάλυσης εικόνας. Παράλληλα, το προφίλ εξώθησης υλικού βιντεοσκοπείται και αναλύεται καρέ-καρέ ώστε να αποκαλυφθούν φαινόμενα

που λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ιδίως στις φάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης της κεφαλής. Μέσω ενός κλασματικού παραγοντικού πειράματος αξιολογούνται η μη-διακοπόμενη απόθεση υλικού, καθώς και η ομοιομορφία πλάτους της αποτιθέμενης λωρίδας, βασιζόμενα σε παραμέτρους που αφορούν στη θερμοκρασία, την ταχύτητα της κεφαλής, αλλά και σε δυναμικές αλλαγές του ρυθμού εξώθησης υλικού. Τέλος, η ανάπτυξη μοντέλων παλινδρόμησης χρησιμοποιείται σαν χάρτης βελτιστοποίησης της ποιότητας απόθεσης σε υψηλότερες ταχύτητες εκτύπωσης.



# 1

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Προσθετική κατασκευή*

Ο όρος προσθετική κατασκευή (ΠΚ) αναφέρεται σε μια μεγάλη κατηγορία κατεργασιών, με κοινό χαρακτηριστικό την δημιουργία του παραγόμενου κομματιού σε στρώσεις [1]. Η ΠΚ απαρτίζεται από ένα σύνολο υποκατηγοριών, οι οποίες διατηρούν την λογική της κατασκευής σε στρώσεις, μέσω διαφορετικών τεχνολογικών υλοποιήσεων ως εξής:

1. Εξώθηση υλικού (ΕΥ), η οποία περιλαμβάνει εξώθηση τηγμένου υλικού μέσω ακροφυσίου και την άμεση στερεοποίησή του κατά την ψύξη του.
2. Σύντηξη πούδρας (ΣΠ), η οποία περιλαμβάνει τη τοπική συσσωμάτωση κόκκων υλικού, με αύξηση της θερμοκρασίας τους μέσω πηγής λέιζερ.
3. Φωτοπολυμερισμός ρητίνης (ΦΡ), η οποία περιλαμβάνει τοπική στερεοποίηση υγρής ρητίνης μέσω επιλεκτικής στόχευσης δέσμης ακτινοβολίας.
4. Ψεκάσμος υλικού (ΨΥ), η οποία περιλαμβάνει τον επιλεκτικό ψεκάσμο υλικού σε υγρή μορφή και την άμεση στερεοποίηση των σταγονιδίων μέσω φωτοπολυμερισμού.
5. Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (ΕΣΟ), η οποία περιλαμβάνει τον επιλεκτικό ψεκάσμο συγκολλητικής ουσίας σε υλικό που βρίσκεται σε μορφή πούδρας.
6. Εναπόθεσή με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (ΕΚΕΔ), η οποία περιλαμβάνει τον ψεκάσμο πούδρας ή νήματος υλικού, με παράλληλη τήξη και συσσωμάτωσή του μέσω αύξησης της θερμοκρασίας.
7. Επαλληλία φύλλων (ΕΦ), η οποία περιλαμβάνει τη διαδοχική σώρευση και συγκόλληση φύλλων, με αφαίρεση του περιττού υλικού που βρίσκεται εκτός του περιγράμματος της στρώσης.

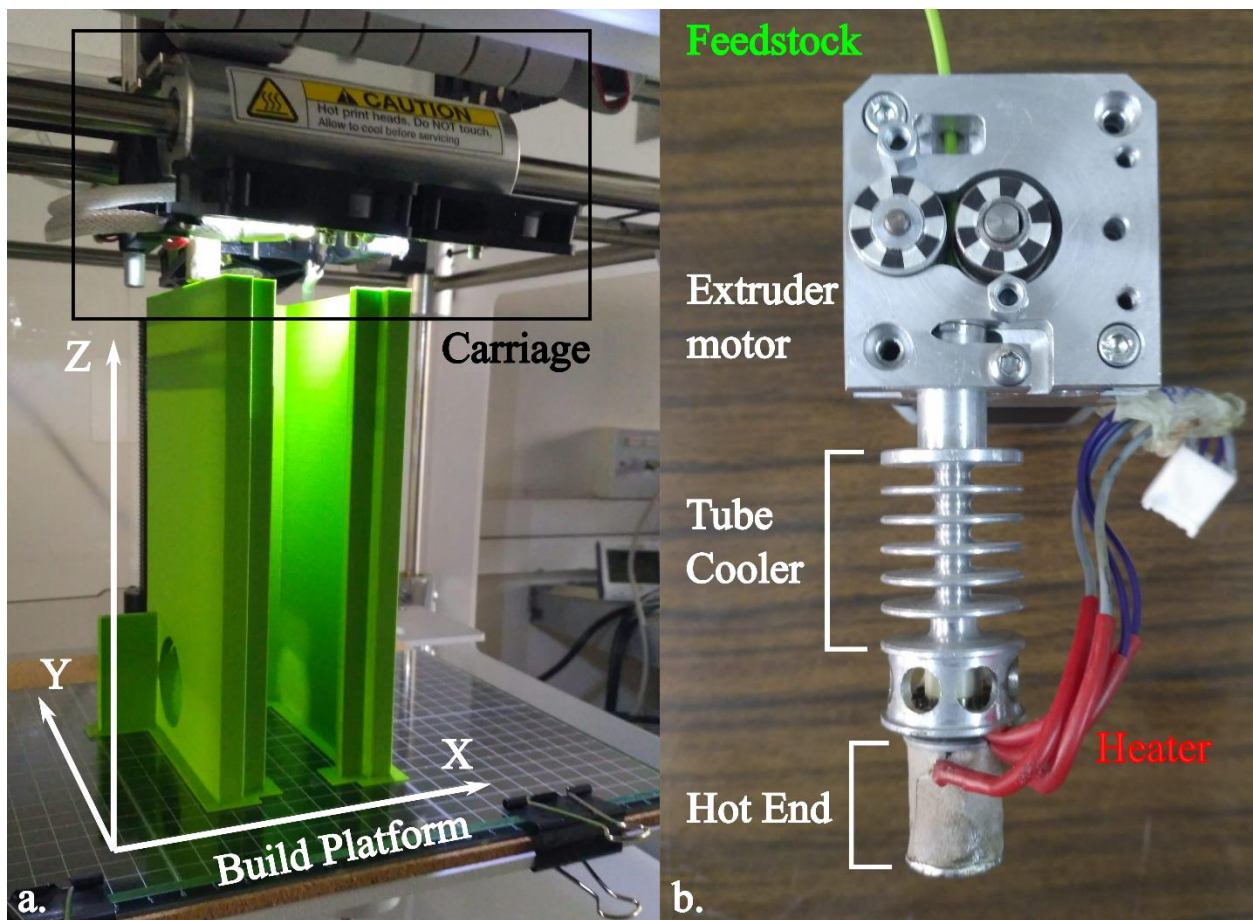
Σύμφωνα με το πρότυπο ISO/ASTM 52900-2015 [2], ο όρος ΠΚ διαφοροποιείται από τις λοιπές βιομηχανικές κατεργασίες (αφαίρεσης υλικού, κατεργασίες διαμόρφωσης κλπ.), ενώ ο πιο δημοφιλής, και κατανοητός από πιο ευρύ κοινό, όρος «τρισδιάστατη εκτύπωση» συχνά συσχετίζεται με χαμηλού κόστους μηχανήματα (τρισδιάστατους εκτυπωτές).

Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της ΠΚ σχετίζονται με την παραγωγή μικρού όγκου τεμαχίων, λόγω της χαμηλής παραγωγικότητας σχετικά με άλλες κατεργασίες, αλλά και με την παραγωγή τεμαχίων σύνθετης γεωμετρίας, όπως εσωτερικές κοιλότητες και πορώδεις δομές, οι οποίες είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν με τις καθιερωμένες τεχνικές [3] και δυνητικά μπορούν να προκύψουν από τεχνικές τοπολογικής βελτιστοποίησης [4] και καινοτόμες αρχές σχεδιασμού [5]. Επιπλέον, στα πλεονεκτήματα της ΠΚ συγκαταλέγεται η μειωμένη δημιουργία αποβλήτου [6], αλλά και η ενοποίηση μηχανισμών και συστημάτων για την απευθείας κατασκευή ως ένα ενιαίο συναρμολόγημα [7, 8]. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για την ΠΚ είναι η συστηματική μελέτη και βελτιστοποίηση των τεχνολογιών της, με σκοπό την εδραίωσή της μεταξύ των αξιόπιστων κατεργασιών για τη βιομηχανία [9, 10].

## ***1.2 Προσθετική κατασκευή με εξώθηση υλικού***

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με την πιο δημοφιλή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσθετικής κατασκευής μέσω εξώθησης υλικού (ΠΚ-EY). Οι αρχές λειτουργίας της βασίζονται στη χρήση θερμοπλαστικού υλικού το οποίο βρίσκεται σε μορφή στερεού νήματος, περιτυλιγμένου σε ανέμη. Το νήμα έλκεται σε έναν κυλινδρικό θάλαμο εξώθησης, ο οποίος είναι τοποθετημένος στην κεφαλή (carriage) του συστήματος ΠΚ-EY, Σχήμα 1-1(a). Η έλξη πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός βηματικού κινητήρα, ο οποίος περιστρέφει ένα γρανάτζι, Σχήμα 1-1(b). Η οδόντωση αυξάνει την τριβή με το νήμα, το οποίο περιορίζεται περαιτέρω από την ύπαρξη μιας ελεύθερα περιστρεφόμενης τροχαλίας, τοποθετημένης απέναντι από το γρανάτζι. Το νήμα οδηγείται με αυτό τον τρόπο στο κάτω μέρος του θαλάμου, όπου βρίσκεται το θερμαινόμενο ακροφύσιο (hot end) κυκλικής διατομής και διαμέτρου μικρότερης από αυτή του στερεού νήματος, τυπικά μεταξύ 0.2 και 1 mm, Σχήμα 1-1(b). Το τηγμένο νήμα εξωθείται μέσω του ακροφυσίου, υπό την επίδραση του βηματικού κινητήρα και του στερεού τμήματος του νήματος που λειτουργεί σαν έμβολο. Κατά την εξώθησή του το νήμα αποτίθεται στην πλατφόρμα εκτύπωσης (build platform), Σχήμα 1-1(a), ενώ παράλληλα συμπιέζεται ελαφρώς και στρώνεται σε σειρές ελλειψοειδούς διατομής, λόγω της επίπεδης σχετικής κίνησης της κεφαλής εξώθησης και της πλατφόρμας εκτύπωσης κατά τις διευθύνσεις X και Y. Οι γειτονικές σειρές υλικού στο επίπεδο συνενώνονται και αποτελούν τη στρώση του υπό κατασκευή τεμαχίου. Αναλόγως με τη διάταξη του συστήματος εξώθησης, η κεφαλή ή η πλατφόρμα κινείται στο επίπεδο προσδεμένη σε δύο κάθετους άξονες, οι οποίοι οδηγούνται από δυο βηματικούς

κινητήρες. Αντίστοιχα, για την απόθεση νέας στρώσης, η πλατφόρμα εκτύπωσης ή η κεφαλή, μετατοπίζονται κατά τον κατακόρυφο άξονα Z υπό την επενέργεια βηματικού κινητήρα. Τελικά η επαλληλία των στρώσεων δημιουργεί την τελική γεωμετρία του κομματιού. Η ταχύτητα εξώθησης υλικού, η ταχύτητα κίνησης στο επίπεδο, το πάχος της κάθε στρώσης, η τροχιά του ακροφυσίου και πολλές άλλες παράμετροι, αποφασίζονται από τον χρήστη στο στάδιο σχεδιασμού της κατεργασίας. Σε αυτό το στάδιο και μέσω της χρήσης εξειδικευμένου λογισμικού (slicer) το ψηφιακό μοντέλο τεμαχίζεται σε διδιάστατες στρώσεις και για την κάθε μια υπολογίζεται η τροχιά του ακροφυσίου. Συνοπτικά, η προσθετική κατεργασία με εξώθηση υλικού περιγράφεται ως μια κατεργασία 2.5 αξόνων, λόγω της σταδιακής κίνησης της πλατφόρμας εκτύπωσης κατά βήματα ίσα με το προδιαγεγραμμένο πάχος στρώσης.



Σχήμα 1-1 (a) Γενική άποψη του συστήματος προσθετικής κατασκευής με εξώθηση υλικού και (b) υποσύστημα κινητήρα εξώθησης και ακροφυσίου.

### **1.3 Πλαίσιο διδακτορικής διατριβής**

Κατά την περίοδο εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής, η προοπτική και τα πλεονεκτήματα της ΠΚ-ΕΥ είχαν ήδη αρχίσει να δημιουργούν υψηλές προσδοκίες στον τομέα των βιομηχανικών κατασκευών. Ο διαρκώς αυξανόμενος όγκος έρευνας την τελευταία δεκαετία συνέβαλε προς την οριοθέτηση της ΠΚ-ΕΥ εντός των πραγματικών της δυνατοτήτων και κυρίως, συνεχίζει να θέτει έως και σήμερα τις ανοιχτές προκλήσεις, προκειμένου η κατεργασία να ωριμάσει και να εδραιωθεί στην παραγωγή τελικών προϊόντων. Οι προκλήσεις αυτές αποτέλεσαν το βασικό κίνητρο εκπόνησης της εν λόγω διατριβής, στοχεύοντας στην βελτιστοποίηση της ΠΚ-ΕΥ από την μεριά του σχεδιασμού της τροχιάς αλλά και της εκτέλεσης της κατεργασίας.

Το αρχικό σημείο της έρευνας αφορά στην ενσωμάτωση των αρχείων STL (Stereolithography file format) στη διαδικασία της ΠΚ [11]. Το αρχείο STL αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ του μοντέλου CAD και του λογισμικού σχεδιασμού της κατεργασίας (slicer). Αναπτύχθηκε το 1988 από την εταιρία 3D Systems<sup>TM</sup> και είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο μέχρι και σήμερα. Η λογική του βασίζεται στην αναπαράσταση των εξωτερικών επιφανειών του μοντέλου CAD από ένα σύνολο μικρών επιφανειών, το μέγεθος των οποίων αποφασίζεται από το χρήστη και επηρεάζει το μέγεθος του μοντέλου. Το αρχείο περιέχει ουσιαστικά τις συντεταγμένες των κορυφών των επιφανειών, καθώς και τον προσανατολισμό τους. Το λογισμικό slicer χρησιμοποιεί τις παραπάνω πληροφορίες για να υπολογίσει την τροχιά της κεφαλής σε ένα σύστημα ΠΚ. Η ευελιξία που παρέχει η ΠΚ στην κατασκευασιμότητα σύνθετων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, καθιστά τη χρήση του STL μη αποδοτική, και συχνά αναντίστοιχη των δυνατοτήτων της .

Η βασική προσέγγιση που παρουσιάζεται εδώ είναι η ανεξαρτητοποίηση της διαδικασίας από τη χρήση του STL και η απευθείας εξαγωγή της τροχιάς από το μοντέλο CAD κυρίως για κομμάτια με περιοδικά διατεταγμένη πορώδη δομή. Ο τρόπος υλοποίησης περιλαμβάνει την ανάπτυξη κώδικα στο API (Application Programming Interface) του λογισμικού Solidworks<sup>TM</sup> για την απευθείας αναπαράσταση και εξαγωγή του μοντέλου απευθείας σε οδηγίες G-code, ικανές να οδηγήσουν την κεφαλή ενός συστήματος ΠΚ-ΕΥ ώστε να κατασκευάσει την δομή. Ο κώδικας χωρίζεται σε τρεις εκδόσεις, και η κάθε μία περιλαμβάνει σημαντικές αναβαθμίσεις σχετικά με τον τρόπο υλοποίησης: η πρώτη έκδοση αναπτύχθηκε σε προπαρασκευαστικό βήμα, πριν την παρούσα διατριβή, και είχε επιτύχει την έμμεση αναπαράσταση του πορώδους μοντέλου ως ένα σύνολο μικρότερων αρχείων STL, που περιγράφουν την διάταξη ημιτελών πόρων στο περίγραμμα της κάθε στρώσης αλλά και την εύρεση και καταχώρηση των σημείων αναφοράς για την τοποθέτηση ολόκληρων πόρων στο εσωτερικό της δομής. Παρόλα αυτά, η αναπαράσταση

της δομής γίνεται με χρήση μεγάλου αριθμού γεωμετρικών οντοτήτων στο περιβάλλον του λογισμικού CAD, γεγονός που κάνει την εκτέλεση του κώδικα χρονοβόρα. Το αρχικό στάδιο της διδακτορικής διατριβής είναι αφιερωμένο στη βελτίωση της απόδοσης του κώδικα αναπαράστασης της πορώδους δομής (δεύτερη έκδοση), επιτυγχάνοντας σημαντικά μειωμένους χρόνους εκτέλεσης, μέσω της αξιοποίησης απλούστερων γεωμετρικών οντοτήτων, με δημοσιεύσιμα αποτελέσματα [12]. Οι προκλήσεις που παρέμεναν ανοιχτές και αντιμετωπίστηκαν κατά την ανάπτυξη της τρίτης έκδοσης του κώδικα, ήταν η εξάρτηση, έστω και μειωμένη, από τα αρχεία STL, αλλά και ο τρόπος για να επιτευχθεί η εξαγωγή της τροχιάς σε οδηγίες μηχανής, μέσω της έμμεσης αναπαράστασης του πορώδους μοντέλου. Συνοπτικά, το περιβάλλον του Solidworks™ χρησιμοποιείται πλέον σχεδόν αποκλειστικά για τον υπολογισμό της τροχιάς, των σημείων τοποθέτησης και τομής των πόρων με το περίγραμμα, ενώ εισάγεται και μια αντικειμενοστραφής λογική μέσω του χειρισμού του κάθε πόρου σαν ένα ξεχωριστό αντικείμενο με τις δικές του ιδιότητες. Με αυτό τον τρόπο η τελευταία έκδοση του κώδικα προσφέρει:

- α) μεγάλη ευελιξία κατά την παραμετροποίηση,
- β) επιτυχή εξαγωγή λειτουργικών αρχείων G-code,
- γ) επεκτασιμότητα για πρόσθετα μοτίβα πόρων.

Το αρχείο G-code που προκύπτει από την εκτέλεση του κώδικα δοκιμάστηκε επιτυχώς σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ. Η πορώδης δομή, αν και κατασκευάστηκε επιτυχώς, παρουσίασε αποκλίσεις σχετικά με τις διαστάσεις του πόρου, τη γεωμετρία αλλά και κατασκευαστικά ελαττώματα εντοπισμένα σε σημεία του τεμαχίου. Σε αυτό το σημείο, κρίθηκε σκόπιμο η έρευνα να εστιάσει στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων εκτύπωσης και το συσχετισμό του σχεδιασμού της κατεργασίας με το παραγόμενο αποτέλεσμα, δεδομένης της έλλειψης προτυποποίησης της κατεργασίας.

Το δεύτερο μέρος της διδακτορική διατριβής εξετάζει και ανιχνεύει τις σχέσεις μεταξύ παραμέτρων και κριτηρίων που άπτονται της τελικής ποιότητας των τεμαχίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα που δίνεται μέσω της πειραματικής μελέτης είναι η δυνατότητα παρατήρησης φαινομένων τα οποία λόγω πολυπλοκότητας είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν με αναλυτικές σχέσεις ή προσομοιώσεις. Επιπλέον, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων απαιτεί βαθιά κατανόηση των εν εξελίξει φαινομένων. Ως πρώτο κριτήριο βελτιστοποίησης επιλέχθηκε η πιστότητα της μορφής των υπό εξέταση δοκιμίων. Εδώ, ως πιστότητα μορφής ορίζεται η κατασκευή ενός δοκιμίου χωρίς την εμφάνιση μιας σειράς ελαττωμάτων, που τείνουν σε ένα παραμορφωμένο ή/και μη λειτουργικό κομμάτι. Το μεγάλο επιτρεπόμενο εύρος ρυθμίσεων συχνά καταλήγει σε παραγόμενα κομμάτια με μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Ο βασικός λόγος της πειραματικής έρευνας είναι η οριοθέτηση των ρυθμίσεων μέσα στις οποίες δεν προκύπτουν δοκίμια με τα υπό

εξέταση ελαττώματα, δημιουργώντας έτσι ένα βέλτιστο παράθυρο λειτουργίας του συστήματος ΠΚ-ΕΥ. Η γεωμετρία ελεύθερης μορφής που προκύπτει στις ΠΚ, ενθαρρύνει τη χρήση οπτικών μέσων για την αξιολόγηση του βαθμού ύπαρξης των τυχόν κατασκευαστικών ελαττωμάτων. Οι υπό εξέταση παράμετροι επιλέχθηκαν ώστε να είναι ευθέως συνδεδεμένες με την παραγωγικότητα της κατεργασίας και με αυτό τον τρόπο η ογκομετρική παροχή υλικού βελτιστοποιήθηκε παράλληλα με την εξασφάλιση της πιστότητας μορφής στα δοκίμια. Η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου στα εκτελεσθέντα πειράματα χρησιμοποιήθηκε για να προβλέψει το σύνολο των ρυθμίσεων ώστε να εξασφαλιστεί αποδεκτή πιστότητα μορφής εντός των ορίων της μέγιστης και ελάχιστης δυνατής παροχής σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ [13].

Χρησιμοποιώντας τα όρια των ρυθμίσεων που χαρτογραφήθηκαν κατά το προηγούμενο πείραμα, το επόμενο στάδιο βελτιστοποίησης της ΠΚ-ΕΥ συνεχίστηκε με την διερεύνηση της διαστασιακής ακρίβειας ενός ειδικά σχεδιασμένου δοκιμίου. Τυπικά η διαστασιακή ακρίβεια των κομματιών που παράγονται με τη συγκεκριμένη τεχνική, ποικίλει ανάλογα με τη διεύθυνση απόθεσης του υλικού αλλά και το υπό κατασκευή γεωμετρικό χαρακτηριστικό. Έτσι, το δοκίμιο εφοδιάστηκε με δύο επιπλέον τυπικά χαρακτηριστικά, οπές και λεπτά τοιχώματα, και η πειραματική διερεύνηση που ακολούθησε είχε ως στόχο τη βελτιστοποίηση πέντε διαφορετικών κριτηρίων ταυτόχρονα. Ο πλέον συνηθισμένος τρόπος επίλυσης μιας πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης είναι η χρήση τεχνικών, οι οποίες είναι σε θέση να εντοπίσουν το ολικό βέλτιστο με βάση όλα τα υπό διερεύνηση κριτήρια, συμβιβάζοντας ουσιαστικά τις επιδόσεις με το μικρότερο δυνατό κόστος. Η εναλλακτική προσέγγιση που δοκιμάστηκε στο τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής είναι η χρήση των βέλτιστων ρυθμίσεων του συστήματος ΠΚ-ΕΥ, προσαρμοσμένων κάθε φορά ανάλογα με τη διεύθυνση εκτύπωσης ή το υπό κατασκευή γεωμετρικό χαρακτηριστικό, ως εξής: εξάγονται πέντε διαφορετικά προβλεπτικά μοντέλα μέσω των παρατηρήσεων που έγιναν βάσει ενός σχεδιασμένου πειράματος. Οι βέλτιστες συνθήκες εκτύπωσης για τα πέντε κριτήρια εισήχθησαν υπό τη μορφή προσαρμοσμένων εντολών μηχανής (G-code) στα σημεία της τροχιάς που σχετίζονται με την κατασκευή του κάθε γεωμετρικού χαρακτηριστικού. Η μετατροπή έγινε off-line, με τη βοήθεια κώδικα επεξεργασίας του αρχείου G-code και τροποποίησής του κατά το δοκούν. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αλλαγή των συνθηκών εκτύπωσης (ταχύτητα κεφαλής και ρυθμός εξώθησης υλικού) εντός της ίδιας στρώσης ή ακόμα και κατά τη διάρκεια εκτύπωσης συνεχόμενης τροχιάς. Τα αποτελέσματα της προσαρμοστικής ρύθμισης των παραμέτρων εκτύπωσης αξιολογήθηκε σε σχέση με τα αποτελέσματα εκτύπωσης βάσει ολικά βέλτιστων συνθηκών. Προέκυψε πως οι προσαρμοσμένες ρυθμίσεις παρήγαγαν δοκίμια με συνολικά υψηλότερη διαστασιακή ακρίβεια και με αυτόν τον τρόπο αποδείχθηκε η καταρχήν αποδοτικότητα της μεθόδου και η προοπτική χρήσης της,

διευκρινίζοντας δε και τις προκλήσεις που προκύπτουν από την υιοθέτηση αυτής της προσέγγισης [14].

Μία από αυτές τις προκλήσεις αφορά στην αστάθεια της εξώθησης που μπορεί να προκληθεί από την επιτόπου αλλαγή των ρυθμίσεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ελαττωμάτων τοπικά. Επιπλέον, τα τοπικά ελαττώματα που προκύπτουν κατά την κατασκευή, υποβαθμίζουν την ποιότητα συσσωμάτωσης των γειτονικών σειρών, δημιουργώντας είτε ασυνέχεια υλικού λόγω υπό-εξώθησης ή απόθεση περίσσειας υλικού τοπικά. Ο συνδυασμός των παραπάνω έδωσε την αφορμή για την εξέλιξη της έρευνας, εστιάζοντας στην αξιολόγηση της ποιότητας απόθεσης σε μία ευθύγραμμη λωρίδα υλικού. Με αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκε καλύτερη εποπτεία της ποιότητας και ενδεδειγμένος εντοπισμός των σφαλμάτων κατά την εξώθηση, το οποίο θα ήταν δύσκολο να γίνει εξετάζοντας μεγαλύτερα δοκίμια. Συνοπτικά, το τέταρτο μέρος της διδακτορικής διατριβής εστίασε:

- α) στην επίδραση της δυναμικής εξώθησης στις τελικές διαστάσεις και την ομοιομορφία της αποτιθέμενης λωρίδας υλικού,
- β) στις οριακές συνθήκες εκτύπωσης κατά τις οποίες προκαλείται προσωρινή αδυναμία εξώθησης και συνεπώς ασυνέχεια υλικού,
- γ) στη συμπεριφορά του κινητήρα εξώθησης κατά την απόθεση υλικού σε υψηλές ταχύτητες.

Ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων, που επηρεάζουν από θερμική, ρεολογική και κινηματική σκοπιά την συμπεριφορά της εξώθησης υλικού, εξετάστηκε πειραματικά μέσω της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων με βάση την ικανότητα συνεχούς απόθεσης και την ομοιομορφία της διάστασης πλάτους της λωρίδας. Η αξιολόγηση των παραπάνω γίνεται μέσω ανάλυσης εικόνας των σειρών. Η συμπεριφορά του κινητήρα εξώθησης λαμβάνεται μέσω της βιντεοσκόπησης και ανάλυσης καρτέ, της κατακόρυφης κίνησης του στερεού μέρους του νήματος, κατά τη διάρκεια εκτύπωσης των σειρών υλικού και αξιολογείται με βάση το αποτέλεσμα της απόθεσης. Με αυτό τον τρόπο, επιτεύχθηκε ολική εποπτεία του συγχρονισμού των υπό-συστημάτων σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ. Από τα πειράματα προέκυψαν δύο προβλεπτικά μοντέλα με σκοπό της βελτιστοποίησης της ποιότητας απόθεσης σε υψηλότερη ταχύτητα εκτύπωσης. Συνεπώς, αξιολογήθηκε η δυνατότητα μεγιστοποίησης της παραγωγικότητάς της κατεργασίας, χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα απόθεσης υλικού και κατ' επέκταση η δομική ακεραιότητα των κομματιών που παράγονται μέσω αυτής.

## **1.4 Δομή διδακτορικής διατριβής**

Το παρόν κείμενο περιλαμβάνει την εκτεταμένη περίληψη της διδακτορικής διατριβής, η οποία στην πλήρη έκδοσή της έχει συγγραφεί στην αγγλική γλώσσα. Η δομή της εκτεταμένης περίληψης ακολουθεί τη χρονολογική σειρά της εξέλιξης της έρευνας. Στα επόμενα κεφάλαια, θα δοθεί μια περιεκτική περιγραφή των τεσσάρων βασικών κομματιών της εργασίας, ξεκινώντας από την εξαγωγή τροχιάς απευθείας από το μοντέλο CAD στο κεφάλαιο 2. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το πρώτο βήμα στη βελτιστοποίηση της προσθετικής κατεργασίας με εξώθηση υλικού, στοχεύοντας στη χαρτογράφηση των ορίων εντός των οποίων διατηρείται η πιστότητα μορφής των τεμαχίων. Στο κεφάλαιο 4 δοκιμάζεται η διαστασιακή ακρίβεια εντός των προαναφερθέντων ορίων και επιπλέον προτείνεται η μέθοδος προσαρμοστικών ρυθμίσεων κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται συνολικά ο συγχρονισμός εξώθησης και απόθεσης, με σκοπό τη συνεχή και ομοιόμορφη εκτύπωση σειρών υλικού. Επιπλέον, με τη βοήθεια προβλεπτικών μοντέλων που προκύπτουν από σχεδιασμό πειραμάτων, περιγράφονται τα βήματα προς την επίτευξη υψηλής παραγωγικότητας της κατεργασίας με παράλληλη διατήρηση της ποιότητας εκτύπωσης. Τέλος, το κεφάλαιο 6 συνοψίζει τα επιτεύγματα, τους περιορισμούς αλλά και τις προκλήσεις που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής και δυνητικά αποτελούν αντικείμενα μελλοντικής έρευνας.



# 2

## *Σχεδιασμός τροχιάς στην προσθετική κατεργασία με εξώθηση υλικού*

### *2.1 Λογισμικά σχεδιασμού τροχιάς και παράμετροι εκτύπωσης*

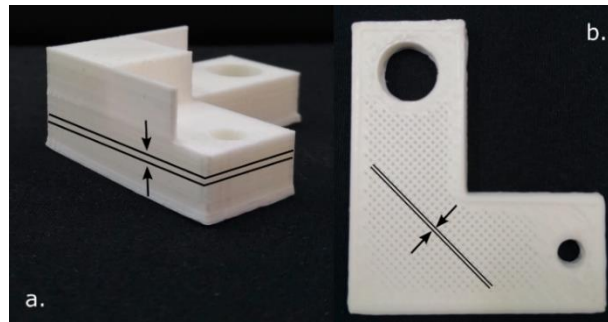
Ο τεμαχισμός του κομματιού αποτελεί βασικό στάδιο στο σχεδιασμό της κατεργασίας ΠΚ-ΕΥ. Το μοντέλο CAD εισάγεται σε ειδικό λογισμικό slicer, όπου χωρίζεται σε στρώσεις, όπως προκύπτουν από την τομή μεταξύ του μοντέλου και ενός κινούμενου επιπέδου που μετατοπίζεται βηματικά. Για κάθε στρώση υπολογίζεται και σχεδιάζεται η τροχιά σύμφωνα με την παραμετροποίηση που έχει επιλέξει ο χρήστης. Μετά τον υπολογισμό της κάθε στρώσης, η τροχιά μετατρέπεται σε οδηγίες G-code [15], ικανές να οδηγήσουν την κεφαλή ενός συστήματος ΠΚ-ΕΥ.

Διατίθενται αρκετά προγράμματα slicer. Ο τρόπος προγραμματισμού τους, η ευελιξία που παρέχει το καθένα όπως και η αποδοτικότητα των γεωμετρικών αλγορίθμων που αναλαμβάνουν τον υπολογισμό της τροχιάς επηρεάζουν αναλόγως και την ποιότητα του κατασκευασμένου κομματιού. Έχουν δημοσιευθεί, επίσης, συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών slicers [16, 17].

Μεταξύ των λογισμικών slicer, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κοινών παραμέτρων, οι οποίες είναι βασικές στον σχεδιασμό της κατεργασίας ΠΚ-ΕΥ. Αν και συχνά συναντώνται με διαφορετική ονομασία, ο τρόπος λειτουργίας των πιο βασικών παραμέτρων περιγράφεται στη συνέχεια:

**Πάχος στρώσης (Layer thickness):** η ρύθμιση της παραμέτρου ορίζει το διάκενο μεταξύ του ακροφυσίου και της πλατφόρμας εκτύπωσης, και ακολούθως ορίζει το βήμα μετατόπισης της πλατφόρμας κατά τον κατακόρυφο άξονα για την απόθεση κάθε νέας στρώσης με δεδομένο πάχος, Σχήμα 2-1(a).

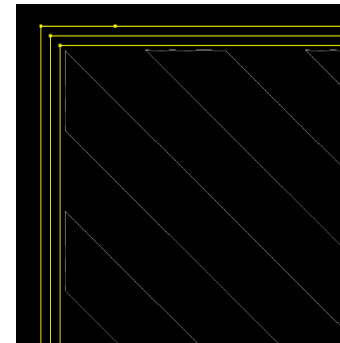
**Πλάτος εξώθησης (Extrusion width):** αντικατοπτρίζει το αναμενόμενο πλάτος της λωρίδας υλικού, Σχήμα 2-1(b). Στην πράξη καθορίζει την απόσταση μεταξύ γειτονικών σειρών της ίδιας στρώσης.



Σχήμα 2-1 (a) Πάχος στρώσης και (b) πλάτος εξώθησης.

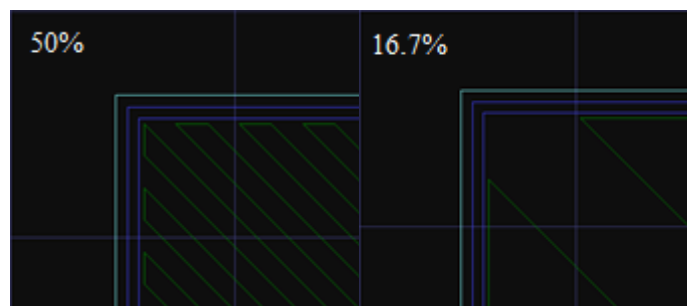
**Αριθμός περιμέτρων (Number of perimeters):** καθορίζει τον αριθμό των εκτυπωμένων περιγραμμάτων για κάθε στρώση του τεμαχίου (κίτρινα περιγράμματα στο Σχήμα 2-2).

**Πάχος κελύφους (Skin thickness):** καθορίζει το πάχος όλων των εξωτερικών τοιχωμάτων του κομματιού. Για τις πλαϊνές επιφάνειες, σχετίζεται με τον αριθμό περιμέτρων (Σχήμα 2-2), ενώ για τη βάση και τις άνω επιφάνειες του κομματιού, ορίζει τον αριθμό των διαδοχικών και πλήρως γεμισμένων στρώσεων.



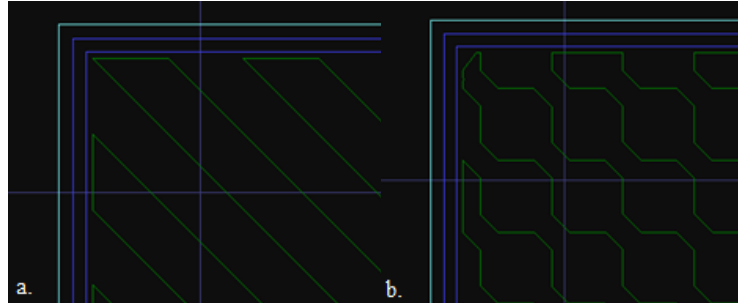
Σχήμα 2-2 Αριθμός περιμέτρων που ορίζει το πάχος κελύφους.

**Ποσοστό εσωτερικού γεμίσματος (Infill percentage):** ορίζει την πυκνότητα (σαν ποσοστό του όγκου) του γεμίσματος στο εσωτερικό των στρώσεων, Σχήμα 2-3. Για τις μη-πλήρως γεμισμένες στρώσεις, αποθέτει υλικό σύμφωνα με μοτίβο που περιλαμβάνει κενά στο εσωτερικό της, μειώνοντας συνεπώς τη μάζα και το χρόνο κατασκευής, αλλά επηρεάζοντας και τις μηχανικές ιδιότητες του κομματιού [18].



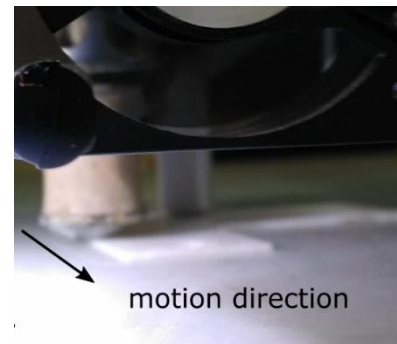
Σχήμα 2-3 Σχεδιασμός της τροχιάς για δύο διαφορετικά ποσοστά εσωτερικού γεμίσματος.

**Μοτίβο εσωτερικού γεμίσματος (Infill pattern):** αντιπροσωπεύει την τροχιά που ακολουθεί η κεφαλή για τη δημιουργία του μοτίβου στο εσωτερικό του κομματιού. Τα πιο συχνά μοτίβα είναι το γραμμικό Σχήμα 2-4(a), με παράλληλα τοποθετημένες σειρές υλικού, αλλά και εναλλακτικά μοτίβα όπως το κυψελοειδές, τριγωνικό ή οκταγωνικό, Σχήμα 2-4(b).



