



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ
ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ
ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

ΑΓΓΕΛΟΣ Κ. ΒΑΣΙΛΑΚΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΑΝ. ΚΑΘ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΙΑΝΑΤΣΗΣ, ΠΑΝ. ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΑΝ. ΚΑΘ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΝΔΡΕΑΔΗΣ, ΑΠΘ

ΚΑΘ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΔΕΔΟΥΣΗΣ, ΠΑΝ. ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα ερευνητική εργασία, αποτελεί την ολοκλήρωση ενός ακαδημαϊκού έργου που ξεκίνησε πριν αρκετά χρόνια με τις προπτυχιακές μου σπουδές και ολοκληρώνεται ύστερα από επίμονο αλλά και ιδιαίτερο επίπονο προσωπικό αγώνα, παρουσιάζοντας την Διδακτορική μου Διατριβή. Θα ήθελα για αυτό τον λόγο να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε συγκεκριμένα πρόσωπα, που χωρίς την αρωγή τους δεν θα ήταν δυνατή η περαίωση της.

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω από καρδιάς, τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Γιαννατσή Ιωάννη, που πίστεψε σε εμένα και μου έδωσε την ευκαιρία να με δεχθεί στην ερευνητική του ομάδα και με αυτόν τον τρόπο να ολοκληρώσω τον κύκλο σπουδών που είχα προγραμματίσει. Η δική του συμμετοχή ήταν καθοριστική σε όλη αυτή την πορεία και η συνεχή του υποστήριξη, ήταν σε κάθε σημείο ιδιαίτερη προς το πρόσωπο μου, για αυτό τον λόγο εκφράζω την προσωπική μου ευγνωμοσύνη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον Καθηγητή κ. Ανδρεάδη Γεώργιο και τον Καθηγητή κ. Δεδούση Βασίλειο, για την αμέριστη επιστημονική τους αρωγή όλο αυτό το διάστημα, καθώς και όλο το ερευνητικό προσωπικό του Πανεπιστημίου Πειραιώς, που η συνεργασία τους μου έδινε συνεχώς το έναυσμα για περαιτέρω και πιο εποικοδομητική εργασία. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του Καθηγητές μου, τόσο από τις προπτυχιακές όσο και από τις μεταπτυχιακές μου σπουδές, οι οποίοι μου εμφύσησαν το ενδιαφέρον για την επιστημονική έρευνα και με παρότρυναν να ασχοληθώ με αυτή.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε σε όλη αυτή την πορεία, καθώς επίσης και τα αδέρφια μου Σωτήρη και Σπύρο, για την υποστήριξη τους σε όλη αυτή την προσπάθεια, όπου οι συμβουλές του ήταν πάντα οδηγός για εμένα. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Μηλίτσα και Κωσταντίνο Βασιλάκο, που με την προσωπική του θυσία και προσφορά τους, μου έδωσαν την ευκαιρία να σπουδάσω και να πραγματοποιήσω τα όνειρα μου. Κάνοντας ιδιαίτερη μνεία στον πατέρα μου, ο οποίος δεν βρίσκεται πλέον στην ζωή, τον ευχαριστώ βαθύτατα για όλη του την προσφορά του και την αρωγή του. Οι συμβουλές του θα είναι πάντοτε οδηγός για εμένα.

Τέλος δεν θα μπορούσα να λησμονήσω την συμπαράσταση της προσωπικής μου οικογένειας, της γυναίκας μου Νίκης και των δυο μου παιδιών, Ειρήνης και Αιμιλιανού, που η καθημερινή τους στήριξη, μου έδινε δύναμη να συνεχίσω και να ολοκληρώσω την επίπονη αυτή προσπάθεια. Πέρα από τις ευχαριστίες μου, θα ήθελα επίσης να τους αφιερώσω και την παρούσα εργασία, που αποτελεί για εμένα το επιστέγασμα σκληρής δουλειάς πολλών ετών.

Στην γυναικά μου Νίκη, στα παιδιά μου Ειρήνη και Αιμιλιανό

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) αποτελεί μια σχετικά νέα οικογένεια μεθόδων παραγωγής οι οποίες αναπτύχθηκαν τα τέλη του 20ου αιώνα. Αυτό που, πρακτικά, διαφοροποιεί τις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής από τις τυπικές τεχνικές κατεργασιών, είναι η δυνατότητα αποτελεσματικότερης διαχείρισης πολύπλοκων μορφολογικά προϊόντων με σαφώς καθορισμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, εξετάζονται τα ζητήματα που αφορούν στον προγραμματισμό της κατασκευής αντικειμένων ετερογενούς δομής με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής μέσω εξώθησης υλικού (material extrusion additive manufacturing), και συγκεκριμένα της εξώθησης θερμοπλαστικών υλικών (thermoplastic material extrusion) με κύρια ερευνητικά ζητήματα: α) την κατασκευή ετερογενούς δομής σε επίπεδο στρώσης με μια και ενιαία διαδρομή εναπόθεσης χωρίς διακοπές, β) την κατασκευή ετερογενούς δομής σε επίπεδο αντικείμενου χωρίς την χρήση εσωτερικών υποστηρικτικών δομών, και γ) την κατασκευή ετερογενών δομών με χρήση δυο υλικών. Για την επίλυση των παραπάνω θεμάτων αναπτύχθηκαν δύο μεθοδολογικές προσεγγίσεις, η προσέγγιση νέφους σημείων και η προσέγγιση πλέγματος. Στην πρώτη προσέγγιση, ένα νέφος σημείων κατανέμεται τοπικά σε επίπεδο στρώσης με βάση την αντίστοιχη εικόνα bitmap, και στη συνέχεια σχεδιάζεται η διαδρομή εναπόθεσης, η οποία ταυτίζεται με την αλληλουχία επίσκεψης των σημείων, επιλύοντας το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (Travelling Salesman Problem). Στη προσέγγιση πλέγματος, ο σχεδιασμός της δομής πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τεχνικές αναπαράστασης με εικονοστοιχεία όγκου (voxel), στα οποία αποδίδονται συγκεκριμένες τιμές πυκνότητας ή/και σύστασης. Τα voxel αναλύονται αρχικά σε υπο-στοιχεία (πλακίδια, κύτταρα και ψηφίδες), τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη σχεδίαση των διαδρομών εναπόθεσης ανά στρώση συνθέτοντας πρότυπες στοιχειώδεις διαδρομές ή ακολουθώντας μια ημι-τυχαία διαδικασία ανάπτυξης/σχεδίασης των επιμέρους διαδρομών. Οι υπολογιστικές και κατασκευαστικές δοκιμές των αναπτυχθέντων μεθοδολογικών προσεγγίσεων και αλγορίθμων έδειξαν ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη υπολογιστική επιβάρυνση, καθώς και ότι είναι δυνατός ο σχεδιασμός και η κατασκευή σύνθετων ετερογενών δομών/αντικειμένων ικανοποιώντας τους βασικούς περιορισμούς της ενιαίας και μη διακοπτόμενης διαδρομής ανά στρώση και της απουσίας εσωτερικών υποστηρικτικών δομών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης είναι, επίσης, δυνατή η επέκταση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας σε δυο υλικά, ακολουθώντας τις κατάλληλες προσαρμογές. Η επίτευξη, ωστόσο, μη διακοπτόμενων διαδρομών και για τα δύο υλικά μπορεί να επιτευχθεί μόνο υπό προϋποθέσεις. Ενδιαφέροντα θέματα περαιτέρω

μελλοντικής έρευνας, που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της μελέτης, αποτελούν η ανάπτυξη μεθόδων εξομάλυνσης της διαδρομής εναπόθεσης μέσω μείωσης του αριθμού των σημείων καμπής και η εφαρμογή των αναπτυχθέντων μεθοδολογικών τεχνικών χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς υλικών και άλλες τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, πέραν της εξώθησης υλικού.

ABSTRACT

Additive Manufacturing is a relatively new class of manufacturing methods that were developed at the end of the 20th century. What, in practice, differentiates Additive Manufacturing methods from standard/conventional manufacturing methods, is their ability to efficiently handle morphological and structural complexity. In the context of the present thesis, the issues concerning the design and fabrication of the manufacturing of heterogeneous structures/objects, i.e. objects with locally defined density and composition, by thermoplastic material extrusion are examined. Three main research questions were identified: a) the fabrication of a heterogeneous structure at the layer level by a single deposition path without interruptions, b) the fabrication of a heterogeneous structure at the object level without the use of internal supporting structures, and c) the fabrication of heterogeneous structures using two materials. To address the above issues, two methodological approaches were developed, the point cloud approach and the grid approach. In the first approach, a cloud of points is aptly distributed at the layer level based on the corresponding bitmap image, and the deposition path is subsequently designed, by defining the visiting sequence of the points through Traveling Salesman Problem optimization techniques. In the grid approach, heterogeneous objects are represented by voxels, which are assigned specific density and/or composition values. The voxels are broken down into sub-elements (laminae, cells and tiles), which are then used to design layer-by-layer deposition paths by joining elementary paths of standard or semi-random shape. Computational and fabrication tests of the developed methodological approaches and algorithms showed that the computational burden is not particularly high, and that it is possible to design and manufacture complex heterogeneous structures/objects satisfying the basic constraints of a single and uninterrupted path per layer and the absence of internal supporting structures. According to the results of the study, it is also possible to extend the specific methodology to two materials, following the appropriate adjustments. Achieving, however, uninterrupted paths for both materials faces more constraints and can only be achieved under conditions. Interesting topics for further research, identified during the study, are the development of methods to smooth the deposition path by reducing the number of turning points and the application of the developed methodological techniques employing various material combinations and different Additive Manufacturing technologies.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	3
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	3
2.1 Γενική περιγραφή της τεχνολογίας.....	3
2.2 Εφαρμογές	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	13
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	13
3.1 Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας	13
3.2 Διαδικασία κατασκευής με εξώθηση υλικού.....	14
3.3 Προγραμματισμός κατασκευής.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	19
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΝΟΥΣ ΔΟΜΗΣ.....	19
4.1 Εισαγωγικά	19
4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	19
4.3 Ερευνητικά ζητήματα	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	26
ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	26
5.1 Εισαγωγικά	26
5.2 Σχεδίαση διαδρομής στρώσης – Προσέγγιση Νέφους Σημείων.....	26
5.3 Σχεδίαση διαδρομής εναπόθεσης στρώσης – Προσέγγιση πλέγματος.....	32
5.4 Αλληλουχία επίσκεψης κυττάρων	37
5.5 Διαδικασία σχεδιασμού διαδρομής εναπόθεσης κυττάρων.....	40
5.6 Σχεδιασμός πρότυπων voxel.....	50
5.7 Δημιουργία τελικών διαδρομών εναπόθεσης και εντολών κώδικα G.....	54

5.8 Υπολογιστικές δοκιμές	55
5.9 Κατασκευαστικές δοκιμές	59
5.10 Κατασκευή ετερογενών δομών από περισσότερα του ενός υλικά	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	75
ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 2.1. Διαδικασία παραγωγής ενός κομματιού με μεθόδους ΠΚ.	4
Εικόνα 2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ΠΚ.	10
Εικόνα 2.3 - Παραδείγματα εφαρμογών ΠΚ (από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά): Αποκατάσταση κρανιακού τραύματος με εμφύτευμα (Gopakumar, 2004) · Βιοεκτυπωμένο μόσχευμα τραχείας (Zorf et al., 2013) · Το πρώτο αντικείμενο κατασκευασμένο με ΠΚ στο διάστημα (Ridgeway, 2014) · Μοντέλο δάκτυλου με εξωτερική ενεργοποίηση, κατασκευασμένο με μεθόδους 4D εκτύπωσης (Stiltner et al., 2011).	11
Εικόνα 3.1 - Σχηματική απεικόνιση μερικών από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πρότυπα πλήρωσης: (α) raster / zig-zag (β) περίγραμμα, (γ) εξαγωνικό και (d) hilbert.	18
Εικόνα 5.1. Σχηματική αναπαράσταση δύο στρώσεων και των αντίστοιχων νεφών σημείων και βέλτιστων διαδρομών: στρώση ορθογώνιου σχήματος με γραμμική μεταβολή της πυκνότητας (αριστερά), και στρώση κυκλικής μορφής με ακτινική μεταβολή της πυκνότητας (δεξιά). ...	28
Εικόνα 5.2. Σημεία οδηγία για την κάλυψη τετραγωνικής περιοχής με 8 διαφορετικές διαβαθμίσεις πυκνότητας.	30
Εικόνα 5.3. Σχηματική αναπαράσταση μιας στρώσης μεταβλητής πυκνότητας σε μορφή εικόνας bitmap (α), του αντίστοιχου νέφους σημείων (β), και της τροχιάς εναπόθεσης υλικού (γ).	30
Εικόνα 5.4. Σχηματική αναπαράσταση της κατασκευασθείσας τετραγωνικής στρώσης χρησιμοποιώντας διαφορετικές διαμέτρους ακροφυσίων (από 0.2 mm έως 0.8 mm).	31
Εικόνα 5.5. Παράδειγμα voxel αναπαράστασης ετερογενούς αντικειμένου: Ισομετρική προβολή του αντικειμένου (αριστερά) και κάτοψη του τέταρτου, από κάτω, στρώματος voxel (δεξιά).	34
Εικόνα 5.6. Σχηματική απεικόνιση ενός voxel (α), ενός πλακιδίου (β) και δύο διαδρομών εναπόθεσης κυττάρων (γ).	35
Εικόνα 5.7. Σχηματική απεικόνιση της αλγοριθμικής διαδικασίας σχεδίασης των διαδρομών εναπόθεσης και δημιουργίας του σχετικού αρχείου εντολών σε κώδικα G.	36
Εικόνα 5.8. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας σχηματισμού της ακολουθίας επίσκεψης κελίου.	38

Εικόνα 5.9. Παράδειγμα σχηματισμού της αλληλουχίας επίσκεψης πλακιδίων/κυττάρων: (α) Αρχικές αλληλουχίες επίσκεψης και (β) η τελική συγχωνευμένη αλληλουχία.....	39
Εικόνα 5.10. Σχηματική αναπαράσταση κεντρικών διαδρομών (πάνω σειρά) και διαγώνιων διαδρομών εναπόθεσης (κάτω σειρά). Στα αριστερά απεικονίζονται οι διαδρομές ελάχιστου μήκους, στη μέση απεικονίζονται πλακίδια με ομοιόμορφη πυκνότητα ανά κύτταρο, ενώ πλακίδια με μεταβλητή πυκνότητα ανά κύτταρο παρουσιάζονται στα δεξιά.....	42
Εικ. 5.11. Σχηματικές απεικονίσεις των διαδρομών εναπόθεσης που διασχίζουν τέσσερα κύτταρα ενός πλακιδίου χρησιμοποιώντας τη διαγώνια προσέγγιση (αριστερά) και την κεντρική προσέγγιση (δεξιά).	44
Εικόνα 5.12. Διαφορετικές διαδρομές εναπόθεσης με κατεύθυνση από αριστερά προς δεξιά, που επισκέπτονται 9 από τις 25 ψηφίδες ενός κυττάρου.....	44
Εικόνα 5.13. Σχηματικές απεικονίσεις τριών βιβλιοθηκών προτύπων διαδρομών για κύτταρα 5×5. Οι διαδρομές ελάχιστης πυκνότητας (36%) για όλους τους τύπους κυττάρων απεικονίζονται στα αριστερά, ενώ οι διαδρομές υψηλότερης πυκνότητας για το κάτω αριστερό κύτταρο (τύπου a) απεικονίζονται στα δεξιά.....	46
Εικόνα 5.14. Αναπαράσταση τριών τετραγωνικών voxel αντικειμένων και των αντίστοιχων διαδρομών εναπόθεσης: περίπτωση βαθμιαίας αύξησης πυκνότητας (επάνω), τυχαίας κατανομής πυκνότητας (κέντρο) και ακτινικής βαθμιαίας αύξησης πυκνότητας (κάτω).	47
Εικόνα 5.15. Παράδειγμα της ημι-τυχαίας αλγοριθμικής διαδικασίας σχηματισμού διαδρομής, όπου ζεύγη πλακιδίων ενσωματώνονται διαδοχικά στο ακολουθία επίσκεψης πλακιδίων.....	49
Εικόνα 5.16. Αναπαράσταση δύο τετραγωνικών voxel αντικειμένων και των αντίστοιχων κεντρικών διαδρομών εναπόθεσης ημι-τυχαίας μορφής: περίπτωση βαθμιαίας αύξησης πυκνότητας (επάνω) και τυχαίας κατανομής πυκνότητας (κάτω).	50
Εικόνα 5.17. Σχηματικές απεικονίσεις δύο δομών voxel: 2 ½ διαστάσεων (αριστερά) και πλήρως τριδιάστατων (δεξιά).	51
Εικόνα 5.18. Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης των μεταβατικών στρωμάτων, η οποία χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση υπερβολικών προεξοχών: πρόοψη (επάνω) και ισομετρική απεικόνιση (κάτω).....	52
Εικόνα 5.19. Σχηματική αναπαράσταση ενός voxel αποτελούμενου από πλακίδια μεταβλητής πυκνότητας.....	53

Εικόνα 5.20. Αναπαράσταση voxel representation (left) and the corresponding deposition paths (right) for a disc-shaped porous structure (top) and a topologically optimized cantilever beam structure (bottom).....	56
Εικόνα 5.21. Αναπαραστάσεις voxel μοντέλων υπολογιστικών δοκιμών: «φύλλο» (πάνω), «πέλμα» (μέση) and «πιγκουίνος» (κάτω).....	58
Εικόνα 5.22. Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου βαθμιαία αυξανόμενης πυκνότητας (πάνω) και τυχαίας κατανεμημένης πυκνότητας (κάτω και φωτογραφίες των αντίστοιχων δοκιμίων.	60
Εικόνα 5.23. Αναπαράσταση Voxel (αριστερά) μιας δομής με αυξανόμενη πυκνότητα εναπόθεσης, στην κατεύθυνση κατασκευής, και την αντίστοιχη κατασκευασμένο μέρος (δεξιά). Οι διαδρομές εναπόθεσης ελασμάτων ανά στρώση voxel απεικονίζονται σχηματικά στο κέντρο.....	62
Εικόνα 5.24. Φωτογραφίες του κατασκευασθέντος δοκιμίου αυξανόμενης καθ' ύψος πυκνότητας voxel (αριστερά), 3D απεικονίσεις των πρότυπων δομές voxel για το πρώτο και το τελευταίο στρώμα (κέντρο) και πλάγια όψη της ψηφιακής αναπαράστασης του τελικού αντικειμένου (δεξιά), χρησιμοποιώντας τη λειτουργία G-code Viewer του λογισμικού Craftware.....	63
Εικόνα 5.25. Φωτογραφίες του κατασκευασθέντος δοκιμίου αυξανόμενης καθ' ύψος πυκνότητας voxel από ημιδιαφανές PLA σε πρόοψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά).....	63
Εικόνα 5.26. Μοντέλο voxel δοκιμίου με κλειστούς πόρους και κατακόρυφα κανάλια (πάνω αριστερά), και φωτογραφία του αντίστοιχου φυσικού δοκιμίου (κάτω δεξιά). Οι χρησιμοποιηθείσες πρότυπες δομές voxel απεικονίζονται στο κέντρο.	64
Εικόνα 5.27. Σχηματική απεικόνιση της διαδρομής εναπόθεσης για την περίπτωση δοκιμίου με μεταβλητό μέγεθος voxel (αριστερά), οι χρησιμοποιούμενες διαδρομές εναπόθεσης ανά πλακίδιο για τους δύο τύπους voxel (κέντρο), και φωτογραφία του αντίστοιχου κατασκευασθέντος δοκιμίου (δεξιά).....	65
Εικόνα 5.28 Μοντέλο voxel θολωτού δοκιμίου (πάνω) και φωτογραφίες των αντίστοιχων δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με πλάτος εναπόθεσης/μέγεθος ψηφίδας 0,2 mm (αριστερά) και 0,4 mm (δεξιά). Το δοκίμιο διαθέτει μια πυκνότερη εσωτερική περιοχή μέχρι το έβδομο στρώμα (πάνω αριστερά) η οποία καλύπτεται από λιγότερα πυκνά voxel στα επόμενα στρώματα.	67

Εικόνα 5.29. Διαδοχική εναπόθεση δύο υλικών σε μία διαδρομή.	68
Εικόνα 5.30. Σχηματική αναπαράσταση των διαδρομών εναπόθεσης εσωτερικού (πορτοκαλί) και εξωτερικού (μπλε) υλικού.	70
Εικόνα 5.31. Μοντέλα voxel δύο αντικειμένων (πάνω) και οι αντίστοιχες διαδρομές εναπόθεσης δύο υλικών ακολουθώντας τη στρατηγική εσωτερικής/εξωτερικής εναπόθεσης (εσωτερικό-μπλε/εξωτερικό-κόκκινο).	71
Εικόνα 5.32. Σχηματική αναπαράσταση των συνεχών διαδρομών εναπόθεσης εσωτερικού (κόκκινο) και εξωτερικού (μπλε) υλικού για την κάλυψη μιας στρώσης από 6 πλακίδια.	72
Εικόνα 5.33. Σχηματική αναπαράσταση των διαδρομών εναπόθεσης εσωτερικού (κόκκινο) και εξωτερικού (μπλε) υλικού σε ένα πλακίδιο: (α) απομονωμένη «νησίδα» εσωτερικού υλικού και (β) δημιουργία χαρακτηριστικών που ενισχύουν τη σύμπλεξη των δύο υλικών.	73

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5.1. Αριθμός σημείων διαδρομής, μήκος διαδρομής, χρόνος δημιουργίας αρχείου κώδικα G και χρόνος σχεδίασης διαδρομής για τις δύο δομές της Εικ. 5.20.	57
Πίνακας 5.2. Στοιχεία των σχεδιασθέντων διαδρόμων εναπόθεσης και οι αντίστοιχοι υπολογιστικοί χρόνοι για τα τρία μοντέλα της Εικ. 5.21.....	59
Πίνακας 5.3. Αριθμός σημείων και μέγεθος διαδρομή κατασκευής, μέγεθος αρχείου εντολών σε κώδικα G, μέγεθος αρχείου και χρόνος κατασκευής για τετράγωνο σχήμα.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) αποτελεί μια σχετικά νέα οικογένεια μεθόδων παραγωγής οι οποίες αναπτύχθηκαν τα τέλη του 20^{ου} αιώνα για να επιταχύνουν τη διαδικασία κατασκευής φυσικών μοντέλων και λειτουργικών πρωτοτύπων, που απαιτούνται κατά την ανάπτυξη και το σχεδιασμό νέων προϊόντων. Τα χρόνια που ακολούθησαν οι συγκεκριμένες τεχνολογίες εξελίχθηκαν σημαντικά, από πλευράς αξιοπιστίας, ακρίβειας, διαθέσιμων υλικών και ταχύτητας με αποτέλεσμα να θεωρούνται, πλέον, αξιόπιστες μέθοδοι κατασκευής εξειδικευμένων παραγωγικών εργαλείων και διατάξεων, καθώς και τελικών προϊόντων με σχετικά μικρό όγκο παραγωγής και πολύπλοκη μορφολογία.

Αυτό που, πρακτικά, διαφοροποιεί τις τεχνολογίες ΠΚ από τις τυπικές τεχνικές κατεργασιών (κοπή, χύτευση και διαμόρφωση), πέρα από τη σχετικά μεγάλη ταχύτητα κατασκευής, είναι η δυνατότητα αποτελεσματικότερης διαχείρισης πολύπλοκων μορφολογικά προϊόντων με σαφώς καθορισμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά. Σε πολλές μεθόδους ΠΚ υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας πολλαπλών υλικών ή δυναμικής μεταβολής της σύστασης της πρώτης ύλης, γεγονός που επιτρέπει την κατασκευή αντικειμένων με τοπικά ελεγχόμενη σύσταση, κάτι το οποίο είναι επίσης πολύ δύσκολο έως αδύνατο χρησιμοποιώντας τυπικές μεθόδους κατεργασιών. Αντικείμενα/τεχνουργήματα αντίστοιχης ετερογενούς δομής εκτιμάται ότι μπορούν να βρουν σημαντικές εφαρμογές στα πεδία της βιοτεχνολογίας, της ρομποτικής και των προηγμένων υλικών, καθώς και να βοηθήσουν στην ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων/προϊόντων σε κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική βιομηχανία και η παροχή υπηρεσιών υγείας και αποκατάστασης.