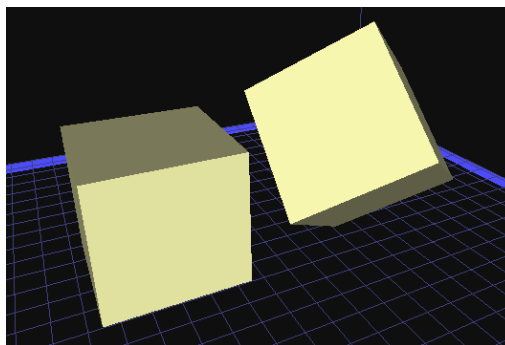
Σχήμα 2-4 (a) Γραμμικό και (b) οκταγωνικό μοτίβο εσωτερικού γεμίσματος.

**Ταχύτητα εκτύπωσης (Printing Speed):** καθορίζει την ταχύτητα πρόωσης της κεφαλής του συστήματος στο οριζόντιο επίπεδο X-Y. Συνήθως, διαφορετικές τιμές μπορούν να δοθούν για τα περιγράμματα, το εσωτερικό μοτίβο ή την βάση του κομματιού, όπου επιλέγονται χαμηλές ταχύτητες για την καλύτερη πρόσφυση στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Επιπλέον, μπορεί να οριστεί και η ταχύτητα των γρήγορων μεταβάσεων της κεφαλής, στη διάρκεια των οποίων δεν πραγματοποιείται εξώθηση υλικού.



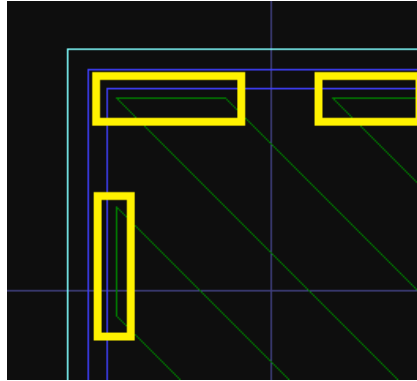
Σχήμα 2-5 Ταχύτητα οριζόντιας κίνησης του ακροφυσίου.

**Προσανατολισμός (Orientation):** πριν τον τεμαχισμό του κομματιού στο slicer, ο προσανατολισμός του κομματιού στο χώρο μπορεί να επιλεγεί, Σχήμα 2-6. Βέλτιστος προσανατολισμός τεμαχίου μπορεί να επιτύχει συντομότερους χρόνους εκτύπωσης ή/και χαμηλότερη επιφανειακή τραχύτητα.



Σχήμα 2-6 Αλλαγή προσανατολισμού για μοντέλο κύβου.

**Επικάλυψη περιμέτρου/εσωτερικού γεμίσματος (Perimeter/Infill overlap):** ορίζει το ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των ακραίων τμημάτων του εσωτερικού γεμίσματος με το περίγραμμα της κάθε στρώσης, ώστε να επιτευχθεί συσσωμάτωση των δύο περιοχών εκτύπωσης, Σχήμα 2-7.



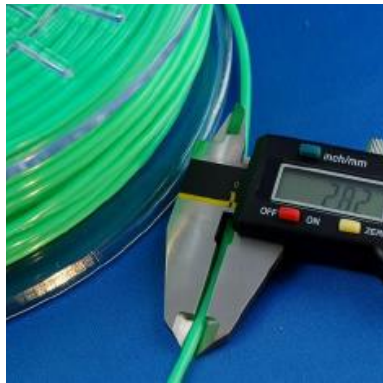
Σχήμα 2-7 Απόσταση μεταξύ εσωτερικού γεμίσματος (πράσινη τροχιά) και περιμέτρου (μπλε τροχιά) που ορίζει το βαθμό της επικάλυψής τους.

**Θερμοκρασία (Temperature):** αναφέρεται στη θερμοκρασία που βρίσκεται το ακροφύσιο στη διάρκεια της εκτύπωσης. Εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού εξώθησης, ώστε να μπορεί να εξωθηθεί ως τήγμα από το ακροφύσιο του συστήματος ΠΚ-ΕΥ.

**Θερμοκρασία πλατφόρμας/θαλάμου (Build platform/chamber temperature):** ορίζει τη θερμοκρασία της πλατφόρμας εκτύπωσης και του θαλάμου εκτύπωσης κατά τη διάρκεια της καταργασίας. Η πρώτη βοηθάει στην καλύτερη πρόσφυση των αποτιθέμενων σειρών υλικών, ενώ η υψηλή θερμοκρασία στο θάλαμο διατηρεί μεγαλύτερη ομοιομορφία στο ρυθμό ψύξης των διαφόρων περιοχών του κομματιού.

**Ανεμιστήρες (Fans):** η λειτουργία των ανεμιστήρων επηρεάζει την ψύξη του υλικού κατά την εξώθηση και απόθεση του. Διαφορετικές ρυθμίσεις μπορεί να επιλέγονται για τα περιγράμματα, το εσωτερικό των στρώσεων ή για στρώσεις που απαιτούν μικρή ογκομετρική παροχή υλικού, ώστε να στερεοποιούνται εγκαίρως πριν την απόθεση νέου υλικού επάνω τους. Η λειτουργία των ανεμιστήρων όμως μπορεί να επηρεάσει τις θερμοκρασιακές συνθήκες τοπικά στο περιβάλλον εκτύπωσης.

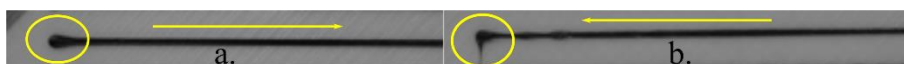
**Διάμετρος νήματος (Filament diameter):** είναι μία σημαντική παράμετρος καθώς χρησιμοποιείται από το λογισμικό slicer σαν βάση υπολογισμού του όγκου υλικού που εξωθείται σε κάθε χρονική στιγμή.



Σχήμα 2-8 Μέτρηση διαμέτρου θερμοπλαστικού νήματος (Πηγή: Kisslicer© v1.5 User Manual).

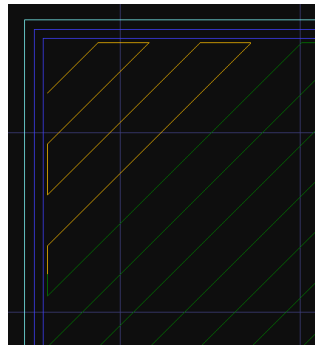
**Διόρθωση ροής (Flow tweak):** η παράμετρος χρησιμοποιείται για μικρές αυξομειώσεις στην παροχή υλικού χωρίς να τροποποιείται η τροχιά, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των διαστάσεων του κομματιού και την ενίσχυση της συσσωμάτωσης των γειτονικών σειρών υλικού. Τυπικά, ορίζεται σαν ποσοστό της ονομαστικής παροχής.

**Προ-εξώθηση/Αναρρόφηση (Priming/Retraction):** κατά το σχεδιασμό της κατεργασίας, ορίζονται το μήκος και η ταχύτητα προ-εξώθησης και αναρρόφησης του υλικού που σχετίζονται με τη αρχή και το τέλος εκτύπωσης μιας ενιαίας τροχιάς, αντίστοιχα. Η προ-εξώθηση εξασφαλίζει πως ο κινητήρας εξώθησης θα μπορέσει έγκαιρα να εξωθήσει τον προκαθορισμένο όγκο υλικού από την αρχή της τροχιάς, χωρίς να αφήσει κενά. Αντίστοιχα, στο τέλος της τροχιάς, το νήμα αναρροφάται για προκαθορισμένο μήκος και προκαθορισμένη ταχύτητα, ώστε να αποσυμπιέσει το τήγμα εντός του ακροφυσίου και να αποφευχθεί ανεξέλεγκτη εξώθηση κατά την γρήγορη μετάβαση της κεφαλής στο σημείο έναρξης της νέας τροχιάς.



Σχήμα 2-9 (a) Αυξημένη απόθεση στην αρχή της τροχιάς λόγω της επίδρασης της προ-εξώθησης και (b) ανεξέλεγκτη απόθεση υλικού λόγω μη-βέλτιστης ρύθμισης της αναρρόφησης στο τέλος της τροχιάς.

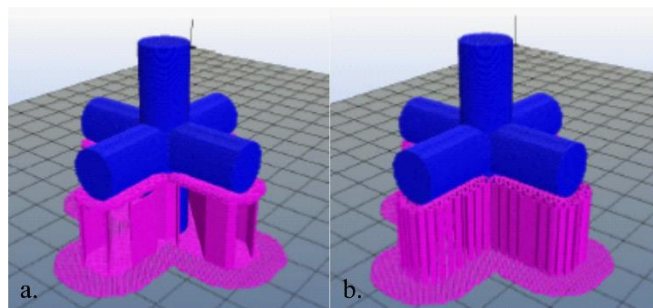
**Καθάρισμα (Wipe):** σε συνέχεια της λειτουργίας αναρρόφησης, η κεφαλή μπορεί να διαγράψει με αντίστροφη φορά λίγα mm της τροχιάς του, Σχήμα 2-10. Με αυτό τον τρόπο το υλικό που εξωθείται ανεξέλεγκτα λόγω της συσσωρευμένης πίεσης εντός του ακροφυσίου, αποτίθεται πάνω σε ήδη αποτιθέμενο υλικό, αποφεύγοντας έτσι να αφήσει ανεπιθύμητα ίχνη υλικού (φαινόμενο stringing) σε εμφανή σημεία του τεμαχίου [19].



**Σχήμα 2-10** Το κίτρινο τμήμα της τροχιάς αντιπροσωπεύει την αντίστροφη διαδρομή του ακροφυσίου για την απόθεση περίσσειας υλικού στην ήδη αποτιθέμενη στρώση.

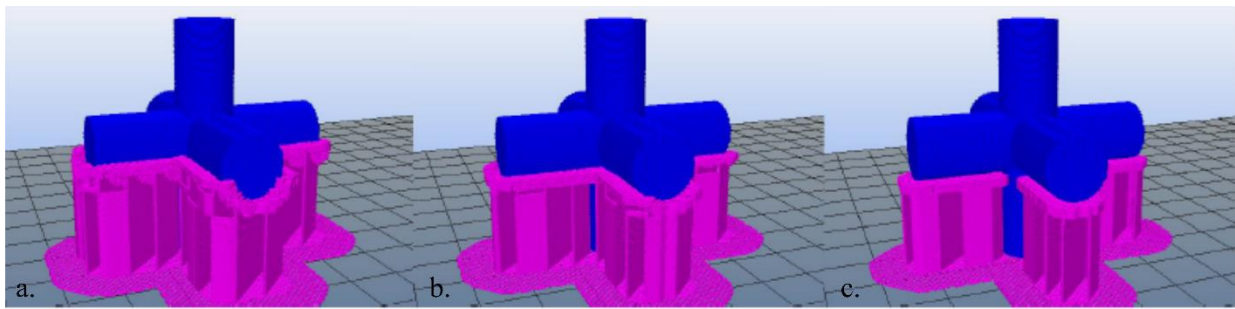
**Συρρίκνωση (Shrinkage):** είναι ο παράγοντας αντιστάθμισης της απόκλισης στη διάσταση του τεμαχίου, λόγω της ποσοστιαίας συρρίκνωσης του υλικού κατά την ψύξη του στις τρεις διαστάσεις της εκτύπωσης. Στην πράξη, αναδιατάσσει την τροχιά στο στάδιο σχεδιασμού της κατεργασίας με αποτέλεσμα την καλύτερη διαστασιακή ακρίβεια του τελικού κομματιού.

**Πυκνότητα υποστηρικτικής δομής (Support density):** αυτή η παράμετρος καθορίζει την πυκνότητα των υποστηρικτικών δομών που δημιουργούνται αυτόματα κατά το σχεδιασμό της κατεργασίας από το slicer, Σχήμα 2-11, και έχουν ως στόχο την συγκράτηση των περιοχών μιας στρώσης που αποτίθεται ως μη υποστηριζόμενα τμήματα (overhangs). Υψηλή πυκνότητα υποστηρικτικών δομών συνοδεύεται από αύξηση του χρόνου κατασκευής.



**Σχήμα 2-11** (a) Αραιή και (b) πυκνή υποστηρικτική δομή (Πηγή: Kisslicer© v1.5 User Manual).

**Γωνία υποστηρικτικής δομής (Support Angle):** ορίζεται σαν όριο της γωνίας που σχηματίζει το αιώρημα με το υπόλοιπο κομμάτι, Σχήμα 2-12. Για μικρές γωνίες, τυπικά  $<45^\circ$ , είναι δυνατή η επιτυχής απόθεση του υλικού χωρίς τη χρήση υποστηρικτικής δομής και συνεπώς μείωση του χρόνου κατασκευής.



**Σχήμα 2-12** Ρύθμιση γωνίας υποστηρικτικής δομής στις (a) 5°, (b) 40° και (c) 70°. Η διαφορά εντοπίζεται στην υποστήριξη ολόενα και μικρότερου τμήματος της κυλινδρικής προεξωχής.

Πέρα από τις δεκαεννέα παραμέτρους που περιγράφονται εδώ, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός λοιπών παραμέτρων που διατίθενται στα λογισμικά slicer. Ο μεγάλος αριθμός παραμέτρων καταδεικνύει την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού της κατεργασίας ΠΚ-ΕΥ, την ανάγκη για αποσαφήνιση της επίδρασής του στο τελικό προϊόν αλλά και την ανάγκη βελτιστοποίησής τους, μιας και η ρύθμιση πολλών εξ αυτών επιφέρει αντικρουόμενα αποτελέσματα στην ποιότητα της κατασκευής και την παραγωγικότητα της κατεργασίας.

## ***2.2 Προβλήματα στην αναπαράσταση και την εξαγωγής τροχιάς για***

### ***σύνθετες πορώδεις δομές***

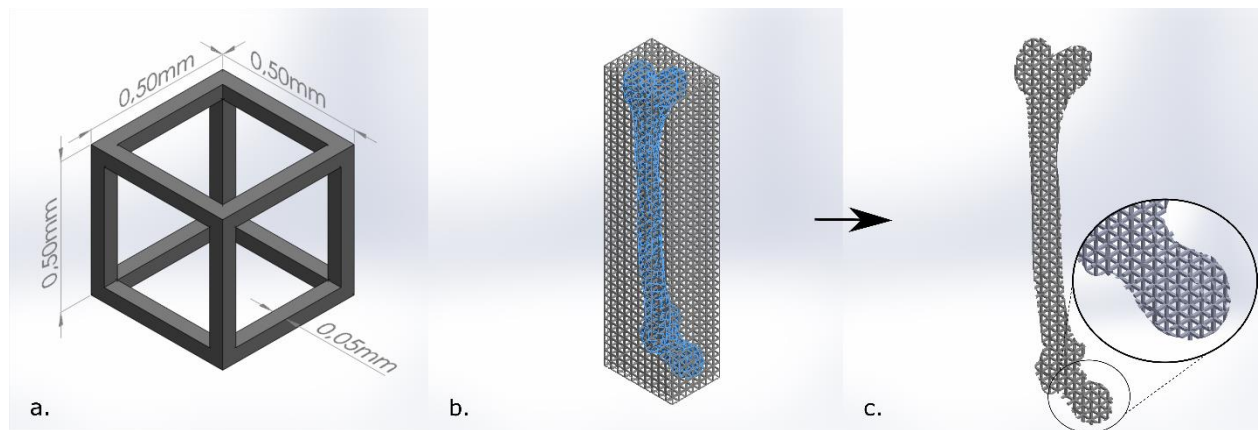
Μία από τις δυσκολίες που αντιμετωπίζονται τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην προετοιμασία της κατεργασίας, αφορά σε μοντέλα με μεγάλο μέγεθος και πολύπλοκη γεωμετρία όπως είναι οι πορώδεις δομές. Μια τυπική περίπτωση που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο είναι τα ικρίωματα που χρησιμοποιούνται για την φυσιολογική αναγέννηση ιστών (tissue engineering scaffolds). Χρησιμοποιούνται ως υποστηρικτικές δομές μέσα στις οποίες τα κύτταρα θρέφονται, και πολλαπλασιάζονται. Το ικρίωμα είναι κατασκευασμένο από βιοαποδομήσιμο υλικό το οποίο σταδιακά αποδομείται και τη θέση του παίρνει ο αναγεννημένος ιστός [20, 21].

Ο αριθμός των εσωτερικών πόρων του ικρίωματος εξαρτάται από το μέγεθός τους. Ως «πορώδες» εδώ, νοείται η ελεγχόμενη δημιουργία κενών εντός της δομής, ο οποία έχει συγκεκριμένη λειτουργία και δεν πρέπει να συγχέεται με μη-επιθυμητούς πόρους που δημιουργούνται λόγω σφάλματος της κατεργασίας. Η γεωμετρία του πόρου επαναλαμβάνεται περιοδικά, με βασική προϋπόθεση τη διασύνδεση των πόρων σε όλο της εύρος της δομής [22, 23]. Η γεωμετρία του πόρου που επαναλαμβάνεται καλείται στο εξής ως μοναδιαίο κελί (MK). Η πολυπλοκότητα των συγκεκριμένων δομών οφείλεται στον πολύ μεγάλο αριθμό γεωμετρικών οντοτήτων που χρειάζονται ώστε το μοντέλο να αναπαρασταθεί γραφικά σε περιβάλλον CAD.



Ακόμη και αν η αναπαράσταση όμως είναι επιτυχής, το μοντέλο CAD δεν είναι σίγουρο ότι θα μπορέσει να μετατραπεί σε STL αρχείο για τροφοδότηση στο λογισμικό slicer.

Για να αποδειχτεί αυτός ο ισχυρισμός, έγινε προσπάθεια αναπαράστασης και εξαγωγής ενός μοντέλου με εσωτερική πορώδη γεωμετρία σε STL, βασιζόμενη σε ένα κυβικό MK με μήκος πλευράς 500 μm. Ένα μοντέλο CAD οστού, επανασχεδιάστηκε σε κλίμακα 6% και 10% του αρχικού μεγέθους του, με διαστάσεις 6.85x4.83x28.07 mm και 11.43x8.05x46.78 mm. Μια συστοιχία από MK σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του Solidworks™, ώστε να καλύπτει όλο το μοντέλο οστού σε κάθε περίπτωση. Έπειτα η τομή boolean χρησιμοποιήθηκε για να βρει τα κοινά σημεία μεταξύ της συστοιχίας των MK και του μοντέλου, δίνοντας έτσι την πραγματική πορώδη δομή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-13. Τα αποτελέσματα (Πίνακας 2-1), δηλώνουν την αδυναμία μοντελοποίησης της πορώδους δομής αλλά και της εξαγωγής σε STL ήδη από το μοντέλο οστού σε κλίμακα 10% του αρχικού του μεγέθους, λόγω του αυξανόμενου αριθμού πόρων τα οποία καταναλώνουν την υπολογιστική ισχύ του συστήματος.



Σχήμα 2-13 (α) Κυβικό μοναδιαίο κελί (β) συστοιχία MK που καλύπτει το μοντέλο οστού (γ) αποτέλεσμα τομής bool.

Πίνακας 2-1 Αποτελέσματα αναπαράστασης και εξαγωγής πορώδους δομής του ικριώματος.

Διαστάσεις ικριώματος (mm)	Επιτυχής CAD μοντελοποίηση	Μέγεθος αρχείου (MB)	Επιτυχής μετατροπή σε STL	Αριθμός τριγώνων STL	Μέγεθος αρχείου STL (MB)	Χρόνος εκτέλεσης (min)
6.85x4.83x28.07	Yes	157	Yes	58000	2.85	23
11.43x8.05x46.78	No	-	No	-	-	-

Δύο πιο αποδοτικοί τύποι αρχείου έχουν προταθεί και η ανάπτυξή τους βρίσκεται σε εξέλιξη, συγκεκριμένα το Additive Manufacturing File (AMF) format [24, 25] και ο τύπος αρχείου 3MF. Και τα δύο είναι βασισμένα στη γλώσσα XML και ουσιαστικά στοχεύουν σε ένα πιο αποδοτικό τρόπο περιγραφής των απαραίτητων δεδομένων για την κατασκευή κομματιών με προσθετικές κατεργασίες. Παρόλα αυτά, η ενσωμάτωσή τους στην παραγωγή είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο.



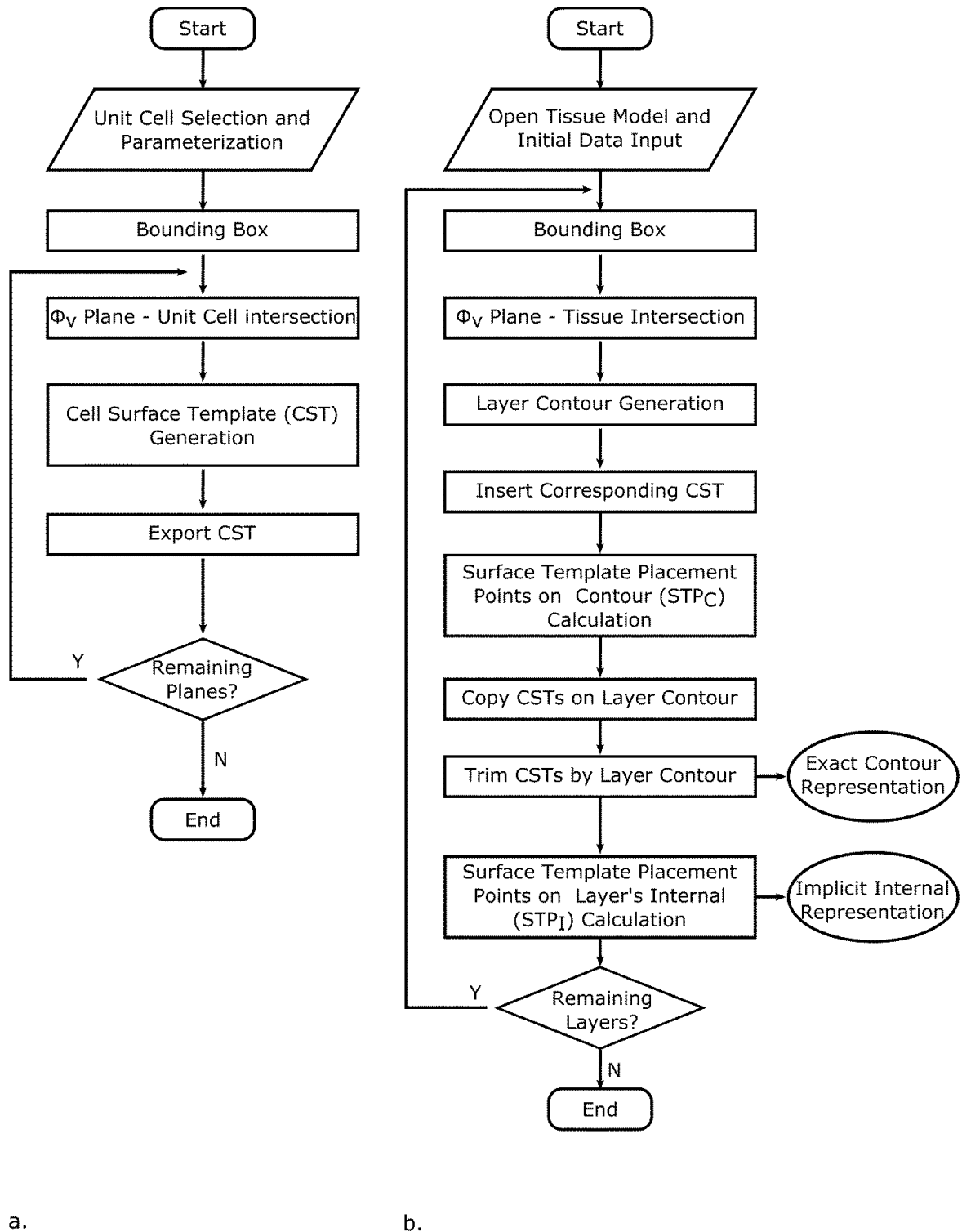
Οι απόπειρες αντιμετώπισης του προβλήματος αναπαράστασης πορώδων δομών στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται στη συνέχεια. Ο αλγόριθμος που προτείνεται από τους Starly et al. [26] περιλαμβάνει τη χρήση δισδιάστατων μοναδιαίων κελιών για την αναπαράσταση του εσωτερικού της δομής. Προχωρώντας περαιτέρω, ο Yoo [27–29] όρισε μαθηματικά το εσωτερικό πορώδες, χρησιμοποιώντας τριπλά περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες (triply periodic minimal structures) και μοντέλο το οποίο αναπαρίσταται με voxels, ώστε να υπολογίσει τις τροχιές για την κάθε στρώση. Μια αντίστοιχη προσέγγιση υιοθετείται και από τους Vassilakos et al. [30]. Οι Kang et al. [31] ανέπτυξαν CAM λογισμικό, το οποίο βασίζεται σε προσχεδιασμένα μοτίβα μοναδιαίων κελιών, τα οποία τοποθετούνται με βέλτιστο τρόπο, μεταβάλλοντας το μέγεθός τους, εντός της κάθε στρώσης. Οι βαθμωτές εσωτερικές δομές είναι ένα ακόμα πεδίο εφαρμογής της ΠΚ με εξαιρετικές προοπτικές: σταδιακά μεταβαλλόμενο μέγεθος εσωτερικού μοτίβου ή ακόμη και μεταβαλλόμενη σύσταση υλικού, είναι ικανή να αλλάξει τις τοπικές ιδιότητες μια δομής, προσφέροντας παράλληλα μείωση της συνολικής μάζας. Μια τέτοια λύση παρατίθεται στην βιβλιογραφική αναφορά [32], όπου τα μοντέλα παραμετροποιούνται διαφορετικά εντός της ίδιας στρώσης, οδηγώντας σε βαθμωτές δομές για μεγάλα κομμάτια, με τυπικές διαστάσεις έως και 6m. Εκτεταμένες ανασκοπήσεις της βιβλιογραφίας επί του θέματος μπορούν να αναζητηθούν στις παρακάτω πηγές [33–35].

### **2.3 Προτεινόμενη λύση**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται λύση έναντι της αδυναμίας αναπαράστασης της πορώδους δομής, αλλά και ο τρόπος εξαγωγής της τροχιάς απευθείας σε αρχείο G-code. Αναπτύσσεται κώδικας στο API του λογισμικού Solidworks™. Συνοπτικά, οι τομές ενός σχεδιασμένου κυβικού MK χρησιμοποιούνται σαν cell surface template (CST), δηλαδή ένα μοτίβο που επαναλαμβάνεται περιοδικά σε όλο το εύρος της στρώσης, βάσει ενός σημείου αναφοράς. Λόγω του ειδικού χειρισμού σε κάθε περίπτωση, για κάθε στρώση διαχωρίζεται το μοτίβο περιγράμματος (layer's contour pattern, LCP) και το μοτίβο εσωτερικού γεμίσματος (layer internal pattern LIP). Τα σημεία τοποθέτησης των CST για κάθε περίπτωση υπολογίζονται και χωρίζονται σε σημεία τοποθέτησης μοτίβου που ανήκουν στο περίγραμμα (surface template placement points on contour, STP<sub>C</sub>) και σημεία τοποθέτησης μοτίβου που ανήκουν στο εσωτερικό της στρώσης (surface template placement points in layer's interior, STP<sub>I</sub>). Τα διαγράμματα ροής για τη δημιουργία των CST και για την τοποθέτηση των CST στις στρώσεις του μοντέλου παρουσιάζονται στα διαγράμματα ροής στο Σχήμα 2-14(a) και (b), αντίστοιχα.

Στην δεύτερη έκδοση του εν λόγω κώδικα, το πρόβλημα της αδυναμίας αναπαράστασης του μοντέλου λύνεται μέσω τμηματικής αναπαράστασης των LCP με πολλαπλά αλλά μικρότερα σε μέγεθος αρχεία STL, ενώ το μοτίβο LIP αναπαρίσταται σαν μία λίστα σημείων αναφοράς στα

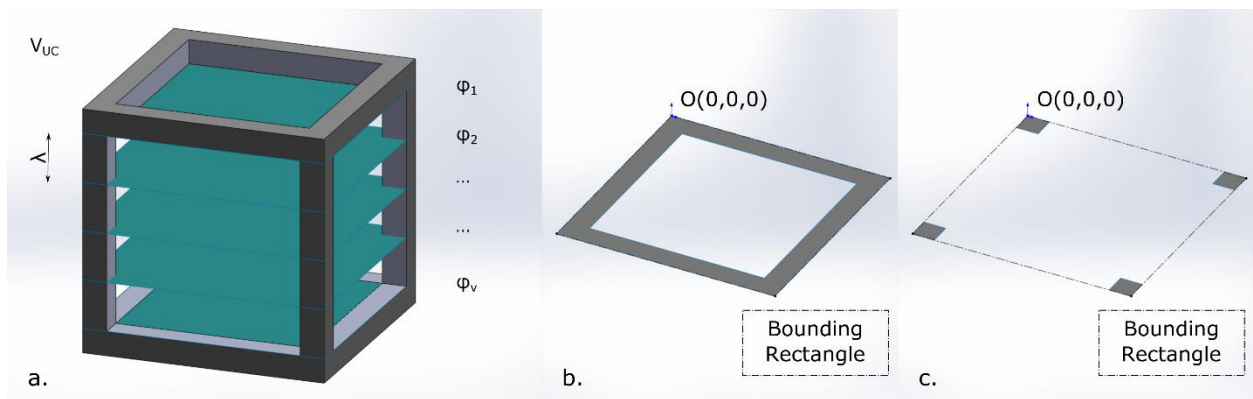
οποία τοποθετούνται τα ΜΚ και αναπαριστούν την πορώδη δομή στο εσωτερικό της κάθε στρώσης. Στην τρίτη έκδοση του κώδικα, τα αρχεία STL απαλείφονται εντελώς, και τα μοτίβα LCP και LIP εξάγονται απευθείας σε οδηγίες τροχιάς G-code.



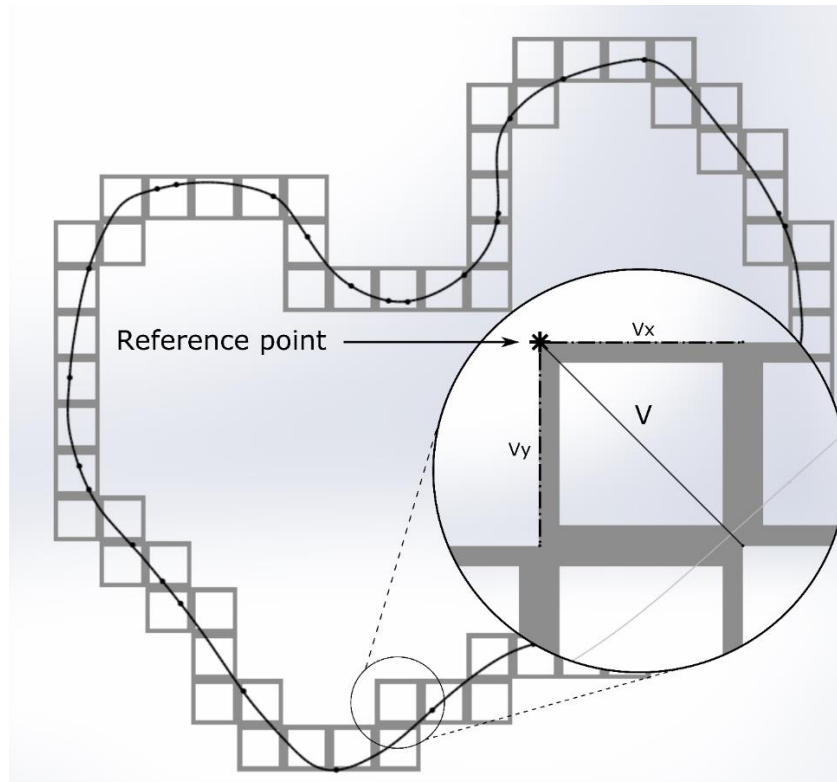
**Σχήμα 2-14** Διάγραμμα ροής αλγορίθμου (a) δημιουργίας cell surface template (CST) και (b) γεμίσματος των στρώσεων του μοντέλου.

## 2.4 Αναπαράσταση πορώδους δομής

Το MK μοντελοποιείται αρχικά στο CAD περιβάλλον και χωρίζεται σε στρώσεις  $\varphi_n$ , με  $n=1,2,\dots,n$  και  $n$  τον συνολικό αριθμό στρώσεων που ολοκληρώνουν ένα MK, ανάλογα το πάχος στρώσης  $\lambda$  που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κατά την εκτύπωση, Σχήμα 2-15(a). Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν τα δισδιάστατα μοτίβα CST, Σχήμα 2-15(b) και (c), καθώς και τα σημεία αναφοράς τους που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτησή τους στη στρώση. Τα τετραγωνικά μοτίβα CST που προκύπτουν, τοποθετούνται ανάλογα με το σημείο αναφοράς και το μήκος της πλευράς τους πάνω στο περίγραμμα της στρώσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-16.

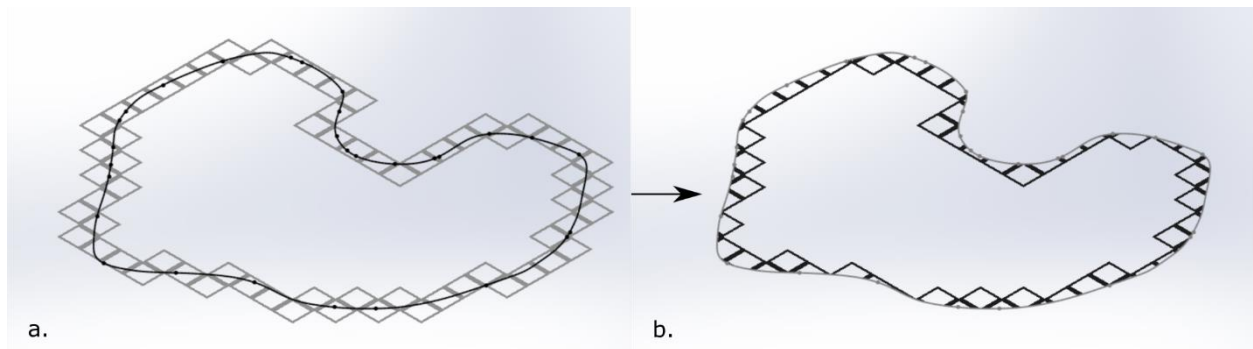


Σχήμα 2-15 (a) Τεμαχισμός μοναδιαίου κελιού (b) Δισδιάστατο μοτίβο 1 (Cell Surface Template, CST 1) και (c) Δισδιάστατο μοτίβο 2 (Cell Surface Template, CST 2).



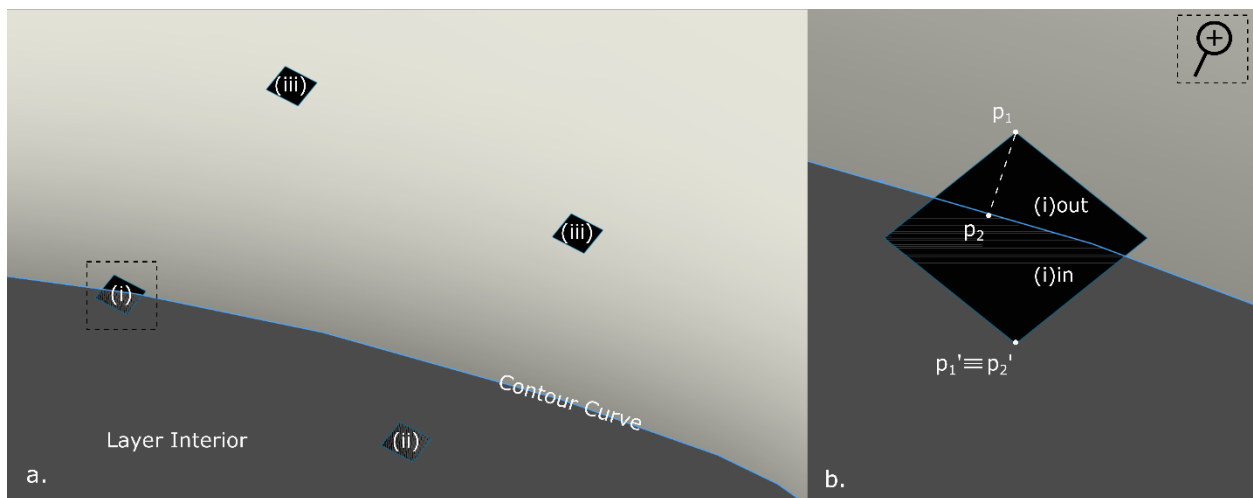
Σχήμα 2-16 Δισδιάστατα μοτίβα CST τοποθετημένα στο περίγραμμα της στρώσης.

Τα τμήματα που βρίσκονται εξωτερικά του ορίου της στρώσης θα αποκοπούν σε επόμενο βήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-17.



**Σχήμα 2-17 Αναπαράσταση του μοτίβου LCP (a) πριν και (b) μετά την αποκοπή των τμημάτων των CST που βρίσκονται εκτός του περιγράμματος στρώσης.**

Σε περίπτωση μοτίβων CST που αποτελούνται από πολλαπλές και ξεχωριστές επιφάνειες, βλ. Σχήμα 2-15(c), γίνεται διαχωρισμός σε επιφάνειες που βρίσκονται (i) πάνω στο όριο της στρώσης (ii) εντός της στρώσης και (iii) εκτός της στρώσης, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 2-18. Κατά αντιστοιχία, οι επιμέρους επιφάνειες θα (i) αποκοπούν στο όριο της στρώσης (ii) θα καταχωρηθούν και (iii) θα διαγραφούν.



**Σχήμα 2-18(a) Πιθανή τοποθέτηση των επιφανειών που ανήκουν σε μοτίβο CST με πολλαπλές επιφάνειες (b) σύγκριση μεταξύ δύο σημείων που ανήκουν στην ίδια επιφάνεια για να προσδιοριστεί εάν βρίσκεται πάνω στο όριο της στρώσης.**

#### 2.4.1 Υλοποίηση

Ο κώδικας που υλοποιεί την προτεινόμενη λύση αναπαράστασης των σύνθετων πορωδών δομών έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα VBA, χρησιμοποιώντας τις ενσωματωμένες εντολές που παρέχονται στο API του Solidworks<sup>TM</sup>. Σε αυτή την ενότητα οι εν λόγω εντολές θα αναφέρονται αυτούσιες εντός παρένθεσης, ακολουθούμενες από την περιγραφή της λειτουργίας τους όπου χρειάζεται.

### 2.4.2 Υπολογισμός σημείων τοποθέτησης CST

Ο κώδικας υπολογισμού των σημείων τοποθέτησης των μοτίβων CST στη στρώση υλοποιείται ως εξής: δημιουργείται το οριακό παραλληλεπίπεδο του μοντέλου (GetPartBox). Στην άνω όψη του οριακού παραλληλεπίπεδου δημιουργείται μια επιφάνεια αναφοράς (InsertPlanarRefSurface), η οποία μετατοπίζεται παράλληλα (InsertOffsetSurface) κατά το πάχος στρώσης  $\lambda$ , ώστε να χρησιμοποιηθεί για την τομή με το μοντέλο. Από κάθε τομή, προκύπτει μία καμπύλη spline που περιγράφει το όριο της στρώσης.

#### 2.4.2.1 Σημεία τοποθέτησης μοτίβου που ανήκουν στο όριο της στρώσης (STP<sub>C</sub>)

Τα σημεία τοποθέτησης του μοτίβου που ανήκουν στο όριο της στρώσης (Surface template placement points on contour, STP<sub>C</sub>) υπολογίζονται ως εξής: η μέθοδος εκτόξευσης νοητών ακτινών (RayIntersections), που ξεκινούν από ένα προκαθορισμένο σημείο και εκτοξεύονται με προκαθορισμένο διάνυσμα διεύθυνσης χρησιμοποιούνται για να στοχεύσουν ένα προκαθορισμένο αντικείμενο, στην προκειμένη περίπτωση την καμπύλη spline που περιγράφει το όριο της στρώσης. Η μέθοδος RayIntersections επιστρέφει τις συντεταγμένες του σημείου τομής. Το σημείο που επιστρέφεται χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του STP<sub>C</sub> σύμφωνα με τις εξισώσεις (2-1) και (2-2). Το STP<sub>C</sub> υπολογίζεται ώστε να συμπίπτει με το πλέγμα στο Σχήμα 2-19.

$$a = \frac{(A_x - BasePt_x)}{V_x} \quad (2-1)$$

$$A'_x = BasePt_x + \text{floor}(a) * V_x \quad (2-2)$$

όπου:

BasePt<sub>x</sub>: συντεταγμένη x του αρχικού σημείου εκτόξευσης της νοητής ακτίνας, τοποθετημένο στην πλευρά του οριακού παραλληλεπίπεδου.

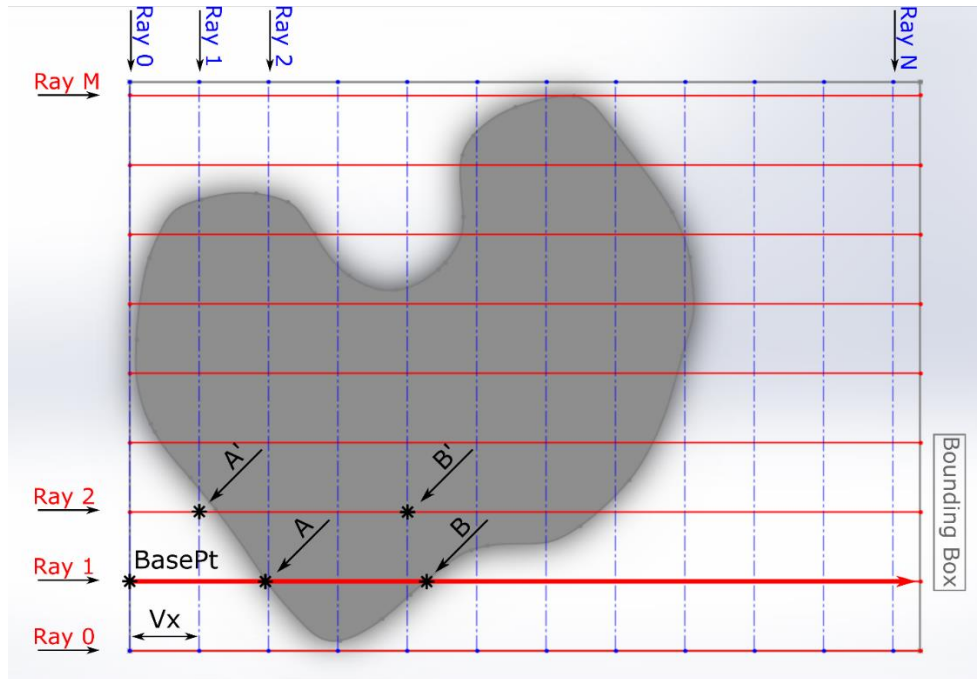
A<sub>x</sub>: συντεταγμένη x του επιστρεφόμενου σημείου σε περίπτωση τομής της ιδεατής ακτίνας με το όριο της στρώσης.

V<sub>x</sub>: μήκος πλευράς του CST κατά τη διεύθυνση X.

a: ο αριθμός των ακέραιων CST που θα χωρούσαν να τοποθετηθούν στο διάστημα μεταξύ του BasePt και του A.

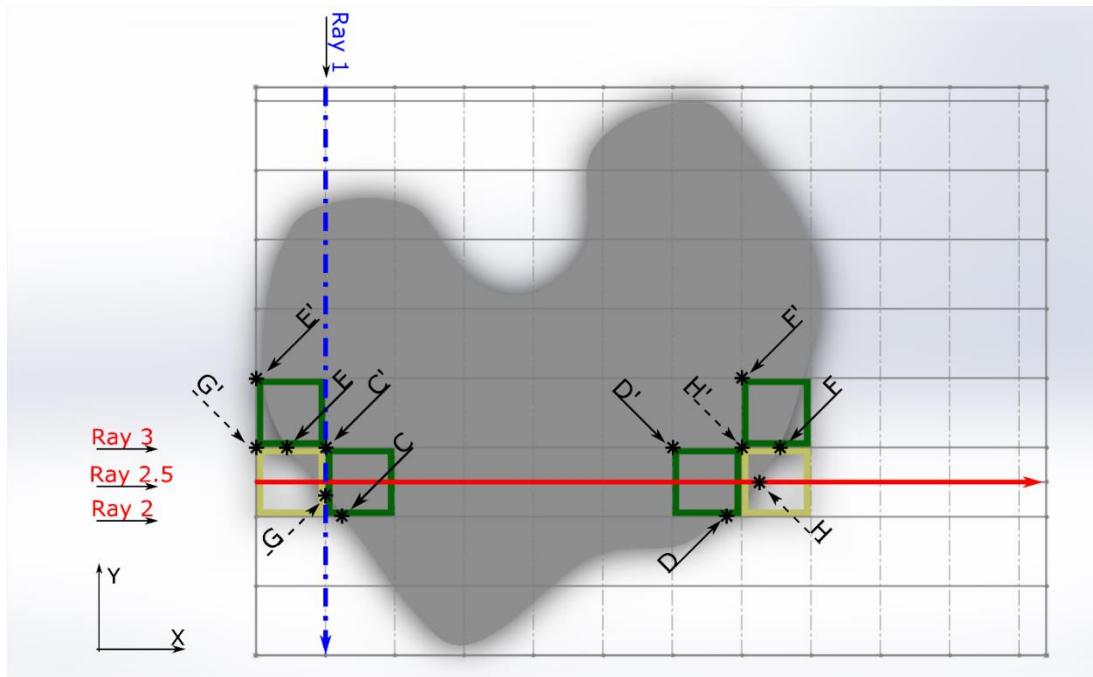
A'<sub>x</sub>: συντεταγμένη x του STP<sub>C</sub>

Εφόσον η ιδεατή ακτίνα έχει διαπεραστική ικανότητα, πέραν του σημείου τομής A, θα επιστραφεί και το σημείο τομής B (Σχήμα 2-19) και παρομοίως το σημείο B' θα καταχωρηθεί σαν σημείο αναφοράς ενός νέου STP<sub>C</sub>.



Σχήμα 2-19 Μέθοδος εκτόξευσης ιδεατών ακτίνων (Ray casting) για τον υπολογισμό των STP<sub>C</sub> according σύμφωνα με τις εξισώσεις (3 1) and (3 2).

Συχνά, λόγω μεγάλης απόστασης μεταξύ των παράλληλων ιδεατών ακτίνων που σαρώνουν την στρώση, είναι δυνατόν κάποια STP<sub>C</sub> να παραληφθούν, με αποτέλεσμα το μοτίβο του περιγράμματος LCP να μην καλυφθεί επαρκώς, όπως στην περίπτωση των μοτίβων G' και H' στο Σχήμα 2-20. Για αυτό το λόγο συχνά απαιτείται πύκνωση των ακτίνων που εκτοξεύονται με τη μέθοδο RayCasting καθώς και αλλαγή της διεύθυνσης εκτόξευσης (διεύθυνση Y στο Σχήμα 2-20).



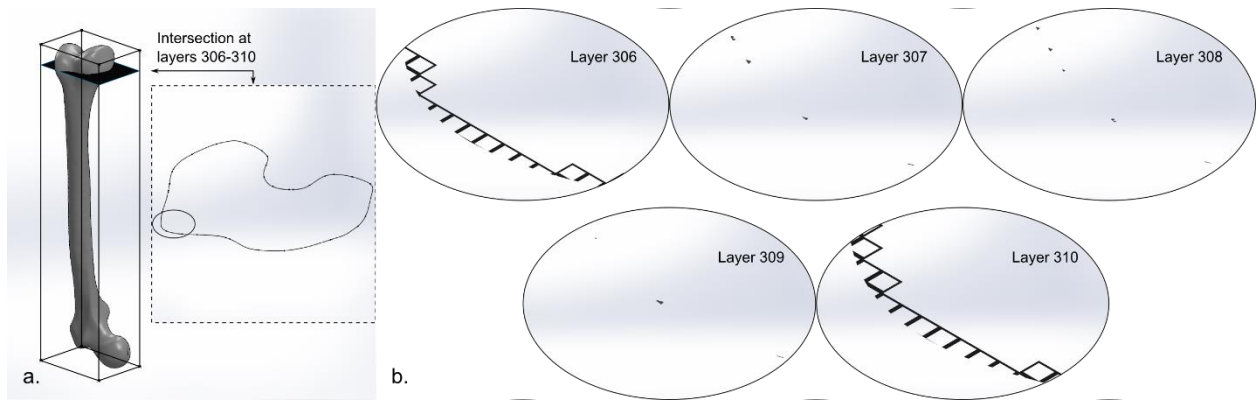
Σχήμα 2-20 Τα σημεία τοποθέτησης  $G'$  και  $H'$ , που σχετίζονται με τα ανοιχτόχρωμα μοτίβα CST, δεν εντοπίζονται παρά μόνο αν η απόσταση μεταξύ των ακτινών Ray 2 και 3 γίνει πιο μικρή με την προσθήκη της ακτίνας Ray 2.5 καθώς και μέσω της εκτόξευσης της (μπλε) ακτίνας Ray 1 κατά τη διεύθυνση Y.

#### 2.4.2.2 Σημεία τοποθέτησης μοτίβου που ανήκουν στο εσωτερικό της στρώσης ( $STP_I$ )

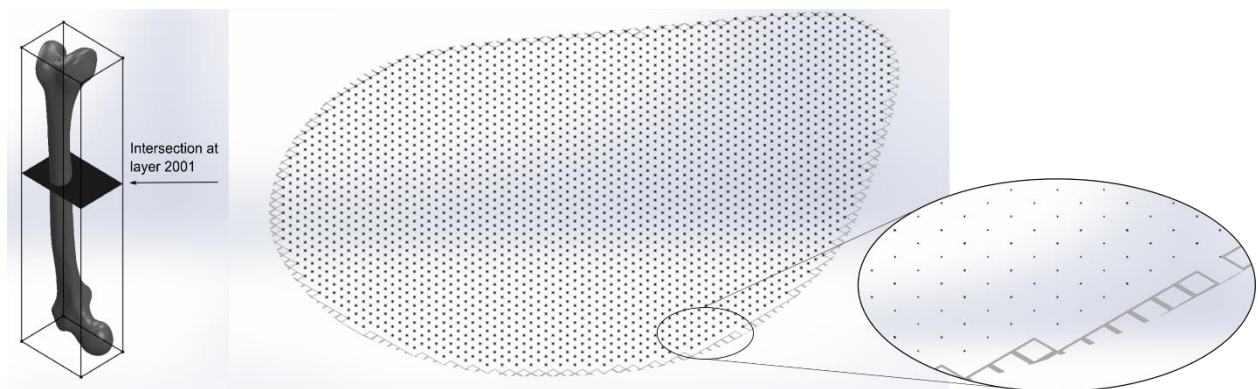
Τα σημεία τοποθέτησης μοτίβου που ανήκουν στο εσωτερικό της στρώσης (surface template placement points in layer's interior,  $STP_I$ ) υπολογίζονται με παρόμοιο τρόπο όπως και τα  $STP_C$ . Αφού υπολογιστούν, ταξινομούνται με βάση την συντεταγμένη Y. Κοινή συντεταγμένη Y μεταξύ δύο ή περισσότερων  $STP_I$  σημαίνει ότι βρίσκονται στην ίδια σειρά με βάση το πλέγμα στο Σχήμα 2-19. Η διαφορά μεταξύ των συντεταγμένων X μπορεί εύκολα λοιπόν να υποδείξει πόσα CST χωράνε να τοποθετηθούν ανάμεσα σε δυο αντικριστά  $STP_I$  και με αυτό τον τρόπο γεμίζει το εσωτερικό μοτίβο της στρώσης. Σε αυτή την έκδοση του κώδικα, τα σημεία  $STP_I$  απλώς καταχωρούνται σε ένα αρχείο txt για κάθε στρώση.

## 2.5 Αξιολόγηση της μεθόδου αναπαράστασης

Ο τρόπος αναπαράστασης τόσο για το μοτίβο στο όριο της στρώσης LCP όσο και για τα σημεία που περιγράφουν το εσωτερικό της στρώσης LIP παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-21 και Σχήμα 2-22, αντίστοιχα.



Σχήμα 2-21 (a) Μοντέλο μηριαίου οστού και (b) πέντε μοτίβα περιγράμματος LCP σε διαδοχικές στρώσεις.



Σχήμα 2-22 Σημεία τοποθέτησης στο εσωτερικό της στρώσης (STP) για μια τυχαία στρώση του μηριαίου οστού, σχεδιασμένα ως sketch points στο Solidworks™ για λόγους επίδειξης.

Ο κώδικας δοκιμάζεται για δυο διαφορετικά ικρίωματα με εξωτερικές διαστάσεις 114.26x80.53x468 mm και 85x98.24x153.36 mm και διάσταση πόρου ίση με 400  $\mu\text{m}$ . Οι χρόνοι εκτέλεσης του κώδικα, οι αριθμοί των στρώσεων και το συνολικό μέγεθος των αρχείων που προκύπτουν για δύο διαφορετικά μοντέλα οστών παρουσιάζονται στη συνέχεια (Πίνακας 2-2).

Πίνακας 2-2 Ενδεικτικά αποτελέσματα για δύο ικρίωματα (Μήκος πλευράς μοναδιαίου κελιού: 500 $\mu\text{m}$ / Μέγεθος πόρου: 400 $\mu\text{m}$ / Πάχος στρώσης: 100 $\mu\text{m}$ ).

Μοντέλο	Διαστάσεις ικρίωματος (mm)	Στρώσεις	Μέγεθος αρχείου (MB)	Χρόνος εκτέλεσης (min)
1	114.26x80.53x468	4677	1300	1980
2	85x98.24x153.36	1530	349	840

Για την αξιολόγηση της μεθόδου αναπαράστασης σύνθετων πορωδών δομών σε σχέση με την κλασική μέθοδο μοντελοποίησης και εξαγωγής σε STL αρχείο, σαν μελέτη περίπτωσης χρησιμοποιείται το μοντέλο μηριαίου οστού, ακολουθώντας την λογική που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.1: Το μοντέλο συρρικνώνεται και στη συνέχεια μεγεθύνεται σταδιακά, ώστε να εντοπιστεί από ποιο σημείο και έπειτα, η συμβατική μέθοδος μοντελοποίησης σταματάει να



είναι λειτουργική και το πρόβλημα της αναπαράστασης λύνεται πλέον με την μέθοδο που παρουσιάζεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Η αξιολόγηση και η σύγκριση (Πίνακας 2-3) λαμβάνει χώρα στο ίδιο υπολογιστικό σύστημα με χαρακτηριστικά: Intel® i7-4790 3.60 GHz CPU και 16 GB RAM. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν πως η συμβατική μέθοδος μοντελοποίησης και μετατροπής αρχίζει να αποτυγχάνει νωρίς, με την πρώτη δυσκολία μετατροπής σε STL να παρουσιάζεται στο 20% των αρχικών διαστάσεων του μοντέλου, ενώ στο 30% του αρχικού μεγέθους, το μοντέλο του ικριώματος δεν μπορεί καν να αναπαρασταθεί στο περιβάλλον CAD.

**Πίνακας 2-3 Σύγκριση μεταξύ συμβατικής και προτεινόμενης μεθόδου αναπαράστασης πορώδους δομής.**

Ποσοστιαία σμίκρυνση μοντέλου οστού:	Συμβατική μέθοδος		Προτεινόμενη μέθοδος	
	Μέγεθος αρχείου (MB)	Χρόνος εκτέλεσης (min)	Μέγεθος αρχείου (MB)	Χρόνος εκτέλεσης (min)
8%	1.5	3	0.7	24
13%	3.0	36	1.9	51
15%	4.1	83	2.7	61
20%	-*	464	5.1	90
30%	-	-	13.6	131

\* Το ικριώμα μοντελοποιήθηκε επιτυχώς όμως η εξαγωγή του σε αρχείο STL ήταν αδύνατη.

## 2.6 Απευθείας εξαγωγή τροχιάς και κατασκευή πορώδους δομής

Η τρίτη έκδοση του κώδικα περιλαμβάνει τις απαραίτητες βελτιώσεις ώστε να περάσει από την επιτυχή, καταρχήν, αναπαράσταση στην απευθείας εξαγωγή τροχιάς και την κατασκευή τμήματος του ικριώματος σε ένα ΠΚ-ΕΥ. Κάθε στρώση αποτελείται από δύο διακριτά μοτίβα, μοτίβο στο εσωτερικό της στρώσης LIP και μοτίβο στο όριο της στρώσης LCP. Το πρώτο περιλαμβάνει αυτούσια μοναδιαία κελιά, έχοντας σαν βάση ένα σημείο αναφοράς, ή στην προκειμένη περίπτωση, το αρχικό σημείο της τροχιάς. Το μοτίβο LCP αποθηκεύεται σαν μικρότερα STL, ένα για κάθε στρώση, τα οποία αν και σαφώς διαχειρίσιμα σε μέγεθος και πολυπλοκότητα, δεν είναι εύκολο να συγχωνευθούν και να δημιουργήσουν ένα κοινό αρχείο G-code.

Σε αυτή την έκδοση του κώδικα, η απευθείας εξαγωγή του LCP και LIP βασίστηκε σε μια αναβαθμισμένη και πιο ευέλικτη προσέγγιση: κάθε μοναδιαίο κελί πλέον αναπαρίσταται από ένα σύνολο γραμμών στο περιβάλλον του Solidworks™, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την τροχιά του ακροφυσίου, στη διάρκεια εκτύπωσης του συγκεκριμένου MK, αναλόγως το μέγεθος του πόρου. Κάθε γραμμή ακολουθεί ένα συγκεκριμένο τρόπο αρίθμησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-23(a).

Μία επιπλέον σημαντική αλλαγή είναι η χρήση των κλάσεων και των αντικειμένων της VBA για το χειρισμό των μοναδιαίων κελιών. Πλέον, κάθε CST λογίζεται σαν ξεχωριστό αντικείμενο και έχει τα δικά του παραμετροποιήσιμα χαρακτηριστικά. Κάποια από αυτά είναι η θέση του σε

σχέση με τη στρώση, το μέγεθος του πόρου του, τα σημεία τομής με το όριο της στρώσης κλπ.. Συγκεκριμένα, για τη θέση του στην στρώση, κάθε CST αντικείμενο εφοδιάζεται με ένα μοναδικό αναγνωριστικό αριθμό, όπως στο Σχήμα 2-24 και με αυτό τον τρόπο ουσιαστικά έχει επιτευχθεί η χαρτογράφηση της κάθε στρώσης.

Επιστρέφοντας στο μοτίβο στο όριο της στρώσης (LCP), κάθε μοναδιαίο κελί έχει καταχωρημένα τα σημεία τομής του με το όριο της στρώσης Σχήμα 2-23(b). Επιπλέον, κάθε μοναδιαίο κελί, έχει καταχωρημένο τον αναγνωριστικό αριθμό τοποθέτησης που φανερώνει τη θέση του στη στρώση, αλλά και με ποια μοναδιαία κελιά γειτνιάζει. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι σταθερά αριθμημένες γραμμές της τροχιάς του CST, περιγράφουν μοναδικά τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των γειτονικών μοναδιαίων κελιών Σχήμα 2-23(c). Για παράδειγμα, παρατηρώντας το άνω αριστερά CST στο Σχήμα 2-23(a), τα πιθανά ζευγάρια είναι:

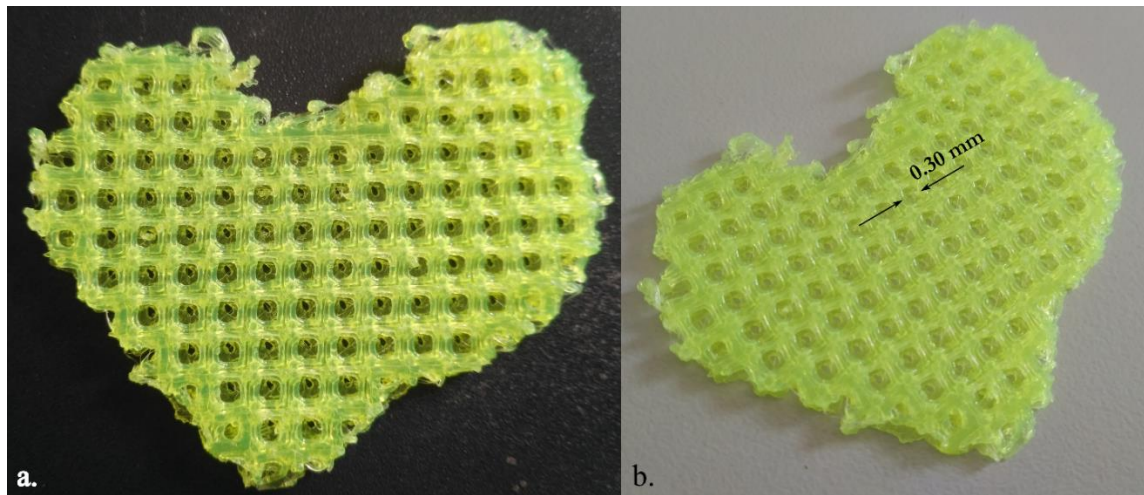
1. το 3<sup>ο</sup> ευθύγραμμο τμήμα (CST αναφοράς) με το 1<sup>ο</sup> ευθύγραμμο τμήμα (κάτω CST).
2. Το 4<sup>ο</sup> ευθύγραμμο τμήμα (CST αναφοράς) με το 2<sup>ο</sup> ευθύγραμμο (αριστερό CST).

Με αυτό τον τρόπο και έχοντας καταγράψει όλα τα αρχικά, τελικά και σημεία σύνδεσης της τροχιάς, οι εντολές G-code εξάγονται απευθείας από το μοντέλο Σχήμα 3 11(d).

Για τα CST που ανήκουν στο εσωτερικό της στρώσης, η αναβάθμιση του κώδικα είναι πιο εύκολη, αφού για κάθε CST υπάρχει ένα γνωστό σημείο αναφοράς, το οποίο χρησιμοποιείται σαν αρχικό σημείο της τροχιάς. Η τροχιά δε είναι επαναλαμβανόμενη και άρα εύκολα μετατρέπεται σε εντολές G-code.

Ο εξαγόμενος G-code δοκιμάστηκε σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ ώστε να κριθεί η λειτουργικότητά του. Ένα τμήμα του μηριαίου οστού χρησιμοποιήθηκε για λόγους επίδειξης και το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 2-25.

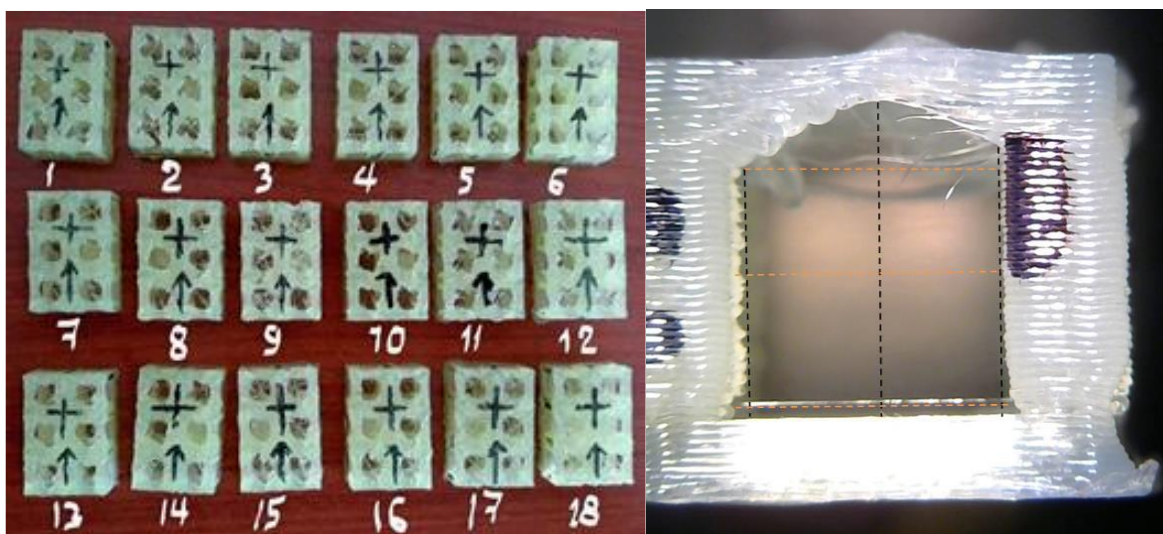




Σχήμα 2-25 Απευθείας εξαγωγή G-code για ένα τμήμα του μηριαίου οστού και κατασκευή σε σύστημα προσθετικής κατασκευής με εξώθηση υλικού.

Το υλικό κατασκευής είναι πολύ-λακτικό οξύ (PLA) και το μέγεθος του πόρου 300  $\mu\text{m}$ . Καταρχάς, η εκτέλεση του G-code ήταν πλήρως λειτουργική και χωρίς σφάλματα κατά τη διάρκεια της καταργασίας. Τα περιγράμματα των στρώσεων είναι ελαφρώς ασαφή και αυτό αποδίδεται στη δυσκολία απόθεσης ανεξάρτητων και μικρών σε μήκος τμημάτων, που συχνά συναντώνται σε τέτοιες περιπτώσεις. Στο εσωτερικό του δοκιμίου, παρατηρείται πως οι πόροι έχουν σχεδιαστεί, αλλά είναι πιο κλειστοί στη βάση του δοκιμίου. Εσωτερικά οι πόροι διατηρούν τη διασύνδεσή τους εν γένει, με τις περισσότερες περιπτώσεις φραγής να παρατηρούνται στο περίγραμμα.

Γενικότερα, η έλλειψη βελτιστοποίησης των παραμέτρων είναι η σοβαρότερη αιτία, τόσο για το ασαφές περίγραμμα όσο και για τη γεωμετρία των πόρων εσωτερικά. Μια σχετική εργασία σε μεταγενέστερο στάδιο [36], βασίστηκε στον εν λόγω κώδικα για να μελετήσει πειραματικά την πιστότητα της μορφής των πόρων, Σχήμα 2-26.



Σχήμα 2-26 a) Πείραμα βελτιστοποίησης γεωμετρίας των πόρων και b) αξιολόγησης των αιωρημάτων που δημιουργούνται κατά την κατασκευή των πόρων.

## 2.7 Συζήτηση

Συνολικά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος για την αναπαράσταση και την απευθείας εξαγωγή της τροχιάς από μοντέλο CAD, λύνει το πρόβλημα της μοντελοποίησης μεγάλων ή/και σύνθετων μοντέλων σε περιβάλλον CAD ή κατά την μετατροπή του σε αρχείο STL για προετοιμασία κατεργασίας με προσθετικές μεθόδους. Παρουσιάστηκαν οι δύο τελευταίες εκδόσεις του κώδικα, μαζί με τα αποτελέσματα αλλά και τους περιορισμούς τους.

Η έμμεση αναπαράσταση σύνθετων πορωδών μοντέλων κρίνεται πιο αποδοτική όσο η πολυπλοκότητα και το πλήθος των γεωμετρικών οντοτήτων, που πρέπει να δημιουργηθούν σε περιβάλλον CAD, αυξάνεται. Το μέγεθος πόρου όπως και το πάχος στρώσης που επιλέχθηκαν είναι απαιτητικά ακόμα και για σύγχρονα συστήματα ΠΚ-ΕΥ, όχι όμως μη-ρεαλιστικά.

Η επιτυχής κατασκευή και η πλήρης λειτουργικότητα του G-code αυξάνει την αξιοπιστία της προτεινόμενης λύσης. Μέσω οπτικής αξιολόγησης έγινε φανερό πως παρά το ότι η γεωμετρία προσέγγιζε το επιθυμητό, υπήρχαν σαφείς αποκλίσεις, τόσο στην καθαρότητα του περιγράμματος, όσο και στη γεωμετρία των πόρων. Αυτές οι ενδείξεις ήταν το κίνητρο για εστίαση της ερευνητικής εργασίας προς την βελτιστοποίηση της κατασκευής μέσω της συστηματικής μελέτης των παραμέτρων εκτύπωσης.

Ο κώδικας παρέχει ευελιξία, σχετικά με μελλοντικές επεκτάσεις σε διαφορετικές μορφές μοναδιαίων κελιών. Σύνθετες δομές βαθμωτής γεωμετρίας κρίνεται σκόπιμο να μελετηθούν σαν μελλοντικό αντικείμενο εργασίας [37]. Επιπλέον, μέσω της δυνατότητας χαρτογράφησης των MK στη στρώση, εναλλακτικές διατάξεις εκτύπωσης μπορεί να μελετηθούν, κυρίως στοχεύοντας στην ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή κατά την κατεργασία, η οποία ευθύνεται για τις εσωτερικές τάσεις και την παραμόρφωση της γεωμετρίας του τελικού κομματιού.

# 3

## *Εξώθηση υλικού για αποφυγή ελαττωμάτων*

### *3.1 Βέλτιστη περιοχή λειτουργίας*

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη για την ανίχνευση της βέλτιστης περιοχής εκτύπωσης σε ένα μεγάλο εύρος ρυθμίσεων για τέσσερις βασικές παραμέτρους εκτύπωσης. Το κριτήριο αξιολόγησης είναι η πιστότητα μορφής των δοκιμίων που μελετάται μέσω σχεδιασμού πειραμάτων και συγκεκριμένα με τη μέθοδο Taguchi. Ως πιστότητα μορφής ορίζεται το αποτέλεσμα της κατασκευής, το οποίο είναι απαλλαγμένο από τέσσερα βασικά και συχνά συναντώμενα ελαττώματα κατασκευής. Σκοπός είναι η ανίχνευση των σχέσεων μεταξύ της ρύθμισης των παραμέτρων και του αποτελέσματος, αλλά και η ανίχνευση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων. Στη συνέχεια, ένα νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται στις πειραματικές παρατηρήσεις και αναπτύσσεται με στόχο την εύρεση των ορίων βέλτιστης λειτουργίας σε συνδυασμό με την παραγωγικότητα της κατεργασίας εξώθησης υλικού.

### *3.2 Βασική ιδέα*

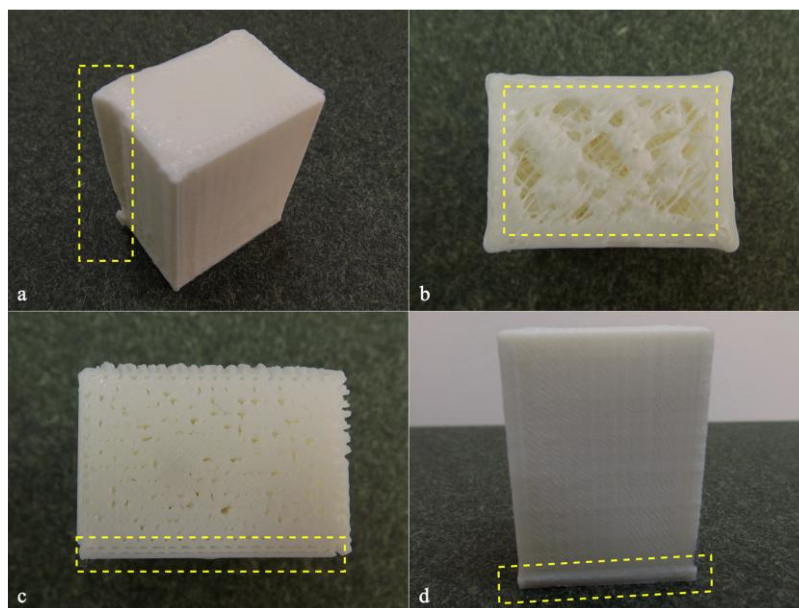
Τα ελαττώματα κατασκευής στα συστήματα ΠΚ-ΕΥ οφείλονται πολύ συχνά στο τύπο του υλικού [38, 39], σε σφάλματα κατά την εξώθηση [40], σε εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο κομμάτι λόγω της ανομοιόμορφης ψύξης από περιοχή σε περιοχή [41]. Κατά την εξώθηση, ο κινητήρας εφαρμόζει δύναμη στο νήμα μέσω του οδοντωτού τροχού, οδηγώντας το στο θερμαινόμενο ακροφύσιο. Η δύναμη θα πρέπει να υπερνικήσει την πτώση πίεσης στο ακροφύσιο ώστε να πραγματοποιηθεί η εξώθηση του τήγματος. Για υψηλότερη παροχή υλικού, παρατηρείται διόγκωση στο αποτιθέμενο υλικό με την εκτόνωση της πίεσης κατά την έξοδο [42], ενώ είναι πιθανή και η αδυναμία εξώθησης λόγω μη επαρκούς χρόνου απορρόφησης της θερμότητας από το νήμα ώστε να βρεθεί σε θερμοκρασία εξώθησης [43]. Η



απόθεση του τηγμένου υλικού και η τελική του γεωμετρία κατά τη στερεοποίησή του έχει μοντελοποιηθεί από τον Crockett [44, 45], ενώ η επίδραση των παραμέτρων της εξώθησης στην ποιότητα συγκόλλησης των στοιβαγμένων στρώσεων έχει μελετηθεί από την ομάδα των Sun et al. [46] και Bellehumeur et. al [47]. Η μελέτη των Venkataraman et al. [48] αποδεικνύει πως εάν το κρίσιμο όριο της επιτρεπόμενης πίεσης στο ακροφύσιο ξεπεραστεί, το νήμα υπόκειται σε λυγισμό με ασυνέπεια μεταξύ ζητούμενης και πραγματικής ογκομετρικής παροχής υλικού. Επιπλέον, το στιγμιαίο μπλοκάρισμα του ακροφυσίου επιδεινώνεται λόγω συγκέντρωσης υπολειμμάτων υλικού [49]. Σύμφωνα με τους Go et al. [50], οι περιορισμοί στην εξώθηση οφείλονται στο σχεδιασμό των υποσυστημάτων του συστήματος ΠΚ-ΕΥ. Επίσης έχει προταθεί βελτιωμένο σύστημα εξώθησης, εφοδιασμένο με πηγή λέιζερ με σκοπό την προθέρμανση του υλικού πριν την είσοδό του στο θερμαινόμενο ακροφύσιο [51],

Λόγω των παραπάνω, πραγματοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση τεσσάρων βασικών ελαττωμάτων κατασκευής, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-1 και στην αναφορά [52]:

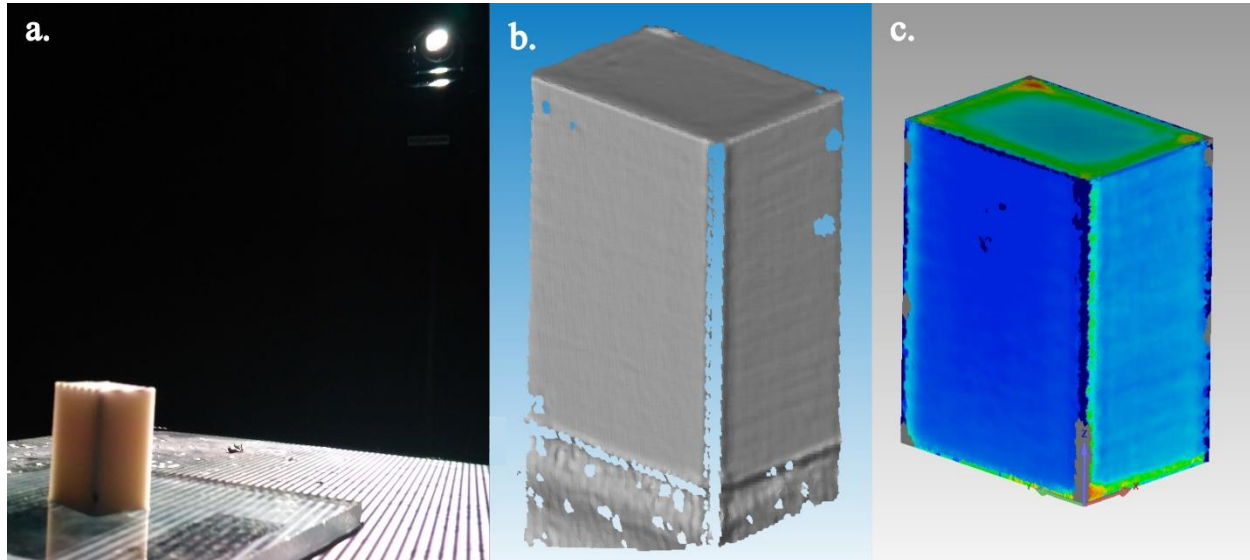
- παραμορφωμένες ακμές (deformed edges, DE)
- μη επαρκής εξώθηση (under-extrusion, UE)
- αδύναμη συγκόλληση σειρών υλικού (weak fiber bonding, WFB) και
- διόγκωση βάσης (base bulging, BB)



**Σχήμα 3-1** Τύποι ελαττωμάτων κατασκευής (a) παραμορφωμένες ακμές (deformed edges, DE)(b) μη-επαρκής εξώθηση (under-extrusion, UE)(c) αδύναμη συγκόλληση σειρών υλικού (weak fiber bonding, WFB)(d) διόγκωση βάσης (base bulging, BB).