Η κατασκευή αντικειμένων, ωστόσο, με ελεγχόμενη ετερογενή δομή, παρότι θεωρητικά εφικτή, απαιτεί τη προσεκτική μελέτη και την επίλυση διάφορων ζητημάτων που σχετίζονται με διάφορα στάδια της διαδικασίας παραγωγής, από τον προγραμματισμό κατεργασιών (process planning) μέχρι τις μετα-παρασκευαστικές εργασίες (post-processing operations). Τα περισσότερα από αυτά τα ζητήματα σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τεχνικής ΠΚ, καθώς διαφορετικές τεχνικές παρουσιάζουν διαφορετικές δυνατότητες αλλά και περιορισμούς σε ό,τι αφορά στη μορφολογία αλλά και τη σύσταση των αντικειμένων. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής εξετάζονται τα ζητήματα που αφορούν στην προγραμματισμό της κατασκευής αντικειμένων ετερογενούς δομής με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής

μέσω εξώθησης υλικού (material extrusion additive manufacturing), και συγκεκριμένα της εξώθησης θερμοπλαστικών υλικών (thermoplastic material extrusion). Με τον όρο ετερογενείς δομές (heterogeneous structures), στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, περιγράφονται δομές μεταβλητής (μη-ομοιόμορφης), τοπικά ελεγχόμενης πυκνότητας και σύστασης.

Η δομή της παρούσας διατριβής έχει ως εξής: Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές τεχνολογίες ΠΚ και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, καθώς και οι εφαρμογές τους. Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζεται πιο αναλυτικά η μέθοδος της εξώθησης θερμοπλαστικών υλικών, εστιάζοντας στις μεθόδους προγραμματισμού της διαδικασίας και επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι και τα αποτελέσματα προηγούμενων σχετικών μελετών, καθώς και τα επιμέρους ερευνητικά ζητήματα, όπως προέκυψαν από την ανάλυση της τεχνολογίας εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού και τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας. Οι μέθοδοι και τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής, καθώς και τα αποτελέσματα των σχετικών δοκιμών, παρουσιάζονται αναλυτικά στο πέμπτο κεφάλαιο. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της μελέτης καθώς και σχετικά θέματα προς μελλοντική διερεύνηση.

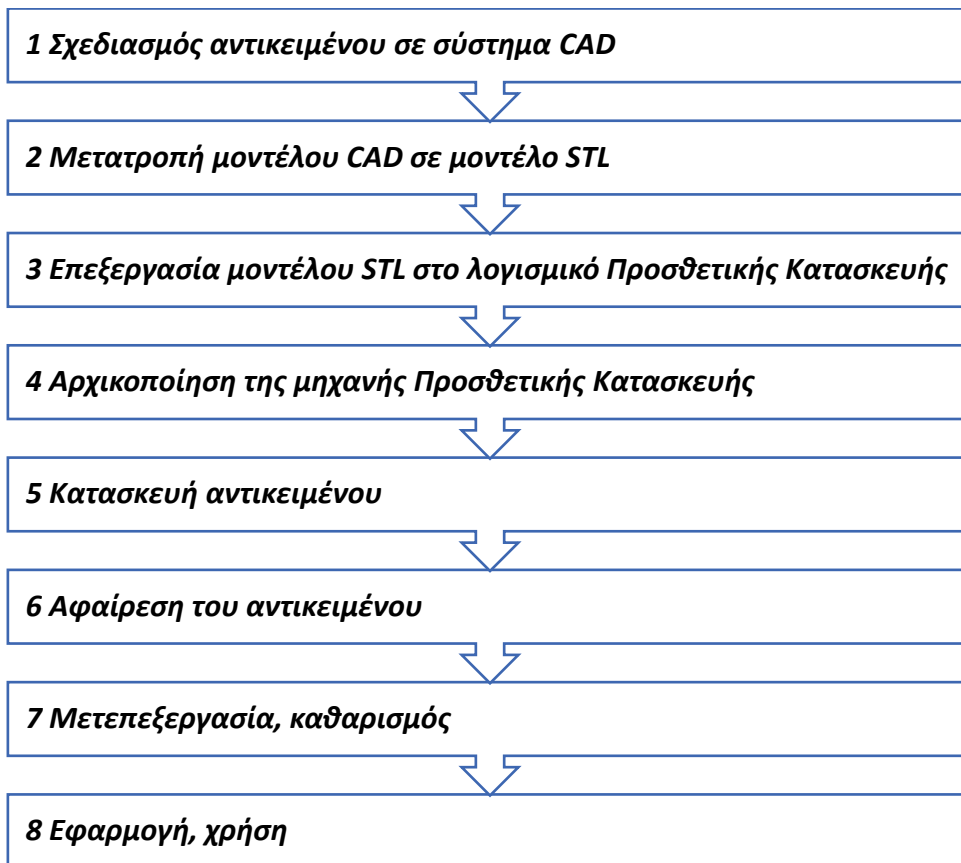
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1 Γενική περιγραφή της τεχνολογίας

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing), αποτελεί μια σχετικά νέα προσέγγιση στην μορφοποίηση υλικών και την κατασκευή κομματιών και εξαρτημάτων, μέσω της διαδοχικής μορφοποίησης και σύνδεσης λεπτών στρωμάτων (ISO/ASTM 52900:2015 · Noriega et al., 2013). Μέσω αυτής της προσέγγισης, είναι δυνατή η κατασκευή κομματιών πολύπλοκης γεωμετρίας από ένα ή περισσότερα υλικά σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (Rezaie et al. 2013). Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως π.χ. στην κατεργασία κεραμικών και σύνθετων υλικών, η Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ) επιτρέπει την κατασκευή μορφών που δεν είναι δυνατές με τις παραδοσιακές μεθόδους (Deckers et al., 2014 · Kumar & Kruth, 2010). Από άποψη διαστασιολογικής ακρίβειας, οι περισσότερες τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής μπορούν να επιτύχουν σχετικά καλές επιδόσεις, υπό την προϋπόθεση ότι ακολουθούνται οι κατάλληλες στρατηγικές και έχουν επιλεγθεί οι κατάλληλες παράμετροι για την μορφοποίηση των υπό κατεργασία υλικών (Oxman , 2011 · Fan & Liou , 2012 · Anitha et al., 2001).

Σύμφωνα με τους Gibson et al. (2014) η διαδικασία παραγωγής ενός κομματιού με μεθόδους ΠΚ περιλαμβάνει οκτώ στάδια (Εικ. 2.1). Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας, δημιουργείται το ψηφιακό μοντέλο του υπό παραγωγή μοντέλου, χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους και συστήματα CAD. Το ψηφιακό μοντέλο μετατρέπεται στη συνέχεια σε μορφή STL, και εισάγεται στο λογισμικό προγραμματισμού της μηχανής ΠΚ, ορίζονται οι παράμετροι κατασκευής του, όπως το πάχος του στρώματος, ο προσανατολισμός κατασκευής, η ταχύτητα εναπόθεσης/μορφοποίησης υλικού κλπ. Στη συνέχεια, το σχετικό κατασκευαστικό αρχείο αποστέλλεται στη μηχανή ΠΚ όπου εκτελούνται οι απαραίτητες εργασίες προετοιμασίας της κατασκευαστικής φάσης. Ακολουθεί η πλήρως αυτοματοποιημένη φάση της κατασκευής του κομματιού στη μηχανή. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή, το κομμάτι απομακρύνεται από τη μηχανή και καθαρίζεται από τυχόν υπολείμματα πρώτης ύλης, υποστηρικτικές δομές κλπ. Στο στάδιο της μετεπεξεργασίας, εκτελούνται χειρωνακτικές ως επί το πλείστον δευτερεύουσες κατεργασίες, έτσι ώστε να βελτιωθούν οι μορφολογικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του κομματιού. Τέλος, η διαδικασία ολοκληρώνεται με το τελικό κομμάτι έτοιμο πλέον προς δοκιμή και χρήση.



Εικόνα 2.1. Διαδικασία παραγωγής ενός κομματιού με μεθόδους ΠΚ.

Τα δύο πρώτα στάδια της γενικής διαδικασίας παραγωγής (δημιουργία ψηφιακού μοντέλου και εξαγωγή σε μορφή STL), είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό κοινά για όλες τις τεχνολογίες και τα συστήματα ΠΚ. Τα επόμενα, ωστόσο, στάδια διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε συγκεκριμένης τεχνολογίας/διεργασίας ΠΚ.

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO/ASTM 52900:2015 οι διεργασίες ΠΚ ταξινομούνται σε επτά βασικές κατηγορίες:

1. Εναπόθεση/ψεκασμός συγκολλητικής ουσίας,
2. Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη,
3. Εξώθηση υλικού,
4. Εναπόθεση/ψεκασμός υλικού,
5. Σύντηξη πούδρας σε κλίνη,
6. Συγκόλληση επάλληλων φύλλων, και
7. Φωτοπολυμερισμός σε κάδο.

Στις διεργασίες εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας (Binder Jetting - BJ), υλικό σε μορφή πούδρας συγκολλάται τοπικά μέσω της εναπόθεσης κατάλληλης κόλλας σε μορφή, συνήθως, σταγονιδίων, σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο στρώματα τα οποία εναποτίθενται σταδιακά το ένα πάνω στο άλλο. Συνήθη υλικά για συστήματα BJ αποτελούν ο γύψος, το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA), ειδικά κράματα χάλυβα και μπρούτζου καθώς και κάποια είδη κεραμικών (Gibson et al., 2014 · Mostafei et al., 2021 · Prakash et al., 2018). Χαρακτηριστικές τεχνολογίες που βασίζονται στην συγκεκριμένη τεχνική αποτελούν οι PBIH (Powder Bed and Inkjet Head) και PP (Plaster-based 3D Printing) (Kellens et al., 2017). Στα πλεονεκτήματα των σχετικών τεχνολογιών συγκαταλέγονται η σχετικά μεγάλη ταχύτητα και το χαμηλό κόστος κατασκευής, η δυνατότητα κατασκευής έγχρωμων αντικειμένων (με την προσθήκη χρωστικών στη συγκολλητική ουσία), η απουσία υποστηρικτικών δομών, και η κατεργασία σε τυπικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (Gibson et al., 2014 · Mostafei et al., 2021). Βασικά μειονεκτήματα αποτελούν, οι σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες των κομματιών όπως εξάγονται από τη μηχανή, γεγονός που επιβάλλει τη μετεπεξεργασία αυτών με δευτερεύουσες κατεργασίες απομάκρυνσης της συγκολλητικής ουσίας και μείωσης του πορώδους των κομματιών. Οι δευτερεύουσες αυτές εργασίες, πέρα από το ότι επιβαρύνουν το κόστος και τον χρόνο παραγωγής, καθιστούν ακόμα δυσκολότερη την επίτευξη υψηλής διαστασιολογικής ακρίβειας λόγω των παραμορφώσεων που επιφέρουν στη μορφολογία του κομματιού.

Στις διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (Directed Energy Deposition - DED), εστιασμένη ενεργειακή δέσμη (π.χ. δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων) χρησιμοποιείται για την τοπική τήξη του υλικού καθώς αυτό εναποτίθεται μέσω ενός ακροφυσίου. Το υλικό παρέχεται, συνήθως, σε μορφή νήματος, σύρματος ή πούδρας και ο σχηματισμός των στρώσεων επιτυγχάνεται μέσω κίνησης του ακροφυσίου (Gibson et al., 2014). Οι σχετικές τεχνολογίες κατεργάζονται κυρίως μεταλλικά και κεραμικά υλικά (Dass & Moridi , 2019). Βασικά μειονεκτήματα της τεχνικής, είναι οι σχετικά χαμηλές επιδόσεις από άποψη ακρίβειας, ποιότητας επιφανειών και ταχύτητας παραγωγής. Ως πλεονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί η δυνατότητα εναπόθεσης σε υφιστάμενες δομές, γεγονός που επιτρέπει την επισκευή ή διόρθωση υπάρχοντων κομματιών, καθώς και η δυνατότητα εναπόθεσης/κίνησης της κεφαλής σε περισσότερους από 3 άξονες (Gibson et al., 2014 · Dass & Moridi, 2019). Χαρακτηριστικές τεχνολογίες που βασίζονται στη συγκεκριμένη τεχνική είναι οι LMD (Laser Material Deposition), DALM (Direct Additive Laser Manufacturing), η DMD (Direct Metal Deposition) και η LDD (Laser Direct Deposition) (Kellens et al., 2017).

Στις διεργασίες εξώθησης υλικού (Material Extrusion - ME) το υλικό εξωθείται και εναποτίθεται επιλεκτικά μέσω ενός ακροφυσίου. Στη συνηθέστερη υλοποίηση της τεχνολογίας το υλικό παρέχεται σε μορφή νήματος και θερμαίνεται τοπικά στο ακροφύσιο έτσι ώστε να είναι δυνατόν να εναποτεθεί σε ρευστή μορφή μέσω της συνδυασμένης κίνησης ακροφυσίου και της πλατφόρμας κατασκευής (Pham & Gault, 1998). Καθώς το υλικό ψύχεται, επαναστερεοποιείται, σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο τις διαδοχικές στρώσεις του κομματιού (Ahn et al., 2009). Η πλειονότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα εξώθησης υλικού, ανήκουν στην οικογένεια των θερμοπλαστικών υλικών, αυξάνονται όμως σταδιακά οι εφαρμογές της τεχνολογίας στην κατασκευή κομματιών από κεραμικά και βιοσυμβατά/βιοδιασπώμενα υλικά. Βασικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου, αποτελούν η δυνατότητα εκμετάλλευσης ποικιλίας υλικών, καθώς και η σχετικά απλή τεχνολογικά φύση των σχετικών συστημάτων. Λόγω της φύσης των χρησιμοποιούμενων υλικών δεν απαιτούνται επίσης μεγάλες ποσότητες ενέργειας, ενώ και η συσσωρευμένη διεθνώς τεχνογνωσία είναι σχετικά μεγάλη. Βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου, είναι η σχετικά χαμηλή κατασκευαστική ταχύτητα και η πιθανή παραγωγή τοξικών αναθυμιάσεων κατά την διαδικασία τήξης των υλικών (Gibson et al., 2014), γεγονός που επιβάλλει την ύπαρξη συστήματος εξαερισμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελούν οι τεχνολογίες FDM (Fused Deposition Modeling), FFF (Fused Filament Fabrication) και DIW (Direct Ink Writing).

Στην ΠΚ μέσω εναπόθεσης/ψεκασμού υλικού (Material Jetting - MJ), μια κινούμενη διάταξη/κεφαλή εναπόθεσης εφοδιασμένη με πολλαπλές οπές χρησιμοποιείται για την επιλεκτική εναπόθεση σταγονιδίων υλικού και το σχηματισμό των σχετικών στρώσεων. Παράλληλα με την εναπόθεση ή κατόπιν αυτής πραγματοποιείται στερεοποίηση του υλικού μέσω έκθεσης σε ακτινοβολία. Όπως είναι προφανές, στη συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιούνται φωτοπολυμερή υλικά, επεκτείνεται όμως σταδιακά η εκμετάλλευση της τεχνολογίας στην κατεργασία σύνθετων υλικών κεραμικής ή μεταλλικής βάσης με προσμίξεις φωτοπολυμερούς συγκολλητικής ουσίας (Gibson et al., 2014). Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται, η δυνατότητα δυναμικής ανάμιξης δύο ή περισσότερων βασικών υλικών για την επίτευξη τοπικά ελεγχόμενων μεταβολών στις ιδιότητες του εναποτιθέντος υλικού, όπως π.χ. στο χρώμα ή την ελαστικότητά του, η σχετικά ομοιογενής μηχανική συμπεριφορά των τελικών κομματιών και η υψηλή ταχύτητα κατασκευής. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελεί, η σχετικά μικρή ποικιλία υλικών και οι σχετικά φτωχές μηχανικές τους

ιδιότητες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τεχνολογιών εναπόθεσης υλικού αποτελούν οι MJM (Multi Jet Modeling) και PolyJet (Kellens et al., 2017).

Η σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion – PBF), αποτελεί μια από τις παλαιότερες μεθόδους ΠΚ, αποτελώντας τη βάση για διάφορες σχετικές τεχνολογίες. Στην συνηθέστερη εκδοχή της, πούδρα υλικού εναποτίθεται σε μία λεπτή στρώση που καλύπτει όλο το διαθέσιμο εμβαδό. Κατόπιν, μια εστιασμένη ενεργειακή δέσμη (συνήθως ακτίνα λέιζερ), σαρώνει επιλεκτικά την επιφάνεια της στρώσης, λιώνοντας ή συσσωματώνοντας τους κόκκους της πούδρας και σχηματίζοντας το απαιτούμενο στρώμα. Ακολουθεί η βύθιση της πλατφόρμας, η εφαρμογή νέας στρώσης πούδρας και ο σχηματισμός της επόμενου στρώματος. Ο κύκλος εναπόθεσης-συσσωμάτωσης επαναλαμβάνεται για κάθε στρώση μέχρι να ολοκληρωθεί το κομμάτι. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται, η σχετικά μεγάλη ποικιλία υλικών (θερμοπλαστικά, μεταλλικά υλικά, κεραμικά υλικά) και οι σχετικά καλές ιδιότητες αυτών, όπως και των τελικών κομματιών. Ως μειονεκτήματα μπορούν να θεωρηθούν το σχετικά υψηλό κόστος εξοπλισμού αλλά και υλικών, δεδομένου ότι μεγάλο ποσοστό της μη χρησιμοποιούμενης πούδρας, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου λόγω υποβάθμισης των ιδιοτήτων της, καθώς και η ανάγκη υποστήριξης ειδικά στην κατεργασία μετάλλων (Vayre et al., 2013). Το σχετικά υψηλό κόστος μπορεί, ωστόσο, να μειωθεί σημαντικά με καλή εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου των μηχανών για την ταυτόχρονη παραγωγή πολλών κομματιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τεχνολογιών PBF αποτελούν οι SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), EBM (Electron Beam Melting) και DMLS (Direct Metal Laser Sintering) (Kellens et al., 2017).

Οι διεργασίες συγκόλλησης επάλληλων φύλλων (Sheet Lamination – SL) αποτελούν συχνά κάποιες από τις πιο φθηνές και τεχνικά απλές μεθόδους ΠΚ. Στην πιο συνήθη υλοποίηση της μεθόδου, η πρώτη ύλη σε μορφή τυλιγμένου σε ρολό φύλλου τροφοδοτείται σταδιακά στον χώρο μορφοποίησης των στρώσεων όπου και κόβεται στο κατάλληλο σχήμα και συγκολλάται στις αμέσως προηγούμενες στρώσεις. Συνήθη υλικά αποτελούν το χαρτί και πολυμερή, έχουν ωστόσο χρησιμοποιηθεί σε κάποιο βαθμό και μεταλλικά φύλλα (Gibson et al., 2014). Ανάλογα με το υλικό, η συγκόλληση μπορεί να γίνει με την εφαρμογή ειδικής κόλλας, με μηχανική σύσφιξη, με εφαρμογή θερμότητας και στην περίπτωση των μετάλλων μέσω υπερήχων. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή κατασκευαστική ταχύτητα και χαμηλό κόστος, ενώ στην περίπτωση της κατεργασίας χαρτιού επιτρέπει την κατασκευή πολύχρωμων κομματιών. Η φύση, ωστόσο, της μεθόδου καθιστά δύσκολη έως αδύνατη την κατασκευή

κομματιών με πολύπλοκη εσωτερικά μορφολογία, γεγονός που σε συνδυασμό με το σχετικά μεγάλο πάχος στρώσεων περιορίζει σημαντικά τις πιθανές εφαρμογές και την ακρίβεια (Pham & Gault, 1998). Χαρακτηριστικά παραδείγματα τεχνολογιών συγκόλλησης επάλληλων φύλλων αποτελούν οι LOM (Laminated Object Manufacturing) και UC (Ultrasonic Consolidation).

Η μέθοδος φωτοπολυμερισμού σε κάδο (Vat Photopolymerization – VP) αποτέλεσε τη βάση για μερικά από τα πρώτα εμπορικά επιτυχημένα συστήματα ΠΚ που αναπτύχθηκαν στα μέσα προς τέλος της δεκαετίας του 1980 (Gibson et al., 2014). Πρώτη ύλη στη συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί κάποιου είδους φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη, τοποθετημένη σε κάδο. Συνηθισμένη εκδοχή της μεθόδου αποτελεί η τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας (Stereolithography), στην οποία τα απαιτούμενα στρώματα σχηματίζονται μέσω επιλεκτικής σάρωσης της επιφάνειας της ρητίνης από ένα εστιασμένο λέιζερ (Bartolo, 2011). Η παρεχόμενη ενέργεια συγκολλά και τη στρώση στις αμέσως προηγούμενες έτσι ώστε μέσω διαδοχικών κύκλων βύθισης της πλατφόρμας, επικάλυψης με ρητίνη και σάρωσης να σχηματιστεί το τελικό αντικείμενο. Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στη μέθοδο DLP (Digital Light Processing), η στερεοποίηση της στρώσης επιτυγχάνεται με ταυτόχρονη έκθεση όλης της απαιτούμενης επιφάνειας σε φως που φιλτράρεται μέσω κατάλληλης μάσκας. Κύρια πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνικής αποτελούν η υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας των τελικών κομματιών, καθώς και η δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων σε διάφορες κλίμακες μεγέθους. Στα αρνητικά της μεθόδου συγκαταλέγονται η σχετικά περιορισμένη ποικιλία διαθέσιμων υλικών και η ανάγκη για την εφαρμογή υποστηρικτικών δομών, η αφαίρεση των οποίων αυξάνει το χρόνο και το κόστος μετεπεξεργασίας (Gibson et al., 2014).

Τέλος, κλείνοντας αυτή τη σύντομη αναφορά στις τεχνολογίες ΠΚ και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, αξίζει να σχολιαστεί η αυξανόμενη χρήση του όρου Τριδιάστατη-3D Εκτύπωση (3D Printing) σε σχέση με τις συγκεκριμένες τεχνολογίες. Ο συγκεκριμένος όρος χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την εμπορική προώθηση των συστημάτων εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας που αναπτύχθηκαν στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης τη δεκαετία του 1990. Αρκετά αργότερα, ωστόσο, η χρήση του όρου σταδιακά επεκτάθηκε στην περιγραφή σχετικά φθηνών οικιακών συστημάτων ΠΚ που βασίζονται στην τεχνολογία εξώθησης υλικού, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιείται πλέον ως συνώνυμο της ΠΚ, ειδικά σε μη-τεχνικό πλαίσιο. Με στόχο να ξεκαθαριστεί κάπως η χρήση των δύο όρων στο πρότυπο ISO/ASTM 52900:2015 αναφέρεται ότι ο όρος «3D εκτύπωση» χρησιμοποιείται

κυρίως για τον προσδιορισμό μηχανών, σχετικά χαμηλού κόστους και συνολικών δυνατοτήτων, χρήση η οποία υιοθετείται και στην παρούσα εργασία.

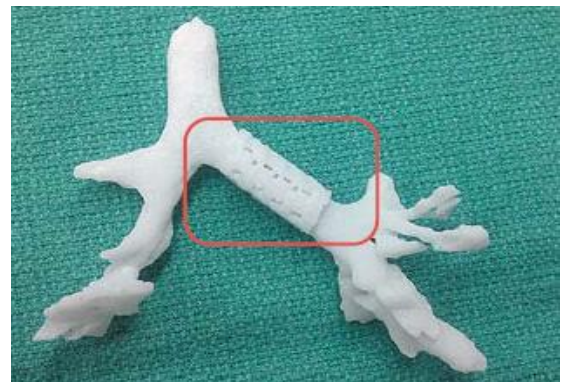
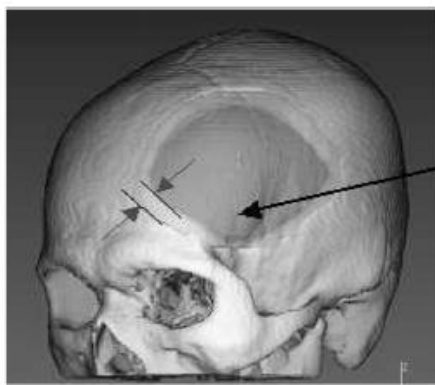
2.2 Εφαρμογές

Οι μέθοδοι ΠΚ θεωρούνται ιδανικές για την κατασκευή προϊόντων/αντικείμενων πολύπλοκης μορφολογίας σε μικρές ποσότητες/παρτίδες (<100) καθώς σε αυτή την περίπτωση υπερέχουν των συμβατικών μεθόδων (οι κατεργασίες κοπής και χύτευσης) από πλευράς κόστους και ταχύτητας (Pham & Gault, 1998 · Gibson et al., 2014). Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων, οι σχετικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για την κατασκευή μοντέλων και πρωτοτύπων σχεδιασμού και ανάπτυξης νέων προϊόντων (Wong & Hernandez, 2012) αλλά και σε άλλες παρόμοιες περιπτώσεις, όπως για την κατασκευή φυσικών μοντέλων για εκπαιδευτικούς και ιατρικούς σκοπούς (Gopakumar , 2004 · Giannatsis & Dedoussis, 2009).