Ακόμη και οι επιτρεπόμενες τιμές των παραμέτρων είναι ικανές να προκαλέσουν ελαττώματα σε τόσο μεγάλο βαθμό, που καθιστούν εξαρχής την κατασκευή μη λειτουργική. Για λόγους πλήρους εποπτείας οι παράμετροι εξετάστηκαν σε μεγάλο εύρος των επιτρεπόμενων ρυθμίσεων μέσω μια σειράς πειραμάτων. Η αξιολόγησή τους έγινε μέσω αποτύπωσης της γεωμετρίας με

μεθόδους τρισδιάστατης σάρωσης [53] και αξιολογήθηκαν σε ειδικό λογισμικό με μέτρηση της απόκλισης της γεωμετρίας τους σημείο-προς-σημείο, σε σχέση με το μοντέλο CAD του δοκιμίου (Σχήμα 3-2). Όσο μεγαλύτερη η τυπική απόκλιση των μετρήσεων σημείο-προς-σημείο, τόσο πιο έντονη η ύπαρξη του κατασκευαστικού ελαττώματος.



Σχήμα 3-2 Αποτύπωση της γεωμετρίας του δοκιμίου (a) τρισδιάστατη σάρωση με προβολή λευκού φωτός (b) δημιουργία μοντέλου (c) σύγκριση μεταξύ πραγματικού δοκιμίου και ιδεατού μοντέλο CAD.

### 3.3 Μεθοδολογία

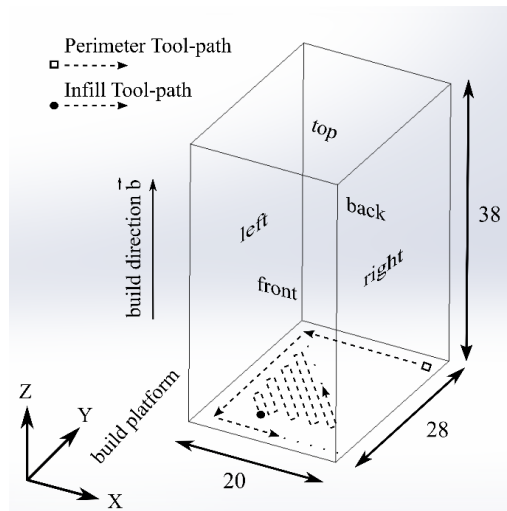
Το δοκίμιο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-3, χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της πιστότητας μορφής κατά την πειραματική διαδικασία. Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ΠΚ-EY 3D Systems™ CubeX. Εξετάστηκαν τέσσερις παράμετροι, πάχος στρώσης (Layer Thickness, LT), διόρθωση ροής (Flow Tweak, FT), ταχύτητα εκτύπωσης (Printing Speed, PS) και προσανατολισμός περί τον άξονα Z (Orientation, Oz), σύμφωνα με την ενότητα 2.1 και το Σχήμα 3-3. Κάθε παράμετρος μελετήθηκε σε τρία επίπεδα, εξασφαλίζοντας μεγάλο εύρος ρυθμίσεων (Πίνακας 3-1). Οι παράμετροι LT, FT και PS ορίζουν την ογκομετρική παροχή υλικού και συνδέονται με την παραγωγικότητα της κατεργασίας.

Οι λοιπές παράμετροι που παρέμειναν σταθερές είναι: διάμετρος ακροφυσίου  $d_n=0.50$  mm, θερμοκρασία εξώθησης  $T=195^{\circ}\text{C}$ , ποσοστό γεμίσματος αραιών στρώσεων  $p=50\%$  και λειτουργία ανεμιστήρων στο 100% και 50% της ισχύος τους κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης περιμέτρου και εσωτερικού γεμίσματος, αντίστοιχα. Η τρισδιάστατη σάρωση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με το σύστημα IMetric™ IScan M300, προβολής λευκού φωτός και η αντίστροφη σχεδίαση και μέτρηση της απόκλισης έλαβε χώρα στο λογισμικό Geomagic™.

Η μέθοδος σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi [54] χρησιμοποιείται για την προετοιμασία μιας αξιόπιστης αξιολόγησης των παραμέτρων έναντι του θεσπισμένου κριτηρίου. Ο τυποποιημένος



ορθογώνιος πίνακας OA27 χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ώστε να εξασφαλίσει την επαρκώς αναλυτική ικανότητα του πειράματος να εντοπίσει τόσο την επίδραση των παραμέτρων μεμονωμένα, όσο και την αλληλεπίδραση μεταξύ ζευγών παραμέτρων στο υπό εξέταση κριτήριο της πιστότητας μορφής [55]. Η απόκριση των πειραμάτων συνοψίζεται στη μετρική signal-to-noise ratio, εξίσωση (3-1), αναζητώντας την ελάχιστη δυνατή τυπική απόκλιση των σημείων που ανασχηματίζουν το πραγματικό μοντέλο, σε σχέση με το ιδεατό μοντέλο CAD.



Σχήμα 3-3 Σχεδιασμένο δοκίμιο πειραματικής διαδικασίας.

Πίνακας 3-1 Παράμετροι και επίπεδα ρυθμίσεων που επιλέχθηκαν για το πείραμα.

Παράμετροι	LT (mm)	FT	PS	Oz (°)
Επίπεδο 1	0.10	0.80	0 (10.00-15.00-30.00 mm/s)	0°
Επίπεδο 2	0.25	1.00	50 (40.00-45.00-55.00 mm/s)	22°
Επίπεδο 3	0.40	1.20	100 (70.00-75.00-80.00 mm/s)	45°

$$SNR = -10 * LOG(\sum_{i=1}^n (Y_i^2)/n) \quad (3-1)$$

όπου,

$n$  : συνολικός αριθμός μετρήσεων

$Y_i$  : η μετρούμενη απόκριση

Τα νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks, ANN) αποτελούν σημαντικά εργαλεία πρόβλεψης της απόκρισης για κατεργασίες οι οποίες είναι πολύπλοκες και δύσκολα προγράφονται αναλυτικά [56]. Αποτελούνται από δίκτυα νευρώνων τα οποία είναι ικανά να εντοπίζουν τις σχέσεις μεταξύ των εισόδων (παράμετροι εκτύπωσης) και της εξόδου (πιστότητα μορφής). Αυτό γίνεται μέσω εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου σε ήδη πραγματοποιημένα πειράματα, που στην προκειμένη περίπτωση προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία Taguchi. Μόνο οι στατιστικά σημαντικές παράμετροι εκτύπωσης, όπως προκύπτουν από την

ανάλυση διακύμανσης ANOVA χρησιμοποιούνται ως είσοδοι του ANN [57]. Ένα μέρος των πειραμάτων (56% ή 15 πειράματα) χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του ANN και δύο ίσα μέρη, αποτελούμενα από 6 πειράματα το καθένα, χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση και δοκιμή της αποδοτικότητας του ANN, αντίστοιχα. Η εκπαίδευση των ANN βασίζεται σε μεγάλο αριθμό παραγόντων και συχνά η τελική απόδοσή τους βασίζεται σε λογική δοκιμής και πλάνης (trial and error). Στην παρούσα περίπτωση οι βέλτιστες ρυθμίσεις των παραγόντων προέκυψαν από δοκιμή 5 βασικών παραγόντων, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [58–60], συγκεκριμένα το αριθμό των νευρώνων (number of neurons, NN), τον αριθμό κρυφών στρωμάτων (hidden layers, HL), τη συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function, AF), το ρυθμό εκμάθησης (learning rate, LR) και τη σταθερά της ορμής (momentum constant, MC). Οι ρυθμίσεις των παραγόντων εισήχθησαν σε έναν ορθογώνιο πίνακα Taguchi 18 πειραμάτων (Πίνακας 3-2). Σαν απόκριση των δεκαοκτώ εκπαιδευμένων νευρωνικών, ορίζεται το σφάλμα πρόβλεψης τους κατά τη δοκιμή, μέσω της συνάρτησης (3-2).

**Πίνακας 3-2** ΟΑ18 πίνακας Taguchi για την εύρεση βέλτιστων παραγόντων εκπαίδευσης του ANN.

<b>Trial</b>	<b>NN</b>	<b>HL</b>	<b>AF</b>	<b>LR</b>	<b>MC</b>	<b>Απόκριση</b>
1	2	1	Linear (LN)	0.001	0.1	0.217
2	2	2	Tan-Sigmoid (TS)	0.005	0.5	0.099
3	2	3	Log-Sigmoid (LS)	0.010	0.9	0.098
4	4	1	Linear (LN)	0.005	0.5	0.223
5	4	2	Tan-Sigmoid (TS)	0.010	0.9	0.069
6	4	3	Log-Sigmoid (LS)	0.001	0.1	0.072
7	6	1	Tan-Sigmoid (TS)	0.001	0.9	0.096
8	6	2	Log-Sigmoid (LS)	0.005	0.1	0.078
9	6	3	Linear (LN)	0.010	0.5	0.222
10	8	1	Log-Sigmoid (LS)	0.010	0.5	0.095
11	8	2	Linear (LN)	0.001	0.9	0.224
12	8	3	Tan-Sigmoid (TS)	0.005	0.1	0.089
13	10	1	Tan-Sigmoid (TS)	0.010	0.1	0.066
14	10	2	Log-Sigmoid (LS)	0.001	0.5	0.095
15	10	3	Linear (LN)	0.005	0.9	0.219
16	12	1	Log-Sigmoid (LS)	0.005	0.9	0.092
17	12	2	Linear (LN)	0.010	0.1	0.222
18	12	3	Tan-Sigmoid (TS)	0.001	0.5	0.100

$$RMSE_{test} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - x_i)^2} \quad (3-2)$$

όπου,

$n$ : ο αριθμός των πειραμάτων που χρησιμοποιούνται κατά τη δοκιμή του εκπαιδευμένου ANN

$t$ : η τιμή στόχος, όπως προκύπτει από την πειραματική παρατήρηση για την πιστότητα μορφής

$x$ : η τιμή πρόβλεψης του εκπαιδευμένου ANN

### 3.4 Αποτελέσματα πειραμάτων

#### 3.4.1 Πιστότητα μορφής

Τα αποτελέσματα των 27 πειραμάτων (Πίνακας 3-3) περιλαμβάνουν την τυπική απόκλιση (StDev) σε κάθε διεύθυνση εκτύπωσης X, Y και Z. Οι τυπικές αποκλίσεις όλων των διευθύνσεων συνυπολογίζονται στο μέτρο της πιστότητας μορφής (shape fidelity, SF), εκφρασμένο ως λόγος signal-to-noise (SNR). Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων προκύπτει και η αντίστοιχη ογκομετρική παροχή Q, όπως υπολογίζεται στην εξίσωση (3-3). Τα γραφήματα στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζουν την επίδραση των παραμέτρων στη γεωμετρική πιστότητα, τόσο μεμονωμένα όσο και με τη μορφή μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων.

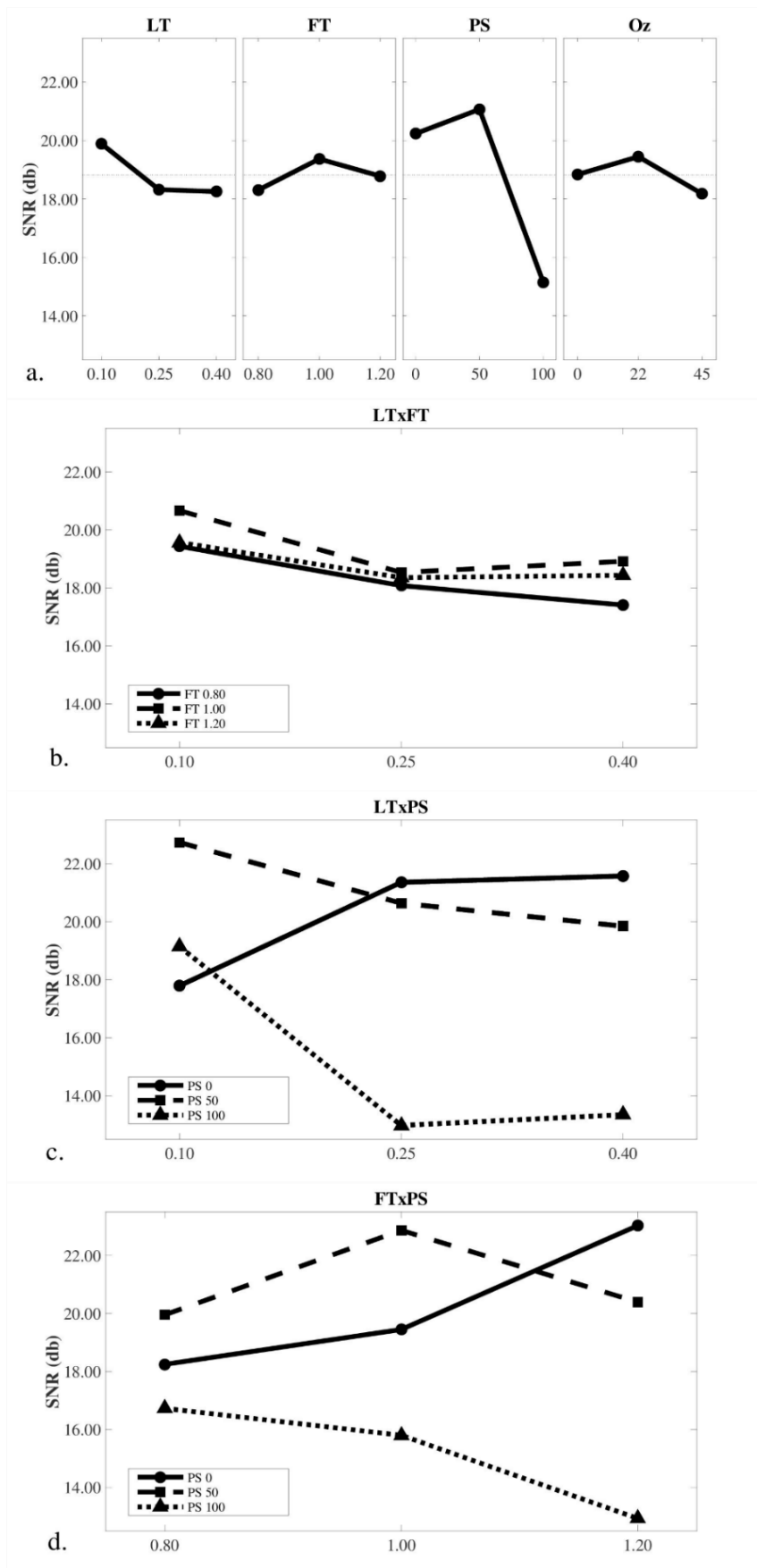
$$Q = LT * FT * d_n * PS \quad (3-3)$$

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3-4(a), η μείωση της ταχύτητας (PS) από 100 σε 50 ευνοεί την πιστότητα μορφής των δοκιμίων. Η αύξηση της πίεσης εσωτερικά του ακροφυσίου, λόγω της ανάγκης εξώθησης μεγαλύτερου όγκου υλικού στη μονάδα του χρόνου, δημιουργεί αστάθεια στην εξώθηση και πλευρική διόγκωση της λωρίδας υλικού καθώς αποτίθεται [40]. Επιπλέον, οι αυξημένες ταχύτητες δυσχεραίνουν τη διαχείριση της εξώθησης στα σημεία αλλαγής της κατεύθυνσης εκτύπωσης, που μοιραία συνοδεύονται από στιγμιαία επιβράδυνση και επιτάχυνση της κεφαλής [61], με συνέπεια τη δημιουργία παραμορφωμένων ακμών όπως στο Σχήμα 3-1(a).

Λεπτότερο πάχος στρώσης (LT) βελτιώνει την ποιότητα απόθεσης του υλικού, αν και για πάχος στρώσης μεγαλύτερο των 0.25 mm, τα αποτελέσματα δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Η διόρθωση της ροής (FT) έχει μικρή επίδραση στην πιστότητα μορφής όταν εξετάζεται ξεχωριστά, ενώ ρύθμισή της κάτω από την ονομαστική διάμετρο του ακροφυσίου, συνδέεται με αδυναμία συγκόλλησης μεταξύ των σειρών υλικού (WFB), Σχήμα 3-1(c), σφάλμα το οποίο επηρεάζει αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες του κομματιού [52]. Αλλαγές στον προσανατολισμό του δοκιμίου (Oz) φαίνεται να μην έχουν επίδραση στη γεωμετρική πιστότητα.

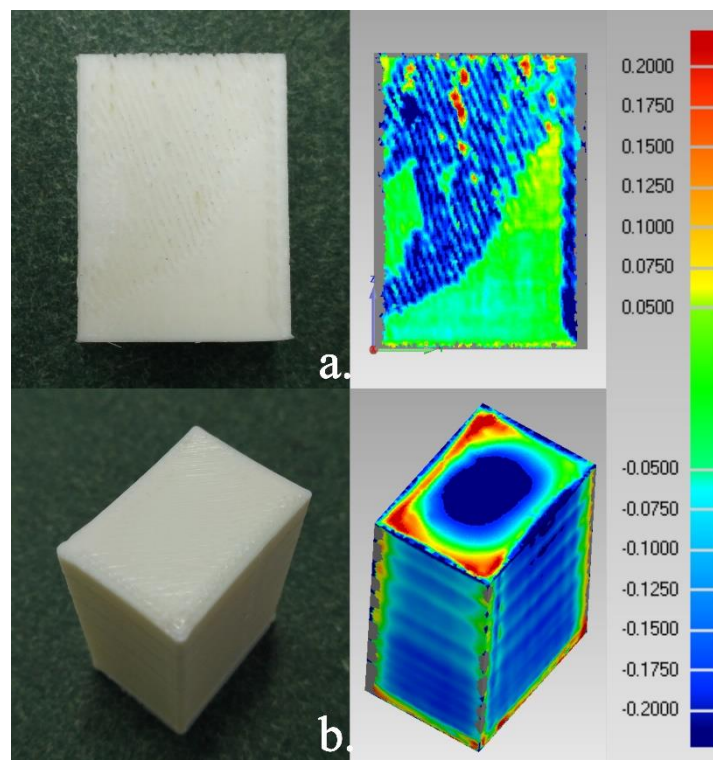
**Πίνακας 3-3 ΟΑ27 πίνακας Taguchi με ενσωματωμένα τα αποτελέσματα της πιστότητας μορφής και της ογκομετρικής παροχής για κάθε συνδυασμό ρυθμίσεων.**

Πείραμα	LT (mm)	FT	PS	Oz (°)	StDev X	StDev Y	StDev Z	SF (SNR)	Q (mm <sup>3</sup> /s)
1	0.10	0.80	100	0	0.104	0.071	0.067	21.674	2.80
2	0.10	0.80	50	22	0.073	0.130	0.092	19.904	1.60
3	0.10	0.80	0	45	0.200	0.110	0.108	16.725	0.40
4	0.10	1.00	100	22	0.082	0.081	0.076	21.989	3.50
5	0.10	1.00	50	45	0.067	0.051	0.041	25.358	2.00
6	0.10	1.00	0	0	0.272	0.128	0.114	14.635	0.50
7	0.10	1.20	100	45	0.232	0.192	0.189	13.756	4.20
8	0.10	1.20	50	0	0.059	0.071	0.082	22.927	2.40
9	0.10	1.20	0	22	0.087	0.100	0.036	22.011	0.60
10	0.25	0.80	100	22	0.092	0.091	0.254	15.679	7.00
11	0.25	0.80	50	45	0.145	0.090	0.049	19.789	4.00
12	0.25	0.80	0	0	0.107	0.147	0.082	18.768	1.00
13	0.25	1.00	100	45	0.148	0.199	0.385	11.553	8.75
14	0.25	1.00	50	0	0.086	0.068	0.079	22.182	5.00
15	0.25	1.00	0	22	0.074	0.092	0.075	21.867	1.25
16	0.25	1.20	100	0	0.210	0.300	0.263	11.695	10.50
17	0.25	1.20	50	22	0.097	0.096	0.108	19.935	6.00
18	0.25	1.20	0	45	0.065	0.088	0.042	23.432	1.50
19	0.40	0.80	100	45	0.258	0.175	0.243	12.826	11.20
20	0.40	0.80	50	0	0.083	0.091	0.117	20.165	6.40
21	0.40	0.80	0	22	0.085	0.146	0.085	19.242	1.60
22	0.40	1.00	100	0	0.228	0.163	0.212	13.859	14.00
23	0.40	1.00	50	22	0.097	0.082	0.087	21.055	8.00
24	0.40	1.00	0	45	0.079	0.091	0.072	21.838	2.00
25	0.40	1.20	100	22	0.203	0.256	0.179	13.351	16.80
26	0.40	1.20	50	45	0.086	0.080	0.175	18.312	9.60
27	0.40	1.20	0	0	0.061	0.075	0.061	23.642	2.40



Σχήμα 3-4 Επίδραση των παραμέτρων εκτύπωσης στην πιστότητα μορφής: (a) μεμονωμένες παράμετροι (b) αλληλεπίδραση LTxFT (c) αλληλεπίδραση LTxPS (d) αλληλεπίδραση FTxPS.

Παρατηρώντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων LTxPS στο Σχήμα 3-4(c), προκύπτει πως ταυτόχρονη μείωση του πάχους στρώσης και της ταχύτητας εκτύπωσης προκαλεί αύξηση στην απόκλιση μεταξύ ακριβούς και ιδεατής γεωμετρίας, γεγονός που αντιτίθεται στα συμπεράσματα που βγαίνουν εξετάζοντας τις συγκεκριμένες παραμέτρους ξεχωριστά. Αυτή είναι μια κλασική περίπτωση σημαντικής αλληλεπίδρασης και συμβαίνει λόγω της πολύ μικρής ογκομετρικής παροχής που ο κινητήρας εξώθησης καλείται να εκτελέσει. Λόγω τραχύτητας υλικού, οι τριβές εντός του ακροφυσίου δεν υπερνικούνται, με συνέπεια η παροχή υλικού να είναι διακοπτόμενη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-5(a) [62]. Αντιθέτως, όταν συνδυάζεται υψηλή ταχύτητα με μεγάλο πάχος στρώσης, παρατηρείται υπο-εξώθηση (UE), όπως στο Σχήμα 2-26(b). Σχετικά με την αλληλεπίδραση FTxPS, στο Σχήμα 3-4(d), μικρή αύξηση της παροχής μέσω της διόρθωσης FT, βοηθάει την εξώθηση και βελτιώνει τη συγκόλληση μεταξύ των αποτιθέμενων σειρών υλικού. Αντιθέτως, μικρές αυξήσεις της παραμέτρου FT σε συνδυασμό με υψηλές ταχύτητες είναι πιθανό να επιφέρουν υπέρ-εξώθηση υλικού, παραμορφώνοντας τις επιφάνειες του δοκιμίου, όπως στο Σχήμα 3-5(b).



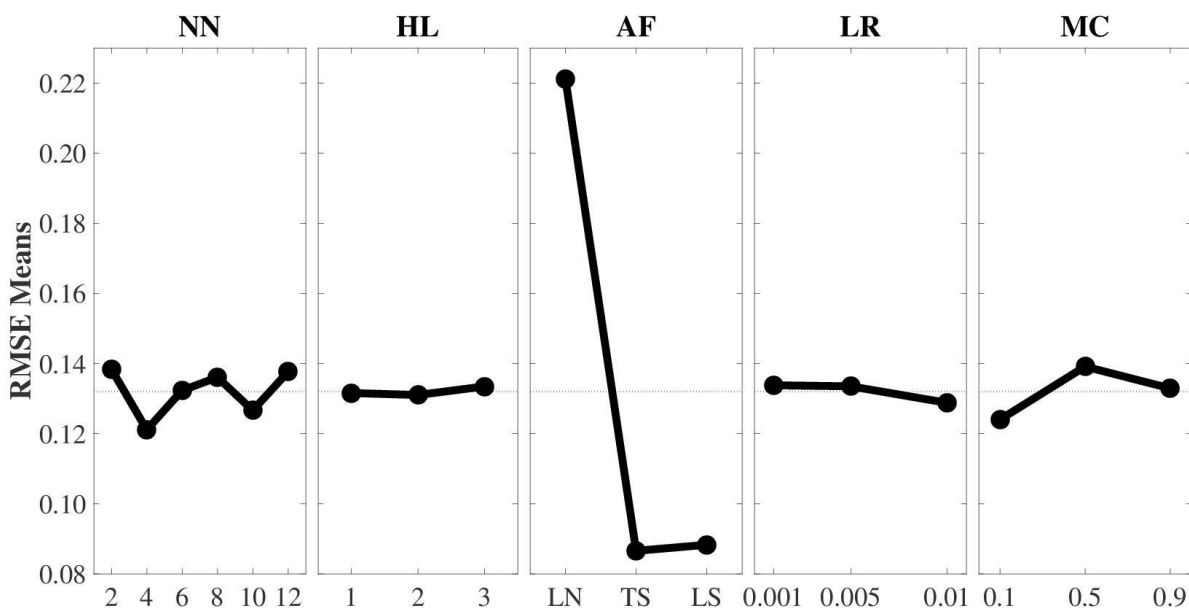
Σχήμα 3-5a) Μη επαρκής εξώθηση υλικού στην πλαϊνή όψη του δοκιμίου και b) υπέρ-εξώθηση υλικού που προκαλεί παραμόρφωση της επιφάνειας.

### 3.4.2 Ογκομετρική παροχή υλικού

Για να διερευνηθεί το κατώτατο και ανώτατο όριο παροχής  $Q_l$  και  $Q_h$ , σαν οριακή συνθήκη λαμβάνεται η τυπική απόκλιση κάτω του 0.1 mm, ή  $SNR_{cr}=20.0$  db. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα (Πίνακας 3-3), τα όρια που προκύπτουν είναι  $Q_l = 0.60$  mm<sup>3</sup>/s και  $Q_h = 6.40$  mm<sup>3</sup>/s, και αναφέρονται στο 9<sup>ο</sup> και 20<sup>ο</sup> πείραμα, αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, παρατηρείται πως δοκίμια τα οποία έχουν κατασκευαστεί εντός των προαναφερθέντων ορίων, παρουσιάζουν εμφανή ελαττώματα κατασκευής.

### 3.5 Βελτιστοποίηση πιστότητας μορφής και ογκομετρικής παροχής

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης μεταξύ των δύο κριτηρίων και για τιμές ενδιάμεσα των επιπέδων που εξετάστηκαν με τη μέθοδο Taguchi, χρησιμοποιείται ένα εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο. Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται σύμφωνα με τις βέλτιστες τιμές παραμετροποίησης (NN=4, HL=2, AF: Tan-Sigmoid, LR=0.01 και MC=0.1) όπως προκύπτουν από το αντίστοιχο πείραμα (Πίνακας 3-2) και έχουν περιγραφεί στην ενότητα 3.3. Η επίδραση του κάθε παράγοντα αποτυπώνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6 Ανάλυση μέσων για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού παραγόντων εκπαίδευσης του ANN.

Οι επιδόσεις σχετικά με την προβλεπτική ικανότητα του ANN δείχνουν μέσο σφάλμα πρόβλεψης ίσο με 6.57% και τυπική απόκλιση μεταξύ των σφαλμάτων των επιμέρους προβλέψεων ίση με 3.75 (Πίνακας 3-4).

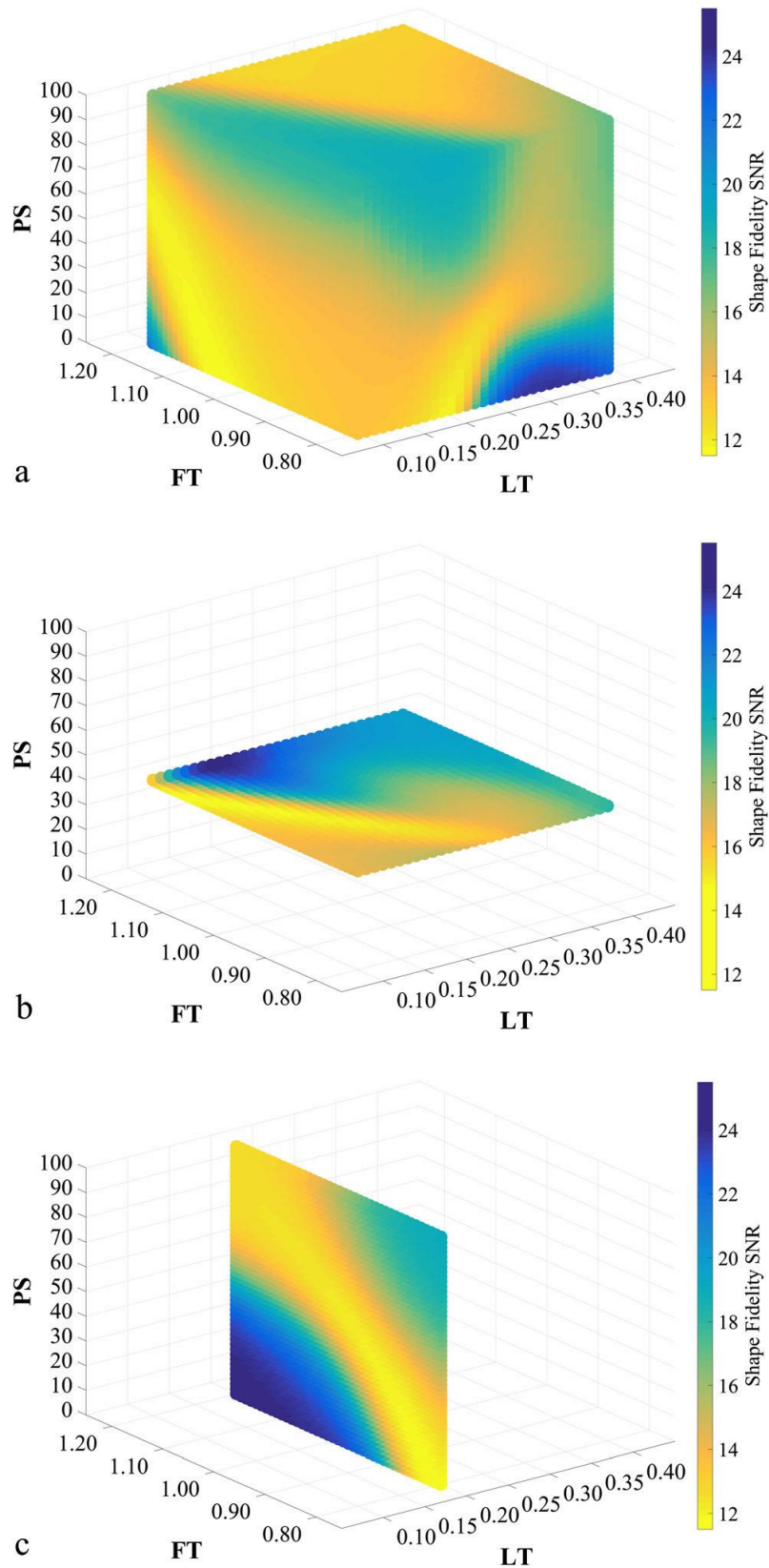
**Πίνακας 3-4 Αποτελέσματα εκπαίδευσης και σφάλματος πρόβλεψης του βέλτιστα εκπαιδευμένου ANN.**

<b>Αποτελέσματα εκπαίδευσης του ANN</b>		
	<i>R</i>	<i>RMSE</i>
Εκπαίδευση	0.963	6.829e-02
Αξιολόγηση	0.903	7.735e-02
Δοκιμή	0.958	8.593e-02
<b>Αποτελέσματα προβλεπτικής ικανότητας του ANN</b>		
<i>Κανονικοποιημένη τιμή πειράματος (SNR)</i>	<i>Κανονικοποιημένη τιμή πρόβλεψης του ANN (SNR)</i>	<i>Σφάλμα (%)</i>
0.8151 - (23.893)	0.7999 - (23.630)	1.90
0.5378 - (19.107)	0.4848 - (18.193)	10.93
0.8448 - (24.407)	0.7755 - (23.209 )	9.01
0.7949 - (23.544)	0.7773 - (23.240)	2.26
0.6413 - (20.893)	0.7029 - (21.957)	8.76
	<b>Μέσος όρος</b>	6.57
	<b>Τυπική απόκλιση</b>	3.75

Με βάση τα αποτελέσματα πρόβλεψης που προκύπτουν από το νευρωνικό δίκτυο, ένας χάρτης που περιγράφει την πιστότητα μορφής και την ογκομετρική παροχή των διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων εκτύπωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-7(a). Όπως προκύπτει, υπάρχει δυνατότητα μικρής αύξησης της ταχύτητας από 40 mm/s (αποτελέσματα πειράματος Taguchi) σε 43.6 mm/s, σύμφωνα με την πρόβλεψη του ANN και τηρώντας το όριο του  $SNR_{cr}=20.0$ . Η χρήση του χάρτη μπορεί να γίνει μέσω σταθεροποίησης μίας εκ των τριών παραμέτρων, όπως στο Σχήμα 3-7(b) για ταχύτητα  $PS=40$  και στο Σχήμα 3-7(c) για πάχος στρώσης  $LT=0.20$  mm. Ο χρωματισμός κάθε περιοχής φανερώνει την πρόβλεψη του ANN σε σχέση με την πιστότητα μορφής που θα προκύψει από το συνδυασμό των εκάστοτε παραμέτρων, ενώ μέσω των τελευταίων υπολογίζεται και η ογκομετρική παροχή υλικού σε κάθε περίπτωση.

Η εύρεση των νέων ορίων παροχής που ταυτόχρονα εξασφαλίζουν πιστότητα μορφής άνω του ορίου  $SNR_{cr}=20.0$ , πραγματοποιείται με ένα απλό πρόγραμμα αναζήτησης. Τα νέα όρια διαμορφώνονται ως εξής:  $Q_l = 0.60$  mm<sup>3</sup>/s and  $Q_h = 8.07$  mm<sup>3</sup>/s. Οι συνδυασμοί που επιτυγχάνουν τις οριακές τιμές παροχής είναι  $LT=0.10$  mm,  $FT=1.20$  and  $PS=0$  για το  $Q_l$ , και  $LT=0.37$  mm,  $FT=1.00$  and  $PS=56$  για το  $Q_h$ . Η τιμή  $Q_l$  αν και δεν βελτιώνει την παραγωγικότητα της κατεργασίας, διαμορφώνει ένα όριο λειτουργικότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή λεπτομερών χαρακτηριστικών (thin features) [63].





Σχήμα 3-7 Χάρτης πιστότητας μορφής για όλους του πιθανούς συνδυασμούς στο εύρος των εξεταζόμενων παραμέτρων εκτύπωσης b) τομή γραφήματος για σταθερή ταχύτητα PS=40 και c) τομή γραφήματος για σταθερό πάχος στρώσης LT=0.20mm.