Σε κάποιες περιπτώσεις, οι τεχνολογίες ΠΚ χρησιμοποιούνται και για την απευθείας κατασκευή προϊόντων ή και κομματιών εξαρτημάτων, διότι επιτρέπουν την ενσωμάτωση πολλών εξαρτημάτων σε ένα σύνθετο κομμάτι, μειώνοντας έτσι το συνολικό χρόνο και κόστος συναρμολόγησης ενός προϊόντος (Ivanova et al., 2013), καθώς και την οικονομική παραγωγή μικρών παρτίδων παραγωγής, δεδομένου ότι δεν απαιτούνται ιδιαίτερα εργαλεία παραγωγής (Huang, S.H. et al., 2013 · Fan & Liou, 2012). Από διάφορους ερευνητές, έχει επίσης τονισθεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης της ΠΚ για την απομακρυσμένη, ψηφιακή παραγωγή προϊόντων κοντά στο σημείο χρήσης/πώλησης αυτών, λόγω του ψηφιακού και αυτοματοποιημένου χαρακτήρα των τεχνολογιών που επιτρέπει την ανάπτυξη γεωγραφικά διεσπαρμένων δικτύων παραγωγής που συνδέονται μέσω διαδικτύου (Li et al., 2002 · Campbell et al., 2011). Η συγκεκριμένη δυνατότητα, εικάζεται ότι θα μπορούσε να αλλάξει σημαντικά τις μεθόδους παραγωγής αρκετών προϊόντων (Bogue, 2013). Ο ψηφιακός χαρακτήρας της ΠΚ σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ταχείας και σχετικά φθηνής παραγωγής πολύπλοκων μορφολογικά κομματιών, την καθιστά επίσης ιδανική για την παραγωγή προϊόντων με έντονα εξατομικευμένα χαρακτηριστικά, όπως π.χ. εμφυτεύματα και βοηθήματα ιατρικής χρήσης και εξατομικευμένο εξοπλισμό (Gopakumar, 2004 · Bogue., 2013 · Huang, S.H. et al., 2013).

Εκτός από τα οφέλη από κόστους και ταχύτητας παραγωγής, σε πολλές μελέτες έχει επισημανθεί η δυνατότητα μείωσης του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος της αλυσίδας παραγωγής μέσω της χρήσης τεχνολογιών ΠΚ (Luo et al., 1999 · Meteyer,S et al., 2014 · Kreiger & Pearce, 2013 · Bourhis et al., 2014 · Campbell et al., 2011 · Russo & Rizzi,

- η κατασκευή κομματιών σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας (Sacco & Moon, 2019),
- η κατασκευή κομματιών που ενσωματώνουν πολλαπλά υλικά, ενισχυτικά στοιχεία ή/και μικροσυσκευές (Bandyopadhyay & Heer, 2018 · Cuellar et al., 2018 · Stiltner et al., 2011),
- η κατασκευή κομματιών υψηλής μορφολογικής πολυπλοκότητας από κεραμικά, σύνθετα και έξυπνα υλικά (Chiu et al., 2006 · Zopf et al., 2013 · Espalin et al., 2014 · Pei, 2014),
- η κατασκευή κομματιών με λειτουργικά διαβαθμισμένη δομή και σύσταση (Oxman et al., 2011 · Chiu & Yu, 2008 · Loh et al., 2018), και
- η κατασκευή τεχνητού ιστού, εμφυτευμάτων και άλλων αντίστοιχων προϊόντων από βιοσυμβατά/βιοδιασπώμενα/βιοενεργά υλικά για ιατροφαρμακευτικές εφαρμογές (Murphy & Atala, 2014 · Munaz et al. 2016 · Mandrycky et al. 2016).



Εικόνα 2.3 - Παραδείγματα εφαρμογών ΠΚ (από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά): Αποκατάσταση κρανιακού τραύματος με εμφύτευμα (Gorakumar, 2004) · Βιοεκτυπωμένο μόσχευμα τραχείας (Zopf et al., 2013) · Το πρώτο αντικείμενο κατασκευασμένο με ΠΚ στο

διάστημα (Ridgeway, 2014) · Μοντέλο δάκτυλου με εξωτερική ενεργοποίηση, κατασκευασμένο με μεθόδους 4D εκτύπωσης (Stiltner et al., 2011).

Η ερευνητική πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια σε όλα τα προαναφερόμενα πεδία, ανέδειξε την εφικτότητα των σχετικών προσεγγίσεων αλλά και τις εν γένει δυνατότητες της ΠΚ. Η σχετική έρευνα, ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι στο αρχικό της στάδιο καθώς η ανάπτυξη των σχετικών εφαρμογών απαιτούν τη μελέτη θεμάτων αλληλεπίδρασης όλων σχεδόν των διαστάσεων της τεχνολογίας ΠΚ (ιδιαιτερότητες εξεταζόμενης μεθόδου ΠΚ, χαρακτηριστικά εξοπλισμού και λογισμικού προγραμματισμού και ελέγχου, ιδιότητες υλικών, μέθοδος σχεδιασμού και αναπαράστασης 3D μοντέλου κλπ.) σε συνάρτηση πάντα με την υπό μελέτη εφαρμογή και το πλαίσιο λειτουργίας (Gao et al., 2015 · Kuipers et al., 2019 · Ng et al., 2016 · Cui et al., 2017 · Joharji et al., 2022).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

3.1 Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας

Η εξώθηση υλικού αποτελεί μια από τις πιο ευρείες και διαδεδομένες κατηγορίες ΠΚ. Ένα από τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει την κατεργασία μεγάλου εύρους υλικών (Dey et al., 2021). Στη πλέον διαδεδομένη μορφή της, η εξώθηση υλικού χρησιμοποιείται για την ΠΚ κομματιών από θερμοπλαστικά υλικά. Η συγκεκριμένη τεχνολογία περιγράφεται ως εναπόθεση τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modelling) ή αλλιώς τηγμένου νήματος (Fused Filament Fabrication). Στην συγκεκριμένη περίπτωση, νήμα θερμοπλαστικού υλικού τροφοδοτείται στην κεφαλή εναπόθεσης, όπου και θερμαίνεται μέχρι το σημείο τήξης έτσι ώστε, σε ρευστή πια μορφή, να εναποτεθεί στην πλατφόρμα της μηχανής ή πάνω σε ήδη διαμορφωμένα στρώματα. Καθώς ο όρος Fused Deposition Modeling αποτελεί πνευματικά κατοχυρωμένο σήμα της εταιρίας Stratasy, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο όρος Fused Filament Fabrication (FFF) για την αναφορά στην τεχνολογία εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού.

Συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία FFF αποτελούν το ακρυλονιτρίλιο-βουταδιένιο-στυρένιο (ABS), το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το πολυτερεφθαλικό αιθυλένιο (PET) και το αλιφατικό πολυαμίδιο (PA) (Novakova-Marcincinova et al., 2012). Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται επίσης στη συγκεκριμένη τεχνολογίας είναι τύποι πολυανθρακικού (PC), ελαστομερών θερμοπλαστικών, πολυπροπυλενίου (PP), πολυαιθεροαιθεροκετόνης (PEEK), πολυαιθεριμιδίου (PEI) καθώς και σύνθετα υλικά θερμοπλαστικής μήτρας με ενίσχυση ανθρακονήματος, υαλονήματος ή γραφενίου (Bourell et al., 2017 · Dey et al., 2021 · Petousis et al., 2022). Ο κατάλογος αλλά και ο τύπος των διαθέσιμων υλικών αυξάνεται συνεχώς (πολλά συστήματα πλέον διαχειρίζονται τα υλικά σε μορφή πέλετ) καθώς αναπτύσσονται νέες φόρμουλες που ενσωματώνουν τα κατάλληλα πρόσθετα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία με τη συγκεκριμένη μέθοδο (Ligon et al., 2017). Για παράδειγμα ο τύπος του PET που χρησιμοποιείται συνήθως περιέχει γλυκόλη (PET-G), σύνθεση που βελτιώνει τη διαδικασία εναπόθεσης και τις ιδιότητες του τελικού αντικειμένου σε σύγκριση με τύπους PET που χρησιμοποιούνται σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. συσκευασία).

Πέρα από την τεχνολογία FFF, η εξώθηση υλικού αποτελεί βασική μέθοδο για την ανάπτυξη συστημάτων επεξεργασίας κεραμικών και μεταλλικών υλικών, όπως κράματα τιτανίου,

χάλυβας, βολφράμιο, κράματα αλουμινίου, καολίνη και άργιλος (Rane & Strano, 2019 · Saadi et al., 2022 · Ang et al., 2023). Τα συγκεκριμένα υλικά τροφοδοτούνται συχνά σε μορφή μελάνης (ink) και οι σχετικές τεχνολογίες αναφέρονται συνήθως ως τεχνολογίες άμεσης εγγραφής (Direct Ink Writing – DIW) (Saadi et al., 2022). Η τεχνολογία άμεσης εγγραφής αποτελεί και μία από τις βασικές τεχνικές βιοεκτύπωσης (bioprinting), κατασκευής δηλ. αντικειμένων από βιοσυμβατά ή/και βιοδιασπώμενα υλικά σε μορφή μελάνης, η οποία μπορεί να περιέχει και ζωντανά κύτταρα. Η μέθοδος της βιοεξώθησης (bioextrusion) όπως είναι επίσης γνωστή θεωρείται μια από τα πλέον ελπιδοφόρες προσεγγίσεις για την παρασκευή τεχνητού ιστού για ιατροφαρμακευτικούς σκοπούς (Tian et al., 2021).

Πέρα από τη σχετική ποικιλία υλικών που μπορούν να κατεργαστούν ακολουθώντας τη λογική της εξώθησης υλικού, ένα ακόμα συγκριτικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι ότι επιτρέπει σχετικά ευκολότερα τη κατασκευή κομματιών από περισσότερα του ενός υλικά. Πιο συγκεκριμένα, η εξώθηση υλικού είναι πιο ευέλικτη μέθοδος για τη διαχείριση πολλαπλών υλικών (Shaqour et al., 2021), σε σύγκριση με τεχνολογίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη και φωτοπολυμερισμού σε κάδο, καθώς διαφορετικά υλικά μπορούν να εναποτίθενται από διαφορετικές κεφαλές ή να εναλλάσσονται σχετικά εύκολα στην κεφαλή εναπόθεσης. Η εξώθηση υλικού προσφέρεται επίσης, για την ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων που συνδυάζουν την ΠΚ με τις κατεργασίες κοπής, συνδυάζοντας με αυτό τον τρόπο τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων (Lee et al., 2014 · Krimpenis & Iordanidis, 2023). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το κόστος προμήθειας και διαμόρφωσης συστημάτων εξώθησης υλικού είναι σχετικά χαμηλά, γεγονός που επιτρέπει την χρήση τους στα πρώτα στάδια έρευνας καινοτόμων εφαρμογών ΠΚ (Tao et al., 2021 · Valvez et al., 2021 · Papapaschos et al., 2020).

3.2 Διαδικασία κατασκευής με εξώθηση υλικού

Για την κατασκευή κομματιών με FFF ακολουθείται η διαδικασία κατασκευής που περιγράφεται στο κεφ 2. Όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους ΠΚ, το πρώτο στάδιο της διαδικασίας αποτελεί η σχεδίαση του 3D μοντέλου χρησιμοποιώντας, συνήθως, κάποιο σύστημα CAD. Τα ψηφιακά μοντέλα μπορούν να σχεδιαστούν είτε ακολουθώντας συμβατικές προσεγγίσεις, όπως η μοντελοποίηση με στερεά (solid modeling) ή επιφάνειες (surface modeling), είτε υιοθετώντας πιο αυτοματοποιημένες μεθόδους όπως η αλγοριθμική μοντελοποίηση (algorithmic modeling), ο παραγωγικός σχεδιασμός (generative design) και η τοπολογική βελτιστοποίηση (topologic optimization) (Wang et al., 2016 · Gibson et al., 2021).

Με την πάροδο των χρόνων υιοθετείται όλο και συχνότερα η αυτοματοποιημένη προσέγγιση καθώς επιτρέπει την εκμετάλλευση πολλών από τα πλεονεκτήματα της ΠΚ που αναφέρθηκαν στο Κεφ. 2 (υψηλή μορφολογική/γεωμετρική πολυπλοκότητα, ενσωμάτωση λειτουργικών στοιχείων/μηχανισμών σε αυτά, δυνατότητα παράλληλης χρήσης περισσότερων του ενός υλικών). Η συγκεκριμένη προσέγγιση, γνωστή και ως Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή (Design for AM – DfAM) λαμβάνει επίσης υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου, ενώ είναι σε άμεση συνάρτηση με το κόστος και την επιθυμητή λειτουργική συμπεριφορά του κομματιού (Rosen .,2014 ` Rias et al., 2016).

Στη συνέχεια το μοντέλο μεταφράζεται σε μορφή που είναι δυνατόν να διαχειριστεί το λογισμικό προετοιμασίας της μηχανής FFF. Το πιο διαδεδομένο σχετικό πρότυπο είναι το πρότυπο STL, η ονομασία του οποίου συνδέεται με την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας (αποτελεί σύντμηση του όρου “Stereolithography”), η οποία ήταν η πρώτη, ουσιαστικά, τεχνολογία ΠΚ που γνώρισε εμπορική επιτυχία. Η αναπαράσταση STL αποτελεί, ουσιαστικά, μια μέθοδο γεωμετρικής αναπαράστασης των ορίων (επιφανειών) του κομματιού μέσω τριγωνικών ψηφίδων (facets). Στο σχετικό αρχείο προσδιορίζονται, σε δυαδική ή ASCII μορφή, αναλυτικά οι συντεταγμένες των κορυφών (vertices) των τριγωνικών ψηφίδων καθώς και τα αντίστοιχα κάθετα διανύσματα (normal), που «δείχνουν» προς το εξωτερικό του μοντέλου. Ο αριθμός των σχετικών τριγώνων είναι ανάλογος της επιθυμητής ακρίβειας στην προσέγγιση των επιφανειών του κομματιού (ειδικά των μη επίπεδων επιφανειών), η οποία ορίζεται συνήθως μέσω της σχετικής ανοχής (αποδεκτού σφάλματος στην προσέγγιση). Έτσι όσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη ανοχή τόσο περισσότερα (και μικρότερα) τρίγωνα απαιτούνται για την αναπαράσταση των επιφανειών. Το ελάχιστο όριο ανοχής προσδιορίζεται συνήθως από την επιθυμητή χρήση του αντικειμένου αλλά και την κατασκευαστική ακρίβεια του εξοπλισμού ΠΚ (Gibson et al., 2014).

Η παράθεση των τριγώνων στο αρχείο STL δεν ακολουθεί κάποια λογική συσχέτισης με συγκεκριμένες επιφάνειες. Τα στοιχεία, επίσης, κάθε τριγώνου προσδιορίζονται άμεσα, με αποτέλεσμα να υπάρχει επανάληψη των συντεταγμένων κορυφών που ανήκουν σε περισσότερα του ενός τρίγωνα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν το πρότυπο STL, απλό από άποψη διαχείρισης και οπτικοποίησης, αυξάνουν όμως το μέγεθος των σχετικών αρχείων καθώς και τις πιθανότητες ύπαρξης λαθών, όπως κάθετων διανυσμάτων με λάθος φορά και κενών στις επιφάνειες, ειδικά εάν σε περιπτώσεις υψηλής ανάλυσης/ακρίβειας στην αναπαράσταση (Huang, P. et al., 2014). Αντίστοιχα προβλήματα εμφανίζονται στην

απεικόνιση δομών με πολύπλοκη εσωτερική γεωμετρία, όπως π.χ. κυβελωτές και δικτυωτές δομές (Aremu et al., 2017). Το πρότυπο STL δεν μπορεί να περιέχει πληροφορίες σχετικά με το χρώμα ή την υφή (texture) των επιφανειών. Όπως είναι προφανές, το πρότυπο STL είναι ιδιαίτερα απλό, γεγονός που το καθιστά ιδανικό «ουδέτερο» πρότυπο μεταφοράς δεδομένων από συστήματα CAD με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά προς διάφορα συστήματα ΠΚ, με επίσης ιδιαίτερα διαφορετικά χαρακτηριστικά. Έτσι αποτελεί, ακόμα και σήμερα, το τυπικό πρότυπο για τη συγκεκριμένη χρήση παρότι έχουν προταθεί διάφορα άλλα πρότυπα για την κάλυψη των (όπως τα OBJ, STEP, VRML, X3D, AMF και 3MF).

3.3 Προγραμματισμός κατασκευής

Το επόμενο στάδιο στη διαδικασία αφορά στον προγραμματισμό της κατεργασίας/κατασκευής (process planning) από τη μηχανή FFF, ο οποίος έγκειται, κατά κύριο λόγο, στην επιλογή των κατασκευαστικών παραμέτρων και τη δημιουργία του σχετικού αρχείου εντολών καθοδήγησης της μηχανής. Βασικές κατασκευαστικές παραμέτρους αποτελούν ο προσανατολισμός κατασκευής (build orientation), το πάχος στρώσης, το υλικό κατασκευής, το μοτίβο εναπόθεσης και η ταχύτητα εναπόθεσης.

Ο προσανατολισμός κατασκευής είναι ιδιαίτερα σημαντικός διότι καθορίζει έμμεσα, τις επιφάνειες που θα εμφανιστεί το φαινόμενο κλίμακας/σκαλοπατιού (staircase effect), τα σημεία που πιθανώς να εμφανιστούν παραμορφώσεις (Sood et al., 2009) καθώς και τις επιφάνειες που θα χρειαστούν στήριξη, επηρεάζοντας έτσι τη διαστασιολογική ακρίβεια στα συγκεκριμένα σημεία αλλά και το χρόνο μετεπεξεργασίας, που συνδέεται με τον καθαρισμό και τη λείανση των σχετικών επιφανειών. Οι υποστηρικτικές δομές είναι απαραίτητες τόσο για την υποστήριξη τμημάτων που δεν βρίσκονται σε άμεση επαφή με την πλατφόρμα ή/και την υπόλοιπη στρώση αλλά και για την υποστήριξη προεξοχών (τμημάτων της στρώσης που προεξέχουν της αμέσως προηγούμενη στρώσης) σχετικά μεγάλου μήκους. Πρακτικά, υφίσταται ανάγκη υποστήριξης όλων των επιφάνειες με γωνία κλίσης μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή, έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα κάμψης και χαλάρωση λόγω βαρύτητας. Η κρίσιμη αυτή γωνία κλίσης, εξαρτάται από το υλικό και τη μηχανή που χρησιμοποιείται, όπως επίσης και με τις διαφορετικές παραμέτρους κατασκευής (Jiang et al., 2018).

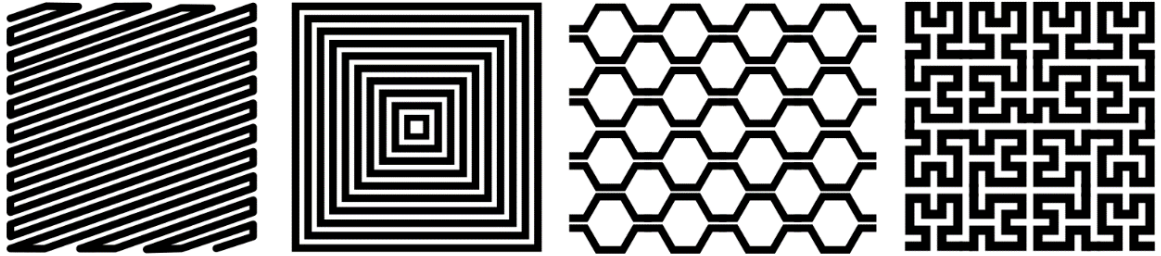
Δεδομένου ότι τα κομμάτια FDM/FFF παρουσιάζουν ανισοτροπική μηχανική συμπεριφορά, με τη μικρότερη αντοχή να παρουσιάζεται στην κατεύθυνση προσθήκης των στρώσεων (κάθετα στο επίπεδο των στρώσεων), ο προσανατολισμός κατασκευής συνδέεται και με τη

μηχανική συμπεριφορά του παραχθέντος κομματιού (Solomon et al., 2021 · Durgun & Ertan, 2014 · Doshi et al., 2022). Το πάχος στρώσης είναι μία, επίσης, ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος καθώς συνδέεται άμεσα με το χρόνο κατασκευής, τη διαστασιολογική ακρίβεια, την ποιότητα των επιφανειών, την κατανάλωση ενέργειας αλλά και τη μηχανική συμπεριφορά (Nancharaiyah et al., 2010 · Chaidas & Kechagias, 2022 · Vidakis et al., 2023 · Kechagias & Chaidas, 2023). Με βάση το πάχος στρώσης δημιουργούνται οι επιμέρους στρώσεις του αντικειμένου μέσω της διαδικασίας του τεμαχισμού (slicing). Ο τεμαχισμός εκτελείται, συνήθως, στο αρχείο STL, αλλά για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη αναπαράσταση (π.χ. η παρουσία κενών στις επιφάνειες ή εκφυλισμένων τριγώνων) έχει προταθεί και ο άμεσος τεμαχισμός των μοντέλων CAD (Huang, P. et al., 2013 · Huang et al., 2014).

Το επιλεγθέν υλικό είναι προφανώς μια σημαντική παράμετρος διότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του κομματιού, τον χρόνο κατασκευής (πχ. κάποια υλικά μπορούν να κατεργαστούν σε μικρότερες ταχύτητες) και την ακρίβεια κατασκευής, καθώς κάποια υλικά μπορεί να μην επιτρέπουν ιδιαίτερα λεπτές ή παχιές στρώσεις ή να απαιτούν ειδικό εξοπλισμό (πχ. ειδικές κεφαλές). Παράμετροι που συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με το υλικό είναι η θερμοκρασία εναπόθεσης (θερμοκρασία στο ακροφύσιο) και η θερμοκρασία της πλατφόρμας ή του χώρου της μηχανής, που συναρτώνται με το βαθμό εμφάνισης παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων στο τελικό κομμάτι και τη διαστασιολογική ακρίβεια (Armillotta et al., 2018 · Kechagias & Zaoutsos, 2024).

Το μοτίβο εναπόθεσης (deposition pattern) καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα εναποτεθούν οι επιμέρους στρώσεις του υλικού. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοτίβο εναπόθεσης είναι το ζιγκ-ζαγκ ή ράστερ, όπου το υλικό εναποτίθεται διαδοχικά σε παράλληλες γραμμές (Εικ 3.1). Η προτίμηση του ζιγκ-ζαγκ μοτίβου, θα μπορούσε να αποδοθεί στη σχετική απλή υπολογιστική ικανότητα, καθώς και στο γεγονός ότι συνήθως ενσωματώνει σχετικά μικρό αριθμό στροφών, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο υψηλότερες ταχύτητες εναπόθεσης. Άλλα συνήθη μοτίβα εναπόθεσης, είναι τα ομόκεντρο, εξαγωνικό και hilbert, που φαίνεται να βελτιώνουν το μηχανική συμπεριφορά του αντικειμένου κάτω από συγκεκριμένα φορτία, όπως ένταση, συμπίεση και κάμψη (Popescu et al., 2018 · Lubombo, & Huneault, 2018). Παράλληλα με το μοτίβο εναπόθεσης ορίζεται ο αριθμός των περιγραμμάτων που περικλείουν την στρώση (τουλάχιστον 1, συνήθως) και η πυκνότητα πλήρωσης (infill density) που εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό της καλυπτόμενης επιφάνειας μιας στρώσης προς το συνολικό εμβαδό της. Οι

επιλογές του μοτίβου εναπόθεσης επηρεάζουν προφανώς τον χρόνο κατασκευής, τη μηχανική αντοχή και συμπεριφορά του αντικειμένου, όπως έχει δειχθεί σε πολλές σχετικές μελέτες (Li et al., 2002 · Ahn et al., 2002 · Es-Said et al., 2000 · Doshi et al., 2022 · Kechagias et al., 2022).



Εικόνα 3.1 - Σχηματική απεικόνιση μερικών από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πρότυπα πλήρωσης: (α) raster / zig-zag (β) περίγραμμα, (γ) εξαγωνικό και (δ) hilbert.

α

β

γ

δ

Σε άμεση συνάρτηση με τις παραπάνω παραμέτρους είναι και η επιλογή της ταχύτητας εναπόθεσης (printing/deposition speed), της ταχύτητας, δηλαδή, με την οποία διαγράφονται οι γραμμές του μοτίβου εναπόθεσης. Η ταχύτητα εναπόθεσης προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό κατασκευής, το πάχος στρώσης και το μοτίβο εναπόθεσης, υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα τροποποίησης αυτής, με στόχο κυρίως τη μείωση του χρόνου κατασκευής και της καταναλισκόμενης ενέργειας, αλλαγή όμως που αρκετές φορές συνεπάγεται χαμηλότερη ποιότητα και μεγαλύτερη πιθανότητα σφαλμάτων (Vidakis et al., 2023).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΝΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

4.1 Εισαγωγικά

Όπως παρουσιάστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η ΠΚ επιτρέπει την οικονομικά αποδοτική και γρήγορη κατασκευή αντικειμένων γεωμετρικά πολύπλοκης μορφολογίας. Εστιάζοντας στην εσωτερική δομή παρατηρείται ότι είναι δυνατή η κατασκευή διάφορων τύπων δομής (κυψελωτή, δικτυωτή, πορώδης κ.ο.κ.), οι οποίες παρότι γεωμετρικά πολύπλοκες διαθέτουν σχετική ομοιομορφία από πλευράς χαρακτηριστικών. Η ανάλυση ωστόσο των αντικειμένων σε στρώσεις επιτρέπει καταρχήν και την κατασκευή εσωτερικών δομών που είναι ετερογενείς, παρουσιάζουν δηλαδή διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως πυκνότητα και σύσταση, σε επιμέρους σημεία/τμήματα του αντικειμένου. Η κατασκευή, ωστόσο, αντίστοιχων δομών παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις οι οποίες, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, σχετίζονται άμεσα με τη μέθοδο ΠΚ που εξετάζεται. Στην περίπτωση της εξώθησης υλικού βασικά ζητήματα αποτελούν η εξασφάλιση ομαλής και συνεχούς ροής κατά την εναπόθεση και η ελαχιστοποίηση των υποστηρικτικών δομών. Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα μελετών του συγκεκριμένου προβλήματος εστιάζοντας στην τεχνολογία της εξώθησης υλικού.

4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Για την κατασκευή αντικειμένων ετερογενούς δομής με τη μέθοδο της εξώθησης υλικού απαιτείται, καταρχάς, να προσδιοριστεί το κατάλληλο σχήμα ψηφιακής αναπαράστασης, που διασφαλίζει ότι η δομή και η σύνθεση του αντικειμένου περιγράφεται περιεκτικά και με ακρίβεια. Το συγκεκριμένο ψηφιακό μοντέλο θα αποτελέσει στη συνέχεια τη βάση για την κατασκευή του αντικειμένου. Οι συμβατικές μέθοδοι αναπαράστασης ψηφιακών μοντέλων σε συστήματα CAD, όπως η μοντελοποίηση με στερεά (solid modeling) ή επιφάνειες (surface modeling) δεν θεωρούνται οι πλέον κατάλληλες για την αναπαράσταση ετερογενών αντικειμένων, καθώς υπονοούν ότι τα μοντέλα είναι εσωτερικά ομοιογενή, είτε από πλευράς δομής είτε σύστασης (Li et al., 2018). Το ίδιο, προφανώς, ισχύει και για το πρότυπο STL, το οποίο αποτελεί μια ψηφιδωτή προσέγγιση των επιφανειών του μοντέλου, και δεν περιέχει συνεπώς πληροφορίες καθόλου πληροφορίες για την εσωτερική δομή του αντικειμένου

(Chandru et al., 1995). Για την κάλυψη του συγκεκριμένου κενού έχουν προταθεί και αναπτύσσονται διάφορα πρότυπα, με κυριότερα τα AMF (Additive Manufacturing File) και 3MF (3D Manufacturing Format). Σε σύγκριση με το πρότυπο STL, τα παραπάνω πρότυπα παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια στην περιγραφή της γεωμετρίας, χρώματος και υφής των εξωτερικών επιφανειών και σε κάποιο βαθμό της σύστασης και της εσωτερικής δομής, κυρίως σε μορφή δικτυωμάτων (Krueckemeier et al., 2023 · Joshi et al., 2023 · Joint Development Foundation, 2023).

Για τη ψηφιακή αναπαράσταση ετερογενών αντικειμένων έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι αναπαράστασης (Kumar et al., 1999 · Morvan & Fadel, 1999 · Liu et al., 2004 · Pasko et al., 2008 · Conde-Rodríguez et al., 2017 · Liu et al., 2021). Ακολουθώντας την ταξινόμηση που προτείνουν οι Kou & Tan (2007), οι σχετικές προσεγγίσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: τα προσεγγιστικά μοντέλα (evaluated models), τα μη-προσεγγιστικά μοντέλα (unevaluated models) και τα σύνθετα μοντέλα (composite models). Τα προσεγγιστικά μοντέλα αποτελούν διακριτές (discrete) αναπαράστασεις της δομής και σύστασης του αντικειμένου και αποτελούν υπό αυτή την έννοια προσεγγίσεις της συνεχούς δομής του. Παραδείγματα προσεγγιστικών μοντέλων αποτελούν τα μοντέλα εικονοστοιχείων όγκου (voxels) και ογκοστοιχείων (volumetric elements). Οι μη προσεγγιστικές μέθοδοι αναπαράστασης επιτρέπουν, θεωρητικά, μεγαλύτερη ακρίβεια στην αναπαράσταση της δομής καθώς δεν προυποθέτουν διακριτοποίηση/ανάλυση του χώρου και της δομής του αντικειμένου σε στοιχεία. Παράδειγμα μη προσεγγιστικών μοντέλων αποτελούν τα μοντέλα λειτουργικής αναπαράστασης (f-rep, functional representation) και έμμεσης μοντελοποίησης (Implicit modeling). Τέλος, στις σύνθετες μεθόδους τα ετερογενή αντικείμενα αναπαριστώνται ως μία συλλογή ή σύνθεση τάξεων / υπο-αντικειμένων που μπορούν να περιγράφονται είτε προσεγγιστικά είτε μη-προσεγγιστικά. Κάθε ένας από τους παραπάνω τύπους αναπαράστασης έχει τις δικές του αδυναμίες και πλεονεκτήματα (Kou & Tan, 2007 · Li et al., 2020).

Πέρα από τη μέθοδο αναπαράστασης της δομής, η κατασκευή ετερογενών δομών με τη μέθοδο της εξώθησης υλικού απαιτεί την ανάπτυξη μεθόδων για τον τοπικό έλεγχο της ποσότητας εναποτιθέμενου υλικού κατά τη φάση της κατασκευής. Το συγκεκριμένο πρόβλημα σχετίζεται με τη διαδικασία προγραμματισμού των τροχιών εναπόθεσης του υλικού στις επιμέρους στρώσεις, με βάση τις επιλεγθείσες παραμέτρους κατασκευής. Όπως προαναφέρθηκε ο σχεδιασμός των επιμέρους τροχιών/διαδρομών εναπόθεσης (deposition paths) επιτελείται με βάση συγκεκριμένα πρότυπα/μοτίβα εναπόθεσης (deposition patterns) και την επιλεγθείσα τιμή

για το ποσοστό πλήρωσης. Το ποσοστό πλήρωσης μπορεί, συνήθως, να μεταβληθεί ανά στρώση έτσι ώστε να σχηματιστούν αντικείμενα με μεταβλητή πυκνότητα ανά στρώση, π.χ. αντικείμενα πλήρως γεμάτα/στέρα στρώματα στην κορυφή και στο κάτω μέρος, και μερικώς γεμάτα/πορώδη στρώματα στο ενδιάμεσο. Σε επίπεδο στρώσης, είναι δυνατός ο ορισμός περιοχών μεταβλητής πυκνότητας χρησιμοποιώντας κάποια από τα διαθέσιμα λογισμικά προγραμματισμού ΠΚ (*Cura*, *Simplify3D* και *Prusaslicer*), η σχετική όμως διαδικασία (modifier meshes) είναι χειρωνακτική και αρκετά χρονοβόρα.

Ιδανικά, επίσης, θα πρέπει η εναπόθεση να εκτελείται ακολουθώντας μία και μοναδική τροχιά/διαδρομή ανά στρώση έτσι ώστε να αποφεύγονται προβλήματα και καθυστερήσεις που σχετίζονται με τη διακοπή και την επανεκκίνηση της ροής υλικού στην κεφαλή εναπόθεσης. Στην πράξη ωστόσο, αυτή η απαίτηση σπάνια ικανοποιείται, με εξαίρεση ίσως αντικείμενα πολύ απλής μορφής. Στα περισσότερα συστήματα εξώθησης υλικού, απαιτείται λοιπόν η βελτιστοποίηση παραμέτρων και μηχανισμών, που σχετίζονται με τη διακοπή και την επανεκκίνηση της ροής, όπως το μήκος η ταχύτητα αναστροφής του νήματος (retraction length and speed), καθώς και η ταχύτητα μετακίνησης μεταξύ διαφορετικών διαδρομών (travel speed). Η συγκεκριμένη απαίτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν χρησιμοποιούνται ορισμένοι τύποι υλικών, όπως για παράδειγμα εύκαμπτα νήματα ή υλικά χαμηλού ιξώδους, για τα οποία είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί ομοιόμορφη ροή στην περίπτωση συχνών διακοπών. Το ίδιο ισχύει και για την κατασκευή αντικειμένων με πολύπλοκη εσωτερική δομή, όπως αντικείμενα με δικτυωτή δομή, όπου παρουσιάζεται συχνά το φαινόμενο να υπάρχουν πολλές επιμέρους νησίδες ανά στρώση, οι οποίες καλύπτονται από μεμονωμένες τροχιές και είναι συχνά αρκετά μικρού μεγέθους.

Οι διαδρομές/τροχιές εναπόθεσης δεν πρέπει, επίσης, να αλληλεπικαλύπτονται ούτε να αυτοτέμνονται, για να αποφευχθεί η υπερβολική εναπόθεση υλικού στα σημεία τομής/επικάλυψης. Ένας μικρός βαθμός επικάλυψης, είναι χρήσιμος ή ανεκτός σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως π.χ. για την καλύτερη διασύνδεση του υλικού που εναποτέθηκε στο εσωτερικό μιας στρώσης (infill) με το υλικό του περιγράμματος ή για την επίτευξη πολύ μεγάλων ποσοστών πλήρωσης (σχεδόν 100%) και την απαλοιφή κενών στην εναπόθεση (Montero et al., 2001), γενικά όμως η επικάλυψη πρέπει να αποφεύγεται.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω θεμάτων έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις. Για το σχεδιασμό μίας και μοναδικής τροχιάς εναπόθεσης, οι Wasser et al., (1999) προτείνουν το σχεδιασμό μιας τροχιάς που επισκέπτεται ένα σύνολο σημείων στο εσωτερικό της στρώσης. Η

βέλτιστη διαδρομή για κάθε δεδομένο σύνολο σημείων προσδιορίζεται με την χρήση τεχνικών ευρετικής επίλυσης του προβλήματος του περιοδεύοντος πωλητή (traveling salesman problem). Παρόμοια προσέγγιση ακολουθούν και οι Chen et al., (2017) που προτείνουν την τυχαία κατανομή σημείων στο εσωτερικό μιας στρώσης και τη σταδιακή βελτιστοποίηση των μεταξύ τους αποστάσεων για την βελτίωση του τελικού αποτελέσματος. Μια άλλη προσέγγιση ακολουθείται από τους Dwivedi και Kovacevic (2004) που προτείνουν μια διαδικασία δύο φάσεων: α) η περιοχή μιας στρώσης αναλύεται αρχικά σε υπο-περιοχές και την χρήση του τυπικού μοτίβου ράστερ για τη σχεδίαση των επιμέρους διαδρομών και β) οι επιμέρους διαδρομές των υπο-περιοχών σε μία τροχιά. Παρόμοιες λύσεις για το πρόβλημα προτείνεται από τους Ding et al., (2014) · Jin et al., (2017), οι οποίοι προτείνουν την προσέγγιση «go and back», και τους Zhao et al., (2016) που υιοθετούν την έννοια των σπειροειδών μοντέλων, προκειμένου να σχηματιστούν κλειστές διαδρομές που καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια μιας στρώσης. Στο ίδιο πλαίσιο, προτείνεται από κάποιους ερευνητές η εφαρμογή καμπυλών πλήρωσης χώρου (space filling curves) ή αλλιώς καμπυλών φράκταλ (fractal curves), όπως οι καμπύλες Hilbert και Peano, που επιτρέπουν την κάλυψη μιας επιφάνειας από μία, μη-αυτοτεμνόμενη τροχιά εναπόθεσης (Bertoldi et al., 1998 · Papacharalampopoulos et al., 2018 · Kapil et al., 2016 · Larimore et al., 2017).

Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον τοπικό έλεγχο της πυκνότητας εντός μιας στρώσης, π.χ. τοποθετώντας πυκνότερα ή πιο αραιά τα σημεία σε συγκεκριμένες περιοχές (Chen et al., 2017) ή χρησιμοποιώντας πολλαπλά φράκταλ μοτίβα εναπόθεσης διαφορετικής πυκνότητας ανά περιοχή (Pandithevan & Kumar, 2009 · Kumar et al., 2009 · Larimore et al., 2017). Για τη σχεδίαση ετερογενούς δομής σε επίπεδο στρώσης, και συγκεκριμένα ετερογενούς πορώδους δομής, έχει προταθεί επίσης η χρήση των διαγραμμμάτων Voronoi (Zhai & Chen, 2019).

Οι παραπάνω προσεγγίσεις εστιάζουν στο πρόβλημα της κατασκευής ετερογενών δομών στο επίπεδο της στρώσης. Εξετάζοντας το πρόβλημα συνολικότερα παρατηρείται ότι τέτοιου τύπου προσεγγίσεις είναι κατάλληλες κυρίως για την κατασκευή αντικειμένων στα οποία η ίδια στρώση επαναλαμβάνεται καθ' ύψος. Τα συγκεκριμένα αντικείμενα μπορούν να περιγράψουν και ως αντικείμενα $2\frac{1}{2}$ διαστάσεων. Η κατασκευή, ωστόσο, αντικειμένων των οποίων η μορφή αλλάζει ουσιαστικά καθ' ύψος (αντικείμενα αμιγώς 3 διαστάσεων) επιβάλλει τη μελέτη και του ζητήματος της ύπαρξης υποστηρικτικών δομών, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε στο κεφ. 3 απαιτούνται για την υποστήριξη περιοχών που μπορεί να καταρρεύσουν λόγω της

βαρύτητας. Για την κατασκευή ετερογενών δομών που θα διαφοροποιούνται και στις 3 διαστάσεις, προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία ένα εύρος διαφορετικών προσεγγίσεων που εξετάζουν και τη σχέση μεταξύ διαδοχικών στρώσεων. Μια από τις πρώτες σχετικές προσεγγίσεις είναι αυτή των Khoda & Koc (2013), οι οποίοι προτείνουν τον τοπικό έλεγχο του διάκενου μεταξύ παράλληλων διαδρομών εναπόθεσης του τυπικού ράστερ/ζιγκ-ζαγκ μοτίβο εναπόθεσης, καθώς και της γωνίας (προσανατολισμού) αυτών των διαδρομών. Μια άλλη προσέγγιση αφορά στην ανάλυση της μορφής ενός αντικειμένου σε κύτταρα ή στοιχεία όγκου δεδομένου μεγέθους και τη χρήση αντίστοιχων κυττάρων σαφώς καθορισμένης μορφολογίας και πυκνότητας (Parazetis & Vosniakos, 2016 · Ahsan et al., 2018). Μια άλλη συχνά προτεινόμενη τεχνική σχεδιασμού ετερογενών δομών βασίζεται στην χρήση τριδιάστατων διαγραμμάτων Voronoi (Lu et al., 2014 · Yaman et al. 2016 · Martínez et al., 2018) ενώ αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν, σε κάποιες περιπτώσεις και με τη χρήση τεχνικών τοπολογικής βελτιστοποίησης (Schumacher et al., 2015 · Cheng et al., 2017 · Dong et al., 2020).

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην κατασκευή ετερογενών δομών με μεθόδους εξώθησης υλικού αφορά στην πιθανή παρουσία εσωτερικών υποστηρικτικών δομών, που είναι δύσκολο να αφαιρεθούν στην φάση της μετεπεξεργασίας (Jiang et al., 2018). Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου ζητήματος οι Wu et al., (2016) προτείνουν την κατασκευή δομών από ρομβικά κύτταρα (rhombic cells) που σχεδιάζονται κατά τρόπο που εξασφαλίζει την απουσία εσωτερικών στηριγμάτων. Μια αρκετά αποδοτική προσέγγιση στο συγκεκριμένο ζήτημα είναι και αυτή των επιφανειών πλήρωσης χώρου (space filling surfaces) η οποία προτείνεται από τους Kuipers et al., (2019).

Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις εστιάζουν στην κατασκευή ετερογενών δομών με τη μέθοδο FFF και τη χρήση ενός υλικού. Οι μελέτες που μελετούν τα συγκεκριμένα ζητήματα σε επίπεδο περισσότερο του ενός υλικών είναι συγκριτικά αρκετά λιγότερες και αφορούν κυρίως μεθόδους DIW. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η μελέτη των Duro-Royo et al., (2015) που διερευνούν την κατασκευή ετερογενών δομών από πολλαπλά υλικά μέσω ρομποτικής εξώθησης (robotic extrusion). Στη συγκεκριμένη περίπτωση η κατασκευή ετερογενών μορφολογικά δομών επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας το ρυθμό ροής (flow rate) υλικού από την κεφαλή εναπόθεσης. Αντίστοιχη προσέγγιση ακολουθείται και από Giachini et al., (2020) που μελετούν την εναπόθεση υλικών λιγνοκυτταρινούχας προέλευσης. Και στις δύο μελέτες το πρόβλημα εξετάζεται μόνο σε επίπεδο στρώσης/επιφάνειας.

4.3 Ερευνητικά ζητήματα

Η μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας οδήγησε στον εντοπισμό μιας σειράς επιμέρους ερευνητικών ζητημάτων και ερωτημάτων που σχετίζονται με την κατασκευή ετερογενών δομών με μεθόδους εξώθησης υλικού. Συνοψίζοντας, τα σχετικά ζητήματα είναι τα εξής:

Κατασκευή ετερογενούς δομής σε επίπεδο στρώσης. Σε επίπεδο στρώσης είναι σημαντικό να αναπτυχθεί μια μέθοδος που εξασφαλίζει ότι υπάρχει ακριβής έλεγχος της πυκνότητας σε κάθε σημείο/περιοχή της στρώσης, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιείται και η απαίτηση για μια και μοναδική διαδρομή εναπόθεσης. Το δεύτερο σημείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την επεξεργασία υλικών μεγάλης ελαστικότητας ή χαμηλού ιξώδους για τα οποία είναι σημαντικότερο να υπάρχει ομοιόμορφη ροή από το ακροφύσιο. Ένα σχετικό ζήτημα που εντοπίστηκε είναι και η κατασκευή έντονα ετερογενών δομών σε επίπεδο στρώσης, δηλ. στρώσεων που η πυκνότητα μεταβάλλεται απότομα σε γειτονικές περιοχές και όχι σταδιακά/βαθμιαία.

Κατασκευή ετερογενούς δομής σε επίπεδο αντικειμένου. Σε επίπεδο αντικειμένου, εάν θεωρήσουμε ότι η ίδια στρώση επαναλαμβάνεται αυτούσια καθ' ύψος τότε το πρόβλημα κατασκευής ετερογενούς δομής περιορίζεται πρακτικά στο επίπεδο στρώσης. Η συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να προσδιοριστεί και ως πρόβλημα 2½ διαστάσεων. Εάν δεν ισχύει αυτή η υπόθεση, δηλ. η μορφή των στρώσεων μεταβάλλεται καθ' ύψος τότε πρέπει να εξεταστεί και το θέμα της ύπαρξης υποστηρικτικών δομών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ύπαρξη υποστηρικτικών δομών, ειδικά στο εσωτερικό του αντικειμένου, πρέπει να αποφευχθεί διότι αυξάνει το κατασκευαστικό κόστος και τον χρόνο (κόστος κατασκευής και αφαίρεσης των δομών), ενώ επιβαρύνει σε πολλές περιπτώσεις και την ποιότητα. Αυτή η επιπλέον απαίτηση ανάγει πρακτικά το πρόβλημα στις 3 διαστάσεις (πρόβλημα 3 διαστάσεων).

Κατασκευή ετερογενών δομών από περισσότερα του ενός υλικά. Σχετικά λίγες μελέτες στη διεθνή βιβλιογραφία μελετούν το πρόβλημα κατασκευής ετερογενών δομών μέσω εξώθησης περισσότερων του ενός υλικών. Συγκεκριμένα, σε πολλές από τις υπάρχουσες μελέτες εξασφαλίζεται η ετερογένεια μέσω δυναμικής αλλαγή ενός μίγματος υλικών που παρέχεται στην κεφαλή, δεν εξετάζεται όμως το θέμα της κατασκευής αντικειμένων από υλικά που δεν είναι δυνατόν να αναμιχθούν στην φάση της εξώθησης, αλλά πρέπει να εναποτεθούν σε διαφορετικές φάσεις και ακολουθώντας διαφορετικές διαδρομές.

Μέθοδος ψηφιακής αναπαράστασης της ετερογενούς δομής. Σε συνάρτηση και με τα παραπάνω ζητήματα τίθεται το θέμα της ψηφιακής αναπαράστασης της ετερογενούς δομής. Όπως κατέστη σαφές από τη μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας, η τυπικά χρησιμοποιούμενη μέθοδος της STL αναπαράστασης δεν καλύπτει τις απαιτήσεις, ενώ και νεότερα αντίστοιχα πρότυπα, παρότι πιο ευέλικτα, παρουσιάζουν περιορισμούς. Στη διεθνή βιβλιογραφία, ωστόσο, προτείνεται πληθώρα προσεγγίσεων/μεθόδων για την αναπαράσταση σχετικών δομών, οι οποίες παρότι δεν χρησιμοποιούνται τυπικά στη διαδικασία κατασκευής με ΠΚ, θα μπορούσαν να προσαρμοστούν στο υπάρχον πρόβλημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ

5.1 Εισαγωγικά

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν για την επίλυση των προβλημάτων που συνοψίζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο και αφορούν στην κατασκευή ετερογενών δομών με τη μέθοδο εξώθησης υλικού. Βασικό ζήτημα αποτέλεσε η σχεδίαση της διαδρομής σε επίπεδο στρώσης όπου μελετήθηκαν δύο προσεγγίσεις/στρατηγικές: α) η προσέγγιση νέφους σημείων και β) η προσέγγιση πλέγματος. Η παρουσίαση των δύο αυτών προσεγγίσεων ακολουθεί την αντίστοιχη χρονολογική σειρά και έτσι πρώτη παρουσιάζεται η προσέγγιση νέφους σημείων και ακολουθεί η προσέγγιση πλέγματος, η οποία αποδείχθηκε πιο ευέλικτη και για την επίλυση των σχετικών ζητημάτων σε επίπεδο αντικειμένου. Η δυνατότητα επέκτασης της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας στην κατασκευή ετερογενών δομών από δύο υλικά, εξετάζεται στην τελευταία ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

Από πλευράς τεχνολογίας η μελέτη επικεντρώθηκε στην τεχνολογία FFF, καθώς αποτελεί την πλέον ώριμη και διαδεδομένη τεχνική εξώθησης υλικού. Οι αναπτυχθείσες, ωστόσο, μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλες τεχνολογίες εξώθησης υλικού όπως η μέθοδος DIW και DED με τις κατάλληλες προσαρμογές.