### 3.6 Συζήτηση

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει τη χρήση της μεθόδου Taguchi για το σχεδιασμό πειραμάτων και την συνδυαστική χρήση ενός εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου για την εύρεση της βέλτιστης περιοχής λειτουργίας, με γνώμονα την παραγωγικότητα της κατεργασίας και την ταυτόχρονη εξασφάλιση εκτύπωσης χωρίς κατασκευαστικά ελαττώματα. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ένα εμπορικά διαθέσιμο σύστημα ΠΚ-ΕΥ και είναι επεκτάσιμη προς εφαρμογή σε άλλα συστήματα και υλικά εκτύπωσης.

Η χρήση του νευρωνικού δικτύου καλύπτει την αδυναμία της μεθόδου Taguchi να αναγνωρίσει βέλτιστες συνθήκες εκτύπωσης για επίπεδα πέραν των εξεταζόμενων. Το νευρωνικό δίκτυο έχει την ικανότητα να εντοπίζει σχέσεις μεταξύ παραμέτρων και απόκρισης που δεν είναι εύκολο να μοντελοποιηθούν αναλυτικά, μέσω της εκπαίδευσής του σε ήδη πεπραγμένα πειράματα. Αποδείχθηκε πως με τη χρήση του νευρωνικού δικτύου, η μέγιστη παροχή εντός του εύρους βέλτιστης λειτουργίας αυξήθηκε σε σχέση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης Taguchi.

Η συμπερίληψη της μελέτης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων κρίνεται εξαιρετικά πετυχημένη, δεδομένου εντοπίστηκε ότι μια σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ της ταχύτητας εκτύπωσης και του πάχους στρώσης, βοηθώντας στην καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία, ενώ αύξησε και την αξιοπιστία των υπολογισμένων ορίων βέλτιστης λειτουργίας. Η αλληλεπίδραση κατέδειξε πως ο παράγοντας της ογκομετρικής παροχής υλικού δεν επαρκεί για να διασφαλίσει την ποιότητα εκτύπωσης. Η ορθή επιλογή των επιμέρους παραμέτρων, σύμφωνα με την ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος Taguchi είναι το κλειδί στη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας και της ποιότητας εκτύπωσης.

Στους περιορισμούς της συγκεκριμένης μεθόδου περιλαμβάνεται η αδυναμία του νευρωνικού δικτύου να εντοπίσει τον τύπο του κατασκευαστικού σφάλματος. Επιπλέον, το πείραμα δεν περιλαμβάνει άλλες σημαντικές παραμέτρους, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία εξώθησης, η οποία αναμένεται να συνδιαμορφώσει την συμπεριφορά της εξώθησης του υλικού και ίσως μεταβάλει κάποια από τα αποτελέσματα. Η θερμοκρασία και άλλες παράμετροι μπορούν να εξεταστούν σε μελλοντική επέκταση της παρούσας μεθοδολογίας. Τέλος, περισσότεροι τύποι σφαλμάτων αλλά και αξιολόγηση επιπλέον γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως κυλινδρικότητα, ποιότητα αιωρημάτων και πορώδεις δομές μπορούν να εμπλουτίσουν σημαντικά τα συμπεράσματα και την κατανόηση των φαινομένων που συνδέονται με την προσθετική κατεργασία μέσω εξώθησης υλικού.

# 4

## *Βελτίωση της διαστασιακής ακρίβειας με προσαρμοστικές ρυθμίσεις*

### *4.1 Μεταβλητή εξώθηση υλικού*

Η ιδέα πίσω από την πρόταση που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, βασίζεται στις ρυθμίσεις εκτύπωσης που εισάγονται στο λογισμικό slicer από το χρήστη με σκοπό την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής διαστασιακής ακρίβειας.

Η διαστασιακή ακρίβεια έχει μελετηθεί στην βιβλιογραφία κυρίως πειραματικά, με στόχο τη συσχέτιση των επιλεγμένων παραμέτρων με το μετρούμενο αποτέλεσμα και την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού [64–66]. Ο σχεδιασμός πειραμάτων με τη μέθοδο response surface (RSM), συνδυασμένος με γενετικό αλγόριθμο, έχει χρησιμοποιηθεί στην αναφορά [67] με σκοπό την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της αντοχής σε εφελκυσμό και της ογκομετρικής συρρίκνωσης του δοκιμίου κατά την ψύξη του. Στις περιπτώσεις που η διαστασιακή ακρίβεια δεν λογίζεται σαν ογκομετρική συρρίκνωση συνολικά, το πρόβλημα της διαστασιακής ακρίβειας στην ΠΚ-ΕΥ ερευνάται σαν πολύ-παραγοντικό πρόβλημα στις τρεις διαφορετικές διευθύνσεις της κατασκευής. Σε αυτή τη λογική, οι Sood et al. [68] ακολούθησαν τη μέθοδο Taguchi για να μελετήσουν πέντε παραμέτρους σε τρία επίπεδα, εξάγοντας τρεις διαφορετικούς βέλτιστους συνδυασμούς για τις τρεις διευθύνσεις εκτύπωσης. Τελικά, για την εύρεση ενός ολικά βέλτιστου συνδυασμού, υιοθετήθηκε η μέθοδος Grey Relational Analysis. Για τον ίδιο σκοπό, οι Sahu et al. [69] συνέδεσαν βελτιστοποίηση με τεχνικές ασαφούς λογικής με ένα πείραμα Taguchi, ενώ συνδυασμός της πειραματικής μεθόδου response surface (RSM) και βελτιστοποίησης μέσω επιθυμητής συνάρτησης (desirability method) έχει καταγραφεί επίσης στην βιβλιογραφία [70]. Μοντέλα αναφοράς (benchmarks) εφοδιασμένα με μεγάλο αριθμό γεωμετρικών

χαρακτηριστικών, όπως λεπτά τοιχώματα, οπές και μη υποστηριζόμενα τμήματα έχουν υιοθετηθεί επίσης στη βιβλιογραφία ως ένα μέσο αξιολόγησης της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την ΠΚ-ΕΥ [71–74].

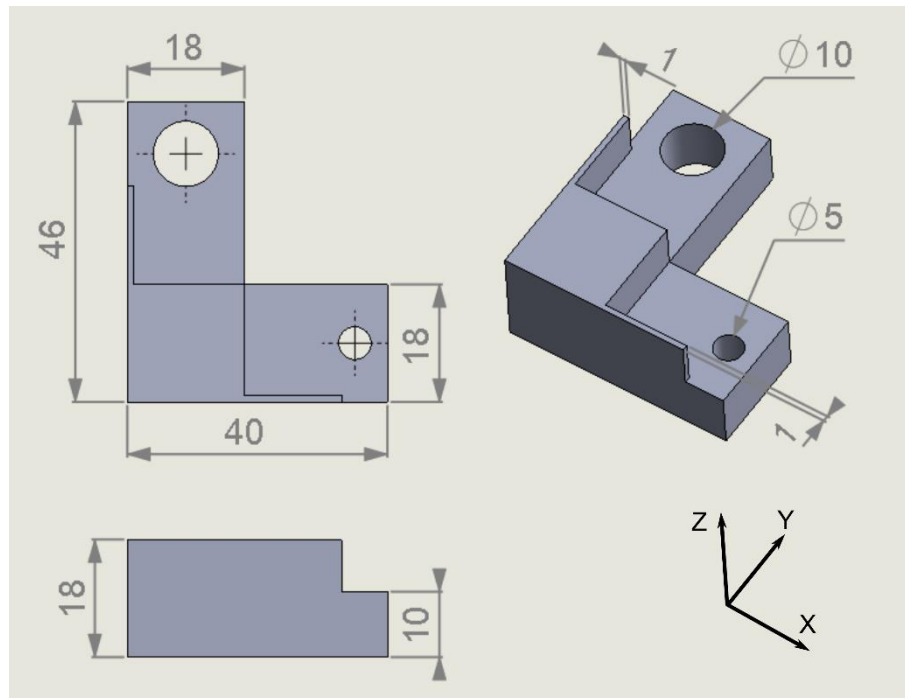
Γενικά, η πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση είναι καθιερωμένη μέθοδος όταν πρέπει να συνυπολογιστούν αντικρουόμενες παράμετροι για την βελτίωση ενός κριτηρίου. Παρόλα αυτά, όσο περισσότερες είναι οι παράμετροι, τόσο πιο συμβιβαστική θα είναι η βέλτιστη λύση [75]. Στην πλειοψηφία των διαθέσιμων slicer οι ρυθμίσεις ορίζονται καθολικά για όλη τη διαδικασία της εκτύπωσης. Μια περίπτωση αυξημένης ευελιξίας είναι η δυνατότητα του προσαρμοστικού τεμαχισμού (adaptive slicing) των μοντέλων [76] με σκοπό τη μείωση του πάχους στρώσης μόνο σε περιοχές όπου απαιτείται χαμηλή τραχύτητα επιφάνειας και την αύξησή του σε περιοχές χαμηλής κρισιμότητας, μειώνοντας έτσι την διάρκεια της εκτύπωσης. Για μεγαλύτερη ακόμη ευελιξία, οι συνθήκες εκτύπωσης μπορούν να ομαδοποιηθούν ανά στρώσεις.

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης προσαρμοστικών ρυθμίσεων, τόσο στην ίδια στρώση, όσο και κατά τη διάρκεια απόθεσης υλικού στην ίδια τροχιά. Η δυνατότητα μεταβαλλόμενης εξώθησης έχει προταθεί από τους Wang et al. [77], ως ένας τρόπος αντιμετώπισης ελαττωμάτων που συνδέονται με δυσανάλογη εξώθηση υλικού. Εδώ, η προτεινόμενη μέθοδος περιλαμβάνει ένα σχεδιασμένο πείραμα για τη μελέτη της διαστασιακής ακρίβειας κατά τις τρεις διευθύνσεις εκτύπωσης αλλά και κατά την κατασκευή δύο πρόσθετων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, οπών και λεπτών τοιχωμάτων. Μέσω του πειράματος αναπτύσσονται πέντε αναλυτικά μοντέλα συσχέτισης των παραμέτρων με την επιτευχθείσα διαστασιακή ακρίβεια. Ένας αλγόριθμος επεξεργασίας του G-code μεταβάλλει τις συνθήκες εκτύπωσης επιλεκτικά, χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες παραμέτρους που αφορούν στις τροχιές κατασκευής του κάθε γεωμετρικού χαρακτηριστικού. Η προτεινόμενη προσέγγιση συγκρίνεται εντέλει με την κλασική μέθοδο πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης, αξιολογώντας τη διαστασιακή ακρίβεια των δοκιμών σε κάθε περίπτωση.

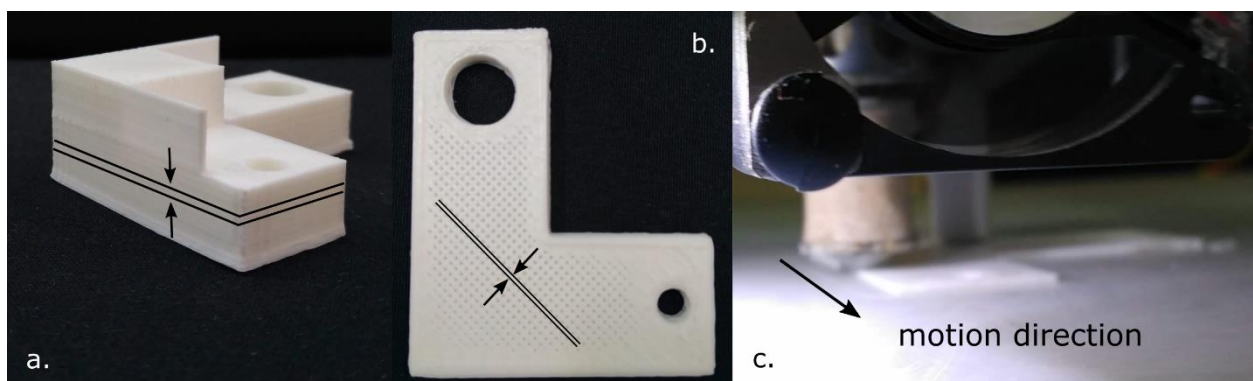
## **4.2 Μεθοδολογία**

Το δοκίμιο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-1 έχει σχεδιαστεί για την αξιολόγηση της διαστασιακής ακρίβειας. Ένα πείραμα κεντρικού σύνθετου σχεδιασμού (central composite design, CCD), που ανήκει στην ευρύτερη μεθοδολογία response surface (RSM) [78], έχει σχεδιαστεί για να συσχετίσει τρεις παραμέτρους, πάχος στρώσης (LT), διόρθωση ροής (FT) και ταχύτητα εκτύπωση (PS), με τη διαστασιακή ακρίβεια που επιτυγχάνεται στα πέντε κριτήρια, την ακρίβεια στις τρεις διευθύνσεις εκτύπωσης (X), (Y), (Z) και στα δύο επιπλέον γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τις οπές (H) και τα λεπτά τοιχώματα (TW). Η λειτουργία των τριών

παραμέτρων αποτυπώνεται στο Σχήμα 4-2 και πιο αναλυτικά στην ενότητα 2.1. Η συσχέτιση γίνεται μέσω μοντέλων παλινδρόμησης (regression models) πρώτου και δευτέρου βαθμού. Οι παράμετροι που έχουν επιλεχθεί είναι οι ίδιες που επιλέχθηκαν και κατά τη διερεύνηση των ορίων βέλτιστης λειτουργίας που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, εκτός της παραμέτρου του προσανατολισμού, η οποία αξιολογήθηκε ως αμελητέας συνεισφοράς στο τελικό αποτέλεσμα. Τα όρια στα επίπεδα των παραμέτρων εμπίπτουν στα όρια βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος ΠΚ-ΕΥ, ούτως ώστε να έχει νόημα η αξιολόγηση της διαστασιακής τους ακρίβειας, εμποδίζοντας την εμφάνιση σημαντικών ελαττωμάτων κατασκευής (Πίνακας 4-1).



Σχήμα 4-1 Σχέδιο δοκιμίου για την αξιολόγηση της διαστασιακής ακρίβειας.



Σχήμα 4-2 Παράμετροι εκτύπωσης που εξετάζονται: a) πάχος στρώσης b) διόρθωση ροής για μεταβολή του πλάτους της αποτιθέμενης λωρίδας υλικού και c) ταχύτητα εκτύπωσης.

**Πίνακας 4-1 Παράμετροι και επίπεδα που συμπεριλαμβάνονται στο σχεδιασμένο πείραμα CCD.**

Επίπεδα	Κωδικοποίηση	LT (mm)	FT	PS (mm/s)
Κάτω αξονικό σημείο	-a	0.10	1.00	14.80
Κάτω παραγοντικό σημείο	-1	0.14	1.04	20.20
Κεντρικό σημείο	0	0.20	1.10	28.00
Άνω παραγοντικό σημείο	+1	0.26	1.16	35.80
Άνω αξονικό σημείο	+a	0.30	1.20	41.20

Η διαστασιακή ακρίβεια μετρήθηκε ως η μέση τιμή πολλαπλών μετρήσεων στα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά, σύμφωνα με το Σχήμα 4-1:

- 40 mm και 18 mm μήκος για την αξιολόγηση κατά τη διεύθυνση X,
- 46 mm και 18 mm μήκος για την αξιολόγηση κατά τη διεύθυνση Y,
- 10 mm και 18 mm μήκος για την αξιολόγηση κατά τη διεύθυνση Z,
- Φ10 και Φ5 διάμετρος για την αξιολόγηση των οπών (H),
- 1 mm πάχος λεπτού τοιχώματος (TW).

Τα δοκίμια κατασκευάζεται από πολύ-λακτικό οξύ (PLA), σε σύστημα εξώθησης υλικού 3D Systems™ CubeX και η προετοιμασία εκτύπωσης των δοκιμίων γίνεται στο λογισμικό Kisslicer™. Οι παραμετρικές συνθήκες που αξιολογούνται σε αυτή τη μελέτη ενσωματώνονται στο αρχείο του G-code μέσω προγράμματος επεξεργασίας κειμένου, συνταγμένο σε γλώσσα VBA. Οι περιοχές του κώδικα συσχετίζονται με το γεωμετρικό χαρακτηριστικό που αντιστοιχούν μέσω του προγράμματος οπτικοποίησης και επεξεργασίας τροχιάς NC-Plot™.

Για το σχεδιασμό του πειράματος επιλέγεται ένα πείραμα CCD 20 επαναλήψεων συνολικά: 8 σημεία που αντικατοπτρίζουν ένα πλήρως παραγοντικό πείραμα (full factorial)  $2^3$ , εφοδιασμένο με 6 αξονικά σημεία (axial points) και 6 κεντρικά σημεία (center points). Τα επίπεδα των παραμέτρων ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούν τη περιστρεψιμότητα (rotatability) του CCD πειράματος, η οποία εγγυάται την σταθερή απόκλιση των προβλεπτικών μοντέλων σε όλο το εύρος των παραμέτρων, και υπολογίζεται στη εξίσωση (4-1).

$$a = \sqrt[4]{f} \quad (4-1)$$

όπου το f είναι ο συνολικός αριθμός των παραγοντικών σημείων. Ο Πίνακας 4-2 στη συνέχεια, συνοψίζει το σχεδιασμένο CCD πείραμα.

**Πίνακας 4-2** Πείραμα κεντρικού σύνθετου σχεδιασμού (CCD) για την αξιολόγηση της διαστασιακής ακρίβειας.

Σειρά εκτέλεσης	LT (mm)	FT	PS (mm/s)	LT	FT	NS	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	TW (mm)	H (mm)
1	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.130	-0.039	-0.050	0.068	-0.027
2	0.10	1.10	28.00	-a	0	0	-0.137	-0.020	-0.122	0.053	-0.070
3	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.143	-0.016	-0.224	0.053	-0.074
4	0.14	1.16	35.85	-1	1	1	-0.023	0.074	-0.054	0.135	-0.192
5	0.20	1.10	14.80	0	0	-a	-0.151	-0.076	-0.200	0.045	-0.090
6	0.30	1.10	28.00	a	0	0	-0.123	-0.064	-0.284	0.210	-0.100
7	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.146	-0.031	-0.298	0.048	-0.035
8	0.26	1.16	20.15	1	1	-1	-0.084	-0.021	-0.344	0.128	-0.089
9	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.106	-0.057	-0.192	0.108	-0.079
10	0.14	1.04	35.85	-1	-1	1	-0.080	-0.004	-0.090	0.125	-0.035
11	0.26	1.04	20.15	1	-1	-1	-0.181	-0.080	-0.374	0.015	-0.045
12	0.14	1.16	20.15	-1	1	-1	-0.134	-0.010	-0.072	0.055	-0.029
13	0.20	1.00	28.00	0	-a	0	-0.153	-0.089	-0.306	0.003	-0.046
14	0.14	1.04	20.15	-1	-1	-1	-0.209	-0.113	-0.260	-0.030	-0.045
15	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.114	-0.021	-0.216	0.090	-0.038
16	0.20	1.10	41.20	0	0	a	0.034	0.136	-0.044	0.217	-0.305
17	0.20	1.20	28.00	0	a	0	0.041	0.127	-0.086	0.245	-0.242
18	0.26	1.16	35.85	1	1	1	-0.001	0.104	-0.108	0.297	-0.328
19	0.20	1.10	28.00	0	0	0	-0.064	-0.060	-0.214	0.108	-0.035
20	0.26	1.04	35.85	1	-1	1	-0.184	-0.026	-0.204	0.110	-0.137

Η καθιερωμένη μέθοδος συνάρτησης επιθυμίας (desirability function), όπως έχει εισαχθεί από τους Derringer and Suich [79], χρησιμοποιείται ως η μέθοδος πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης που θα συγκριθεί με την προτεινόμενη μέθοδο προσαρμοστικών συνθηκών εκτόπωσης. Συνοπτικά, η συνάρτηση επιθυμίας υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε κριτήριο  $i$ , όπως στην εξίσωση (4-2). Στην προκειμένη περίπτωση το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η μηδενική απόκλιση από την ονομαστική διάσταση του κάθε γεωμετρικού χαρακτηριστικού.

$$d_i = \begin{cases} 0, & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{w_i}, & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{w_i}, & T \leq y \leq U \\ 0, & y > U \end{cases} \quad (4-2)$$

όπου  $y$  είναι η προβλεπόμενη απόκριση σύμφωνα με τα μοντέλα παλινδρόμησης,  $T$  είναι η τιμή στόχος,  $w_i$  είναι η βαρύτητα που δίνει ο χρήστης σε κάθε κριτήριο και τα  $L$  και  $U$  είναι τα κατώτατα και ανώτατα όρια αποδεκτής απόκρισης όπως ορίζονται από το χρήστη. Το αποτέλεσμα της συνάρτησης είναι μία τιμή μεταξύ 0 και 1, όπου το 0 δηλώνει μη-αποδεκτή απόκριση έξω από τα όρια  $L$  και  $U$ , ενώ το 1 αντικατοπτρίζει απόλυτη ταύτιση με το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τέλος, το γινόμενο των επιμέρους συναρτήσεων  $d_i$  με  $\{i=1, \dots, m\}$  και  $m$  το σύνολο των αποκρίσεων, στην εξίσωση (4-3) δίνει το ολικό μέτρο  $D$ , το οποίο υποδεικνύει τον καλύτερο συνδυασμό ρυθμίσεων, όσο πιο κοντά βρίσκεται στην τιμή 1.

$$D = \left( \prod_{i=1}^m d_i \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4-3)$$

## 4.3 Αποτελέσματα

### 4.3.1 Αξιολόγηση μοντέλων παλινδρόμησης

Πέντε ξεχωριστά πολυώνυμα πρώτου και δευτέρου βαθμού, εξισώσεις (4-4)-(4-8), δημιουργήθηκαν ώστε να περιγράψουν και να προβλέψουν τη διαστασιακή ακρίβεια κάθε γεωμετρικού χαρακτηριστικού, σε συνάρτηση με ένα σετ παραμετρικών ρυθμίσεων που εμπίπτει στα όρια των εξεταζόμενων επιπέδων.

$$X = -0.114 + 0.054FT + 0.046PS + 0.015FT^2 - 0.02LT \times PS \quad (4-4)$$

$$Y = -0.041 + 0.054FT + 0.053PS + 0.017FT^2 + 0.021PS^2 \quad (4-5)$$

$$Z = -0.187 - 0.061LT + 0.053FT + 0.063PS \quad (4-6)$$

$$TW = 0.104 + 0.039LT + 0.059FT + 0.058PS + 0.026LT \times FT \quad (4-7)$$



$$H = -0.054 - 0.026LT - 0.052FT - 0.062PS - 0.026FT^2 - 0.045PS^2 - 0.012LT \times FT - 0.022LT \times PS - 0.04FT \times PS \quad (4-8)$$

Ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζει τους δείκτες αξιολόγησης των μοντέλων παλινδρόμησης. Καταρχάς η στατιστική σημαντικότητα όλων των μοντέλων επαληθεύεται στην στήλη Model significance με P-Value < 0.050. Η στήλη lack-of-fit υποδηλώνει πως δεν υπάρχει σημαντική καμπυλότητα (P-Value > 0.050), η οποία θα χρειαζόταν πολυώνυμο υψηλότερου βαθμού ώστε να περιγραφεί επαρκώς. Το σφάλμα (pure error) για όλα τα μοντέλα είναι κάτω του 5%, με εξαίρεση το μοντέλο της διεύθυνσης Z. Η ύπαρξη μιας ακραίας παρατήρησης (outlier) [80], ευθύνεται για την μειωμένη απόδοση του μοντέλου, παρόλα αυτά η συγκεκριμένη παρατήρηση αποτελεί έγκυρο αποτέλεσμα και συνεπώς λαμβάνεται υπόψιν. Ο συντελεστής παλινδρόμησης R<sup>2</sup> παρουσιάζεται σχετικά χαμηλός για το μοντέλο Z, αποδεκτός για το μοντέλο X και σε υψηλά επίπεδα για τα υπόλοιπα μοντέλα. Ο τροποποιημένος συντελεστής παλινδρόμησης R<sup>2</sup>-adjusted δηλώνει την επάρκεια περιγραφής του φαινομένου μετά την αφαίρεση των μη στατιστικά σημαντικών όρων από το μοντέλο και για αυτό το λόγο είναι πάντα μικρότεροι του R<sup>2</sup> αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν την ικανότητα πρόβλεψης νέων παρατηρήσεων, όπως υποδηλώνεται από τη μετρική R<sup>2</sup>-prediction. Τέλος, ο μη στατιστικά σημαντικός (P-Value > 0.050) δείκτης normality, υποδηλώνει την κανονική κατανομή των αποκλίσεων μεταξύ της πρόβλεψης και της πραγματικής τιμής των παρατηρήσεων.

**Πίνακας 4-3 Αξιολόγηση των μοντέλων παλινδρόμησης.**

Model	Model significance (P-Value)	Lack of fit (P-Value)	Pure Error (%)	R <sup>2</sup> (%)	R <sup>2</sup> adjusted (%)	R <sup>2</sup> prediction (%)	Normality (P-Value)
X	0.000	0.326	4.85	80.03	75.00	60.78	0.952
Y	0.000	0.306	1.74	92.55	90.57	81.87	0.340
Z	0.000	0.901	16.23	69.29	63.53	55.57	0.584
TW	0.000	0.257	2.64	87.59	84.28	78.60	0.315
H	0.000	0.158	1.52	93.75	89.21	74.36	0.854

#### 4.3.2 Πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση

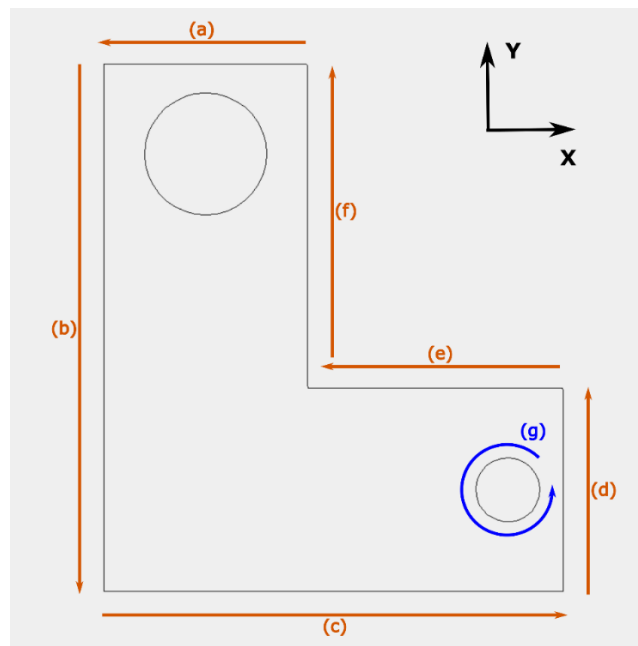
Σύμφωνα με τη μέθοδο desirability, οι βέλτιστες ρυθμίσεις που προκύπτουν είναι LT=0.10 mm, FT=1.12 και PS=30.40 mm/s. Η ποιότητα της λύσης αξιολογείται με D=0.834 σύμφωνα με την εξίσωση (4-3) και τις επιμέρους τιμές d<sub>i</sub> για τα πέντε κριτήρια. Για την αξιολόγηση της μεθόδου, δύο δοκίμια κατασκευάζονται υπό τις βέλτιστες συνθήκες όπως προκύπτουν από τη μέθοδο desirability (Πίνακας 4-4).

**Πίνακας 4-4 Προβλεπόμενη και ακριβής απόκλιση των δοκιμών επαλήθευσης που κατασκευάζονται σύμφωνα με την πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση και σύμφωνα με τις προσαρμοσμένες ρυθμίσεις.**

Κριτήριο	Πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση					Βελτιστοποίηση με προσαρμοστικές ρυθμίσεις				
	Τιμή Πρόβλεψης (mm)	Πραγματική τιμή (mm)	LT (mm)	FT	PS (mm/s)	Τιμή Πρόβλεψης (mm)	Πραγματική τιμή (mm)	LT (mm)	FT	PS (mm/s)
X	-0.070	-0.123	0.10	1.12	30.40	-0.004	-0.079	0.1	1.155	32.72
Y	-0.002	-0.011	0.10	1.12	30.40	0.000	0.021	0.1	1.10	32.83
Z	-0.048	-0.026	0.10	1.12	30.40	-0.001	-0.024	0.1	1.152	32.82
TW	0.062	0.090	0.10	1.12	30.40	0.001	0.049	0.1	1.04	24.99
H	-0.040	-0.019	0.10	1.12	30.40	-0.001	-0.009	0.1	1.06	28.02

### 4.3.3 Βελτιστοποίηση με προσαρμοστικές ρυθμίσεις

Από την ανάλυση πειραμάτων γίνεται φανερό πως διαφορετικοί συνδυασμοί παραμετρικών ρυθμίσεων επιφέρουν διαφορετική ακρίβεια για κάθε κριτήριο. Η βελτιστοποίηση του κάθε κριτηρίου ξεχωριστά, αναμένεται να αυξήσει τη συνολική διαστασιακή ακρίβεια του δοκιμίου. Ο συμβιβασμός μεταξύ των παραμέτρων κατά την πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση επιχειρήθηκε να ξεπεραστεί μέσω προσαρμοσμένων ρυθμίσεων στη διάρκεια της κατασκευής με τροποποίηση στα αντίστοιχα σημεία του G-code. Η τροποποίηση των ρυθμίσεων αφορά μόνο στις παραμέτρους FT και PS για λόγους αποφυγής σφαλμάτων κατά την κατασκευή. Ουσιαστικά οι δύο παράμετροι μεταβάλλουν το ρυθμό εξώθησης υλικού και την ταχύτητα της κεφαλής του συστήματος ΠΚ-ΕΥ. Για την τροποποίηση του G-code αναπτύσσεται κώδικας σε γλώσσα VBA, ο οποίος εντοπίζει τις τροχιές, εντολές G01, που αφορούν την κατασκευή των επιμέρους χαρακτηριστικών (a) έως (g) (Σχήμα 4-3 και Πίνακας 4-5), και στη συνέχεια τροποποιεί τις εντολές “M108 Sx” και “Fy”, όπου x είναι οι στροφές του κινητήρα εξώθησης εκφρασμένες σε RPM\*10, και y είναι η ταχύτητα της κεφαλής, εκφρασμένη σε mm/min. Για την αξιολόγηση της προσαρμοστικής μεθόδου βελτιστοποίησης, δύο δοκίμια κατασκευάζονται με ρυθμίσεις που μεταβάλλονται όχι μόνο εντός της ίδιας στρώσης αλλά και επιτόπου στη διάρκεια απόθεσης μιας συνεχόμενης τροχιάς. Ο Πίνακας 4-4 παραθέτει τα αποτελέσματα διαστασιακής ακρίβειας για την προτεινόμενη μέθοδο σε σύγκριση με αυτά της πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4-3 Περιοχές δοκιμίου (a) – (g) όπως αναφέρονται στις εντολές G-code (Πίνακας 4-5).

Πίνακας 4-5 Ενδεικτικό απόσπασμά G-code με τις εντοπισμένες τροχιές που αναφέρονται στα σημεία (a) – (g) στο Σχήμα 4-3.

Multiple objective optimisation	Feature adaptive optimisation
<i>Outer contour</i>	
M108 S9.6 M101 G1 X-51.26 Y-46.33 Z1.19 F1968.9 G1 X-51.36 Y-46.25 Z1.19 F1968.9 G1 X-68.74 Y-46.25 Z1.19 F1968.9 (a)  G1 X-68.74 Y-91.33 Z1.19 F1968.9 (b)  ... G1 X-51.26 Y-46.41 Z1.19 F1968.9 (f) M103	M108 S9.6 M101 G1 X-51.26 Y-46.33 Z1.19 F1963.3 G1 X-51.36 Y-46.25 Z1.19 F1963.3 G1 X-68.74 Y-46.25 Z1.19 F1963.3 (a) M108 S9.2 G1 X-68.74 Y-91.33 Z1.19 F1969.9 (b) M108 S9.6 ... G1 X-51.26 Y-46.41 Z1.19 F1969.9 (f) M103
<i>5-mm diameter hole</i>	
M108 S9.6 M101 G1 X-31.97 Y-81.14 Z1.19 F1968.9 (g) start G1 X-32.53 Y-80.66 Z1.19 F1968.9 G1 X-33.17 Y-80.36 Z1.19 F1968.9 ... G1 X-31.61 Y-81.63 Z1.19 F1968.9 G1 X-31.97 Y-81.14 Z1.19 F1968.9 (g) end M103	M108 S7.5 M101 G1 X-31.97 Y-81.14 Z1.19 F1681.3 (g) start G1 X-32.53 Y-80.66 Z1.19 F1681.3 G1 X-33.17 Y-80.36 Z1.19 F1681.3 ... G1 X-31.61 Y-81.63 Z1.19 F1681.3 G1 X-31.97 Y-81.14 Z1.19 F1681.3 (g) end M103

#### **4.4 Κατασκευή με προσαρμοστικές ρυθμίσεις**

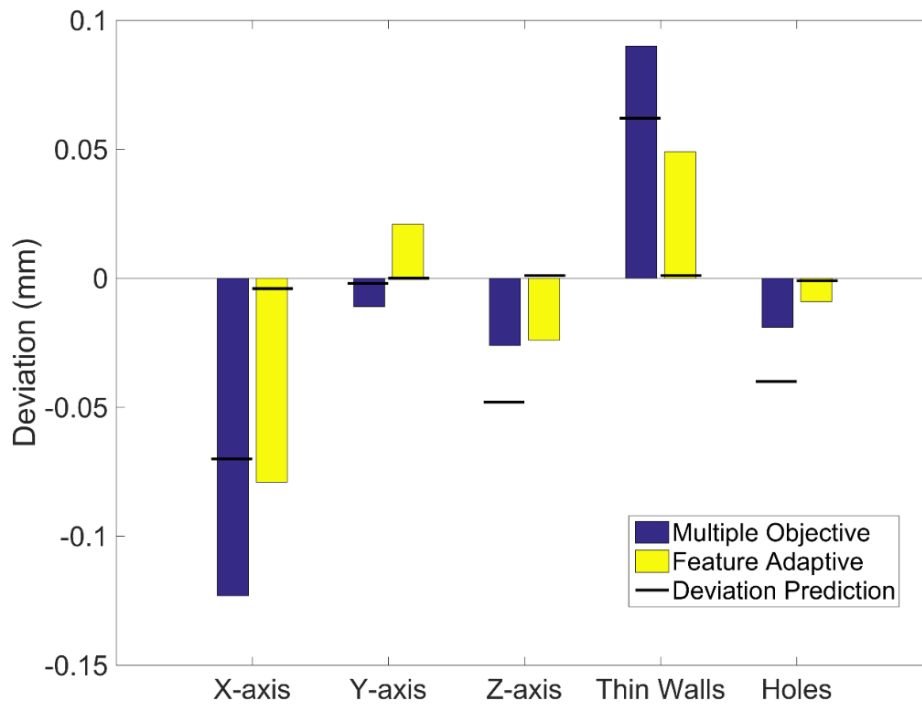
Ο βασικός στόχος του κεφαλαίου ήταν να παρουσιάσει την ιδέα των προσαρμοστικών ρυθμίσεων εκτύπωσης, να εξετάσει την δυνατότητα εφαρμογής της σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ και να συγκρίνει τα αποτελέσματα με την κατασκευή δοκιμίων υπό τις ολικά βέλτιστες παραμετρικές ρυθμίσεις σύμφωνα με πέντε κριτήρια.

Στο Σχήμα 4-4 παρουσιάζεται η διαστασιακή ακρίβεια που επιτυγχάνεται σε κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό μέσω πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης και μέσω προσαρμοστικών ρυθμίσεων. Επίσης, το μαύρο ευθύγραμμο τμήμα που αντιστοιχεί σε κάθε ράβδο του γραφήματος, αντικατοπτρίζει την πρόβλεψη του μοντέλου για την διαστασιακή ακρίβεια σε κάθε περίπτωση.

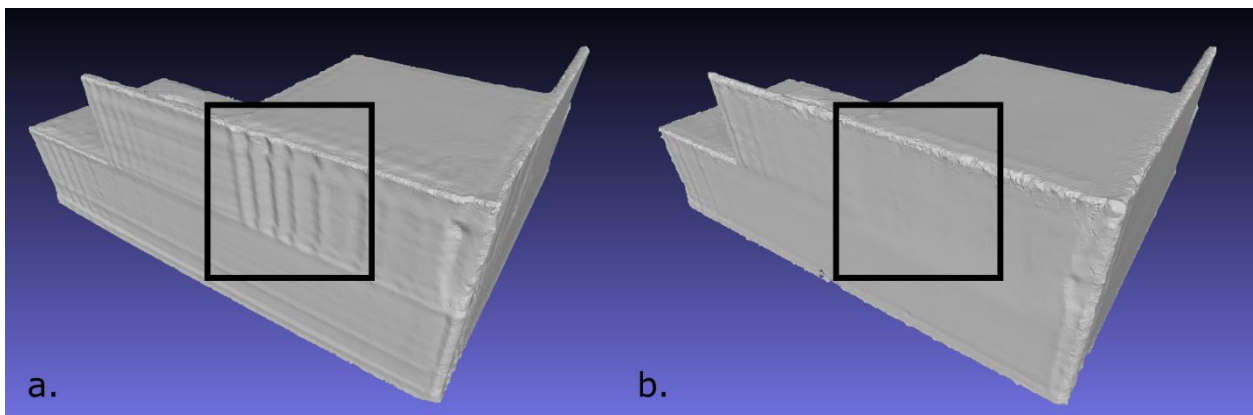
Για τέσσερα από τα πέντε γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η διαστασιακή ακρίβεια μέσω προσαρμοστικών ρυθμίσεων είναι βελτιωμένη, με πιο έντονη τη διαφορά κατά τη διεύθυνση X και κατά την κατασκευή λεπτών τοιχωμάτων (TW). Η διαστασιακή ακρίβεια στη διεύθυνση Y είναι το μοναδικό κριτήριο που επιδεινώθηκε ελαφρώς, χωρίς όμως να παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από την ονομαστική διάσταση και στις δύο περιπτώσεις.