5.2 Σχεδίαση διαδρομής στρώσης – Προσέγγιση Νέφους Σημείων

Το πρώτο ζήτημα που τέθηκε προς διερεύνηση αφορούσε στο σχεδιασμό της διαδρομής εναπόθεσης σε επίπεδο στρώσης. Για την επίλυση του σχετικού ζητήματος δοκιμάστηκε αρχικά η προσέγγιση της σχεδίασης μιας διαδρομής εναπόθεσης που επισκέπτεται διαδοχικά ένα σύνολο σημείων κατάλληλα καταναμημένων στο εσωτερικό της στρώσης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ακολουθεί ουσιαστικά τη λογική που περιγράφεται στην μελέτη των Wasser et al., (1999) σύμφωνα με την οποία για τη σχεδίαση μίας και μοναδικής διαδρομής εναπόθεσης (επίσκεψης των σημείων) χρησιμοποιούνται τεχνικές επίλυσης του προβλήματος του περιοδεύοντος πωλητή (Traveling Salesman Problem - TSP). Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να οριστεί ως εξής: ποια είναι η διαδρομή ελάχιστου κόστους που πρέπει να ακολουθήσει ένας πωλητής ο οποίος θέλει να επισκεφτεί ένα σύνολο πόλεων, επισκεπτόμενος

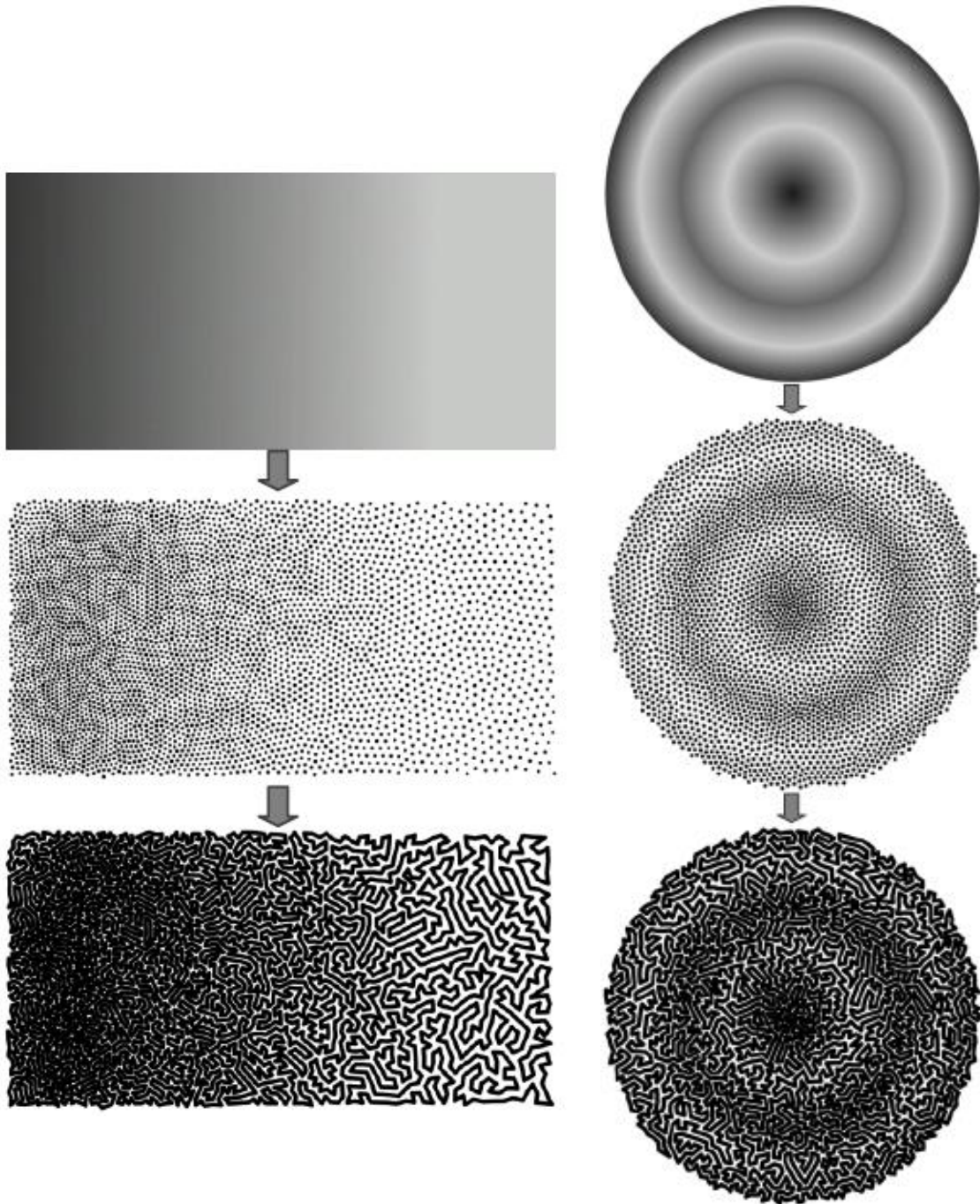
κάθε πόλη ακριβώς μια φορά, και ξεκινώντας και τελειώνοντας το ταξίδι του στην ίδια πόλη (Rego et al., 2011 · Krapetyan & Gutin, 2011). Στις περισσότερες εκδοχές του προβλήματος TSP, το συνολικό κόστος αποτελεί συνάρτηση της συνολικής απόστασης, όπως και στη περίπτωση που εξετάστηκε.

Στη μελέτη των Wasser et al. (1999) η κατανομή των σημείων είναι ομοιόμορφη (σύμφωνη με ένα τετραγωνικό πλέγμα) καθώς στόχος είναι η κάλυψη όλης της στρώσης (100% κάλυψη) αλλά με ένα μοτίβο που δεν έχει τα μειονεκτήματα του τυπικού ράστερ μοτίβου εναπόθεσης. Αντίθετα στην παρούσα μελέτη, η κατανομή των σημείων θεωρήθηκε μη ομοιόμορφη έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτική της πυκνότητας υλικού στις επιμέρους περιοχές της στρώσης. Για τη γραφική αναπαράσταση της πυκνότητας υλικού επιλέχθηκε η αναπαράσταση μέσω εικόνας bitmap, στην οποία το χρώμα κάθε εικονοστοιχείου (pixel) αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή πυκνότητας. Για τη χρωματική απεικόνιση επιλέχθηκε η κλίμακα του γκρι, με το μαύρο να αντιστοιχεί στο μέγιστο της πυκνότητας (100%, πλήρως γεμάτη περιοχή) και το λευκό στο ελάχιστο (0%, κενή περιοχή). Για τον ακριβή προσδιορισμό του αριθμού και της θέσης (συντεταγμένες) των απαιτούμενων σημείων ακολουθήθηκε η προσέγγιση των Bosch & Hermann (2004). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, στην αρχική εικόνα εφαρμόζεται ένα τετραγωνικό πλέγμα m γραμμών και n στηλών και για κάθε τετραγωνικό στοιχείο (i, j) του πλέγματος (i : αριθμός γραμμής, j : αριθμός στήλης) υπολογίζεται μια μέση τιμή χρωματικού τόνου μ_{ij} . Στη συνέχεια, εντός κάθε τετραγωνικού στοιχείου (i, j) τοποθετείται ένας αριθμός σημείων g_{ij} σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$g_{ij} = \gamma - \frac{\mu_{ij}}{256} \quad (5.1)$$

όπου γ ο μέγιστος αριθμός σημείων και 256 ο μέγιστος αριθμός χρωματικών τόνων. Τα σημεία τοποθετούνται αρχικά σε τυχαίες θέσεις, οι οποίες μεταβάλλονται σε επόμενη φάση χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές στιγματισμού (stippling) έτσι ώστε να εξισωθούν σε κάποιο βαθμό οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων, και να επιτευχθεί πιο ομοιόμορφη κατανομή σημείων ανά στοιχείο (Bosch & Hermann, 2004 · Kaplan & Bosch, 2005). Τέλος, με βάση την τελική συνολική κατανομή σημείων επιλύεται το αντίστοιχο πρόβλημα TSP χρησιμοποιώντας σχετικές τεχνικές βελτιστοποίησης. Για την επίλυση του προβλήματος TSP, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Lin-Kernighan, ο οποίος είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς σχετικούς ευρετικούς αλγορίθμους (Wasser et al., 1999 · Bosch & Hermann, 2004).

Η παραπάνω προσέγγιση εφαρμόστηκε σε ένα εύρος διαφορετικών περιπτώσεων/εικόνων που αντιπροσωπεύουν στρώσεις με διαφορετικές κατανομές υλικού. Στην Εικ. 5.1 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις στρώσεων με βαθμιαία μεταβολή στην κατανομή υλικού(graded), όπου ξεκινώντας από την αντίστοιχη εικόνα (πάνω τμήμα) δημιουργείται η σχετική κατανομή σημείων (μεσαίο τμήμα) και σχεδιάζεται η βέλτιστη διαδρομή (κάτω τμήμα).



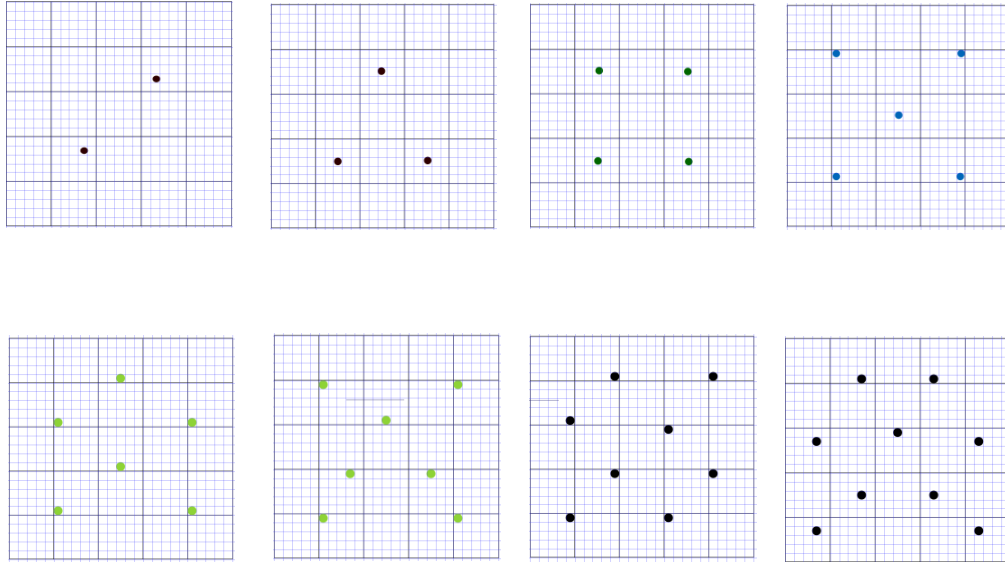
Εικόνα 5.1. Σχηματική αναπαράσταση δύο στρώσεων και των αντίστοιχων νεφών σημείων και βέλτιστων διαδρομών: στρώση ορθογώνιου σχήματος με γραμμική μεταβολή της πυκνότητας (αριστερά), και στρώση κυκλικής μορφής με ακτινική μεταβολή της πυκνότητας (δεξιά).

Στις παραπάνω δοκιμές για την επεξεργασία των εικόνων και την δημιουργία των σχετικών συνόλων (νεφών) σημείων χρησιμοποιήθηκαν σχετικές εφαρμογές, που αναπτύχθηκαν από τους Bosch & Hermann (2004) και Kaplan & Bosch (2005) και είναι ελεύθερα διαθέσιμες στη διεύθυνση https://wiki.evilmadscientist.com/TSP_art. Για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής χρησιμοποιήθηκε το πακέτο επιλυτών Concorde TSP (διαθέσιμο στη διεύθυνση <https://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde/downloads/downloads.htm>). Οι δοκιμές κατέστησαν σαφές ότι η ακρίβεια της προσέγγισης όπως και ο υπολογιστικός χρόνος συναρτώνται σε μεγάλο βαθμό με το συνολικό αριθμό των σημείων που δημιουργούνται. Σχετικά μικρός (μεγάλος) αριθμός σημείων, μειώνει (αυξάνει) την ακρίβεια στη απόδοση της κατανομής υλικού. Αντίστοιχα, ο αριθμός των σημείων συνδέεται αντιστρόφως ανάλογα με τον υπολογιστικό χρόνο. Ο αριθμός σημείων και για τις δύο περιπτώσεις της Εικ. 5.1 είναι περίπου 5.000 και ο αντίστοιχος υπολογιστικός χρόνος ανήλθε σε περίπου σε 1 ώρα, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας (περίπου 95%) καταναλώθηκε στην φάση της αναδιάταξης των σημείων με τη χρήση των αλγόριθμων στιγματισμού.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξετάστηκε περαιτέρω μέσω της κατασκευής των αντίστοιχων δοκιμών, χρησιμοποιώντας το FFF σύστημα RapMan της εταιρείας Bits-from-Bytes, ένα ανοικτού κώδικα σύστημα τύπου RepRap (<https://edutechwiki.unige.ch/en/RapMan>). Ο αντίστοιχος κώδικας εντολών CNC (G-code) περιλάμβανε τις εντολές κίνησης της κεφαλής εναπόθεσης σύμφωνα με τη βέλτιστη διαδρομή για δέκα όμοιες στρώσεις. Για τη δημιουργία του αρχείου εντολών κίνησης αναπτύχθηκε μια σχετική εφαρμογή στη γλώσσα προγραμματισμού Perl. Τα αποτελέσματα των κατασκευαστικών δοκιμών έδειξαν ότι και ο κατασκευαστικός χρόνος αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των σημείων. Από πλευράς ποιότητας παρατηρήθηκαν κάποια προβλήματα υπερ-εναπόθεσης, δηλ. εναπόθεσης υλικού που αύξανε τοπικά το πάχος στρώσης, σε περιοχές των στρώσεων με ιδιαίτερα πυκνή κατανομή. Το συγκεκριμένο σφάλμα μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα κατά την κατασκευαστική φάση, καθώς λειτουργικά σωρευτικά από στρώση σε στρώση και μπορεί να οδηγήσει σε εμφανή προβλήματα ποιότητας και κατασκευαστικές αστοχίες.

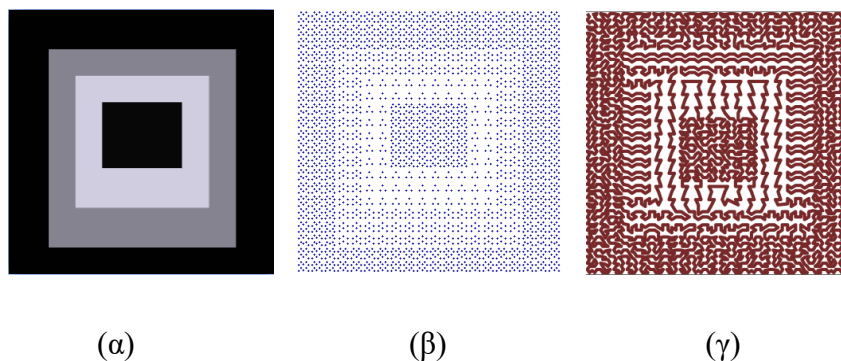
Σε μια προσπάθεια να μειωθεί ο συνολικός χρόνος, απαλείφοντας τον χρόνο αναδιάταξης των σημείων, ακολουθήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση στην αρχική τοποθέτηση των σημείων αντί της τυχαίας. Πιο συγκεκριμένα καθορίστηκαν συγκεκριμένα σύνολα σημείων με σαφώς καθορισμένες θέσεις εντός ενός τετραγωνικού στοιχείου, τα οποία συνδέονται με συγκεκριμένους χρωματικούς τόνους και αντίστοιχες τιμές πυκνότητας υλικού (Εικ. 5.2). Η

δημιουργία προκαθορισμένων συνόλων σημείων μπορεί, επίσης, να επιτρέψει μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο της ποσότητας υλικού που εναποτίθεται και κατά συνέπεια να περιορίσει τα φαινόμενα υπερ-εναπόθεσης.



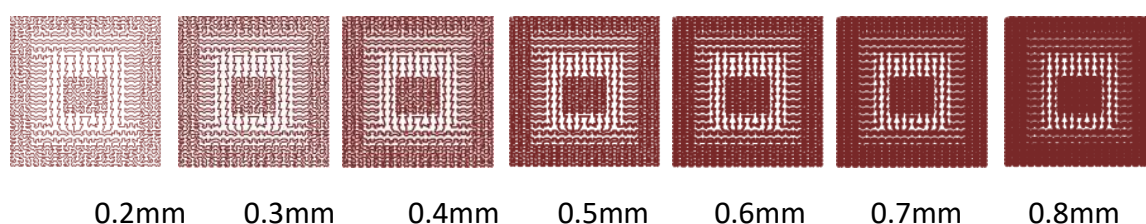
Εικόνα 5.2. Σημεία οδηγοί για την κάλυψη τετραγωνικής περιοχής με 8 διαφορετικές διαβαθμίσεις πυκνότητας.

Στην Εικ. 5.3 Παρουσιάζεται ένα παράδειγμα στρώσης με ανομοιόμορφη κατανομή υλικού, το αντίστοιχο νέφος σημείων και η βέλτιστη διαδρομή που προέκυψε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Lin-Kernighan. Ο υπολογιστικός χρόνος για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι σημαντικά μικρότερος καθώς για τα περίπου 4.000 σημεία του νέφους απαιτήθηκαν 3 περίπου λεπτά.



Εικόνα 5.3. Σχηματική αναπαράσταση μιας στρώσης μεταβλητής πυκνότητας σε μορφή εικόνας bitmap (α), του αντίστοιχου νέφους σημείων (β), και της τροχιάς εναπόθεσης υλικού (γ).

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών κατέστη, επίσης, σαφής η σημασία της παραμέτρου του πλάτους εναπόθεσης (deposition width), του πλάτους δηλαδή της γραμμής εναποτεθέντος υλικού στην επιφάνεια της στρώσης. Προφανώς, όσο μεγαλύτερο το πάχος εναπόθεσης για μια δεδομένη διαδρομή τόσο πυκνότερη η κατανομή υλικού, όπως είναι εμφανές και στην Εικ. 5.4. Το πάχος εναπόθεσης συνδέεται άμεσα με το ρυθμό ροής υλικού (flow rate) από το ακροφύσιο, συνεπώς υφίσταται θεωρητικά η δυνατότητα ελέγχου της τοπικά εναποτεθείσας ποσότητας υλικού μέσω ελέγχου του ρυθμού ροής τοπικά. Η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει προταθεί για τη διόρθωση σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης και την επίτευξη καλύτερης, συνολικά διαστασιολογικής ακρίβειας (Parazetis & Vosniakos, 2019).



Εικόνα 5.4. Σχηματική αναπαράσταση της κατασκευασθείσας τετραγωνικής στρώσης χρησιμοποιώντας διαφορετικές διαμέτρους ακροφυσίων (από 0.2 mm έως 0.8 mm).

Ωστόσο, τα αποτελέσματα δοκιμών αυτής της προσαρμοστικής (adaptive) προσέγγισης έδειξαν ότι είναι πρακτικά δύσκολος ο ακριβής έλεγχος της ροής υλικού και η επίτευξη απότομων αυξομειώσεων στην τιμή του, καθώς απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα για την επίτευξη διαφορετικών επιπέδων ροής. Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι πιο έντονο στην περίπτωση έντονα ετερογενών δομών, δομών δηλ. με έντονα ανομοιόμορφη πυκνότητα και απότομες μεταβολές στην τοπική τιμή της. Κατά συνέπεια είναι δύσκολος ο έλεγχος της ποσότητας υλικού που εναποτίθεται τοπικά, ειδικά εάν έχουμε σχετικά απότομες αλλαγές στην εναποτεθείσα πυκνότητα. Ένας δεύτερος λόγος που περιορίζει κάπως τη δυνατότητα χρήσης της συγκεκριμένης προσέγγισης στο υπό μελέτη πρόβλημα σχετίζεται με τη σχέση μεταξύ πλάτους εναπόθεσης και πάχους στρώσης. Γενικά, το πλάτος εναπόθεσης σχετίζεται με τη διάμετρο του ακροφυσίου (nozzle), και προσδιορίζεται με βάση ευρετικούς κανόνες (συνήθως ορίζεται ως 1,2-1,5 φορές η διάμετρος του ακροφυσίου). Η διάμετρος του ακροφυσίου με τη σειρά της είναι ανάλογη του πάχους στρώσης και ένας ευρετικός κανόνας που ακολουθείται στην πράξη ορίζει ότι το πάχος στρώσης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 20%-80% της διαμέτρου ακροφυσίου. Λαμβάνοντας υπόψη τις πρακτικές δυσκολίες αλλά και την απαίτηση για την επίτευξη μιας βέλτιστης σχέσης μεταξύ πάχους στρώσης και διαμέτρου ακροφυσίου,

αποφασίστηκε η μη περαιτέρω μελέτη της δυνατότητας προσαρμοστικής ρύθμισης του ρυθμού ροής υλικού ως μηχανισμού ελέγχου του τοπικά εναποτιθέντος υλικού.

Κατά τη μελέτη της TSP προσέγγισης κατέστη επίσης σαφές ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες, οι οποίες σχετίζονται με τον μη ακριβή έλεγχο της μορφής της διαδρομής εναπόθεσης. Η πρώτη αφορά στον ακριβή έλεγχο της ποσότητας υλικού που εναποτίθεται ανά περιοχή, η οποία δεν μπορεί να συσχετιστεί με απόλυτη ακρίβεια με τον αριθμό των σημείων. Πιο συγκεκριμένα, η πυκνότητα κάλυψης της επιφάνειας ενός στοιχείου, η οποία μπορεί να οριστεί ως ο λόγος του εμβαδού του καλυφθέντος τμήματος του στοιχείου προς το συνολικό εμβαδό, καθορίζεται άμεσα από τη διαδρομή εναπόθεσης. Η διαδρομή εναπόθεσης, όμως, δεν ανταποκρίνεται αυστηρά στον αριθμό και τις θέσεις των σημείων που ανατίθενται σε κάθε σημείο, αντίθετα μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική ανάλογα με τη συνολική διαδρομή που θα προκύψει από τον ευρετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα, παρατηρείται πιο έντονα σε πιο χαμηλές τιμές πυκνότητας (λιγότερα σημεία), όπου υπάρχουν και μεγαλύτερα περιθώρια μεταβολής της διαδρομής.

Μια δεύτερη αδυναμία της συγκεκριμένης μεθόδου αφορά στον περιορισμό των οξείων γωνιών στην τροχιά εναπόθεσης. Γενικά, κατά το σχεδιασμό διαδρομών εναπόθεσης υλικού συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση γωνιών μικρότερων των 90° , καθώς η σχετικά απότομη αλλαγή κατεύθυνσης συνδέεται με προβλήματα κατασκευαστικής ακρίβειας (Jin et al., 2015 · Jin et al., 2017). Ακολουθώντας, ωστόσο, την ευρετική προσέγγιση στη σχεδίαση της διαδρομής εναπόθεσης δεν εξασφαλίζεται η απουσία οξείων γωνιών ή έστω η ελαχιστοποίηση του αριθμού τους. Θεωρητικά, υφίσταται η δυνατότητα ενσωμάτωσης σχετικών περιορισμών στον αλγόριθμο, αλλά η εφαρμογή αυτών των περιορισμών σε συνδυασμό με την ανάγκη ακριβούς καθορισμού του ποσοστού κάλυψης ανά στοιχείο, πρακτικά επιβάλλει την αντιστοίχιση συγκεκριμένων διαδρομών ανά τιμή πυκνότητας. Τέλος, ένα μειονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης αποτελεί η δυσκολία επέκτασής της σε περισσότερα από ένα υλικά, καθώς είναι τεχνικά δύσκολο να εξασφαλιστεί ότι δεν θα τέμνονται οι διαφορετικές διαδρομές εναπόθεσης των επιμέρους υλικών.

5.3 Σχεδίαση διαδρομής εναπόθεσης στρώσης – Προσέγγιση πλέγματος

Μελετώντας περαιτέρω το πρόβλημα κατασκευής ετερογενών δομών/αντικειμένων κατέστη σαφές ότι η αναπαράσταση στρώσεων μη ομοιόμορφης πυκνότητας μέσω εικόνων bitmap, παρότι πρακτικά κατάλληλη για αναπαράσταση σε επίπεδο της στρώσης (και κατ' επέκταση

αντικειμένων $2\frac{1}{2}$ διαστάσεων), έχει σημαντικές αδυναμίες ως μέθοδος αναπαράστασης πλήρως τριδιάστατων αντικειμένων. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφ. 4, στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνεται πληθώρα μεθόδων ψηφιακής αναπαράστασης ετερογενών μοντέλων, οι οποίες διαφέρουν από πλευράς ακρίβειας, ευκολίας εφαρμογής και υπολογιστικού κόστους. Κατόπιν μελέτης της σχετικής βιβλιογραφίας επιλέχθηκε ως μέθοδος τριδιάστατης αναπαράστασης των ψηφιακών μοντέλων η μέθοδος των εικονοστοιχείων όγκου (volumetric pixels - voxels), η οποία σύμφωνα με την αξιολόγηση των Kou & Tan (2007) λαμβάνει υψηλή βαθμολογία στα κριτήρια της ευκολίας χρήσης, της παραστατικής ικανότητας και του υπολογιστικού κόστους.

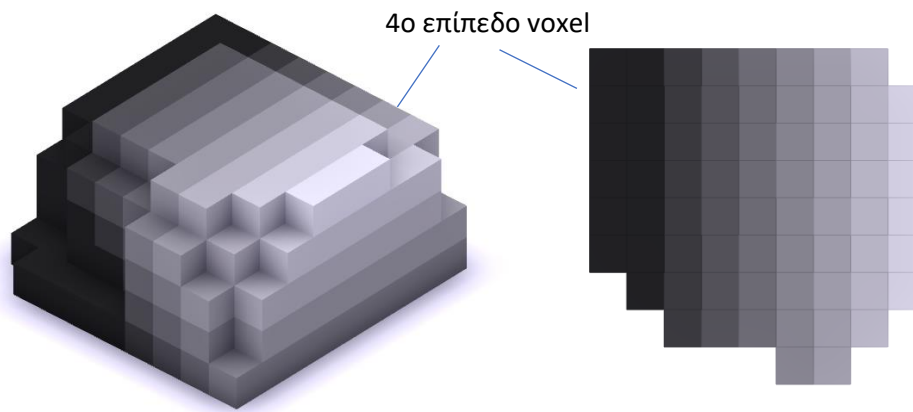
Η αναπαράσταση μέσω voxel, όπως είναι εμφανές και από τον ίδιο τον όρο, αποτελεί το τριδιάστατο ανάλογο της αναπαράστασης διδιάστατων εικόνων μέσω εικονοστοιχείων (pixels). Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές ψηφιακών γραφικών, για την αναπαράσταση ιατρικών και γεωγραφικών μοντέλων τομογραφίας καθώς και για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς αντικειμένων και την προσομοίωση φυσικών φαινομένων. Ανάλογα με την εφαρμογή, μοντέλα voxel μπορούν να δημιουργηθούν είτε άμεσα, με τη χρήση αντίστοιχου λογισμικού, είτε έμμεσα μέσω της μετατροπής μοντέλων διάφορων τύπων (μοντέλα CAD, μοντέλα νέφους σημείων, μοντέλα εικόνων) σε μοντέλα voxel χρησιμοποιώντας σχετικές τεχνικές (voxelization techniques).

Στην αναπαράσταση μέσω voxel, ένα αντικείμενο O ορίζεται ως το σύνολο n στοιχείων/voxel v_i ($1 \leq i \leq n$) σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Kou & Tan, 2007 · Gupta et al., 2010):

$$O = \{v_i\} = \{(x_i, y_i, z_i, m_i)\} \quad (5.2)$$

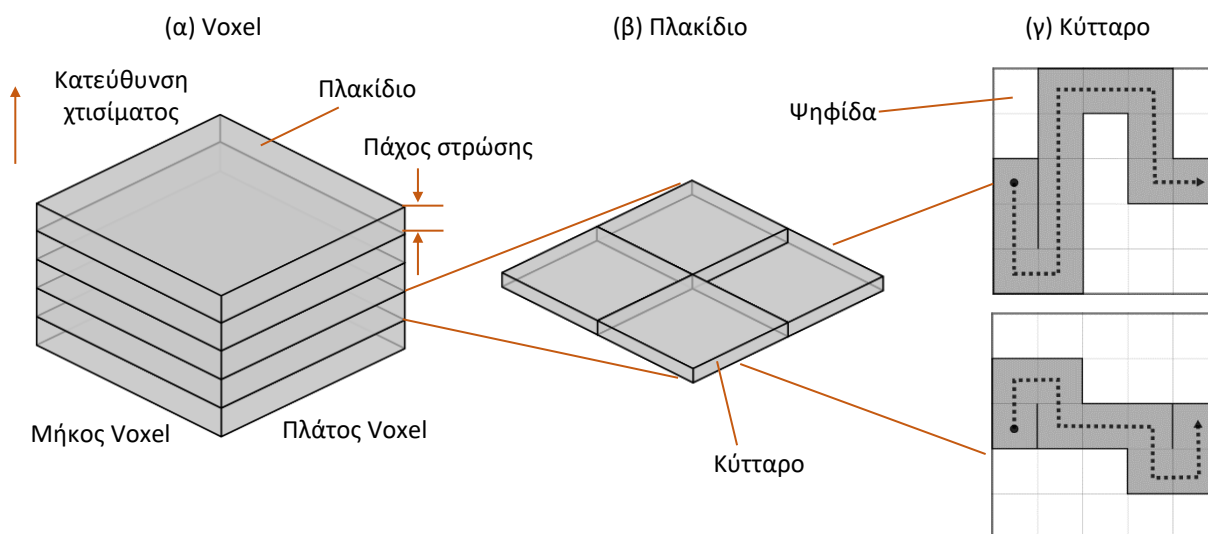
όπου i ο αριθμός ενός voxel, (x_i, y_i, z_i) οι συντεταγμένες της θέσης τους και m_i η σύσταση τους από πλευράς υλικού, υφής ή χρώματος. Στις εφαρμογές τριδιάστατων γραφικών, η παράμετρος m_i σχετίζεται συνήθως με χαρακτηριστικά όπως το χρώμα, η διαφάνεια ή/και η υφή των επιφανειών ενός voxel. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της αναπαράστασης ετερογενών αντικειμένων ΠΚ η παράμετρος m_i μπορεί να συσχετιστεί τόσο με την πυκνότητα του voxel όσο και με τη σύστασή του. Χρησιμοποιώντας την χρωματική κλίμακα του γκρι, το μαύρο χρώμα μπορεί να υποδηλώνει πλήρως συμπαγή voxel (πυκνότητα 100%), ενώ το λευκό να σηματοδοτεί περιοχές με την ελάχιστη δυνατή πυκνότητα ή κενά voxel, αναλόγως της περίπτωσης. Αντίστοιχα, οι διαστάσεις του κυβοειδούς voxel μπορούν να συσχετιστούν με διάφορες κατασκευαστικές παραμέτρους, όπως π.χ. το ύψος με το πάχος στρώσης. Στην Εικ.

5.5 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση ενός αντικειμένου, αποτελούμενου από πέντε στρώματα (επίπεδα) voxel.



Εικόνα 5.5. Παράδειγμα voxel αναπαράστασης ετερογενούς αντικειμένου: Ισομετρική προβολή του αντικειμένου (αριστερά) και κάτοψη του τέταρτου, από κάτω, στρώματος voxel (δεξιά).

Για να εξασφαλιστεί επαρκής βαθμός ευελιξίας στον ορισμό της συνολικής μορφής του αντικειμένου, καθώς και για να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός μιας ενιαίας τροχιάς, κάθε voxel αναλύεται σε επιμέρους στοιχεία. Σε πρώτο επίπεδο, τα voxel αναλύονται σε μια σειρά οριζόντιων (παράλληλων στην πλατφόρμα) πλακιδίων, των οποίων το πάχος ισούται με το πάχος της στρώσης (Εικ. 5.6α). Ο ελάχιστος αριθμός πλακιδίων ανά voxel είναι και ο σχετικός σε συνδυασμό με το πάχος στρώσης, καθορίζει ουσιαστικά το ύψος του voxel. Υπ' αυτή την έννοια τα πλακίδια αποτελούν και τα βασικά στοιχεία ανάλυσης των στρώσεων, για τα οποία ορίζεται η τοπική πυκνότητα. Κάθε πλακίδιο, με τη σειρά του, αναλύεται σε τέσσερα τεταρτημόρια ή κύτταρα (Εικ. 5.6β), έτσι ώστε να καταστεί δυνατός ο ορισμός μιας και μοναδικής διαδρομής εναπόθεσης, όπως περιγράφεται σε επόμενες ενότητες. Τέλος, τα κύτταρα αναλύονται σε ψηφίδες (Εικ. 5.6γ) τα οποία αποτελούν βασικά στοιχεία για τον σχεδιασμό της εκάστοτε στοιχειώδους διαδρομής κάθε κυττάρου και πλακιδίου. Ο αριθμός των ψηφίδων ανά πλακίδιο καθορίζει ουσιαστικά το μήκος και το πλάτος των voxel.



Εικόνα 5.6. Σχηματική απεικόνιση ενός voxel (α), ενός πλακιδίου (β) και δύο διαδρομών εναπόθεσης κυττάρων (γ).

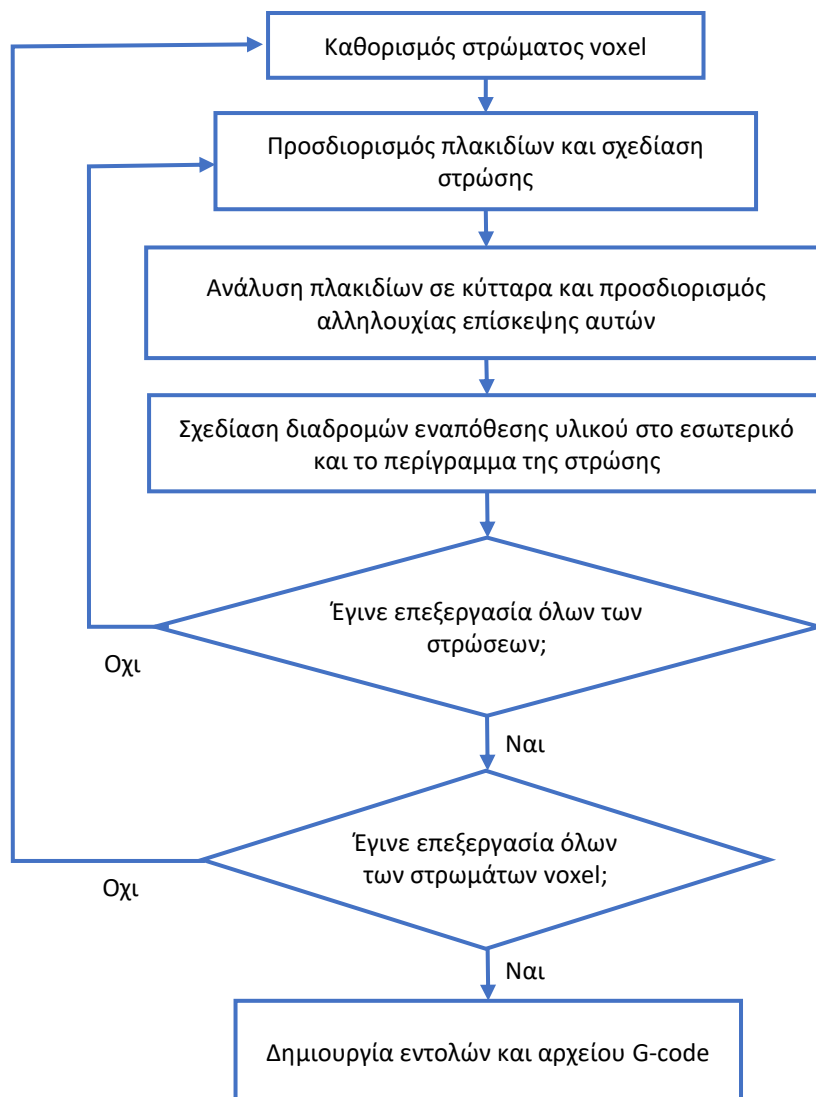
Ο όγκος εναποτεθέντος υλικού και η πυκνότητα ενός voxel υπολογίζεται αθροίζοντας τις αντίστοιχες τιμές σε επίπεδο κυττάρων και πλακιδίων. Πιο συγκεκριμένα, η πυκνότητα d_l ενός πλακιδίου ορίζεται ως ο μέσος όρος της πυκνότητας εναπόθεσης των σχετικών κυττάρων d_c . Η πυκνότητα υλικού ενός κυττάρου d_c , συνδέεται άμεσα με το μήκος και τη μορφή της διαδρομής εναπόθεσης που διατρέχει την περιοχή του. Για παράδειγμα, η διαδρομή εναπόθεσης στο άνω μέρος της Εικ. 5.6γ καλύπτει το 52% του όγκου του κυττάρου, ενώ η αντίστοιχη διαδρομή στο κάτω μέρος της εικόνας αντιστοιχεί σε πυκνότητα εναπόθεσης 36%. Αντίστοιχα σε επίπεδο voxel, η πυκνότητα εναπόθεσης d_v ορίζεται ως η μέση πυκνότητα εναπόθεσης των αντίστοιχων n πλακιδίων (Σχ. (5.4)).

$$d_l = \frac{\sum_{c=1}^4 d_c}{4} \quad (5.3)$$

$$d_v = \frac{\sum_{l=1}^n d_l}{n} \quad (5.4)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω μέθοδο μπορούν να καθοριστούν διάφοροι τύποι voxel που διαφέρουν από πλευράς μορφής και χαρακτηριστικών. Σε αντιστοιχία με όσα αναφέρονταν και σε προηγούμενες ενότητες, μπορούν να οριστούν δύο βασικοί τύποι voxel: (α) τα voxel $2\frac{1}{2}$ διαστάσεων, στα οποία όλες το σχήμα της διαδρομής εναπόθεσης όλων των πλακιδίων είναι απολύτως ίδιο και (β) τα voxel αμιγώς 3 διαστάσεων, στα οποία η πυκνότητα υλικού δεν είναι ίδια για όλα τα πλακίδια, και κατά συνέπεια διαφέρουν και οι σχετικές διαδρομές εναπόθεσης.

Η διαδικασία για τον ορισμό των διαδρομών εναπόθεσης ανά στρώση απεικονίζεται διαγραμματικά στην Εικ. 5.7. Η επεξεργασία των voxel πραγματοποιείται αρχικά ανά οριζόντιο επίπεδο (επίπεδο παράλληλο με την πλατφόρμα του συστήματος εξώθησης υλικού) ακολουθώντας κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω. Στη συνέχεια, καθορίζονται οι επιμέρους κατασκευαστικές στρώσεις, οι στρώσεις δηλ. από τις οποίες αποτελείται ουσιαστικά το αντικείμενο, συνθέτοντας τα αντίστοιχα πλακίδια.



Εικόνα 5.7. Σχηματική απεικόνιση της αλγοριθμικής διαδικασίας σχεδίασης των διαδρομών εναπόθεσης και δημιουργίας του σχετικού αρχείου εντολών σε κώδικα G.

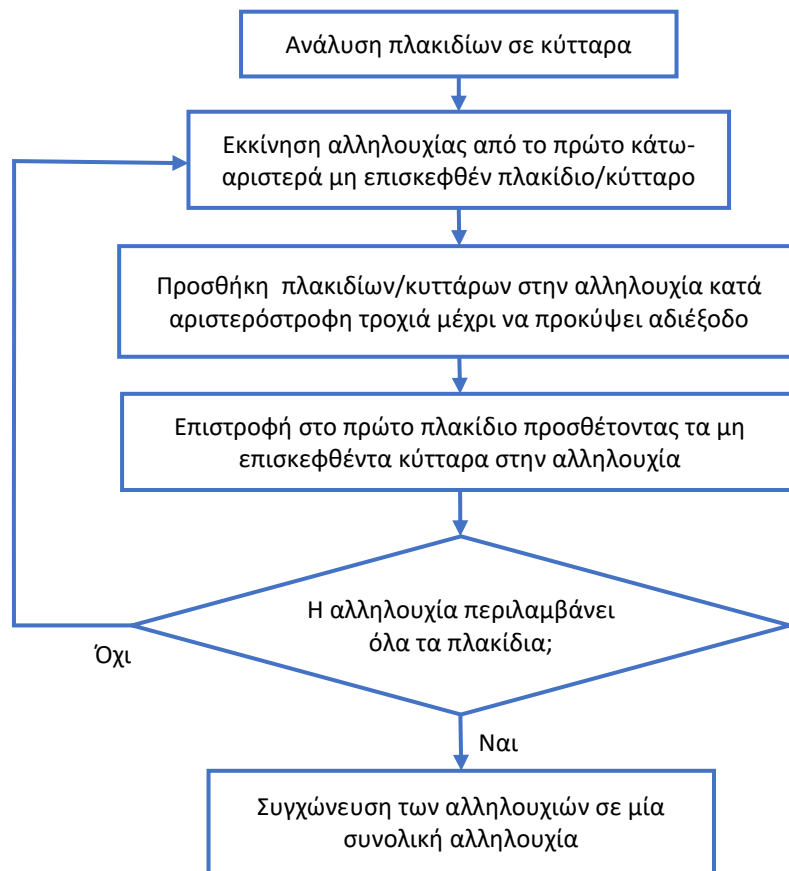
Ακολουθεί η ανάλυση των στρώσεων σε κύτταρα και ο καθορισμός μιας συνεχούς αλληλουχίας επίσκεψης των κυττάρων αυτών. Με βάση αυτή την αλληλουχία σχεδιάζεται η διαδρομή εναπόθεσης υλικού στο εσωτερικό κάθε στρώσης, συνδέοντας τις επιμέρους

στοιχειώδεις διαδρομές ανά κύτταρο, καθώς και η διαδρομή εναπόθεσης του περιγράμματος της στρώσης. Τέλος, με βάση τις σχεδιασθείσες διαδρομές εναπόθεσης δημιουργείται το σχετικό αρχείο εντολών σε κώδικα G (G-code).

5.4 Αλληλουχία επίσκεψης κυττάρων

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδρομή εναπόθεσης υλικού σε μία στρώση πρέπει ιδανικά να είναι μία και μη αυτοτεμνόμενη. Στην περίπτωση που μελετάται, κατά την οποία οι στρώσεις αποτελούν ουσιαστικά ένα σύνολο πλακιδίων, η συγκεκριμένη απαίτηση μεταφράζεται πρακτικά στον καθορισμό μιας συνεχούς και μη αυτοτεμνόμενης αλληλουχίας επίσκεψης γειτονικών πλακιδίων, η οποία εμπεριέχει όλα τα πλακίδια από μια και μόνο φορά. Το συγκεκριμένο πρόβλημα, στη γενική του μορφή, θα μπορούσε να θεωρηθεί ισοδύναμο με το πρόβλημα σχεδιασμού της διαδρομής κάλυψης του εμβαδού μιας περιοχής από ένα ρομπότ (Choset, 2001· Galceran & Carreras, 2013). Από τις διάφορες προτεινόμενες μεθόδους, οι μέθοδοι που βασίζονται στην ανάλυση πλέγματος φαίνεται να είναι οι πιο κατάλληλες για το υπό μελέτη πρόβλημα, καθώς η ανάλυση μιας στρώσης σε πλακίδια εφαρμόζεται ουσιαστικά ένα τετραγωνικό πλέγμα στην αντίστοιχη περιοχή. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη βασίστηκε στη στρατηγική της σπειροειδούς κάλυψης (spiral-STC), η οποία έχει προταθεί από τους Gabriely & Rimon, (2002) και διασφαλίζει ότι όλα τα πλακίδια μιας στρώσης περιλαμβάνονται στη σχετική αλληλουχία μία και μόνο φορά.

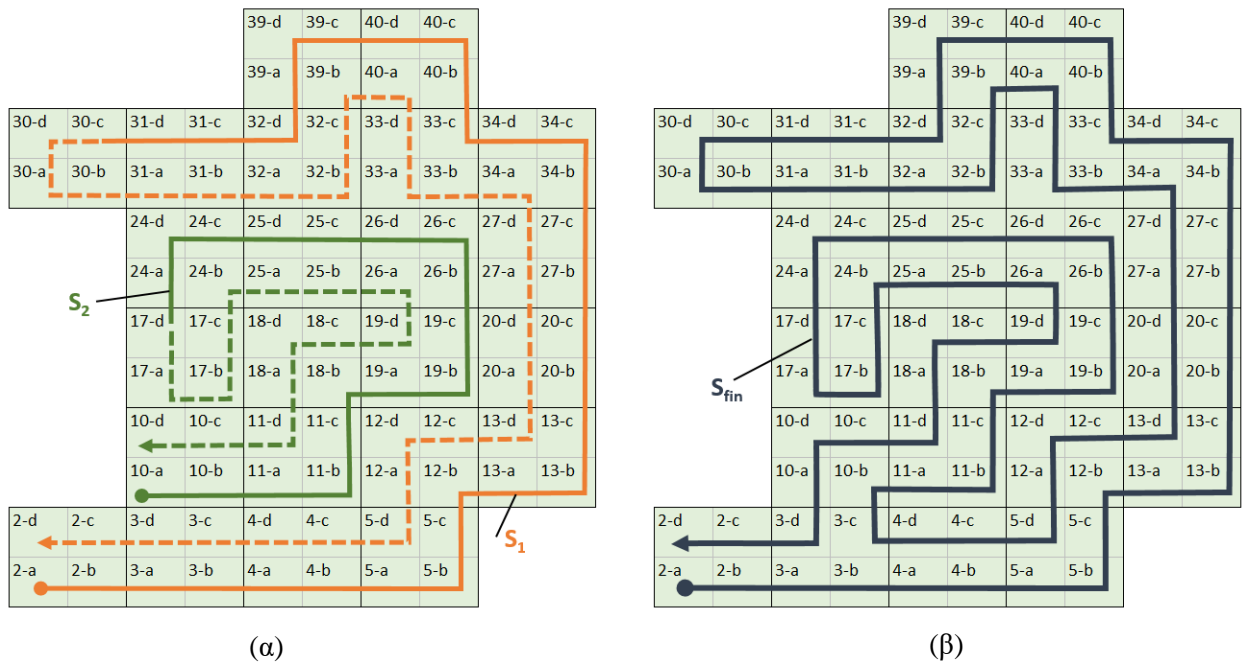
Η σχετική αλγοριθμική διαδικασία απαιτεί, αρχικά, τη διαίρεση κάθε πλάκας σε τέσσερα κύτταρα (cells). Στη συνέχεια, ξεκινώντας από το κάτω αριστερά κύτταρο δημιουργείται η αλληλουχία επίσκεψης ακολουθώντας μια αριστερόστροφη σπειροειδή διαδρομή επίσκεψης γειτονικών κυττάρων. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία προσθήκης κυττάρων στην αλληλουχία συνεχίζεται έως ότου παρουσιαστεί αδιέξοδο, δεν υπάρχει δηλ. γειτονικό πλακίδιο το οποίο δεν εμπεριέχεται ήδη στην αλληλουχία. Εάν υπάρχουν ακόμα πλακίδια που δεν περιλαμβάνονται στην αλληλουχία, εκκινεί μια νέα αλληλουχία εφαρμόζοντας την ίδια αλγοριθμική διαδικασία. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου όλα τα κύτταρα ανατεθούν σε επιμέρους αλληλουχίες, οι οποίες τελικά ενώνονται σε μια συνεχή κλειστή αλληλουχία επίσκεψης όλων των κυττάρων (και κατ' επέκταση όλων των πλακιδίων) της στρώσης. Ένα διάγραμμα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζεται στην Εικ. 5.8.



Εικόνα 5.8. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας σχηματισμού της ακολουθίας επίσκεψης κελίου

Για να γίνει πιο ξεκάθαρη η μέθοδος δημιουργίας της αλληλουχίας παρουσιάζεται στην Εικ. 5.9 το παράδειγμα μιας στρώσης αποτελούμενης από 23 πλακίδια. Κάθε πλακίδιο αποτελείται από τέσσερα κύτταρα (a, b, c και d). Η δημιουργία της πρώτης αλληλουχίας S_1 ξεκινά με την προσθήκη του κυττάρου 2-a και συνεχίζεται τη διαδοχική προσθήκη κυττάρων μέχρι το πλακίδιο 30, όπου εμφανίζεται αδιέξοδο διότι δεν υπάρχει νέο γειτονικό πλακίδιο που μπορεί να προστεθεί στην αλληλουχία (κύτταρα του πλακιδίου 31 έχουν ήδη προστεθεί στην αλληλουχία). Στο σημείο αυτό ξεκινά μια πορεία επιστροφής προς το αρχικό κύτταρο (υποδεικνύεται με διακεκομμένη γραμμή) ακολουθώντας αντίστροφη φορά. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ουσιαστικά η κλειστή ακολουθία επίσκεψης κυττάρων S_1 : [2-a, 2-b, 3-a, 3-b... 31d, 30-c, 30-d, 30-a, 30-b, 31-a ... 4-d, 3-c, 3-d, 2-c 2-d]. Επειδή η S_1 δεν περιλαμβάνει όλα τα πλακίδια της στρώσης, δημιουργείται μια δεύτερη αλληλουχία επίσκεψης S_2 (Εικ. 5.9α), η οποία ξεκινώντας από το κάτω αριστερό πλακίδιο και προσθέτοντας διαδοχικά όλα τα

εναπομείναντα πλακίδια και κύτταρα (S_2 : [10-a, 10-b, 11-a, 11-b, 11-c... 18-d, 18-a, 11-d, 10-c, 10-d]).



Εικόνα 5.9. Παράδειγμα σχηματισμού της αλληλουχίας επίσκεψης πλακιδίων/κυττάρων: (α) Αρχικές αλληλουχίες επίσκεψης και (β) η τελική συγχωνευμένη αλληλουχία.

Η συγχώνευση των αλληλουχιών S_1 και S_2 σε μία, επιτυγχάνεται ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

- α. Εντοπίζεται ένα τουλάχιστον σημείο επαφής των δύο αλληλουχιών, δηλ. ένα ζεύγος γειτονικών πλακιδίων που δεν περιλαμβάνονται στην ίδια αλληλουχία, καθώς και τα αντίστοιχα κύτταρα (αν υπάρχουν περισσότερα του ενός σημεία επαφής, επιλέγεται ένα τυχαία).
- β. Η πρώτη αλληλουχία διακόπτεται στο αντίστοιχο κύτταρο (σημείο εισαγωγής).
- γ. Η δεύτερη αλληλουχία αναδιατάσσεται έτσι ώστε να ξεκινά από το γειτονικό στο σημείο εισαγωγής κύτταρο.
- δ. Εισάγεται η αναδιαταγμένη δεύτερη αλληλουχία εντός της πρώτης αμέσως μετά το σημείο εισαγωγής.