Η ικανότητα πρόβλεψης των μοντέλων κρίνεται ικανοποιητική σχετικά με την τάση της προβλεπόμενης τιμής, παρόλα αυτά δεν επαρκεί για να διορθώσει την ακρίβεια σε τάξη μεγέθους μικρότερη του 0,1 mm, κυρίως λόγω των εγγενών δυνατοτήτων του συστήματος και δευτερευόντως λόγω της ικανότητας πρόβλεψης των μοντέλων παλινδρόμησης. Σε κάθε περίπτωση, η δυνατότητα εφαρμογής προσαρμοστικών ρυθμίσεων επαληθεύτηκε και τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την καλή προοπτική της μεθόδου. Οι προσαρμοστικές ρυθμίσεις εξετάζουν και την περίπτωση μεταβολής της ταχύτητας εκτύπωσης ή/και του ρυθμού εξώθησης στην διάρκεια της ίδιας τροχιάς. Η ενσωμάτωσή τους βοήθησε στη βελτίωση της διαστασιακής ακρίβειας του δοκιμίου, επηρεάζοντας όμως τη σταθερότητα της εξώθησης και τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, όπως αποτυπώνεται με τη μορφή κυματισμών στο Σχήμα 4-5(a).

Τέλος, ο εντοπισμός και η τροποποίηση των εντολών G-code σε στάδιο μετά-επεξεργασίας κρίνεται επιτυχημένος για γεωμετρικά χαρακτηριστικά με εύκολα προβλέψιμη τροχιά στις διαδοχικές στρώσεις. Σε περίπτωση χαρακτηριστικών ελεύθερης γεωμετρίας είναι απαραίτητη η διερεύνηση μιας πιο προηγμένης προσέγγισης.



Σχήμα 4-4 Απόκλιση μεταξύ πραγματικής και ονομαστικής διάστασης για πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση (μωβ) και για προσαρμοσμένες ρυθμίσεις ανά γεωμετρικό χαρακτηριστικό (κίτρινο).



Σχήμα 4-5 (a) Δημιουργία κυματισμών στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια εκτύπωσης του λεπτού τοιχώματος λόγω στιγμιαίας μεταβολής της ταχύτητας εκτύπωσης και (b) μορφολογία της ίδιας επιφάνειας κατασκευασμένης με σταθερές συνθήκες.

## 4.5 Συζήτηση

Στο παρόν κεφάλαιο, πέντε μοντέλα παλινδρόμησης, που βασίζονται στις παρατηρήσεις ενός σχεδιασμένου πειράματος CCD, περιγράφουν της απόκριση τριών παραμέτρων εκτύπωσης σε σχέση με τη διαστασιακή ακρίβεια πέντε γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Βασικός στόχος είναι η βελτίωση της διαστασιακής ακρίβειας μέσω μια νέας προσαρμοστικής προσέγγισης, που

περιλαμβάνει μεταβλητές ρυθμίσεις εκτύπωσης στη ίδια στρώση αλλά και κατά τη διάρκεια της ίδιας τροχιάς. Για πρώτη φορά, η μέθοδος αξιολογείται ως προς τη δυνατότητα εφαρμογής της αλλά και ως προς την αποδοτικότητά της σε σχέση με την καθιερωμένη πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση, μέσω της μεθόδου desirability. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου υπερτερούν έναντι της μεθόδου desirability, λόγω της μεγαλύτερης ευελιξίας στο εντοπισμό των βέλτιστων ρυθμίσεων για κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό. Η εφαρμογή των μεταβλητών ρυθμίσεων γίνεται μέσω αυτοματοποιημένης τροποποίησης των σχετικών εντολών G-code σε μεταγενέστερο στάδιο. Η απλότητα των υπό εξέταση γεωμετρικών χαρακτηριστικών ευνοούν την εφαρμογή της μεθόδου, ενώ για πιο σύνθετες γεωμετρίες θα πρέπει να εξετασθεί η ενσωμάτωσή της μεθόδου στο στάδιο προετοιμασίας της κατεργασίας στο λογισμικό slicer. Η επίδραση των στιγμιαίων αλλαγών ταχύτητας εκτύπωσης και εξώθησης υλικού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ως ένας περιοριστικός παράγοντας έναντι της ποιότητας κατασκευής ή και άλλων ελαττωμάτων κατά την κατεργασία.

# 5

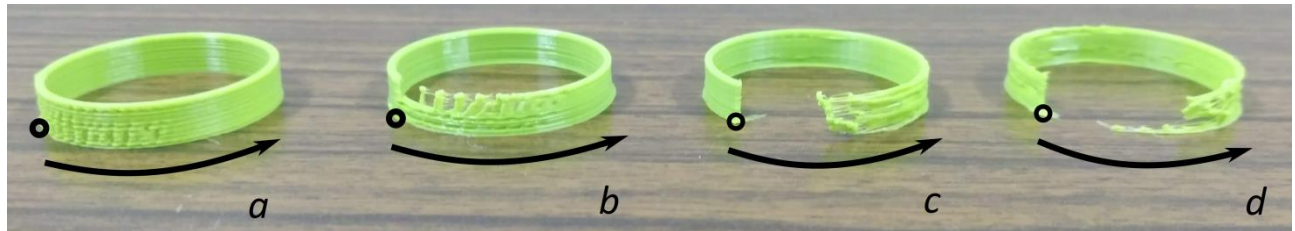
## *Απόθεση υλικού σε υψηλότερες ταχύτητες*

### *5.1 Περιγραφή της απόθεσης υλικού*

Η υπέρ-εξώθηση [52] και υπό-εξώθηση [81] υλικού στην ΠΚ-ΕΥ υποβαθμίζει τη διαστασιακή ακρίβεια των παραγόμενων κομματιών, αλλά και την ομοιογένεια της δομής. Στην προσθετική κατασκευή με εξώθηση, ο απώτερος στόχος είναι η απόθεση σειρών υλικού με ομοιόμορφο πλάτος και σύμφωνα με τις σχεδιασμένες διαστάσεις, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ποιότητα συσσωμάτωσης του υλικού. Από τη φύση της κατεργασίας, η μεταβολή του ρυθμού εξώθησης είναι συχνό φαινόμενο, λόγω της επιλεκτικής απόθεσης υλικού σύμφωνα με τη σχεδιασμένη τροχιά [82]. Επιπλέον, η σταθερότητα της εξώθησης επηρεάζεται και από τα στάδια επιτάχυνσης/επιβράδυνσης της κεφαλής του συστήματος ΠΚ-ΕΥ, κατά τη μετατόπισή του στο οριζόντιο επίπεδο. Όπως έχει περιγραφεί στη βιβλιογραφία, η υψηλότερου ρυθμού εξώθηση παρουσιάζει προκλήσεις ως προς την σταθερότητα της ροής και των σφαλμάτων κατά την απόθεση [13, 83, 84]. Η υπέρ-εξώθηση υλικού στις γωνίες αλλαγής προσανατολισμού τις κεφαλής έχει μοντελοποιηθεί από τους Comminal et al. [85], προτείνοντας μια γεωμετρική λύση υπολογισμού της τροχιάς, ώστε να αντισταθμιστεί το πρόβλημα της υπέρ-εξώθησης. Το ίδιο πρόβλημα αντιμετωπίζεται από τους Ertay et al. [61] μέσω βέλτιστου συγχρονισμού της εφαπτομενικής ταχύτητας της κεφαλής και της εξώθησης κατά την αλλαγή προσανατολισμού της τροχιάς. Η συσχέτιση της μη-επαρκούς θερμοκρασίας εξώθησης με το φαινόμενο της υπό-εξώθησης έχει πραγματοποιηθεί στην αναφορά [86]. Η μεταβολές στη θερμοκρασία του υλικού κατά την προ-εξώθηση, την αναρρόφηση του νήματος, έχουν μετρηθεί μέσω θερμικής κάμερας από τους Pollard et al. [82].

Συχνά, κατά την έναρξη της μετατόπισης της κεφαλής για την εκτύπωση, παρατηρείται καθυστέρηση στην εκκίνηση εξώθησης, με αποτέλεσμα την μη πλήρωση του αρχικού τμήματος

της τροχιάς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1. Κατ' αντιστοιχία, στο τέλος της τροχιάς είναι δυνατή η απόθεση περίσσειας υλικού, λόγω συσσωρευμένης πίεσης εντός του ακροφυσίου σε συνδυασμό με την αδράνεια της κεφαλής κατά το στιγμιαίο σταμάτημά της. Επιπλέον, κατά την αλλαγή κατεύθυνσης της κεφαλής, είναι πιθανή η μη-ελεγχόμενη απόθεση υλικού με μορφή ινών (φαινόμενο stringing) στο εσωτερικό της δομής.



Σχήμα 5-1 Περιοχές με έλλειψη υλικού στο αρχικό στάδιο εξώθησης της για ζητούμενη ογκομετρική παροχή (a) 0.59 mm<sup>3</sup>/s (b) 1.30 mm<sup>3</sup>/s (c) 4.00 mm<sup>3</sup>/s (d) 7.00 mm<sup>3</sup>/s. Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση της μετατόπισης και η τελεία το σημείο εκκίνησης της τροχιάς.

Τα λογισμικά slicer χρησιμοποιούν τις παραμέτρους προ-εξώθησης (priming) και αναρρόφησης (retraction) για την επιδιόρθωση των παραπάνω συμβάντων. Στην προ-εξώθηση, ρυθμιζόμενο μήκος νήματος εξωθείται υπό ρυθμιζόμενη ταχύτητα, πριν την εκκίνηση της τροχιάς, ενώ κατά την αναρρόφηση, οι στροφές του κινητήρα εξώθησης αντιστρέφονται ώστε να υπάρξει υπό-πίεση εντός του ακροφυσίου και εντούτοις έγκαιρο σταμάτημα της εξώθησης. Οι Jin et al. [87], προτείνουν μια μέθοδο σχεδιασμού της τροχιάς με κριτήριο τη διατήρηση όσο το δυνατόν περισσότερης συνεχόμενης τροχιάς η οποία μειώνει την ανάγκη αναρρόφησης και προ-εξώθησης υλικού στη διάρκεια της κατεργασίας. Ο βέλτιστος συγχρονισμός μεταξύ εξώθησης και ταχύτητας στο αρχικό και το τελικό σημείο της τροχιάς παρουσιάζεται από τους Li et al. [88] για την εξώθηση κεραμικού υλικού. Οι περιορισμοί που περιγράφηκαν νωρίτερα αντιμετωπίζονται με συντηρητική ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης, γεγονός που υποβαθμίζει την ταχύτητα και το κόστος της κατεργασίας. Συνεπώς, η ανάγκη αύξησης της παραγωγικότητας, με ταυτόχρονη διασφάλιση της ποιότητας του κατασκευαζόμενου τεμαχίου, παραμένει επίκαιρη.

## 5.2 Αξιολόγηση της απόθεσης υλικού

Προβλήματα στη διάρκεια της κατεργασίας, όπως η στιγμιαία διακοπή της εξώθησης λόγω έμφραξης του ακροφυσίου, αντιμετωπίζονται συχνά με εποπτικές λύσεις, όπως η λήψη ακουστικών σημάτων [89, 90] και σημάτων από αισθητήρες δόνησης [91], τα οποία εκπαιδεύουν νευρωνικά δίκτυα για τον εντοπισμό των σφαλμάτων κατεργασίας μέσω τεχνητής νοημοσύνης. Τεχνικές ανάλυσης εικόνας [92] ή αποτύπωσης της γεωμετρίας σε πραγματικό χρόνο με τεχνικές αντίστροφης μηχανικής [93] έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για τον εντοπισμό



σφαλμάτων στη διάρκεια της κατεργασίας. Η προβλεπτική προσέγγιση για τον εντοπισμό των σφαλμάτων πριν την γέννηση του είναι τρέχοντος η μέθοδος που συγκεντρώνει υψηλό ενδιαφέρον αλλά και προκλήσεις για την υλοποίησή της [94, 95], ενώ αναγκαία κρίνεται και η δυνατότητα επέμβασης στην κατεργασία σε πραγματικό χρόνο με συστήματα κλειστού βρόχου και γρήγορης απόκρισης [81].

Για να αξιολογηθεί η ποιότητα της απόθεσης υλικού, το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στην απόθεση μιας ευθύγραμμης λωρίδας. Η αξιολόγηση της ποιότητας γίνεται βάσει δύο κριτηρίων: της διακοπής απόθεση υλικού (material deposition discontinuity, MDD) και της απόκλισης πλάτους λωρίδας υλικού (strand width deviation, SWD). Οκτώ παράμετροι εκτύπωσης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [85, 96–98] επιλέγονται για να συσχετίσουν τη ρύθμισή του με τα δυο κριτήρια και είναι οι εξής:

1. Μήκος προ-εξώθησης και αναρρόφησης (Priming and Retraction Length, LPR) σε mm.
2. Ταχύτητα προ-εξώθησης και αναρρόφησης (Priming and Retraction Speed, LPR) σε mm/s.
3. Δυναμική προ-εξώθηση (Dynamic Priming, DP), είναι το ποσοστό του μήκους του νήματος το οποίο εξακολουθεί να εξωθείται ενώ έχει ξεκινήσει η μετατόπιση της κεφαλής σύμφωνα με την τροχιά
4. Στατική αναρρόφηση (Static Retraction, SR) είναι το ποσοστό του μήκους του νήματος το οποίο αναρροφάται για όσο η κεφαλή είναι σταματημένη πάνω από το τελικό σημείο της τροχιάς.
5. Απόσταση από το τέλος (Distance to End, DtE) σε mm, είναι η απόσταση πριν το τελικό σημείο της τροχιάς όπου ξεκινάει η μείωση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα εξώθησης.
6. Ρυθμός επιβράδυνσης εξώθησης (Extrusion Slow-down Rate, ESR) είναι το ποσοστό της μείωσης της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα εξώθησης πριν το τέλος της τροχιάς.
7. Ταχύτητα εκτύπωσης (Printing Speed, PS) σε mm/s.
8. Θερμοκρασίας (Temperature, T) σε °C, είναι η θερμοκρασία εξώθησης του υλικού.

Ένα κλασματικό παραγοντικό πείραμα 16 δοκιμών και 2 δοκιμών των κεντρικών σημείων έχει σχεδιαστεί για την αξιόπιστη συσχέτιση των παραμέτρων με τα κριτήρια MDD και SWD [99]. Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τα επίπεδα στα οποία εξετάζονται οι παράμετροι.

Πίνακας 5-1 Παράμετροι και επίπεδα που περιλαμβάνονται στο κλασματικό παραγοντικό πείραμα.

Παράμετροι	Κωδικοποίηση	LPR (mm)	SPR (mm/s)	DP (%)	SR (%)	DtE (mm)	ESR (%)	PS (mm/s)	T (°C)
Κάτω παραγοντικό σημείο	-1	1.0	5.0	0	0	2	2	40	195
Κεντρικό σημείο	0	4.8	9.7	33	33	11	11	65	210
Άνω παραγοντικό σημείο	1	8.6	14.4	66	66	20	20	90	225

Τα πειράματα εκτελούνται στο σύστημα ΠΚ-EY 3D Systems™ CubeX, εφοδιασμένο με ακροφύσιο διαμέτρου  $d_n=0.50$  mm. Η προετοιμασία γίνεται και ο G-code για το κάθε δοκίμιο εξάγεται στο λογισμικό Kisslicer™. Οι παράμετροι LPR, SPR, PS και T είναι βασικές στην προετοιμασία της ΠΚ-EY. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι πιο εξειδικευμένες και δεν υλοποιούνται άμεσα από τα περισσότερα λογισμικά slicer, αλλά με εύκολο τρόπο εισάγονται μέσω ελάχιστης τροποποίησης του αρχικού G-code, όπως στην περίπτωση των DtE και ESR. Τα δοκίμια έχουν τη μορφή 13 παράλληλων σειρών υλικού από μαύρο θερμοπλαστικό νήμα PLA, αποτιθέμενων σε μία βάση ίδιου υλικού αλλά λευκού χρωματισμού για λόγους μέτρησης που εξηγούνται στη συνέχεια. Το πάχος στρώσης για όλες τις σειρές είναι  $LT=0.24$  mm, ώστε να υπάρχει κοινή βάση σύγκρισης και της αντίστοιχης ογκομετρικής παροχής σε κάθε περίπτωση σύμφωνα με την εξίσωση (5-1)

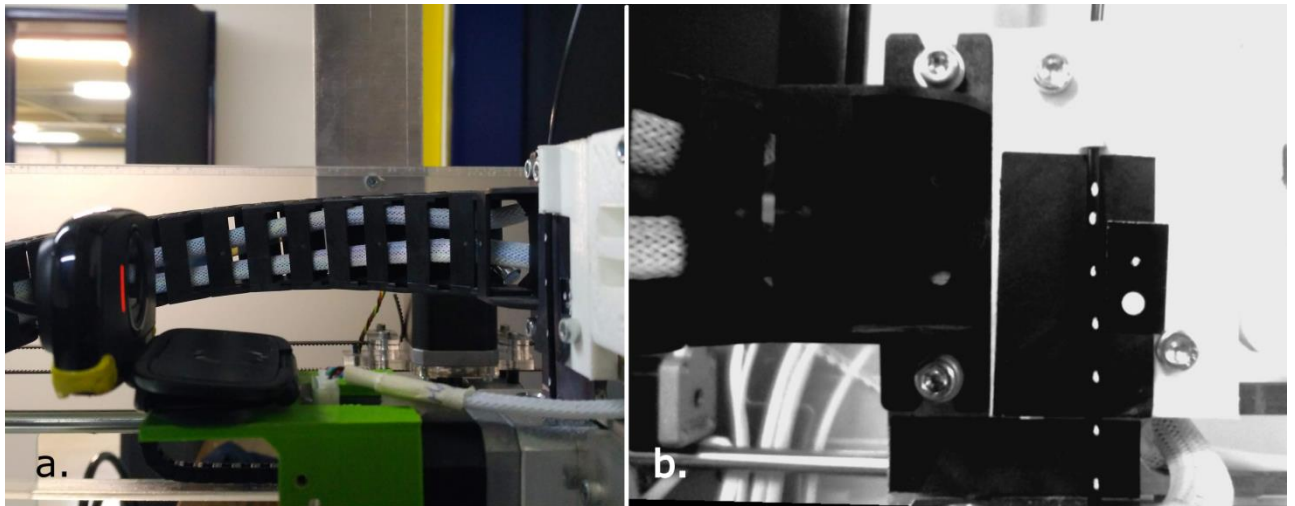
$$Q = LT \cdot d_n \cdot PS \quad (5-1)$$

Η απόδοση τιμής στα κριτήρια MDD και SWD γίνεται με ανάλυση εικόνας, λαμβανόμενη από υψηλής ευκρίνειας φωτογραφική μηχανή DSLR Canon™ EOS. Η μετρητική διάταξη (Σχήμα 5-2) εξασφαλίζει παραλληλία και κοινή εστίαση μεταξύ των μετρούμενων δοκιμίων. Η μέτρηση των εικόνων γίνεται στο λογισμικό ανοιχτού κώδικα Fiji-ImageJ [100], ξεχωρίζοντας την αποτιθέμενη λωρίδα μαύρου χρώματος από το λευκό φόντο και στη συνέχεια εκτελώντας μέτρηση των μεγεθών ενδιαφέροντος

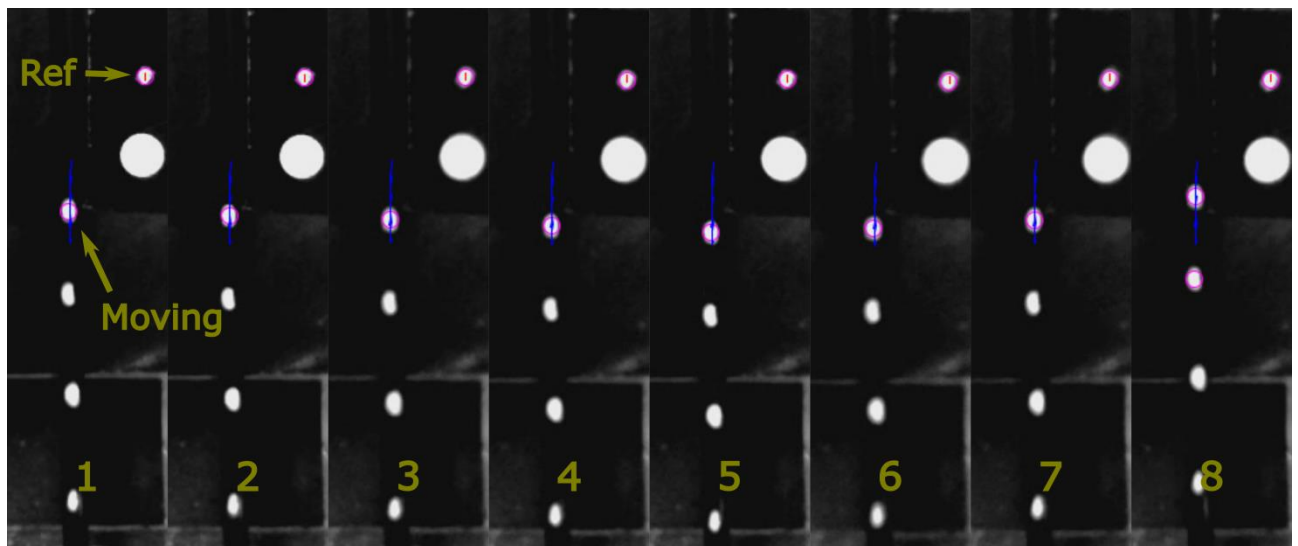


**Σχήμα 5-2** Διάταξη μέτρησης των δοκιμίων που περιλαμβάνει πλατφόρμα μεταβλητού ύψους και γωνίας περιστροφής, φωτογραφική μηχανή και τρίποδο στήριξης.

Για τη συσχέτιση της εξώθησης με την απόθεση, εφαρμόζεται βιντεοσκόπηση της κίνησης του νήματος όπως προκύπτει από την περιστροφή του κινητήρα εξώθησης, με χρήση κάμερας υψηλής ευκρίνειας στα 20 fps. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτή η κατανόηση και μέτρηση των κινήσεων στη διάρκεια της προ-εξώθησης και αναρρόφησης του υλικού, των παραμέτρων DP, SR και ESR, φαινομένων που λαμβάνουν χώρα για μερικά ms, αλλά και εντοπισμό στιγμιαίας έμφραξης στο ακροφύσιο. Η διάταξη της βιντεοσκόπησης φαίνεται στο Σχήμα 5-3(a). Τα λευκά σημάδια πάνω στο νήμα, Σχήμα 5-3(b), βοηθούν στην ιχνηλάτηση της κίνησης κατά την εξώθηση. Η ιχνηλάτηση πραγματοποιείται με αυτόματο τρόπο μέσω single particle tracking αλγορίθμου που υλοποιείται μέσω του κώδικα TrackMate [101], ως πρόσθετου στο πρόγραμμα Fiji ImageJ. Σε κάθε γνωστή χρονική στιγμή (καρέ) υπολογίζεται αυτόματα η θέση του λευκού σημαδιού όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4. Επιπλέον, κατά τη βιντεοσκόπηση γίνεται αντιληπτό εάν η κεφαλή κινείται στο οριζόντιο επίπεδο ή παραμένει σταθερή και επομένως μπορεί να γίνει συσχέτιση μεταξύ εξώθησης και κίνησης της κεφαλής βάσει της τροχιάς.



Σχήμα 5-3(a) Τοποθέτηση κάμερα στην κεφαλή του συστήματος εξώθησης υλικού και (b) σημάδια στο νήμα για την ιχνηλάτηση της κίνησης του νήματος κατά την εξώθηση (πλάνο μέσω κάμερας).



Σχήμα 5-4 Αυτόματος υπολογισμός της θέσης του λευκού σημαδιού στην εικόνα και προφίλ της κίνησης του νήματος (μπλε διαδρομή) κατά την εξώθηση.

### 5.3 Αποτελέσματα

Τα πειράματα εκτελούνται και αξιολογούνται σύμφωνα με τα κριτήρια της διακοπής απόθεσης υλικού (MDD) και της απόκλισης πλάτους λωρίδας υλικού (SWD). Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τους συνδυασμούς των παραμετρικών ρυθμίσεων και τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Τα δοκίμια που προκύπτουν σε κάθε πείραμα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-5. Δύο μοντέλα παλινδρόμησης δημιουργούνται βάσει των πειραματικών παρατηρήσεων για κάθε κριτήριο, όπως παρουσιάζονται στις εξισώσεις (5-2) και (5-3). Τέλος ο Πίνακας 5-3 παρουσιάζει τις μετρικές αξιολόγησης αξιοπιστίας των μοντέλων.

**Πίνακας 5-2 Κλασματικό παραγοντικό πείραμα αξιολόγησης της διακοπής απόθεσης υλικού (MDD) και της απόκλισης πλάτους λωρίδας υλικού (SWD).**

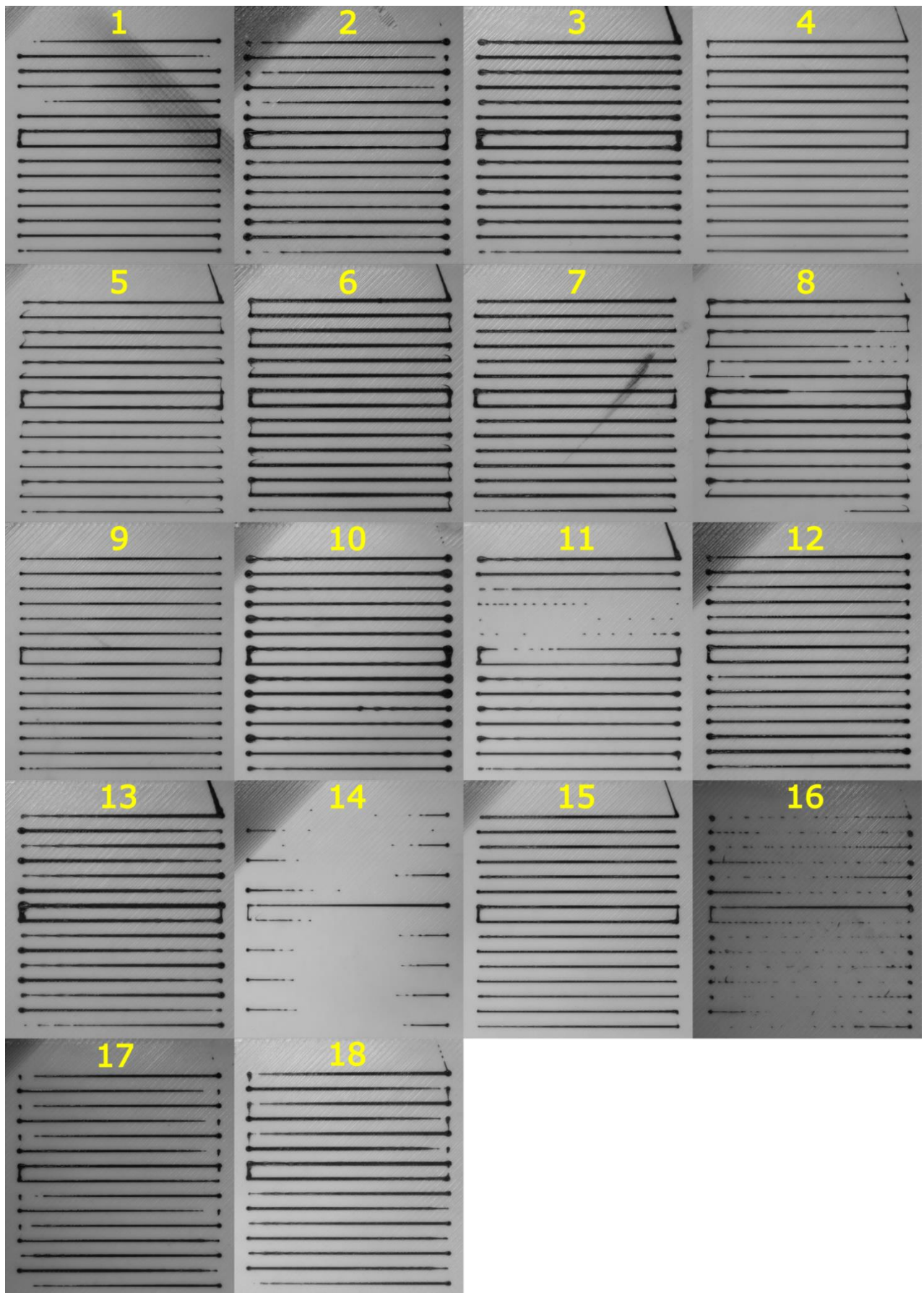
Πείραμα	LPR (mm)	SPR (mm/s)	DP (%)	SR (%)	DtE (mm)	ESR (%)	PS (mm/s)	T (°C)	MDD (mm <sup>2</sup> )	SWD (mm)	Q (mm <sup>3</sup> /s)
1	1.0	5.0	0	0	2	2	40	195	2.2900	0.272	4.8
2	8.6	5.0	0	0	2	20	90	225	5.9879	0.518	10.8
3	1.0	14.4	0	0	20	2	90	225	2.1187	0.434	10.8
4	8.6	14.4	0	0	20	20	40	195	0.0003	0.208	4.8
5	1.0	5.0	66	0	20	20	90	195	1.1969	0.212	10.8
6	8.6	5.0	66	0	20	2	40	225	0.0006	0.580	4.8
7	1.0	14.4	66	0	2	20	40	225	0.0015	0.097	4.8
8	8.6	14.4	66	0	2	2	90	195	8.1362	0.468	10.8
9	1.0	5.0	0	66	20	20	40	225	2.0671	0.199	4.8
10	8.6	5.0	0	66	20	2	90	195	1.0979	0.599	10.8
11	1.0	14.4	0	66	2	20	90	195	11.7936	0.306	10.8
12	8.6	14.4	0	66	2	2	40	225	1.2653	0.378	4.8
13	1.0	5.0	66	66	2	2	90	225	3.0734	0.427	10.8
14	8.6	5.0	66	66	2	20	40	195	10.5624	0.535	4.8
15	1.0	14.4	66	66	20	2	40	195	0.0022	0.103	4.8
16	8.6	14.4	66	66	20	20	90	225	15.2716	0.880	10.8
17	4.8	9.7	33	33	11	11	65	210	6.5425	0.356	7.8
18	4.8	9.7	33	33	11	11	65	210	1.7800	0.292	7.8

$$MDD = 4.066 + 1.236 \cdot LPR + 0.77 \cdot SPR + 0.727 \cdot DP + 1.588 \cdot SR - 1.335 \cdot DtE + 1.806 \cdot ESR + 2.03 \cdot PS - 0.331 \cdot T + 2.476 \cdot LPR \times DP + 0.672 \cdot LPR \times T + 0.859 \cdot PS \times T \quad (5-2)$$

$$SWD = 0.381 + 0.132 \cdot LPR - 0.029 \cdot SPR + 0.024 \cdot DP + 0.04 \cdot SR + 0.092 \cdot PS + 0.051 \cdot T + 0.071 \cdot LPR \times DP + 0.033 \cdot LPR \times DtE + 0.034 \cdot LPR \times ESR + 0.038 \cdot DP \times ESR \quad (5-3)$$

**Πίνακας 5-3 Αξιολόγηση των μοντέλων παλινδρόμησης.**

Μοντέλο	R <sup>2</sup> (%)	Pure Error (%)	(LOF) (p-value)	Curvature (p-value)	Normality (p-value)
MDD	96.19	3.13	0.988	0.935	0.113
SWD	96.34	0.31	0.554	0.158	0.900

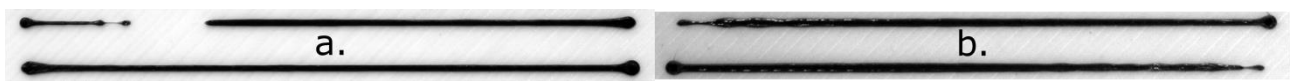


Σχήμα 5-5 Δοκίμια που προκύπτουν από την εκτέλεση του κλασματικού παραγοντικού πειράματος.



## 5.4 Διακοπή απόθεσης υλικού (MDD)

Η ασυνέχεια υλικού οφείλεται σε υπό-εξώθηση υλικού η οποία οφείλεται είτε σε στιγμιαία αδυναμία του υλικού να υπερβεί την πτώση πίεσης εντός του ακροφυσίου, είτε σε μη έγκαιρη εκκίνηση της εξώθησης σε σχέση με την αρχή της κίνησης της κεφαλής στο οριζόντιο επίπεδο. Το πρώτο φαινόμενο συνοδεύεται από στιγμιαία ολίσθηση του οδοντωτού τροχού του κινητήρα εξώθησης στο νήμα και παρουσιάζει κενά σε τυχαία σημεία της τροχιάς Σχήμα 5-6(a). Το χαρακτηριστικό σφάλμα στο δεύτερο φαινόμενο είναι η μη πλήρωση του αρχικού σημείου της τροχιάς Σχήμα 5-6(b).



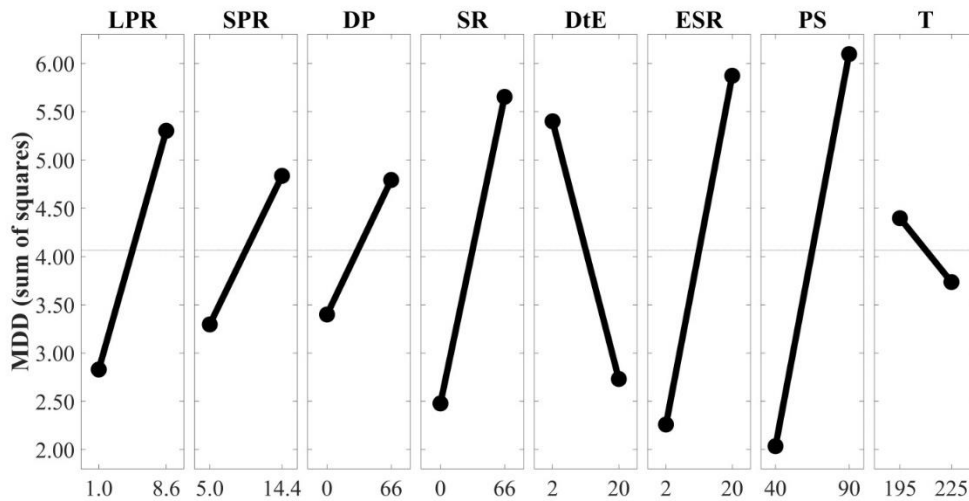
Σχήμα 5-6 Ασυνέχεια απόθεσης υλικού λόγω (a) αδυναμίας υπέρβασης της πτώσης πίεσης στο ακροφύσιο και (b) μη έγκαιρης εκκίνησης της εξώθησης κατά την κίνηση της κεφαλής στην τροχιά.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος (Πίνακας 5-2), οι τιμές του MDD που βρίσκονται κοντά στο 0 φανερώνουν ομαλή εξώθηση χωρίς ασυνέχειες. Οι τιμές MDD είναι το άθροισμα τετραγώνων των αποκλίσεων του πραγματικού από το ονομαστικό μήκος για το σύνολο των 13 αποτιθέμενων σειρών υλικού.