Στο παράδειγμα της Εικ. 5.9α, οι ακολουθίες S_1 και S_2 διαθέτουν πολλά σημεία επαφής. Έστω ότι επιλέγεται ως ζεύγος επαφής τα πλακίδια 3 και 10. Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, η S_1 διακόπτεται στο κύτταρο 3-c (σημείο εισαγωγής), που είναι το πρώτο από τα δύο σχετικά κύτταρα (3-c και 3-d) που περιλαμβάνονται στην S_1 και εφάπτονται

του πλακιδίου 10. Στη συνέχεια, η S_2 αναδιατάσσεται, έτσι ώστε το κελί 10-b, που είναι το γειτονικό κελί του 3-c, να αποτελεί το σημείο εκκίνησης της αλληλουχίας, δηλαδή S_2 : [10-b, 11-a, 11-b... 10-c, 10-d, 10-a]. Τέλος, η αναδιαταγμένη αλληλουχία S_2 εισάγεται στην S_1 μετά το κελί 3-c, σχηματίζοντας έτσι την συγχωνευμένη αλληλουχία S_{fin} : [2-a, 2-b, 3-a, ..., 4-c, 4-d, 3-c, [10-b, 11-a, 11-b... 10-c, 10-d, 10-a], 3d, 2-c, 2-d], η οποία παρουσιάζεται στην Εικ. 5.9β.

5.5 Διαδικασία σχεδιασμού διαδρομής εναπόθεσης κυττάρων

Έχοντας καθορίσει την αλληλουχία επίσκεψης πλακιδίων και κυττάρων της στρώσης, σχεδιάζεται η τελική διαδρομή εναπόθεσης υλικού συνδέοντας τις αντίστοιχες στοιχειώδεις διαδρομές εναπόθεσης ανά κύτταρο. Για τη σχεδίαση διαδρομών εναπόθεσης ανά κύτταρο ακολουθείται μια στρατηγική παρόμοια με αυτή που προτάθηκε από τους Lou & Stucki (1998) για την κατασκευή πορωδών αντικειμένων με Στερεολιθογραφία. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, η επιφάνεια ενός κυττάρου αναλύεται σε ένα σύνολο τετραγωνικών ψηφίδων, το μέγεθος των οποίων ισούται με το πλάτος εναπόθεσης. Βασικός λόγος για την επιλογή αυτής της παραμέτρου είναι ότι καθορίζει πρακτικά το ελάχιστο μέγεθος ενός στοιχείου που μπορεί να εναποτεθεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Κατά συνέπεια οποιαδήποτε διαδρομή εναπόθεσης μπορεί να προσεγγιστεί ως μια διαδοχή αντίστοιχων ψηφίδων.

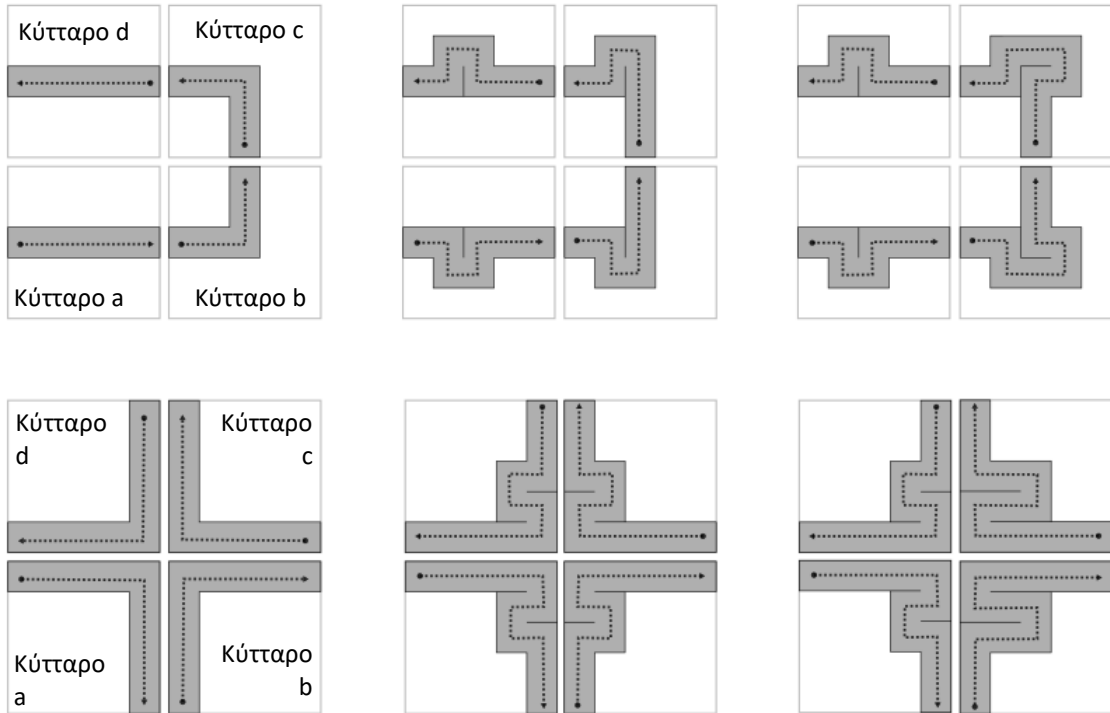
Η ανάλυση ενός κυττάρου, ο αριθμός δηλ. ψηφίδων ανά πλάτος και μήκος, σε συνάρτηση με το πλάτος εναπόθεσης ορίζουν, συνεπώς, τις διαστάσεις τόσο του κυττάρου όσο και του πλακιδίου. Υποθέτοντας για παράδειγμα, ένα τετραγωνικό κύτταρο το οποίο υποδιαιρείται σε 25 ψηφίδες (ανάλυση 5×5) μεγέθους 0,6 mm x 0,6 mm (πλάτος εναπόθεσης), συνεπάγεται ότι το κύτταρο έχει μέγεθος 3 mm, και το αντίστοιχο πλακίδιο 6 mm.

Η διαδρομή εναπόθεσης υλικού σε κάθε κύτταρο ορίζεται αρχικά ως η ακολουθία ψηφίδων που επισκέπτεται διαδοχικά η κεφαλή εναπόθεσης. Από αυτήν την ακολουθία επίσκεψης ψηφίδων, καθορίζεται η πραγματική διαδρομή εναπόθεσης χρησιμοποιώντας ως σημεία τις συντεταγμένες των κέντρων των ψηφίδων. Τόσο ο αριθμός όσο και η θέση των επιμέρους σημείων καθορίζονται έτσι ώστε να προκύπτει η απαιτούμενη πυκνότητα εναπόθεσης για κάθε συγκεκριμένο κύτταρο. Επιπλέον, κατά τη σχεδίαση των στοιχειωδών διαδρομών ακολουθείται ένα σύνολο κανόνων, που έχουν ως σκοπό να διασφαλιστεί ότι οι σχεδιασθείσες διαδρομές ικανοποιούν βασικούς κατασκευαστικούς περιορισμούς. Ο πρώτος κανόνας ορίζει ότι κάθε ένα από τα κύτταρα διασχίζεται μία και μόνο φορά. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα σημεία έναρξης

και λήξης της διαδρομής πρέπει να βρίσκονται σε διαφορετικές πλευρές του κυττάρου. Ο δεύτερος κανόνας αφορά το σχήμα της διαδρομής όπου επιτρέπονται μόνο ευθύγραμμες κινήσεις, δηλ. η επόμενη στην ακολουθία ψηφίδα πρέπει να βρίσκεται στην ίδια σειρά ή στήλη του πλέγματος με την προηγούμενη. Αυτός ο κανόνας εφαρμόζεται για να αποφευχθούν οξείες γωνίες εντός της διαδρομής καθώς και για υπολογιστικούς λόγους (επιτάχυνση διαδικασίας). Τέλος, για να διευκολυνθεί η διαδικασία σχεδιασμού της συνολικής διαδρομής, ορίζονται σταθερά σημεία έναρξης / λήξης της διαδρομής για όλα τα κύτταρα. Πιθανά τέτοια σημεία, αποτελούν οι ψηφίδες στο μέσο των πλευρών και οι γωνιακές ψηφίδες κάθε κυττάρου.

Με βάση τους παραπάνω κανόνες, μπορούν να σχεδιασθούν πολλές διαδρομές εναπόθεσης που αντιστοιχούν σε διαφορετικές πυκνότητες εναπόθεσης ενός πλακιδίου. Η ελάχιστη πυκνότητα εναπόθεσης, η οποία συνδέεται με το ελάχιστο μήκος της στοιχειώδους διαδρομής, καθορίζεται ουσιαστικά από την επιλογή των σημείων έναρξης και λήξης της διαδρομής. Σε ένα πλακίδιο π.χ. που αποτελείται από 4 κύτταρα με ανάλυση ψηφίδων 5×5, η επιλογή των κεντρικών ψηφίδων (μέσων) κάθε πλευράς ως σημείων έναρξης ή λήξης (κεντρική διαδρομή) προσδιορίζει έμμεσα το ελάχιστο μήκος μιας διαδρομής είναι ίσο με 5 ψηφίδες και η ελάχιστη πυκνότητα 20% (Εικ. 5.10, άνω αριστερά). Αντίστοιχα η επιλογή των άκρων των διαγωνίων ως σημείων έναρξης/λήξης (διαγώνια διαδρομή) σε συνδυασμό με τον κανόνα ορθογώνιων κινήσεων προσδιορίζει το ελάχιστο μήκος διαδρομής σε 9 ψηφίδες και την πυκνότητα σε 36% (Εικ. 5.10 κάτω αριστερά).

Έχοντας ως βάση την ελάχιστη μήκους διαδρομή είναι δυνατό να σχεδιαστεί πλήθος διαδρομών μεγαλύτερου μήκους και πυκνότητας. Δεδομένου ότι η κίνηση της κεφαλής εναπόθεσης περιορίζεται μόνο σε ορθογώνιες κινήσεις, ο ελάχιστος αριθμός των ψηφίδων που μπορούν να προστεθούν σε οποιαδήποτε διαδρομή είναι δύο. Στην περίπτωση κεντρικών διαδρομών, η δεύτερη σε μήκος έγκυρη διαδρομή έχει μήκος 7 ψηφίδες και καλύπτει το 28% του κυττάρου (Εικ. 5.10, μέσο). Επαναλαμβάνοντας αυτή την διαδικασία προσθήκης ζευγών ψηφίδων, μπορούν να κατασκευαστούν διαδρομές εναπόθεσης που καλύπτουν διαφορετικά ποσοστά του διαθέσιμου χώρου έως και τις 25 ψηφίδες (100% πυκνότητα εναπόθεσης).



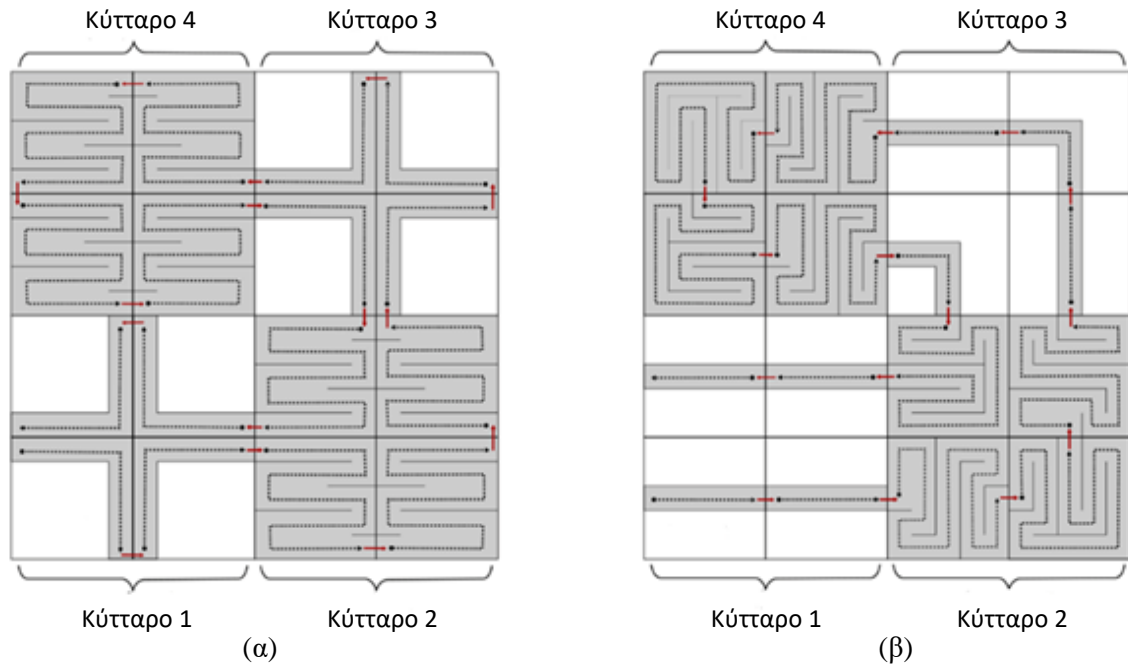
Εικόνα 5.10. Σχηματική αναπαράσταση κεντρικών διαδρομών (πάνω σειρά) και διαγώνιων διαδρομών εναπόθεσης (κάτω σειρά). Στα αριστερά απεικονίζονται οι διαδρομές ελάχιστου μήκους, στη μέση απεικονίζονται πλακίδια με ομοιόμορφη πυκνότητα ανά κύτταρο, ενώ πλακίδια με μεταβλητή πυκνότητα ανά κύτταρο παρουσιάζονται στα δεξιά.

Όπως είναι προφανές, ακολουθώντας την παραπάνω στρατηγική είναι δυνατόν να σχεδιαστούν διαδρομές που επιτυγχάνουν περιορισμένο αριθμό τιμών πυκνότητας. Ο αριθμός των διακριτών τιμών πυκνότητας εξαρτάται τόσο από την επιλεγμένη ανάλυση πλακιδίων όσο και από τους κανόνες δημιουργίας διαδρομών που ακολουθούνται. Υποθέτοντας, π.χ. ότι ακολουθείται η μέθοδος των κεντρικών διαδρομών για την κάλυψη ενός κυττάρου ανάλυσης 5×5 ψηφίδων, προκύπτει ότι μπορούν να σχεδιαστούν διαδρομές με 11 διακριτές τιμές μήκους και πυκνότητας εναπόθεσης, ήτοι 5 ψηφίδες/20%, 7 ψηφίδες/28%... 25 ψηφίδες/100%. Το γεγονός ότι κάθε πλακίδιο αποτελείται από τέσσερα κύτταρα, επιτρέπει τη σχεδίαση μεγαλύτερου αριθμού διακριτών τιμών πυκνότητας, αφού δεν είναι απαραίτητο όλα τα κύτταρα να έχουν την ίδια πυκνότητα εναπόθεσης (βλέπε π.χ. Εικ. 5.10 δεξιά). Εμπειρικά παρατηρήθηκε ότι εφαρμόζοντας την προσέγγιση των κεντρικών διαδρομών, ο αριθμός των διακριτών τιμών πυκνότητας υπολογίζεται ως εξής

$$\text{Αριθμός διακριτών τιμών πυκνότητας} = 2c_r^2 - 2c_r + 1 \quad (5.5)$$

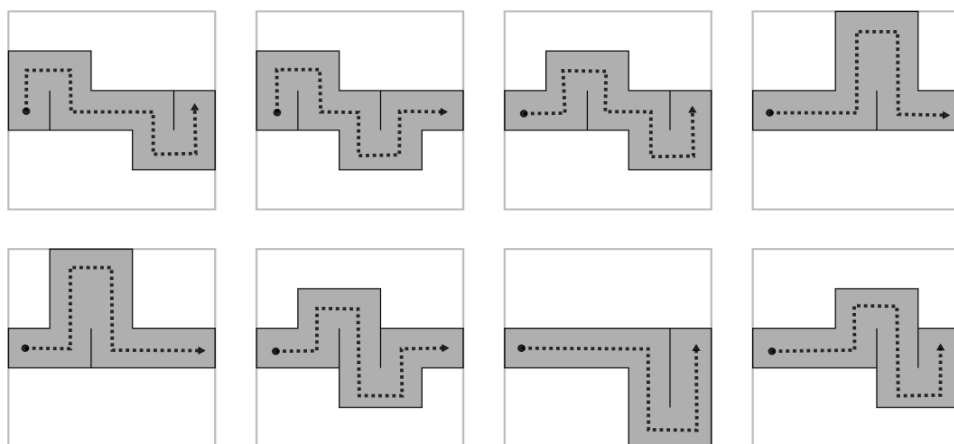
όπου c_r η ανάλυση των κυττάρων (αριθμός ψηφίδων ανά πλευρά). Με βάση τη σχέση (5.5) για ανάλυση $c_r = 5$ προκύπτει ότι ο αριθμός των διακριτών τιμών πυκνότητας εναπόθεσης σε επίπεδο πλακιδίου είναι 41. Η εφαρμογή διαγώνιας προσέγγισης μειώνει τον αριθμό των τιμών πυκνότητας σε 33, διότι οι διαδρομές με μήκος ίσο με 5 ή 7 ψηφίδες αποκλείονται εξ ορισμού. Όπως είναι εμφανές από τη σχέση (5.5), όσο μεγαλύτερη η ανάλυση τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός των διακριτών τιμών πυκνότητας και κατά συνέπεια, τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια στον ορισμό τοπικής πυκνότητας. Αυτό, ωστόσο, αντισταθμίζεται από την πιθανή μείωση στην ακρίβεια αναπαράστασης αντικειμένων καθώς υψηλότερες τιμές ανάλυσης συνεπάγονται αυξημένες διαστάσεις voxel. Συνεπώς, η ανάλυση των κυττάρων αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο η τιμή της οποίας πρέπει να καθορίζεται κατά περίπτωση και ανάλογα με την εφαρμογή.

Ο ορισμός σταθερών σημείων έναρξης και λήξης των διαδρομών, διευκολύνει επίσης τη σύνδεση των επιμέρους διαδρομών εναπόθεσης γειτονικών πλακιδίων/κυττάρων ανεξαρτήτως πυκνότητας. Στην Εικ. 5.11(α), για παράδειγμα, η διαδρομή εναπόθεσης διασχίζει διαγώνια τέσσερα κύτταρα μεταβλητής πυκνότητας, δύο ελάχιστης πυκνότητας (κύτταρα a και c) και δύο μέγιστης πυκνότητας (κύτταρα b και d). Η αλληλουχία επίσκεψης των κυττάρων ξεκινά από κύτταρο 1a και υποδεικνύεται με τα κόκκινα βέλη. Σε αυτήν την περίπτωση, το σημείο εκκίνησης όλων των διαδρομών που διασχίζουν κύτταρα τύπου a (κάτω αριστερά κύτταρα) είναι η επάνω αριστερά ψηφίδα, ενώ το τελικό σημείο είναι σταθερά η κάτω δεξιά ψηφίδα. Οι αντίστοιχες διαδρομές για τους άλλους τύπους κυττάρων καθορίζονται με κατάλληλες περιστροφές, π.χ. τα σταθερά σημεία έναρξης και λήξης διαδρομών για τα κύτταρα τύπου «b» (κάτω-δεξιά) είναι η κάτω αριστερά και η πάνω δεξιά ψηφίδα, αντίστοιχα. Στην εικόνα 5.11(β), απεικονίζονται αντίστοιχες κεντρικές διαδρομές εναπόθεσης στις οποίες ως πιθανά σημεία έναρξης/λήξης θεωρούνται οι κεντρικές ψηφίδες των πλευρών των κυττάρων. Σε αντίθεση με τη διαγώνια προσέγγιση, τα σημεία έναρξης και λήξης δεν είναι σταθερά ανά τύπο κυττάρου αλλά διαφέρουν ανάλογα και με την αλληλουχία επίσκεψης (δείτε, για παράδειγμα, τα κελιά 1-α, 3-α και 4-α).



Εικ. 5.11. Σχηματικές απεικονίσεις των διαδρομών εναπόθεσης που διασχίζουν τέσσερα κύτταρα ενός πλακιδίου χρησιμοποιώντας τη διαγώνια προσέγγιση (αριστερά) και την κεντρική προσέγγιση (δεξιά).

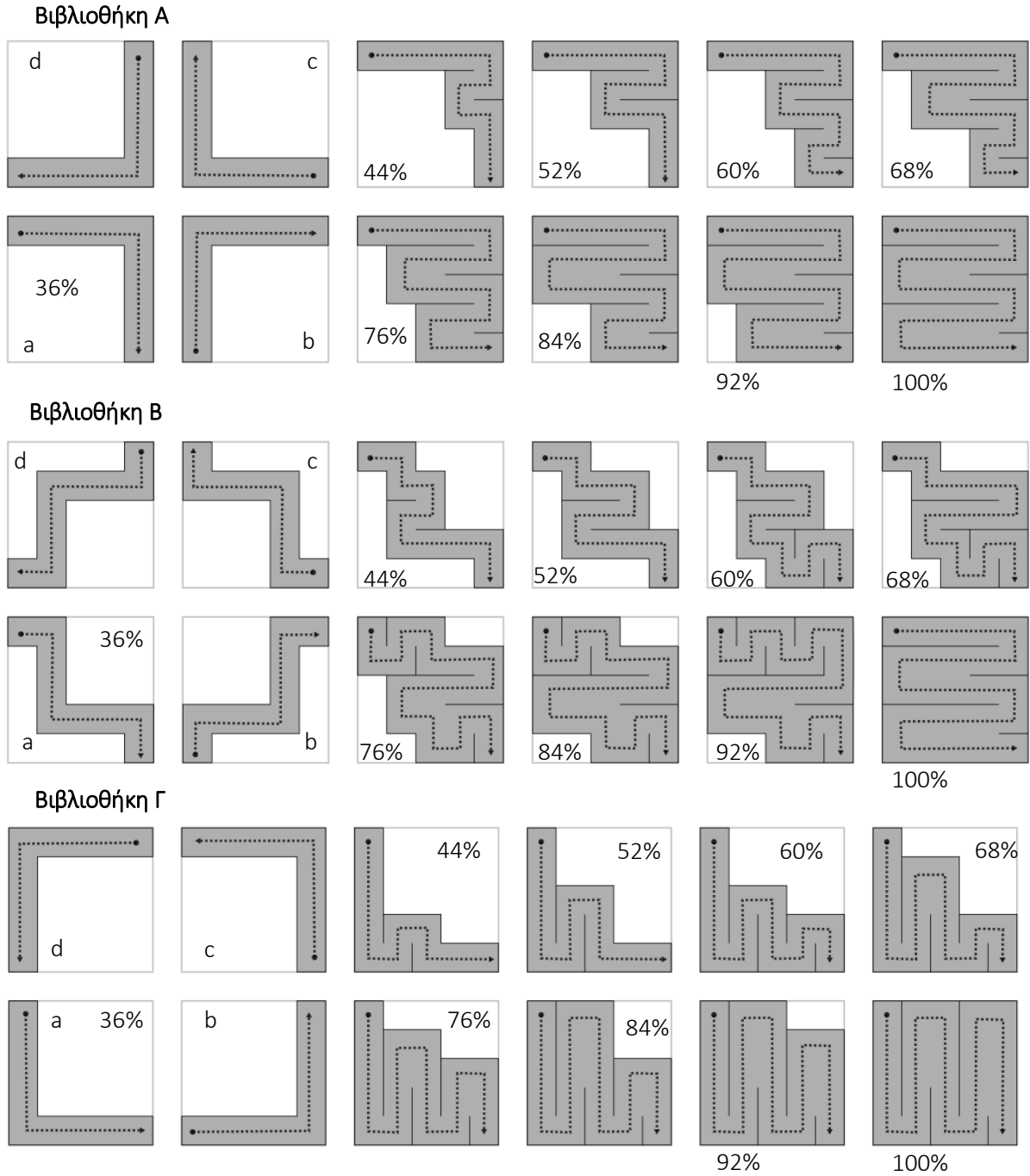
Εφαρμόζοντας τους κανόνες σχεδίασης διαδρομών είναι δυνατό να σχεδιαστούν επιμέρους διαδρομές που ανταποκρίνονται σε διαφορετικές τιμές πυκνότητας. Στις περισσότερες από τις επιτρεπτές τιμές πυκνότητας αντιστοιχούν περισσότερες από μία πιθανές διαδρομές δεδομένου μήκους. Για ένα κύτταρο ανάλυσης 5×5 , για παράδειγμα, υφίστανται αρκετές κεντρικές διαδρομές μήκους εννέα ψηφίδων και πυκνότητας 36% (Εικ. 5.12).