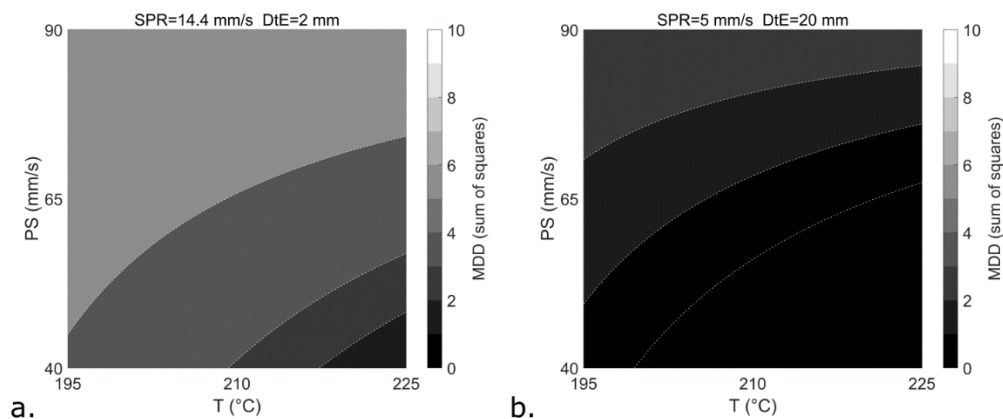
Η αδυναμία υπέρβασης της πτώσης πίεσης συνήθως συνδέεται με τις υψηλότερες ταχύτητες εκτύπωσης (PS) και τις χαμηλότερες θερμοκρασίες εξώθησης (T), όπως φαίνεται στα πειράματα 8 και 11 στο Σχήμα 5-5. Παρόλα αυτά, με τις ίδιες συνθήκες PS και T, το φαινόμενο της στιγμιαίας υπό-εξώθησης δεν παρατηρείται στο πείραμα 5, λόγω της μειωμένης ταχύτητας προ-εξώθησης (SPR) και της αυξημένης απόστασης πριν το τέλος της τροχιάς (DtE) κατά την οποία η ταχύτητα εξώθησης του κινητήρα μειώνεται. Η αύξηση του DtE μειώνει τη ροή θερμότητας προς το περιβάλλον λόγω της εξώθησης, μειώνοντας συνεπώς την τραχύτητα του υλικού και επαληθεύεται και στα γραφήματα επίδρασης των μεμονωμένων παραμέτρων στο Σχήμα 5-7. Στην ίδια λογική και με βάση τα γραφήματα αλληλεπίδρασης PS-T στο Σχήμα 5-8, η μειωμένη ταχύτητα προ-εξώθησης δίνει περισσότερο χρόνο στο στερεό νήμα που εισέρχεται στο ακροφύσιο να θερμανθεί και να έλθει σε θερμοκρασία εξώθησης [51].

Ο δεύτερος μηχανισμός που προκαλεί ασυνέχεια υλικού αιτιολογείται ως καθυστερημένη έναρξη εξώθησης στην αρχή της τροχιάς. Στο Σχήμα 5-5, τα δοκίμια 8, 14 και 16 παρουσιάζουν έντονα το εν λόγω φαινόμενο. Βασική αιτία είναι το μεγάλο μήκος προ-εξώθησης και αναρρόφησης (LPR) που επιλέγεται σε αυτές τις περιπτώσεις. Το μεγάλο μήκος αναρρόφησης,

αναγκάζει το νήμα να αποτραβηχτεί από τη θερμή περιοχή του ακροφυσίου ακριβώς μετά τον τερματισμό της τροχιάς, αυξάνοντας της θερμικές απώλειες του υλικού.



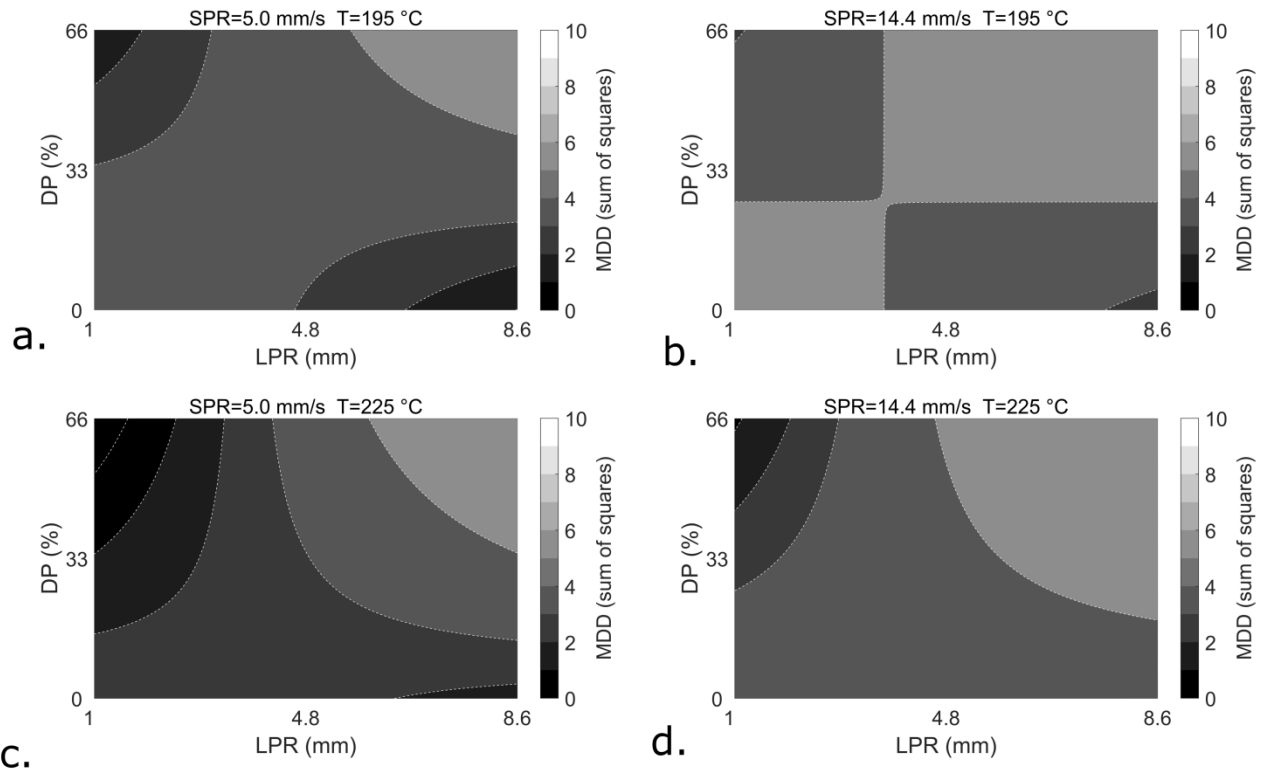
Σχήμα 5-7 Επίδραση των μεμονωμένων παραμέτρων στην ασυνέχεια υλικού.



Σχήμα 5-8 (a) Φαινόμενο διακοπής εξώθησης υλικού με υψηλή SPR και χαμηλή DtE (b) σε αντίθεση με ομαλή εξώθηση που παρατηρείται για μειωμένη SPR και αυξημένη DtE.

Το ίδιο τμήμα του νήματος, θα πρέπει να προ-εξωθηθεί πριν την έναρξη της ακριβώς επόμενης τροχιάς, γεγονός που προκαλεί καθυστέρηση στην έγκαιρη αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού, ειδικά όταν η προ-εξώθηση γίνεται με υψηλή ταχύτητα (SPR). Επίσης, το υψηλό ποσοστό δυναμικής προ-εξώθησης (DP) δυσχεραίνει περισσότερο την ομαλή εξώθηση στην αρχή της τροχιάς. Σύμφωνα με τα γραφήματα αλληλεπίδρασης LPR-DP στο Σχήμα 5-9, ο βέλτιστος συνδυασμός των δύο παραμέτρων είναι είτε μειωμένο μήκος LPR με υψηλό ποσοστό DP, είτε μεγάλο μήκος LPR με χαμηλό ποσοστό DP. Επιπλέον, αυξάνοντας την ταχύτητα SPR και μειώνοντας τη θερμοκρασία εξώθησης (T), Σχήμα 5-9(b) και (d), περιορίζει τις (σκουρόχρωμες) περιοχές μη-διακοπτόμενης απόθεσης υλικού.





Σχήμα 5-9 Αλληλεπίδραση παραμέτρων LPR και DP στο κριτήριο MDD για (a) χαμηλό SPR και χαμηλό T, (b) υψηλό SPR και χαμηλό T, (c) χαμηλό SPR και υψηλό T, (d) υψηλό SPR και υψηλό T.

### 5.5 Απόκλιση πλάτους λωρίδας υλικού (SWD)

Η μέτρηση του μέσου πλάτους λωρίδας υλικού γίνεται μέσω της μέτρησης της εικόνας στο Fiji ImageJ σύμφωνα με την εξίσωση (5-4):

$$\bar{W} = A/L \quad (5-4)$$

όπου,

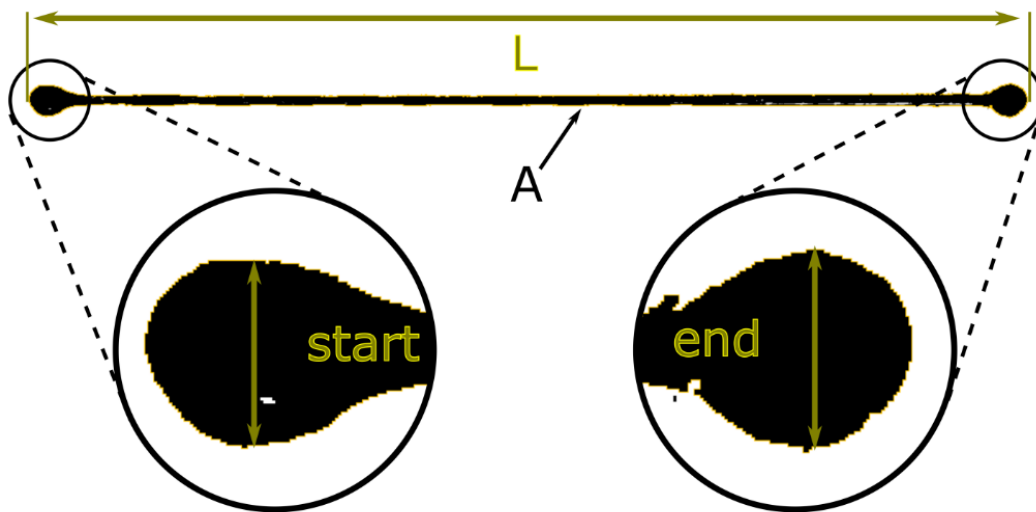
A: το εμβαδό της λωρίδας

L: το μήκος της λωρίδας.

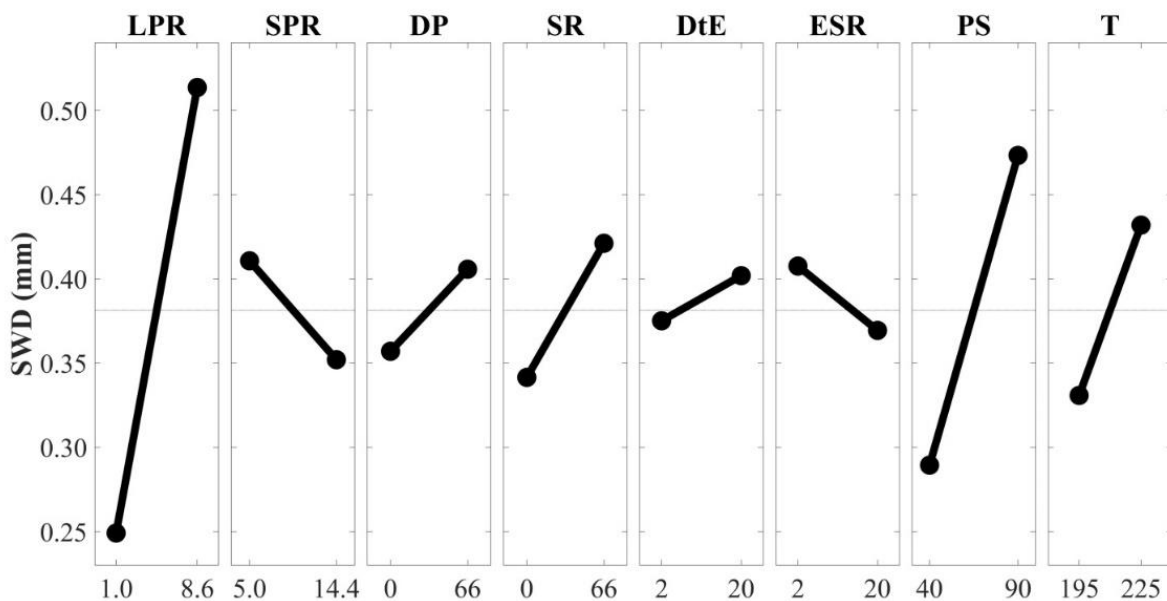
Σύμφωνα με το Σχήμα 5-10, η απόκλιση πλάτους λωρίδας (SWD) προκύπτει από την τυπική απόκλιση του μέσου πλάτους  $\bar{W}$  και των τοπικών μετρήσεων στην αρχή και στο τέλος της αποτιθέμενης λωρίδας υλικού.

Όσο περισσότερος είναι ο χρόνος ακινησίας του ακροφυσίου πάνω από τα ακραία σημεία της λωρίδας, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα υπέρ-απόθεσης τοπικά. Σύμφωνα με την επίδραση των μεμονωμένων παραμέτρων στο Σχήμα 5-11, υψηλό LPR αυξάνει το χρόνο ακινησίας, επιδεινώνοντας σημαντικά την ομοιομορφία απόθεσης. Δευτερευόντως, υψηλές ταχύτητες PS αυξάνουν την πίεση στο εσωτερικό του ακροφυσίου, οδηγώντας σε ανεξέλεγκτη υπέρ-εξώθηση

στο τέλος της τροχιάς. Η τρίτη πιο επιδραστική παράμετρος είναι η θερμοκρασία  $T$ , η οποία μειώνει το ιξώδες του υλικού κάνοντας ευκολότερη τη ροή του υλικού λόγω της επίδρασης της βαρύτητας αλλά και της συσσωρευμένης πίεσης στο ακροφύσιο.

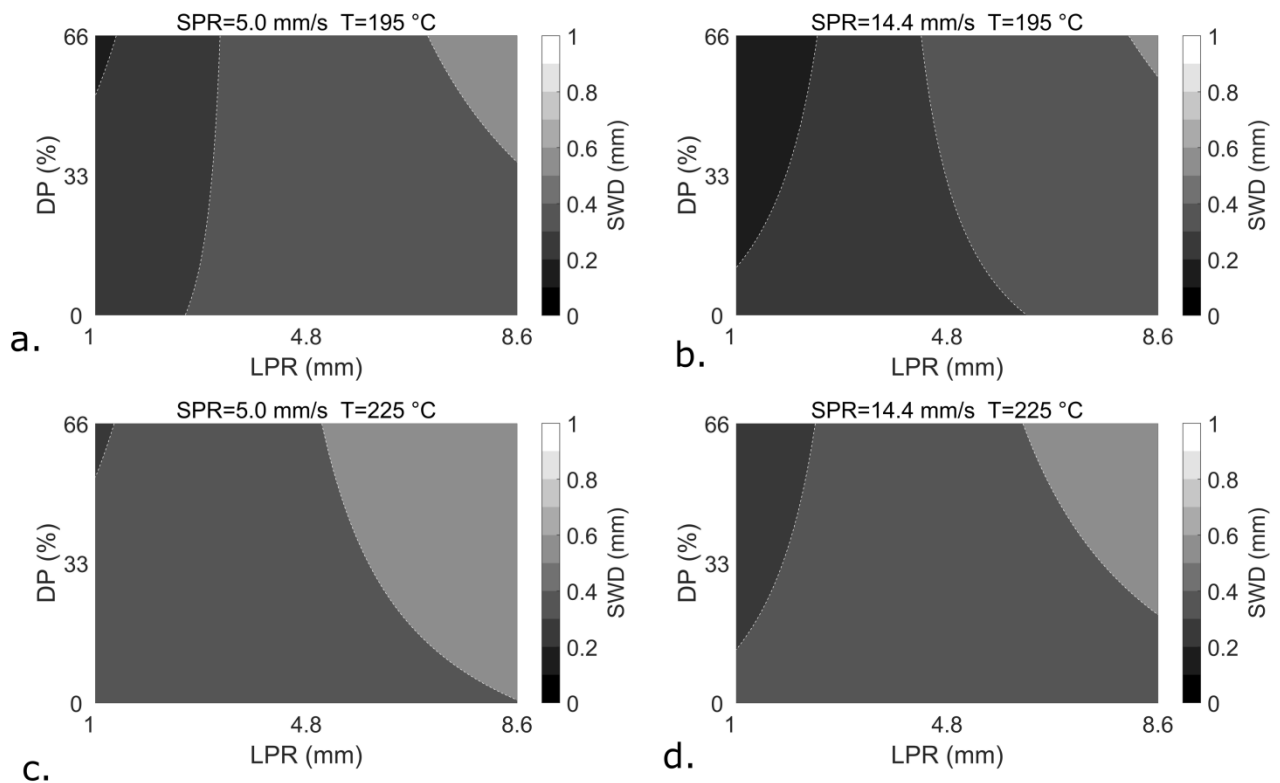


Σχήμα 5-10 Μήκος ( $L$ ), εμβαδό ( $A$ ) και τοπικές μετρήσεις στην αρχή (start) και στο τέλος (end) της αποτιθέμενης λωρίδας υλικού.



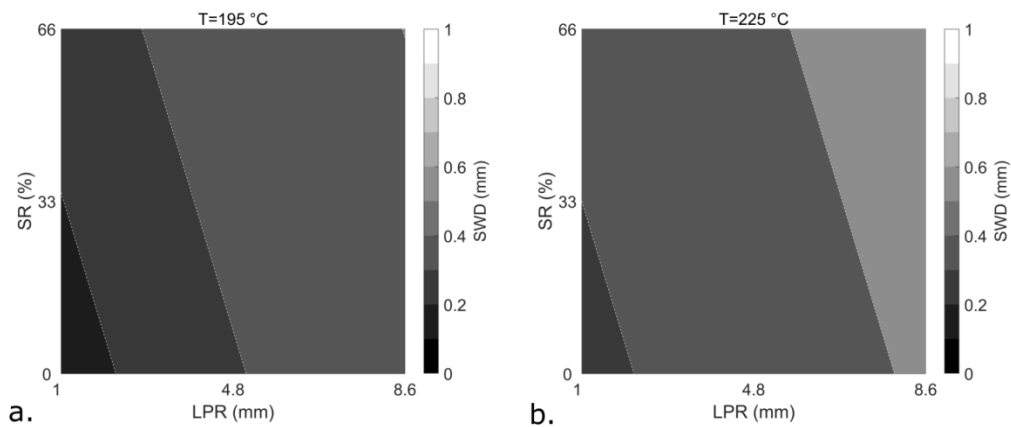
Σχήμα 5-11 Επίδραση των μεμονωμένων παραμέτρων στην απόκλιση πλάτους λωρίδας υλικού (SWD). Οι χαμηλότερες τιμές υποδεικνύουν μεγαλύτερη ομοιομορφία στην απόθεση.

Η αυξημένη δυναμική προ-εξώθηση DP, επιδρά θετικά στην αρχή της τροχιάς και σύμφωνα με την αλληλεπίδρασή της με μικρό μήκος LPR, σύμφωνα με το Σχήμα 5-12. Ιδανικά, υψηλή ταχύτητα SPR και χαμηλή θερμοκρασία, Σχήμα 5-12(c), προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος ρύθμισης των παραμέτρων LPR και DP, χωρίς να θυσιάζεται η ομοιομορφία της απόθεσης (σκουρόχρωμες περιοχές του γραφήματος).

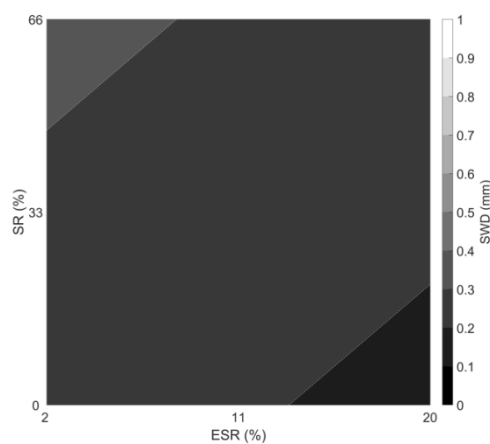


**Σχήμα 5-12** Αλληλεπίδραση LPR και DP στο κριτήριο SWD για (a) χαμηλή SPR και χαμηλή T, (b) υψηλή SPR και χαμηλή T, (c) χαμηλή SPR και υψηλή T, (d) υψηλή SPR και υψηλή T.

Αντίστοιχα, για το τελικό τμήμα της τροχιάς, η υψηλή τιμή της στατικής αναρρόφησης (SR) επιμηκώνει το χρόνο ακινησίας του ακροφυσίου στο ίδιο σημείο, προκαλώντας υπέρ-εξώθηση υλικού τοπικά Σχήμα 5-13(a). Η υπέρ-εξώθηση εντείνεται περαιτέρω με υψηλότερη θερμοκρασία T, λόγω του μειωμένου ιξώδους του υλικού Σχήμα 5-13(b). Τέλος, ο ρυθμός μείωσης της εξώθησης ESR λειτουργεί διορθωτικά στο φαινόμενο της υπερ-εξώθησης στο τελικό σημείο της τροχιάς για υψηλότερες τιμές στατικής αναρρόφησης SR, Σχήμα 5-14, οι οποίες μπορεί να επιλεγούν για το περιορισμό του φαινομένου stringing, δηλαδή της ανεξέλεγκτης απόθεσης ινών υλικού κατά τη γρήγορη μετάβαση (travelling) του ακροφυσίου στο αρχικό σημείο της επόμενης τροχιάς.



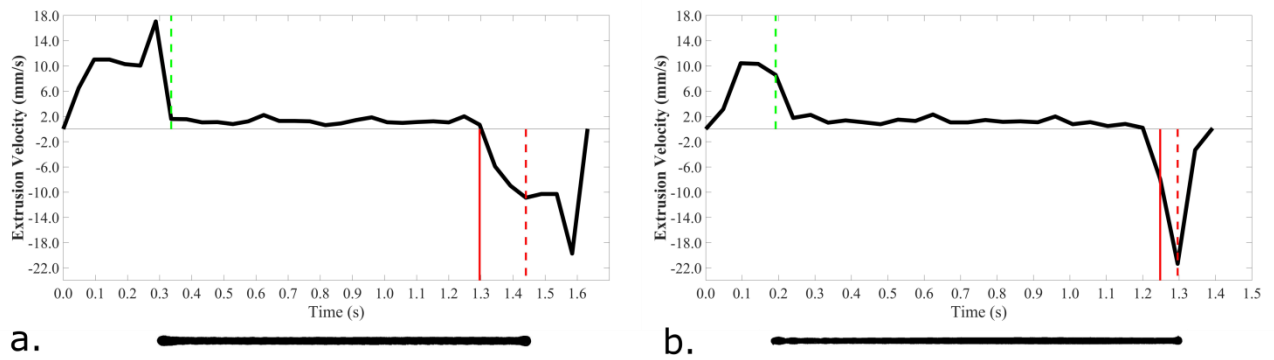
Σχήμα 5-13(a) Αλληλεπίδραση LPR και SR στο κριτήριο SWD για (a)  $T=195^{\circ}\text{C}$  και (b)  $T=225^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 5-14 Αλληλεπίδραση μεταξύ παραμέτρων ESR και SR. Οι υπόλοιπες παράμετροι ρυθμίζονται στην κεντρική τους τιμή.

## 5.6 Παρατηρήσεις στην ποιότητα απόθεσης υλικού

Για την ποιότητα απόθεσης υλικού χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές παρατηρήσεις σε συνδυασμό με την καταγραφή της κίνησης του νήματος κατά τη διάρκεια της εξώθησης. Στο Σχήμα 5-15 παρουσιάζεται το προφίλ της εξώθησης του νήματος για ταχύτητα εκτύπωσης  $PS=40\text{ mm/s}$ . Η θετική ταχύτητα στο γράφημα φανερώνει προ-εξώθηση υλικού και η αρνητική φανερώνει αναρρόφηση υλικού. Οι κάθετες διακεκομμένες ευθείες αντικατοπτρίζουν έναρξη της κίνησης της κεφαλής στο οριζόντιο επίπεδο (όπως καταγράφηκε παράλληλα από την βιντεοσκόπηση της εξώθησης υλικού). Η κάθετη συμπαγής ευθεία (κόκκινου χρώματος) φανερώνει την στιγμιαία ακινητοποίηση του ακροφυσίου πάνω από το τελικό σημείο της τροχιάς. Κάτω από κάθε γράφημα παρατίθεται η αποτεθειμένη λωρίδα υλικού σύμφωνα με τις επιλεγμένες παραμέτρους (Πίνακας 5-4).



**Σχήμα 5-15** Γράφημα ταχύτητας νήματος στην εξώθηση σε συνάρτηση με το χρόνο για ταχύτητα εκτύπωσης 40mm/s: (a) χωρίς βελτιστοποίηση της προ-εξώθησης και της αναρρόφησης και (b) υπό βελτιωμένες συνθήκες προ-εξώθησης και αναρρόφησης. Στο κάτω μέρος κάθε γραφήματος παρατίθεται η αποτιθέμενη λωρίδα υλικού.

**Πίνακας 5-4** Ρυθμίσεις παραμέτρων που αφορούν στις εκτυπωμένες σειρές υλικού στο Σχήμα 5-15.

	LPR	SPR	DP	SR	DtE	ESR	PS	T	start	W	stop	SWD
Σχήμα 5-15 (a)	4.3	14.4	-*	-	-	-	40	195	1.165	0.830	1.144	0.1532
Σχήμα 5-15 (b)	2.1	14.4	30	30	10	2	40	195	0.807	0.617	0.848	0.1006

\*μη-ρυθμισμένη παράμετρος

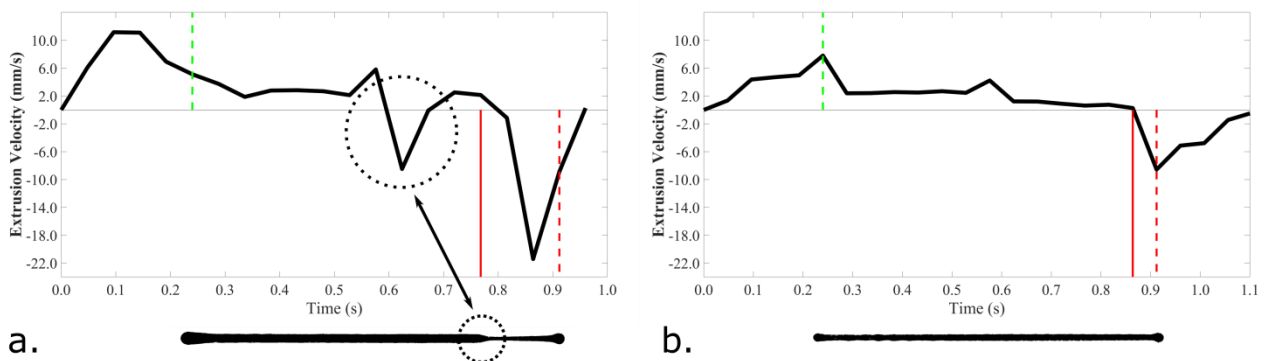
Για την διασφάλιση της ποιότητας απόθεσης σε υψηλότερες ταχύτητες PS, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα πρόβλεψης των κριτηρίων MDD και SWD σαν βάση διατύπωσης βημάτων προς τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων εκτύπωσης ως εξής:

- Το μήκος προ-εξώθησης και αναρρόφησης LPR ρυθμίζεται στην ελάχιστη τιμή που διερευνήθηκε εφόσον βελτιώνει τόσο την ομοιομορφία απόθεσης όσο και τη διασφάλιση της συνεχούς απόθεσης σύμφωνα με τις πειραματικές παρατηρήσεις.
- Η χαμηλή ρύθμιση του LPR μειώνει την επίδραση της ταχύτητας προ-εξώθησης και αναρρόφησης SPR, εφόσον στην πράξη δεν υπάρχει αρκετός χρόνος ώστε να επιτευχθεί η ρυθμιζόμενη ταχύτητα.
- Σύμφωνα με το Σχήμα 5-12(a) και (c), μεγαλύτερη ευελιξία στη δυναμική προ-εξώθηση DP δίνεται για υψηλότερη θερμοκρασία T, συνεπώς για T=195°C, DP=50 είναι μια λογική αρχική τιμή.
- Η υψηλή ρύθμιση της στατικής αναρρόφησης SR αυξάνει τις πιθανότητες υπερ-εξώθησης στο τελικό σημείο της τροχιάς, όμως δεν μπορεί να μηδενιστεί λόγω του

αντικρουόμενου φαινομένου της απόθεσης ινών υλικού κατά τη γρήγορη μετάβαση της κεφαλής στην επόμενη τροχιά. Για  $T=195^{\circ}\text{C}$ , επιλέγεται η κεντρική τιμή SR.

- Επιλέγεται η υψηλότερη ρύθμιση της απόστασης από το τέλος της τροχιάς DtE, κατά την οποία μειώνεται ο ρυθμός εξώθησης, εφόσον βοηθάει τόσο τη συνεχή απόθεση υλικού (MDD) όσο και την πιο αποδοτική αναρρόφηση του υλικού στο τέλος της τροχιάς.
- Ο ρυθμός μείωσης της εξώθησης ESR ρυθμίζεται στη χαμηλότερη τιμή του ώστε να αποφευχθεί απότομη αλλαγή και αστάθεια στην εξώθηση.
- Όσο αυξάνεται η ταχύτητα εκτύπωσης PS, η θερμοκρασία T θα πρέπει να αυξάνεται συντηρητικά. Η ανάγκη μείωσης του ιξώδους και διευκόλυνσης της ροής υλικού, περιορίζεται από τη δυσκολία χειρισμού της ανεξέλεγκτης απόθεσης τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της τροχιάς.

Τα παραπάνω βήματα χρησιμοποιήθηκαν για να παραμετροποιηθεί η εκτύπωση της λωρίδας υλικού για αυξημένη ταχύτητα  $PS=65\text{ mm/s}$  που αντιστοιχεί σε ογκομετρικής παροχή  $Q=7.8\text{ mm}^3/\text{s}$ . Ο Πίνακας 5-5 παρουσιάζει τις αρχικές και τις βελτιωμένες ρυθμίσεις, οι οποίες παρουσιάζονται γραφικά και κατ' αντιστοιχία στο Σχήμα 5-16(a) και (b).



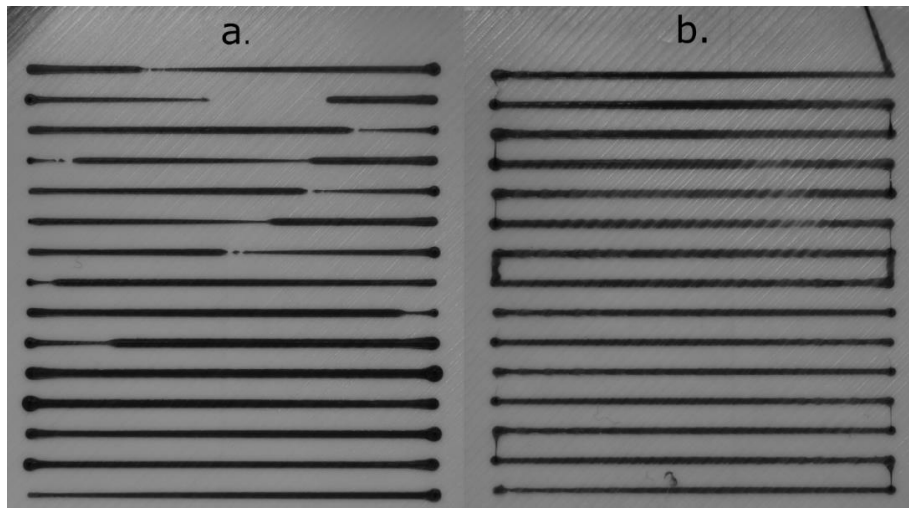
Σχήμα 5-16 Γράφημα ταχύτητας νήματος στην εξώθηση σε συνάρτηση με το χρόνο για ταχύτητα εκτύπωσης  $65\text{mm/s}$ : (a) υπέρ-εξώθηση και διακοπή απόθεση υλικού (διακεκομμένος κύκλος) και (b) χαμηλότερη απόκλιση πλάτους λωρίδας (SWD) υπό βελτιωμένες συνθήκες προ-εξώθησης και αναρρόφησης.

Πίνακας 5-5 Ρυθμίσεις παραμέτρων που αφορούν στις εκτυπωμένες σειρές υλικού στο Σχήμα 5-16

	LPR	SPR	DP	SR	DtE	ESR	PS	T	start	W	stop	SWD
Σχήμα 5-16 (a)	4.3	14.4	-*	-	-	-	65	195	1.393	0.889	1.158	0.2059
Σχήμα 5-16 (b)	1.0	5.0	40	40	20	2	65	200	0.927	0.704	1.111	0.1664

\*μη-ρυθμισμένη παράμετρος

Και στις δύο περιπτώσεις Σχήμα 5-15 και Σχήμα 5-16, η ρύθμιση της δυναμικής προ-εξώθησης ευνοεί την ομοιόμορφη απόθεση υλικού. Παρομοίως ευνοϊκή είναι η μικρή διάρκεια παραμονής, περίπου 0.05 ms, του ακροφυσίου πάνω από το τελικό σημείο της τροχιάς, Σχήμα 5-15(b) και Σχήμα 5-16(b). Επίσης, στο Σχήμα 5-16(b), παρατηρείται σταδιακή μείωση της εξώθησης μετά τα 0.6 s. Τέλος στο Σχήμα 5-17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αρχικών και των βελτιωμένων ρυθμίσεων εκτύπωσης, τα οποία υποδεικνύουν την επιτυχή χρήση των μοντέλων που είχε σαν αποτέλεσμα τη συνεχόμενη απόθεση υλικού με βελτιωμένη ομοιομορφία πλάτους σε υψηλότερες ταχύτητες.



Σχήμα 5-17 Σύγκριση μεταξύ της ποιότητας απόθεσης για PS=65 mm/s και Q=7.80mm<sup>3</sup>/s υπό (a) τις αρχικές και (b) τις βελτιωμένες ρυθμίσεις των παραμέτρων.

## 5.7 Συζήτηση

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάστηκε η ομοιόμορφη και συνεχής απόθεση υλικού σε υψηλότερες ταχύτητες, μέσω ενός σχεδιασμένου πειράματος για οκτώ παραμέτρους της κατεργασίας ΠΚ-ΕΥ. Η αξιολόγηση των αποτιθέμενων σειρών υλικού έγινε με εργαλεία ανάλυσης εικόνας ανοικτού κώδικα. Το προφίλ εξώθησης του νήματος καταγράφηκε και αναλύθηκε καρέ-καρέ μέσω βιντεοσκόπησης, ενώ εμμέσως καταγράφηκε και το προφίλ της κίνησης της κεφαλής στο οριζόντιο επίπεδο. Από το σχεδιασμένο πείραμα, προέκυψαν δύο μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την σχέση των παραμέτρων με τη διασφάλιση συνεχούς απόθεσης (κριτήριο MDD) και τη σχέση των παραμέτρων με την απόκλιση της διάστασης πλάτους των αποτιθέμενων σειρών (κριτήριο SWD). Στο πείραμα συμπεριλήφθηκαν οι παράμετροι της προ-εξώθησης και της αναρρόφησης υλικού σε μια προσπάθεια βελτιστοποίησης του συγχρονισμού μεταξύ των σταδίων επιτάχυνσης/επιβράδυνσης της κεφαλής και έγκαιρης εκκίνησης/διακοπής της εξώθησης, αντίστοιχα. Προέκυψε πως το μήκος προ-εξώθησης και αναρρόφησης (LPR) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υπέρ-εξώθηση υλικού στο αρχικό και τελικό σημείο της

τροχιάς. Για πρώτη φορά εξετάστηκε πειραματικά η μέθοδος επιβράδυνσης της εξώθησης πριν το τέλος της τροχιάς (ESR και DtE), σε μια προσπάθεια εκτόνωσης της πίεσης εντός του ακροφυσίου και αποφυγής της υπέρ-εξώθησης υλικού στο τελικό σημείο της τροχιάς. Προέκυψε πως η αύξηση της θερμοκρασίας εξώθησης βοηθάει τη συνεχή ροή υλικού ειδικά σε υψηλότερες ταχύτητες, όμως κάνει δυσκολότερη τη διαχείριση της μη-ελεγχόμενης εξώθησης στις γρήγορες μετατοπίσεις της κεφαλής, που συντελεί στην εμφάνιση ινών υλικού (stringing).

Αφού βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι που βοηθούν τη συνεχή ροή, έγινε προσπάθεια διατήρησης της ομοιομορφίας πλάτους λωρίδας υλικού, σε ταχύτητα εκτύπωσης 40 mm/s και 65 mm/s. Για τη βελτιστοποίηση, καταλυτική ήταν η καθοδήγηση των μοντέλων για την προβλεπόμενη απόκριση του κάθε κριτηρίου. Με μικρή αύξηση της θερμοκρασίας, με τη χρήση δυναμικής προ-εξώθησης (DP) και τον ελάχιστο δυνατό χρόνο παραμονής του ακροφυσίου πάνω από το αρχικό και τελικό σημείο της τροχιάς, επιτεύχθηκε μείωση της απόκλισης πλάτους κατά 34.33% και 19.18% για τις δύο ταχύτητες εκτύπωσης, αντίστοιχα.



# 6

## *Συμπεράσματα*

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζονται τα κύρια σημεία συνεισφοράς της παρούσας διδακτορικής διατριβής, καθώς και οι περιορισμοί των προτεινόμενων λύσεων οι οποίοι δείχνουν την κατεύθυνση της μελλοντικής επέκτασης της έρευνας.

### *6.1 Συνεισφορά και περιορισμοί*

Στο κομμάτι του σχεδιασμού της τροχιάς, προτάθηκε μία μέθοδος εξαγωγής αρχείου οδηγιών μηχανής (G-code), απευθείας από το μοντέλο CAD και χωρίς την παρεμβολή των αρχείων STL. Η προτεινόμενη λύση βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε μεγάλα μοντέλα με πολύπλοκη μορφή. Μια περίπτωση, που εμπίπτει στα παραπάνω, είναι αυτή των ικριωμάτων αναγέννησης ιστών τα οποία εσωκλείουν πορώδεις δομές, περιοδικά διατεταγμένες και χρησιμοποιήθηκαν για λόγους επίδειξης της λειτουργικότητας της μεθόδου. Η προτεινόμενη λύση εφαρμόζεται μέσω ανάπτυξης κώδικα στο API του λογισμικού Solidworks™, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει τις βασικές παραμέτρους εκτύπωσης. Με αυτό τον τρόπο λύνονται δύο προβλήματα: το πρώτο αναφέρεται στην αδυναμία μοντελοποίησης σύνθετων γεωμετριών σε περιβάλλον CAD, λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού των γεωμετρικών οντοτήτων που πρέπει να μοντελοποιηθεί και συχνά περιορίζεται από τις υπολογιστικές δυνατότητες ακόμη και των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων. Το δεύτερο πρόβλημα αναφέρεται στην εξαγωγή του αρχείου STL, η οποία πέραν του ότι έπεται της -συχνά αδύνατης- μοντελοποίησης, εισάγει περιορισμούς στον αριθμό των επιφανειών με τις οποίες μπορεί να συνθέσει μια γεωμετρική μορφή, υποβαθμίζοντας έτσι την ακρίβεια αναπαράστασης, αλλά εισάγοντας και σφάλματα σε αυτή. Η προτεινόμενη λύση απαιτεί μόνο την ύπαρξη της εξωτερικής γεωμετρίας ενός μοντέλου, το οποίο αναπαρίσταται έμμεσα σαν πορώδης δομή, υπολογίζοντας και εξάγοντας απευθείας την τροχιά σε οδηγίες μηχανής, έτοιμες να εισαχθούν στο σύστημα ΠΚ-ΕΥ προς κατασκευή. Η

λειτουργικότητα του κώδικα επιβεβαιώθηκε με την κατασκευή ενός τμήματος της πορώδους δομής, ενώ ο κώδικας κρίνεται πιο αποδοτικός για μεγαλύτερα σε μέγεθος μοντέλα, καθώς εκεί αρχίζει να φαίνεται το συγκριτικό του πλεονέκτημα όσον αφορά στην ταχύτητα εκτέλεσής του. Η δομή του κώδικα επιτρέπει επεκτάσεις σχετικά με τον τύπο των εσωτερικών μοτίβων που μπορεί να δημιουργήσει. Παρόλα αυτά, ο κώδικας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιος σε άλλα λογισμικά CAD λόγω των εγγενών εντολών που περιέχονται στο API κάθε λογισμικού, αλλά η αλγοριθμική λογική του μπορεί να ακολουθηθεί ως έχει, καθώς βασίζεται ως επί το πλείστον σε κοινές και βασικές γεωμετρικές λειτουργίες και υπολογισμούς. Ανάλογες τροποποιήσεις απαιτούνται και στη σύνταξη του εξαγόμενου G-code, ο οποίος πρέπει να είναι συμβατός με τη λειτουργία του κάθε συστήματος προσθετικής κατασκευής. Στην προκειμένη περίπτωση, τα αποτελέσματα της κατασκευής σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ απέδειξαν την πλήρη λειτουργικότητα του εξαγόμενου G-code, επιτυγχάνοντας την κατασκευή της πορώδους δομής. Τα σφάλματα της κατασκευής και οι αποκλίσεις στη γεωμετρία, ανάγονται κυρίως στην παραμετροποίηση της κατεργασίας, προσανατολίζοντας έτσι την έρευνα στο πεδίο της βελτιστοποίησης της ΠΚ-ΕΥ.

Για τη βελτιστοποίηση της προσθετικής κατεργασίας με εξώθηση υλικού ακολουθήθηκε μια ιεραρχική λογική. Ο μεγάλος αριθμός παραμέτρων και τα μεγάλα εύρη επιτρεπόμενων ρυθμίσεων είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε κομμάτια με σοβαρά κατασκευαστικά ελαττώματα. Κρίθηκε λοιπόν σκόπιμο να πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση της κατεργασίας βάσει τεσσάρων βασικών παραμέτρων εκτύπωσης, δηλαδή πάχος στρώσης, διόρθωση ροής, ταχύτητα εκτύπωσης και προσανατολισμού, ώστε να εντοπιστεί ένα παράθυρο βέλτιστης λειτουργίας. Ένα σχεδιασμένο πείραμα 27 δοκιμών, βασιζόμενο στη μέθοδο Taguchi, οδήγησε σε χρήσιμα και αξιόπιστα συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στη πιστότητα μορφής του τεμαχίου, δηλαδή την έλλειψη βασικών ελαττωμάτων κατασκευής. Η στατιστική σημαντικότητα των παραμέτρων αλλά και η ύπαρξη αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών, αξιολογήθηκε μέσω της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA). Προέκυψε πως η αλληλεπίδραση της ταχύτητας εκτύπωσης με το πάχος στρώσης, θέτει ένα κατώτατο όριο σε σχέση με την ογκομετρική παροχή υλικού που μπορεί να εξωθείται, πριν παρατηρηθούν φαινόμενα υπό-εξώθησης. Το γεγονός αυτό έρχεται να αντιπαρατεθεί με την ένδειξη πως οι συντηρητικές ρυθμίσεις στην κατεργασία λειτουργούν πάντα προς όφελός της, σύμφωνα με την επίδραση των μεμονωμένων παραμέτρων. Η μέθοδος Taguchi επαρκεί για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού των επιπέδων των παραμέτρων που εξετάζονται στη διάρκεια του πειράματος. Για την πρόβλεψη της πιστότητας μορφής για τις ενδιάμεσες τιμές των παραμέτρων, εκπαιδεύτηκε ένα νευρωνικό δίκτυο, το οποίο μπόρεσε να εντοπίσει με μεγαλύτερη αναλυτική ικανότητα το κατώτατο και ανώτατο όριο ογκομετρικής παροχής υλικού, στις τιμές  $Q_1 = 0.60 \text{ mm}^3/\text{s}$  και

$Q_h = 8.07 \text{ mm}^3/\text{s}$ , αντίστοιχα, ενώ η μέγιστη δυνατή ταχύτητα εκτύπωσης βρέθηκε ίση με  $43.6 \text{ mm/s}$ . Η ακρίβεια πρόβλεψης του νευρωνικού δικτύου κρίνεται καλή, με μέσο όρο σφάλματος  $6.57\%$  και τυπική απόκλιση  $3.75\%$ , ενώ η κύρια αδυναμία του εντοπίζεται στο γεγονός πως δεν μπορεί να προβλέψει τον τύπο του κατασκευαστικού ελαττώματος, παρά μόνο την υποβαθμισμένη πιστότητα μορφής του κομματιού, δοσμένη σαν μια τιμή εκτός ορίων της βέλτιστης περιοχής λειτουργίας.

Η βέλτιστη περιοχή λειτουργίας του συστήματος ΠΚ-EY χρησιμοποιήθηκε σαν βάση σχεδιασμού του δεύτερου πειράματος, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαστασιακής ακρίβειας με τη χρήση προσαρμοστικών ρυθμίσεων για κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό. Πέντε μοντέλα παλινδρόμησης περιγράφουν επαρκώς τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων: πάχος στρώσης, διόρθωση ροής, ταχύτητα εκτύπωσης, με την διαστασιακή ακρίβεια κατά τις διευθύνσεις X, Y, Z και για την κατασκευή οπών και λεπτών τοιχωμάτων. Η καινοτομία που εισάγεται είναι η μεταβολή των ρυθμίσεων εκτύπωσης τόσο στη διάρκεια εκτύπωσης της ίδιας στρώσης όσο και στην εκτέλεση της ίδιας τροχιάς, δεδομένου ότι τα πέντε μοντέλα βελτιστοποιούν την διαστασιακή ακρίβεια του γεωμετρικού χαρακτηριστικού που περιγράφουν με διαφορετικούς συνδυασμούς παραμετρικών ρυθμίσεων. Η σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με την εύρεση ενός ολικού βέλτιστου συνδυασμού ρυθμίσεων, μέσω της συνάρτησης επιθυμίας (desirability function), επέδειξε μείωση της απόκλισης της διάστασης από την ονομαστική της κατά  $32.3\%$ . Η τροποποίηση των παραμέτρων έγινε σε στάδιο μεταγενέστερο του σχεδιασμού της κατεργασίας απευθείας στο αρχείο G-code, εκμεταλλευόμενη την ευκολία εντοπισμού των τροχιών που συνδέονται με το εκάστοτε γεωμετρικό χαρακτηριστικό. Για πιο σύνθετες γεωμετρίες, αυτό θα ήταν αρκετά πιο πολύπλοκο, θέτοντας έτσι ένα περιορισμό στην προτεινόμενη προσέγγιση. Επιπλέον, οι απότομες αλλαγές της ταχύτητας εκτύπωσης και του ρυθμού εξώθησης εν κινήσει, παρουσίασαν πτυχώσεις στις εξωτερικές επιφάνειες του δοκιμίου, γεγονός που συνιστά προσοχή στο μέτρο της επιτρεπόμενης μεταβολής των συνθηκών εκτύπωσης, ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή νέων σφαλμάτων στην κατασκευή.

Το τελευταίο μέρος της διδακτορικής διατριβής παρουσιάζει την ανάλυση του τρόπου απόθεσης μιας ευθύγραμμης λωρίδας υλικού με σκοπό την συνεχή ροή υλικού και την ομοιόμορφη απόθεση. Η αξιολόγηση της απόθεσης γίνεται μέσω ανάλυσης εικόνας των σειρών υλικού, ενώ χρήσιμες πληροφορίες λαμβάνονται και από το προφίλ της εξώθησης, το οποίο βιντεοσκοπείται και αναλύεται σε καρτέ ανά  $40 \text{ ms}$ . Οκτώ παράμετροι εκτύπωσης συνιστούν τη βάση μιας πειραματικής μελέτης, συγκεκριμένα: μήκος προ-εξώθησης/αναρρόφησης, ταχύτητα προ-εξώθησης/αναρρόφησης, δυναμική προ-εξώθηση, στατική αναρρόφηση, απόσταση από το τέλος, ρυθμός επιβράδυνσης εξώθησης, ταχύτητα εκτύπωσης και θερμοκρασία εξώθησης. Κάποιες από αυτές τις παραμέτρους μελετώνται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία. Τα κριτήρια

αξιολόγησης είναι η συνεχής απόθεση (MDD) και η απόκλιση πλάτους λωρίδας υλικού (SWD), για τα οποία εξάγονται δύο μοντέλα παλινδρόμησης με συντελεστή 96%. Οι παράμετροι απόσταση από το τέλος και ρυθμός επιβράδυνσης εξώθησης, συνιστούν ένα τρόπο εκτόνωσης της πίεσης εντός του ακροφυσίου μέσω μείωσης της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα εξώθησης, λίγα mm πριν το τέλος της τροχιάς, με απώτερο σκοπό την αποφυγή υπέρ-απόθεσης υλικού στα σημεία επιβράδυνσης της κεφαλής. Προέκυψε πως η μέθοδος βοηθάει στη συνεχή απόθεση υλικού σε υψηλότερες ταχύτητες, αποτρέποντας στιγμιαία έμφραξη του ακροφυσίου καθώς παρέχει περισσότερο χρόνο στο υλικό να απορροφήσει την απαιτούμενη θερμική ενέργεια ώστε να βρίσκεται σε κατάλληλη θερμοκρασία εξώθησης. Ο δεύτερος μηχανισμός που προκαλεί ασυνέχεια στην απόθεση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος προ-εξώθησης/αναρρόφησης στην αρχή και στο τέλος της τροχιάς, αντίστοιχα. Στην κατανόηση των φαινομένων της (δυναμικής) προ-εξώθησης και της (στατικής) αναρρόφησης υλικού, που λαμβάνουν χώρα για μερικά ms, συνέβαλε καθοριστικά η ανάλυση των καρέ του βιντεοσκοπημένου προφίλ της εξώθησης. Προέκυψε πως, μικρό μήκος προ-εξώθησης/αναρρόφησης εξασφαλίζει την έγκαιρη εκκίνηση της εξώθησης σε συγχρονισμό με την οριζόντια μετατόπιση της κεφαλής. Επιπλέον, το μικρό μήκος προ-εξώθησης/αναρρόφησης σε συνδυασμό με αποδοτική χρήση της δυναμικής προ-εξώθησης και της στατικής αναρρόφησης, συμβάλλουν στην ομοιομορφία πλάτους λωρίδας υλικού, εφόσον μειώνουν στο ελάχιστο δυνατό το χρόνο παραμονής του ακροφυσίου πάνω από το αρχικό και τελικό σημείο της τροχιάς, αποφεύγοντας έτσι τα φαινόμενα υπέρ-εξώθησης υλικού. Τα εξαγόμενα μοντέλα παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκαν σαν οδηγοί βελτιστοποίησης της ποιότητας απόθεσης σε υψηλότερη ταχύτητα εκτύπωσης 65 mm/s, που αντιστοιχεί σε ογκομετρική παροχή υλικού  $Q=7.80 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης προέκυψε πως μικρή αύξηση της θερμοκρασίας βοηθάει στη διευκόλυνση της ροής υλικού, λόγω της μείωσης του ιξώδους του, ενώ σε συνδυασμό με τη στρατηγική ρύθμιση των υπολοίπων παραμέτρων, επιτεύχθηκε μείωση της απόκλιση πλάτους λωρίδας κατά 19.18%.

## **6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις**

Ξεκινώντας με την απευθείας εξαγωγή τροχιάς για μεγάλες και πορώδεις δομές, νέες μορφές μοναδιαίων κελιών είναι δυνατόν να σχεδιαστούν, εμπλουτίζοντας έτσι τη βιβλιοθήκη των περιοδικών μοτίβων που μπορούν να δομήσουν το εσωτερικό ενός μοντέλου. Από προγραμματιστικής άποψης, η εισαγωγή του ανεξάρτητου χειρισμού του κάθε μοναδιαίου κελιού δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής των ιδιοτήτων τους ανάλογα με τις συντεταγμένες τοποθέτησής τους, δημιουργώντας έτσι βαθμωτές δομές μεταβαλλόμενου πορώδους. Επιπλέον,

είναι εφικτός και ο εναλλακτικός προγραμματισμός της τροχιάς, επιδρώντας έτσι στην ομοιομορφία της θερμοκρασιακής κατανομής στη διάρκεια της κατεργασίας.

Στο πεδίο της βελτιστοποίησης της κατεργασίας ΠΚ-ΕΥ, η βασική αδυναμία του νευρωνικού δικτύου, που εκπαιδεύτηκε για την πρόβλεψη των ελαττωμάτων, είναι πως λειτουργεί βάσει μιας οριακής τιμής, κάτω από την οποία αναμένεται να εκδηλωθεί ελάττωμα στην κατασκευή, χωρίς όμως να μπορεί να προσδιοριστεί ο τύπος του. Σε επόμενο βήμα, η διερευνητική ικανότητα αντίστοιχων εργαλείων πρόβλεψης, μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση νευρωνικών δικτύων ταξινόμησης των κατασκευαστικών σφαλμάτων. Επιπλέον, η μέθοδος αντίστροφης μηχανικής με εργαλεία τρισδιάστατης σάρωσης, χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτικοποίηση των σφαλμάτων και έλαβε χώρα σε μεταγενέστερο στάδιο. Η συγκεκριμένη λύση έχει την προοπτική αναβάθμισης σε εργαλείο επιτόπου εποπτείας στην κατεργασία και εξαγωγής αποτελεσμάτων σε (κατά το δυνατόν) πραγματικό χρόνο. Ως μεγαλύτερη πρόκληση σε αυτή τη λογική εκτιμάται η ταχύτητα λήψης και εξαγωγής του αποτελέσματος, ώστε να χρησιμοποιηθεί, ιδανικά, σαν πληροφορία ανάδρασης και διόρθωσης των παραμέτρων της κατεργασίας. Θερμικές παράμετροι εκτύπωσης δεν συμπεριλήφθηκαν και, ως εκ τούτου, κρίνεται σκόπιμη η μελλοντική επέκταση του εύρους των παραμέτρων, οι οποίες αναμένεται να επηρεάσουν την ποιότητα κατασκευής, τόσο στα εξεταζόμενα κριτήρια, αλλά και για πρόσθετα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως η καθετότητα και η κυλινδρικότητα, καθώς και χαρακτηριστικά που άπτονται της λογικής της σχεδίασης της προσθετικής κατασκευής, όπως τα μη υποστηριζόμενα τμήματα (overhangs).

Οι προσαρμοστικές ρυθμίσεις στη διάρκεια της ΠΚ-ΕΥ, αξιολογήθηκαν θετικά ως προς τη συνεισφορά τους στην κατασκευή δοκιμίων με υψηλότερη διαστασιακή ακρίβεια. Η μελέτη περίπτωσης αφορούσε γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία ήταν εύκολο να εντοπιστούν και να τροποποιηθούν στο επίπεδο του G-code, ούτως ώστε να μεταβάλλουν τις παραμετρικές ρυθμίσεις κατά βέλτιστο τρόπο στη διάρκεια της κατασκευής και να αποδείξουν τη λειτουργικότητα της μεθόδου. Σε επόμενο βήμα, η τροποποίηση των ρυθμίσεων θα πρέπει να γίνεται ήδη στο επίπεδο του σχεδιασμού της κατεργασίας και με αυξημένη διαδραστικότητα με το χρήστη, καλύπτοντας έτσι και γεωμετρικά χαρακτηριστικά σύνθετης γεωμετρίας, που συχνά συναντώνται στην ΠΚ.

Στο αντικείμενο της ομοιόμορφης και συνεχούς απόθεσης λωρίδας υλικού, η προσέγγιση που επιχειρήθηκε αφορά σε μετέπειτα αξιολόγηση και δημιουργία προβλεπτικών μοντέλων. Κρίνεται σκόπιμη η επέκταση της εργασίας σε on-line παρακολούθηση τόσο της εξώθησης, με αναγνώριση μοτίβων μέσω αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης, όσο και της απόθεσης υλικού, με τεχνικές μηχανικής όρασης, σε μια λογική έγκαιρου εντοπισμού σφαλμάτων στη διάρκεια της κατεργασίας. Ιδανικά, ο χρόνος απόκρισης των εργαλείων θα ορίσει αν και κατά πόσο οι συγκεκριμένες λύσεις μπορούν να αναβαθμιστούν και σε μια επεμβατική λογική στη διάρκεια

της κατεργασίας, διορθώνοντας ουσιαστικά τις συνθήκες εκτύπωσης σε πραγματικό χρόνο και μειώνοντας δραστικά της περιπτώσεις ελαττωματικών παρτίδων και σπατάλης υλικού.

# 7

## *Βιβλιογραφία*

1. Gibson I, Rosen DW, Stucker B (2010) Additive Manufacturing Technologies. CIRP Encycl Prod Eng. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9
2. ISO/ASTM 52900 (2015) Additive manufacturing - General principles - Terminology. International Standard Organization (ISO), ASTM International
3. Boschetto A, Bottini L, Veniali F (2016) Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining. Robot Comput Integr Manuf 41:92–101. doi: 10.1016/j.rcim.2016.03.004
4. Orme M, Madera I, Gschweidl M, Ferrari M (2018) Topology Optimization for Additive Manufacturing as an Enabler for Light Weight Flight Hardware. Designs 2:51. doi: 10.3390/designs2040051
5. Yang S, Zhao YF (2015) Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. Int J Adv Manuf Technol 80:327–342. doi: 10.1007/s00170-015-6994-5
6. Lušić M, Barabanov A, Morina D, et al (2015) Towards Zero Waste in Additive Manufacturing: A Case Study Investigating one Pressurised Rapid Tooling Mould to Ensure Resource Efficiency. Procedia CIRP 37:54–58. doi: 10.1016/j.procir.2015.08.022
7. Kim S, Moon SK (2020) A part consolidation design method for additive manufacturing based on product disassembly complexity. Appl Sci. doi: 10.3390/app10031100
8. Nie Z, Jung S, Kara LB, Whitefoot KS (2020) Optimization of Part Consolidation for Minimum Production Costs and Time Using Additive Manufacturing. J Mech Des. doi: 10.1115/1.4045106
9. Monzón MD, Ortega Z, Martínez A, Ortega F (2015) Standardization in additive

- manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. *Int J Adv Manuf Technol* 76:1111–1121. doi: 10.1007/s00170-014-6334-1
10. Seifi M, Gorelik M, Waller J, et al (2017) Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification. *JOM* 69:439–455. doi: 10.1007/s11837-017-2265-2
  11. Szilvsi-Nagy M, Mátyási G (2003) Analysis of STL files. *Math Comput Model* 38:945–960. doi: 10.1016/S0895-7177(03)90079-3
  12. Papazetis G, Vosniakos G-C (2016) Direct porous structure generation of tissue engineering scaffolds for layer-based additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 86:871–883. doi: 10.1007/s00170-015-8237-1
  13. Papazetis G, Vosniakos G-C (2019) Mapping of deposition-stable and defect-free additive manufacturing via material extrusion from minimal experiments. *Int J Adv Manuf Technol* 100:2207–2219. doi: 10.1007/s00170-018-2820-1
  14. Papazetis G, Vosniakos G-C (2019) Feature-based process parameter variation in continuous paths to improve dimensional accuracy in three-dimensional printing via material extrusion. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 095440541983836. doi: 10.1177/0954405419838361
  15. ISO 6983-1 (1982) Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words — Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems. International Standard Organization (ISO), Geneva
  16. Baumann F, Bugdayci H, Grunert J, et al (2016) Influence of slicing tools on quality of 3D printed parts. *Comput Aided Des Appl* 13:14–31. doi: 10.1080/16864360.2015.1059184
  17. Šljivic M, Pavlovic A, Kraišnik M, Ilić J (2019) Comparing the accuracy of 3D slicer software in printed enduse parts. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. doi: 10.1088/1757-899X/659/1/012082
  18. Álvarez K, Lagos RF, Aizpun M (2016) Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ing e Investig* 36:110. doi: 10.15446/ing.investig.v36n3.56610
  19. Greeff GP, Schilling M (2018) Single print optimisation of fused filament fabrication parameters. *Int J Adv Manuf Technol*. doi: 10.1007/s00170-018-2518-4
  20. Eisenbarth E (2007) Biomaterials for Tissue Engineering. *Adv Eng Mater* 9:1051–1060.



- doi: 10.1002/adem.200700287
21. Langer R, Vacanti J (1993) Tissue engineering. *Science* (80- ) 260:920–926. doi: 10.1126/science.8493529
  22. Liebschner MAK (2012) Computer-Aided Tissue Engineering. doi: 10.1007/978-1-61779-764-4
  23. Cheah CM, Chua CK, Leong KF, Chua SW (2003) Development of a Tissue Engineering Scaffold Structure Library for Rapid Prototyping. Part 2: Parametric Library and Assembly Program. *Int J Adv Manuf Technol* 21:302–312. doi: 10.1007/s001700300035
  24. ISO / ASTM52915-16 (2016) Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2. ASTM International, West Conshohocken, PA
  25. Hiller JD, Lipson H (2009) STL 2.0: A Proposal for a Universal Multi-Material Additive Manufacturing File Format. *Solid Free Fabr Symp* 266–278.
  26. Starly B, Lau W, Bradbury T, Sun W (2006) Internal architecture design and freeform fabrication of tissue replacement structures. *Comput Des* 38:115–124. doi: 10.1016/j.cad.2005.08.001
  27. Yoo D-J (2011) Computer-aided porous scaffold design for tissue engineering using triply periodic minimal surfaces. *Int J Precis Eng Manuf* 12:61–71. doi: 10.1007/s12541-011-0008-9
  28. Yoo D-J (2012) Heterogeneous porous scaffold design for tissue engineering using triply periodic minimal surfaces. *Int J Precis Eng Manuf* 13:527–537. doi: 10.1007/s12541-012-0068-5
  29. Yoo D (2012) New paradigms in internal architecture design and freeform fabrication of tissue engineering porous scaffolds. *Med Eng Phys* 34:762–776. doi: 10.1016/j.medengphy.2012.05.008
  30. Vassilakos A, Giannatsis J, Dedoussis V (2019) 3D Printing of Parts with Intra-Layer Variable Density. *Key Eng Mater* 799:288–293. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.288
  31. Kang H-W, Park JH, Kang T-Y, et al (2012) Unit cell-based computer-aided manufacturing system for tissue engineering. *Biofabrication* 4:015005. doi: 10.1088/1758-5082/4/1/015005
  32. Roschli A, Messing A, Borish M, et al (2017) Ornl Slicer 2: a Novel Approach for Additive Manufacturing Tool Path Planning. *Solid Free Fabr Symp* 896–902.
  33. Giannitelli SM, Accoto D, Trombetta M, Rainer A (2014) Current trends in the design of

- scaffolds for computer-aided tissue engineering. *Acta Biomater* 10:580–594. doi: 10.1016/j.actbio.2013.10.024
34. Giannatsis J, Dedoussis V (2009) Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 40:116–127. doi: 10.1007/s00170-007-1308-1
35. An J, Ee Mei Teoh J, Suntornnond R, Kai Chua C (2015) Design and 3D Printing of Scaffolds and Tissues. *Engineering* 1:261. doi: 10.15302/J-ENG-2015061
36. Filippidis P, Papazetis G, Vosniakos G (2020) Process parameter investigation for 3D printing of cellular structured parts.
37. Leong K, Chua C, Sudarmadji N, Yeong W (2008) Engineering functionally graded tissue engineering scaffolds. *J Mech Behav Biomed Mater* 1:140–152. doi: 10.1016/j.jmbbm.2007.11.002
38. Fitzharris ER, Watanabe N, Rosen DW, Shofner ML (2018) Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts. *Int J Adv Manuf Technol* 95:2059–2070. doi: 10.1007/s00170-017-1340-8
39. Stoof D, Pickering K (2018) Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene. *Compos Part B Eng* 135:110–118. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.005
40. Turner BN, Strong R, Gold SA (2014) A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyp J* 20:192–204. doi: 10.1108/RPJ-01-2013-0012
41. Wang TM, Xi JT, Jin Y (2007) A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *Int J Adv Manuf Technol* 33:1087–1096. doi: 10.1007/s00170-006-0556-9
42. Michaeli W (2012) Extrusion Dies for Plastics and Rubber. *Extrus Dies Plast Rubber*. doi: 10.3139/9783446401815
43. Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, Gu P (2008) Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyp J* 14:72–80. doi: 10.1108/13552540810862028
44. R.S.Crockett PDC (1997) Rheology and Solid Freeform Fabrication: Modeling Material Flow in Deposition Techniques. *Int Solid Free Fabr Symp* 717–724.
45. Crockett RS, Calvert PD (1996) The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques. In: *Solid Free. Fabr. Proc.* Austin, TX, pp 257–264
46. Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, Gu P (2003) Experimental study of the cooling

- characteristics of polymer filaments in FDM and impact on the mesostructures and properties of prototypes. *Solid Free Fabr Proc* 313–323.
47. Bellehumeur C, Li L, Sun Q, Gu P (2004) Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. *J Manuf Process* 6:170–178. doi: 10.1016/S1526-6125(04)70071-7
  48. Venkataraman N, Harper B, Matthewson MJ, et al (2002) Feedstock material property – process relationships in fused deposition of ceramics (FDC). *Rapid Prototyp J* 6:244–253. doi: 10.1108/13552540010373344
  49. Tlegenov Y, Wong YS, Hong GS (2017) A dynamic model for nozzle clog monitoring in fused deposition modelling. *Rapid Prototyp J* 23:391–400. doi: 10.1108/RPJ-04-2016-0054
  50. Go J, Schiffres SN, Stevens AG, Hart AJ (2017) Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design. *Addit Manuf* 16:1–11. doi: 10.1016/j.addma.2017.03.007
  51. Go J, Hart AJ (2017) Fast Desktop-Scale Extrusion Additive Manufacturing. *Addit Manuf* 18:276–284. doi: 10.1016/j.addma.2017.10.016
  52. Agarwala MK, Jamalabad VR, Langrana NA, et al (1996) Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyp J* 2:4–19. doi: 10.1108/13552549610732034
  53. Gu Q, Herakleous K, Poullis C (2014) 3DUNDERWORLD-SLS: An Open-Source Structured-Light Scanning System for Rapid Geometry Acquisition. 1–30.
  54. Roy RK (1990) *A Primer on the Taguchi Method*. Van Nostrand Reinhold, New York
  55. Czitrom V (1989) Taguchi methods: linear graphs of high resolution. *Commun Stat - Theory Methods* 18:4583–4606. doi: 10.1080/03610928908830176
  56. Boschetto A, Giordano V, Veniali F (2013) Surface roughness prediction in fused deposition modelling by neural networks. *Int J Adv Manuf Technol* 67:2727–2742. doi: 10.1007/s00170-012-4687-x
  57. Wilcox JAD, Wright DT (1998) Towards pultrusion process optimisation using artificial neural networks. *J Mater Process Technol* 83:131–141. doi: 10.1016/S0924-0136(98)00052-1
  58. Yalcin U, Karaoglan AD, Korkut I (2013) Optimization of Cutting Parameters in Face Milling with Neural Networks and Taguchi based on Cutting Force, Surface Roughness and Temperatures. *Int J Prod Res* 51:3404–3414. doi: 10.1080/00207543.2013.774482

59. Madić M, Madić MJ, Radovanović MR (2011) Optimal Selection of ANN Training and Architectural Parameters Using Taguchi Method: A Case Study. *FME Trans* 39:79–86.
60. Benardos PG, Vosniakos GC (2007) Optimizing feedforward artificial neural network architecture. *Eng Appl Artif Intell* 20:365–382. doi: 10.1016/j.engappai.2006.06.005
61. Ertay DS, Yuen A, Altintas Y (2018) Synchronized material deposition rate control with path velocity on fused filament fabrication machines. *Addit Manuf* 19:205–213. doi: 10.1016/j.addma.2017.05.011
62. Bellini A, Güçeri S, Bertoldi M (2004) Liquefier Dynamics in Fused Deposition. *J Manuf Sci Eng* 126:237. doi: 10.1115/1.1688377
63. Suiker ASJ (2018) Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments. *Int J Mech Sci* 137:145–170. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.01.010
64. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS (2010) Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 224:135–145. doi: 10.1243/09544054JEM1565
65. Chang D-Y, Huang B-H (2011) Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modeling process. *Int J Adv Manuf Technol* 53:1027–1037. doi: 10.1007/s00170-010-2882-1
66. Srivastava M, Rathee S (2018) Optimisation of FDM process parameters by Taguchi method for imparting customised properties to components. *Virtual Phys Prototyp* 13:203–210. doi: 10.1080/17452759.2018.1440722
67. Gurralla PK, Regalla SP (2014) Multi-objective optimisation of strength and volumetric shrinkage of FDM parts. *Virtual Phys Prototyp* 9:127–138. doi: 10.1080/17452759.2014.898851
68. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS (2009) Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Mater Des* 30:4243–4252. doi: 10.1016/j.matdes.2009.04.030
69. Sahu RK, Mahapatra SS, Sood AK (2014) A Study on Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modeling (FDM) Processed Parts using Fuzzy Logic. *J Manuf Sci Prod* 13:183–197. doi: 10.1515/jmsp-2013-0010
70. Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL (2016) Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion. *Meas J Int Meas Confed* 81:174–196. doi: 10.1016/j.measurement.2015.12.011

71. Cruz Sanchez FA, Boudaoud H, Muller L, Camargo M (2014) Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing. *Virtual Phys Prototyp* 9:151–167. doi: 10.1080/17452759.2014.919553
72. Minetola P, Iuliano L, Marchiandi G (2016) Benchmarking of FDM Machines through Part Quality Using IT Grades. *Procedia CIRP* 41:1027–1032. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.075
73. Lieneke T, Denzer V, Adam GAO, Zimmer D (2016) Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP* 43:286–291. doi: 10.1016/j.procir.2016.02.361
74. Rupal BS, Ahmad R, Qureshi AJ (2018) Feature-Based Methodology for Design of Geometric Benchmark Test Artifacts for Additive Manufacturing Processes. *Procedia CIRP* 70:84–89. doi: 10.1016/j.procir.2018.02.012
75. Strano G (2012) Multi-objective Optimisation in Additive Manufacturing.
76. Danjou S, Kohler P (2010) Improving part quality and process efficiency in layered manufacturing by adaptive slicing. *Virtual Phys Prototyp* 5:183–188. doi: 10.1080/17452759.2010.527010
77. Wang J, Chen T, Jin Y, He Y (2019) Variable bead width of material extrusion-based additive manufacturing. *J Zhejiang Univ A* 20:73–82. doi: 10.1631/jzus.A1700236
78. Montgomery DC (2006) Design and Analysis of Experiments. *Technometrics* 48:158–158. doi: 10.1198/tech.2006.s372
79. Derringer G, Suich R (1980) Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *J Qual Technol* 12:214–219. doi: 10.1080/00224065.1980.11980968
80. Hawkins DM (1980) Identification of Outliers. Chapman & Hall, London-New York
81. Greeff GP, Schilling M (2017) Closed loop control of slippage during filament transport in molten material extrusion. *Addit Manuf* 14:31–38. doi: 10.1016/j.addma.2016.12.005
82. Pollard D, Ward C, Herrmann G, Etches J (2017) Filament Temperature Dynamics in Fused Deposition Modelling and Outlook for Control. *Procedia Manuf* 11:536–544. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.147
83. Bakrani Balani S, Chabert F, Nassiet V, Cantarel A (2019) Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid. *Addit Manuf* 25:112–121. doi: 10.1016/j.addma.2018.10.012
84. Geng P, Zhao J, Wu W, et al (2019) Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. *J Manuf Process* 37:266–273. doi:

- 10.1016/j.jmapro.2018.11.023
85. Comminal R, Serdeczny MP, Pedersen DB, Spangenberg J (2019) Motion planning and numerical simulation of material deposition at corners in extrusion additive manufacturing. *Addit Manuf* 29:100753. doi: 10.1016/j.addma.2019.06.005
  86. Kuznetsov VE, Solonin AN, Tavitov A, et al (2019) Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process. *Rapid Prototyp J*. doi: 10.1108/RPJ-01-2019-0017
  87. Jin Y, He Y, Fu G, et al (2017) A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing. *Robot Comput Integr Manuf* 48:132–144. doi: 10.1016/j.rcim.2017.03.008
  88. Li W, Ghazanfari A, Leu MC, Landers RG (2017) Extrusion-on-demand methods for high solids loading ceramic paste in freeform extrusion fabrication. *Virtual Phys Prototyp* 12:193–205. doi: 10.1080/17452759.2017.1312735
  89. Yang Z, Jin L, Yan Y, Mei Y (2018) Filament breakage monitoring in fused deposition modeling using acoustic emission technique. *Sensors (Switzerland)* 18:1–16. doi: 10.3390/s18030749
  90. Wu H, Wang Y, Yu Z (2016) In situ monitoring of FDM machine condition via acoustic emission. *Int J Adv Manuf Technol* 84:1483–1495. doi: 10.1007/s00170-015-7809-4
  91. Li Y, Zhao W, Li Q, et al (2019) In-situ monitoring and diagnosing for fused filament fabrication process based on vibration sensors. *Sensors (Switzerland)* 19:0–18. doi: 10.3390/s19112589
  92. Holzmond O, Li X (2017) In situ real time defect detection of 3D printed parts. *Addit Manuf* 17:135–142. doi: 10.1016/j.addma.2017.08.003
  93. Lin W, Shen H, Fu J, Wu S (2019) Online quality monitoring in material extrusion additive manufacturing processes based on laser scanning technology. *Precis Eng* 60:76–84. doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.06.004
  94. Anderegg DA, Bryant HA, Ruffin DC, et al (2019) In-situ monitoring of polymer flow temperature and pressure in extrusion based additive manufacturing. *Addit Manuf* 26:76–83. doi: 10.1016/j.addma.2019.01.002
  95. Gardner JM, Hunt KA, Ebel AB, et al (2019) Machines as Craftsmen: Localized Parameter Setting Optimization for Fused Filament Fabrication 3D Printing. *Adv Mater Technol* 4:1800653. doi: 10.1002/admt.201800653
  96. Alafaghani A, Qattawi A (2018) Investigating the effect of fused deposition modeling

- processing parameters using Taguchi design of experiment method. *J Manuf Process* 36:164–174. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.09.025
97. Dong G, Wijaya G, Tang Y, Zhao YF (2018) Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures. *Addit Manuf* 19:62–72. doi: 10.1016/j.addma.2017.11.004
98. Bähr F, Westkämper E (2018) Correlations between Influencing Parameters and Quality Properties of Components Produced by Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP* 72:1214–1219. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.048
99. Montgomery DC (2006) Design and Analysis of Experiments. *Technometrics* 48:158–158. doi: 10.1198/tech.2006.s372
100. Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E, et al (2012) Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* 9:676–682. doi: 10.1038/nmeth.2019
101. Tinevez J-Y, Perry N, Schindelin J, et al (2017) TrackMate: An open and extensible platform for single-particle tracking. *Methods* 115:80–90. doi: 10.1016/j.ymeth.2016.09.016