Εικόνα 5.12. Διαφορετικές διαδρομές εναπόθεσης με κατεύθυνση από αριστερά προς δεξιά, που επισκέπτονται 9 από τις 25 ψηφίδες ενός κυττάρου.

Η επιλογή συγκεκριμένων/πρότυπων διαδρομών ανά επίπεδο πυκνότητας και η κατάρτιση του σχετικού καταλόγου (βιβλιοθήκης) σχημάτων αποτελεί μια εύλογη μέθοδο επιτάχυνσης της αλγοριθμικής διαδικασίας. Δύο τέτοιες βιβλιοθήκες πρότυπων διαγώνιων διαδρομών σε κύτταρα 5×5 , παρουσιάζονται στην Εικ. 5.13. Οι διαδρομές ελάχιστου μήκους για όλους τους τύπους κυττάρων παρουσιάζονται στα αριστερά της Εικ. 5.13. Οι διαδρομές υψηλότερης πυκνότητας για κύτταρα τύπου a (κάτω αριστερά) απεικονίζονται στα δεξιά. Οι διαδρομές για τους άλλους τύπους κυττάρων δημιουργούνται εφαρμόζοντας τους κατάλληλους γεωμετρικούς μετασχηματισμούς (περιστροφή ή κατοπτρισμό) των συγκεκριμένων διαδρομών. Κάθε μία από τις δύο βιβλιοθήκες πρότυπων διαδρομών διαθέτει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Η βιβλιοθήκη A (Εικ. 5.13, άνω τμήμα), περιλαμβάνει διαδρομές με σχετικά λίγα σημεία καμπής, ένα χαρακτηριστικό που είναι επωφελές από την άποψη του χρόνου επεξεργασίας και κατασκευής. Αντίστοιχα, η βιβλιοθήκη B (Εικ. 5.13, κάτω τμήμα), επιτρέπει τη σχεδίαση πιο γεωμετρικά σύνθετων voxels που περιέχουν εσωτερικά κενά και προσομοιάζουν σε πιο έντονα πορώδεις δομές.

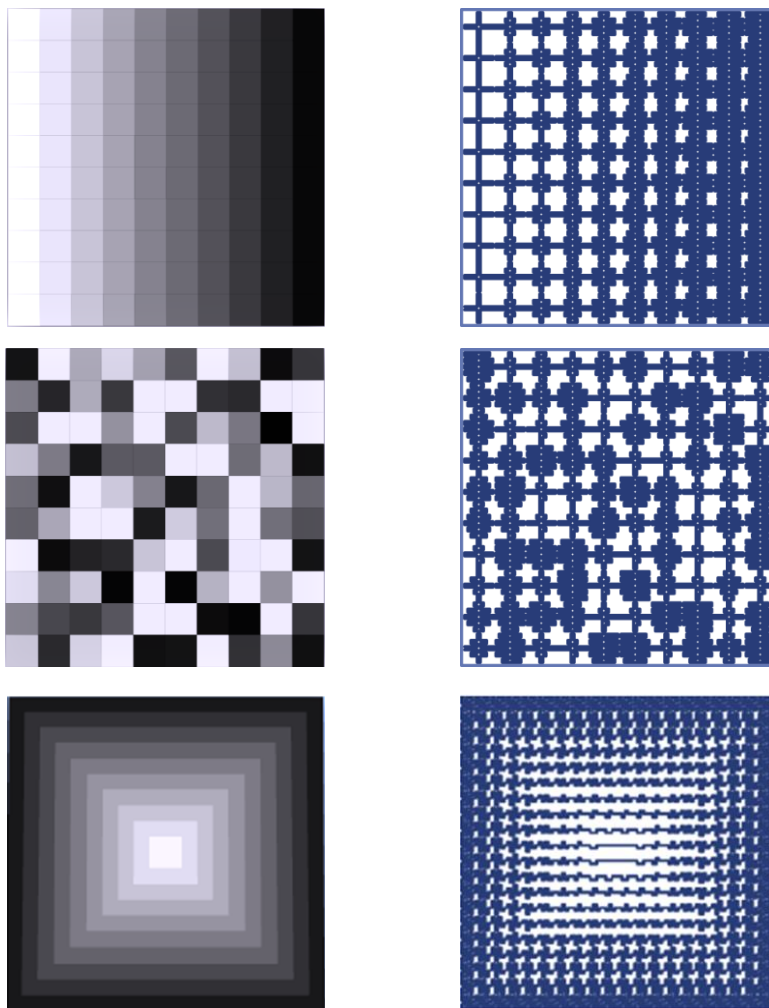
Σε ό,τι αφορά τις βιβλιοθήκες πρότυπων διαδρομών, η προσέγγιση των διαγώνιων διαδρομών θεωρείται απλούστερη από άποψη υλοποίησης επειδή διευκολύνει τη σύνδεση των διαδρομών διαδοχικών κυττάρων. Αυτό συμβαίνει διότι στην προσέγγιση κεντρικών διαδρομών τα σημεία έναρξης/λήξης και η διαδρομή καθαυτή εξαρτώνται τόσο τον τύπο του κυττάρου (a, b, c, d) όσο και από τη θέση του επόμενου κυττάρου. Για παράδειγμα, μια διαδρομή που διατρέχει ένα κύτταρο τύπου a (κάτω αριστερά) μπορεί να έχει κατεύθυνση δύση-ανατολή, δύση-νότος, βορράς-ανατολή ή βορράς-νότος (δες κύτταρα 2-a, 34-a, 30-a και 39-a στην Εικ. 5.9, αντίστοιχα). Κατά συνέπεια στην περίπτωση των κεντρικών διαδρομών απαιτείται ο ορισμός τεσσάρων πρότυπων σχημάτων. Αντίθετα στην περίπτωση των διαγώνιων διαδρομών το σχήμα της διαδρομής είναι ανεξάρτητο της κατεύθυνσης.



Εικόνα 5.13. Σχηματικές απεικονίσεις τριών βιβλιοθηκών προτύπων διαδρομών για κύτταρα 5×5 . Οι διαδρομές ελάχιστης πυκνότητας (36%) για όλους τους τύπους κυττάρων απεικονίζονται στα αριστερά, ενώ οι διαδρομές υψηλότερης πυκνότητας για το κάτω αριστερό κύτταρο (τύπου a) απεικονίζονται στα δεξιά.

Στην Εικ. 5.14 παρουσιάζεται σχηματικά η εφαρμογή της παραπάνω προσέγγισης, σε τρεις περιπτώσεις στρώσεων, μίας στρώσης με βαθμιαία γραμμική αύξηση πυκνότητας (πάνω) και μίας έντονα ετερογενούς στρώσης με τυχαία κατανομή πυκνότητας (μέση) και μίας στρώσης

με βαθμιαία ακτινική αύξηση πυκνότητας από το κέντρο προς την περιφέρεια (κάτω). Για την υλοποίηση του αλγορίθμου σχεδίασης και τη σχηματική αναπαράσταση σε μορφή εικόνας SVG (πρότυπο λογισμικού Inkscape) χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα Perl. Τα δύο πρώτα παραδείγματα αποτελούνται από ένα στρώμα 100 voxel (10x10) και σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες διαγώνιων διαδρομών, ενώ το τελευταίο αποτελείται από ένα στρώμα 400 voxel (20x20) και η κατανομή υλικού επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κεντρικές διαδρομές. Η ανάλυση ανά κύτταρο είναι 5x5 και το πλάτος ψηφίδας ισούται με 0,4 mm. Όπως είναι εμφανές με τη χρήση πρότυπων σχημάτων ανά τιμή πυκνότητας, προκύπτουν διαδρομές που έχουν μία σχετική κανονικότητα.



Εικόνα 5.14. Αναπαράσταση τριών τετραγωνικών voxel αντικειμένων και των αντίστοιχων διαδρομών εναπόθεσης: περίπτωση βαθμιαίας αύξησης πυκνότητας (επάνω), τυχαίας κατανομής πυκνότητας (κέντρο) και ακτινικής βαθμιαίας αύξησης πυκνότητας (κάτω).

Για τη σχεδίαση διαδρομών λιγότερο κανονικής μορφής μπορεί να ακολουθηθεί μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία η διαδρομή σχηματίζεται σταδιακά, ξεκινώντας από τη διαδρομή ελάχιστου μήκους και προσθέτοντας ζεύγη ψηφίδων με ημι-τυχαίο τρόπο μέχρι να επιτευχθεί το απαιτούμενο μήκος. Μια απλή αλγοριθμική διαδικασία που αυτοματοποιεί και τυχαιοποιεί μερικώς τη μορφή των διαδρομών, είναι η ακόλουθη:

Βήμα 1. Ξεκινώντας με τη διαδρομή ελάχιστου μήκους, μια ψηφίδα επιλέγεται τυχαία και της αποδίδεται το όνομα «*Ins_point_1*». Οι πρώτα και οι τελευταίες ψηφίδες εξαιρούνται. Η προηγούμενη στην ακολουθία ψηφίδα επισημαίνεται ως «*ins_point_0*» ενώ η επόμενη ως «*Ins_point_2*».

Βήμα 2. Οι γειτονικές ψηφίδες της «*ins_point_1*» ελέγχονται για να διαπιστωθεί εάν περιλαμβάνονται στη διαδρομή. Εάν περισσότερες από μία ψηφίδες δεν περιλαμβάνονται στη διαδρομή, τότε επιλέγεται μία από αυτές τυχαία και της αποδίδεται το όνομα «*new_tile_1*». Εάν όλες οι γειτονικές ψηφίδες περιλαμβάνονται στη διαδρομή τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 1.

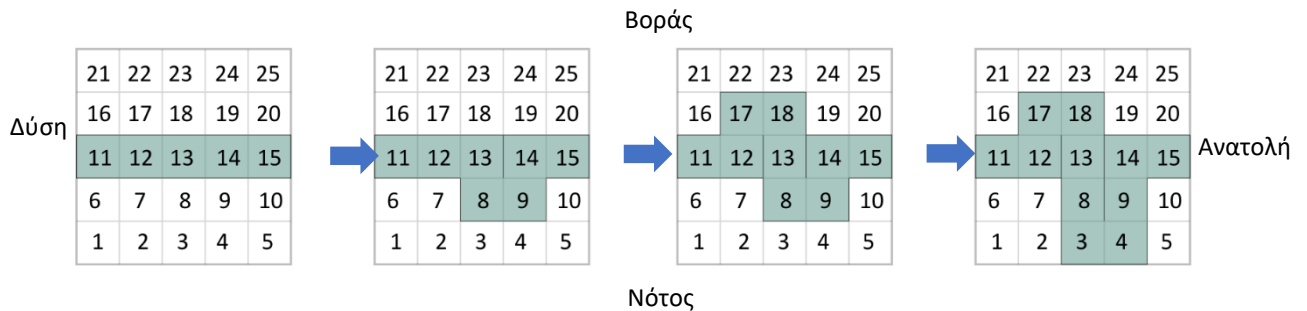
Βήμα-3. Ελέγχεται εάν υπάρχουν γειτονικές ψηφίδες των «*ins_point_0*» και «*ins_point_2*» που δεν περιλαμβάνονται ήδη στη διαδρομή και εφάπτονται του «*new_tile_1*». Εάν αυτό ισχύει, τότε στις αντίστοιχες ψηφίδες αποδίδονται τα ονόματα «*new_tile_0*» και «*new_tile_2*», αλλιώς ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 1.

Βήμα-4. Ορίζεται ένα νέο ζεύγος ψηφίδων, το οποίο αποτελείται από τις «*New_tile_1*» και μία από τις «*new_tile_0*» ή «*New_tile_2*» (εάν υπάρχουν και οι δύο, επιλέγεται μία τυχαία). Οι δύο νέες ψηφίδες προστίθεται στη διαδρομή στο αντίστοιχο σημείο εισαγωγής.

Βήμα-5. Τα βήματα 1–4 επαναλαμβάνονται μέχρι ο συνολικός αριθμός ψηφίδων να φτάσει στην απαιτούμενη τιμή (προδιαγεγραμμένο μήκος).

Στην Εικ. 5.15 παρουσιάζεται σχηματικά ένα παράδειγμα έτσι ώστε να γίνει πιο σαφής η συγκεκριμένη μέθοδος. Θεωρούμε ότι ένα κύτταρο ανάλυσης 5×5 πρέπει να καλυφθεί από μία κεντρικού τύπου διαδρομή κατά 44%, δηλ. το μήκος ισούται με 11 ψηφίδες, καθώς και ότι η διαδρομή διασχίζει κεντρικά το κύτταρο με κατεύθυνση Δύση προς Ανατολή (αριστερά-δεξιά). Στην περίπτωση αυτή, η ελάχιστου μήκους διαδρομή είναι η 11-12-13-14-15. Έστω ότι η ψηφίδα 14 επιλέγεται τυχαία ως *ins_point_1* και συνεπώς στις ψηφίδες 13 και 15 αποδίδονται

τα ονόματα *ins_point_0* και *ins_point_2*. Η ψηφίδα 14 έχει μόνο δύο γειτονικές ψηφίδες που θα μπορούσαν να προστεθούν στη διαδρομή εναπόθεσης, ήτοι τις ψηφίδες 9 και 19. Δεδομένου ότι και οι δύο δεν περιλαμβάνονται στη διαδρομή, επιλέγεται τυχαία η μία, έστω η ψηφίδα 9, και της ανατίθεται το όνομα *new_tile_1*. Και οι δύο ψηφίδες 13 και 15 έχουν γειτονικές που επίσης δεν περιλαμβάνονται στη διαδρομή και εφάπτονται με την ψηφίδα 9 (*new_tile_1*), συγκεκριμένα τις ψηφίδες 8 (*new_tile_0*) και 10 (*new_tile_2*).

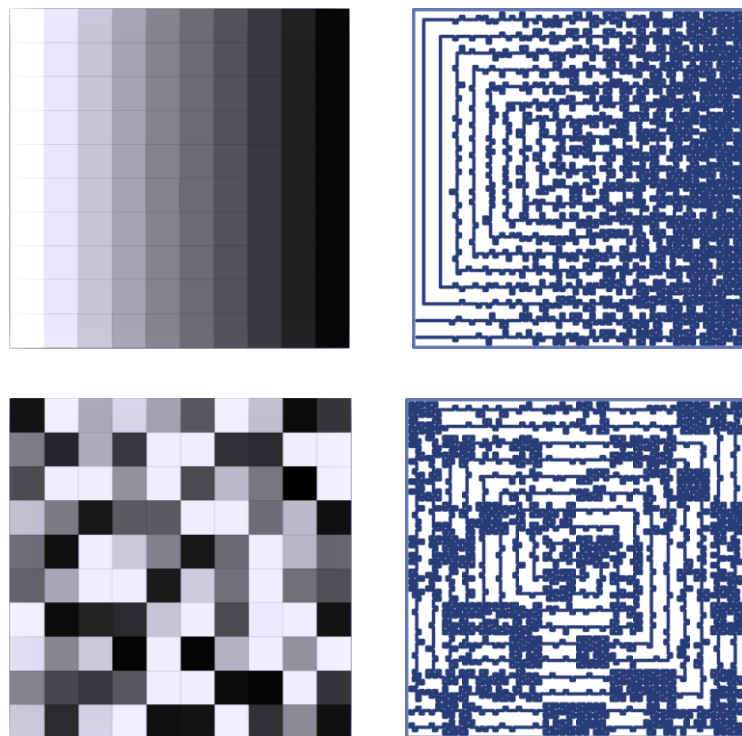


Εικόνα 5.15. Παράδειγμα της ημι-τυχαίας αλγοριθμικής διαδικασίας σχηματισμού διαδρομής, όπου ζεύγη πλακιδίων ενσωματώνονται διαδοχικά στο ακολουθία επίσκεψης πλακιδίων.

Επιλέγοντας μία από αυτές τυχαία, έστω την 8, ορίζεται ένα νέο ζεύγος γειτονικών ψηφίδων που θα προστεθεί στη διαδρομή εναπόθεσης (ψηφίδες 8 και 9). Αυτό το ζεύγος εισάγεται στη διαδρομή στην κατάλληλη θέση, δηλαδή μετά την ψηφίδα 13 και πριν την ψηφίδα 14, και η νέα διαδρομή εναπόθεσης περιλαμβάνει πλέον 7 ψηφίδες (11-12-13-8-9-14-15). Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται δύο ακόμα φορές, στις οποίες προστίθενται διαδοχικά δύο νέα ζεύγη ψηφίδων, οι ψηφίδες 17-18 και 3-4. Έτσι, η τελική διαδρομή (ακολουθία ψηφίδων) περιλαμβάνει πλέον 11 ψηφίδες (11-12-17-18-13-8-3-4-9-14-15). Όσον αφορά την κατεύθυνση των κεντρικών διαδρομών που διασχίζουν τα κύτταρα, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι επιτρέπονται όλες οι κατευθύνσεις, λόγω της αριστερόστροφης φοράς ελέγχου/επίσκεψης των κυττάρων. Όπως είδαμε, οι δυνατές κατευθύνσεις εξαρτώνται από τον τύπο του κυττάρου (a, b, c, d), π.χ. στα κύτταρα τύπου b (κάτω δεξιά) η διαδρομή μπορεί να ακολουθεί μόνο τις κατευθύνσεις μόνο δύση-ανατολή, δύση-βορράς, νότος-ανατολή ή νότος-βορράς (δες κύτταρα 2-b, 5-b, 12-b και 20-b στην Εικ. 5.9, αντίστοιχα). Ο περιορισμός αυτός απλοποιεί, σε κάποιο βαθμό, το βήμα-1 της διαδικασίας σχηματισμού διαδρομής.

Στην Εικ. 5.16 παρουσιάζονται δύο παραδείγματα διαδρομών που δημιουργήθηκαν εφαρμόζοντας την ημι-τυχαία διαδικασία σχεδίασης κεντρικών διαδρομών. Για λόγους

σύγκρισης οι δύο αυτές περιπτώσεις είναι ίδιες από πλευράς μορφολογίας με αυτές που παρουσιάζονται στην Εικ. 5.14. Όπως είναι εμφανές εφαρμόζοντας την ημι-τυχαία διαδικασία σχεδίασης διαδρομών προκύπτουν πιο «οργανικές» δομές, οι οποίες παρουσιάζουν την απαιτούμενη κατανομή πυκνότητας αλλά διαφέρουν από τυπικές τεχνητές δομές, κανονικής μορφολογίας. Οι διαδρομές είναι επίσης εμφανώς πιο αραιές σε κάποια σημεία, καθώς ακολουθήθηκε η προσέγγιση των κεντρικών διαδρομών στην οποία η ελάχιστη τιμή πυκνότητας ισούται με 20%, αντί 36% για τις αντίστοιχες διαγώνιες διαδρομές πρότυπου σχήματος της Εικ. 5.14.

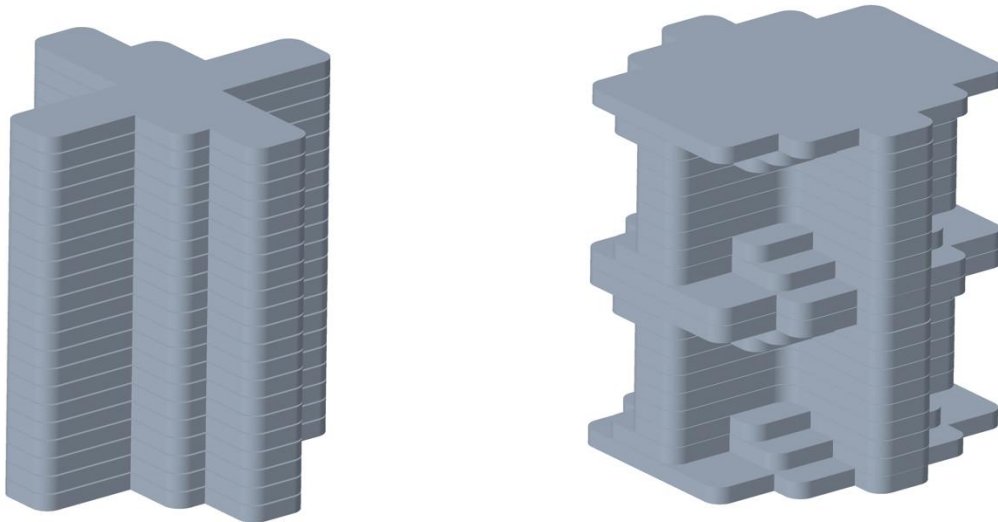


Εικόνα 5.16. Αναπαράσταση δύο τετραγωνικών voxel αντικειμένων και των αντίστοιχων κεντρικών διαδρομών εναπόθεσης ημι-τυχαίας μορφής: περίπτωση βαθμιαίας αύξησης πυκνότητας (επάνω) και τυχαίας κατανομής πυκνότητας (κάτω).

5.6 Σχεδιασμός πρότυπων voxel

Κατά το σχεδιασμό των voxel πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα ύπαρξης υποστηρικτικών δομών, ειδικά εντός της δομής των voxel, τα οποία είναι δύσκολο έως πιθανώς αδύνατο, σε πολλές περιπτώσεις να αφαιρεθούν. Το συγκεκριμένο πρόβλημα εμφανίζεται μόνο στην περίπτωσης πλήρως τριδιάστατων voxel (Εικ. 5.17, δεξιά), όπου η εφαρμογή στηριγμάτων επιβάλλεται όταν το μήκος της προεξοχής που παρατηρείται υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο

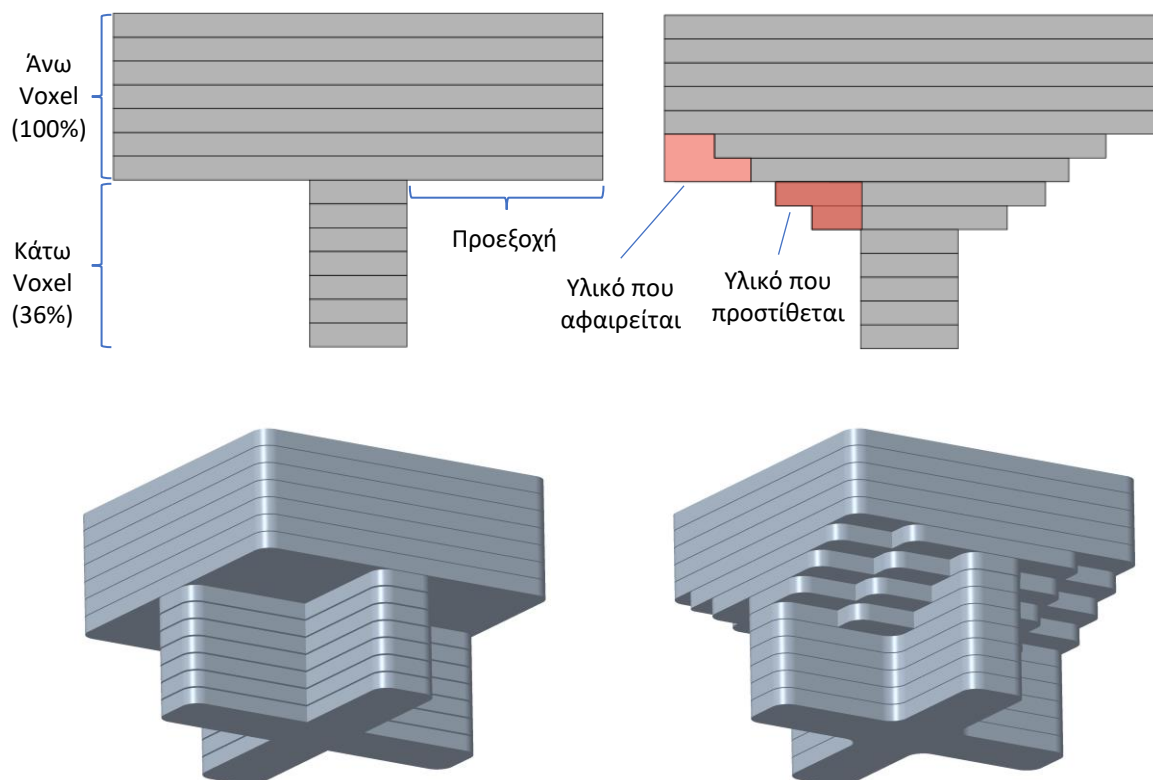
όριο/μήκος. Το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος προεξοχής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά του συστήματος εξώθησης (π.χ. ψύξη στο ακροφύσιο) και το υλικό, γενικά όμως αποτελεί ασφαλή επιλογή να οριστεί ίσο με το πλάτος εναπόθεσης. Ελέγχοντας, συνεπώς, την ύπαρξη και το μήκος πιθανών προεξοχών μπορεί να απαλειφθεί η ανάγκη υποστηρικτικών δομών εντός ενός voxel.



Εικόνα 5.17. Σχηματικές απεικονίσεις δύο δομών voxel: 2 ½ διαστάσεων (αριστερά) και πλήρως τριδιάστατων (δεξιά).

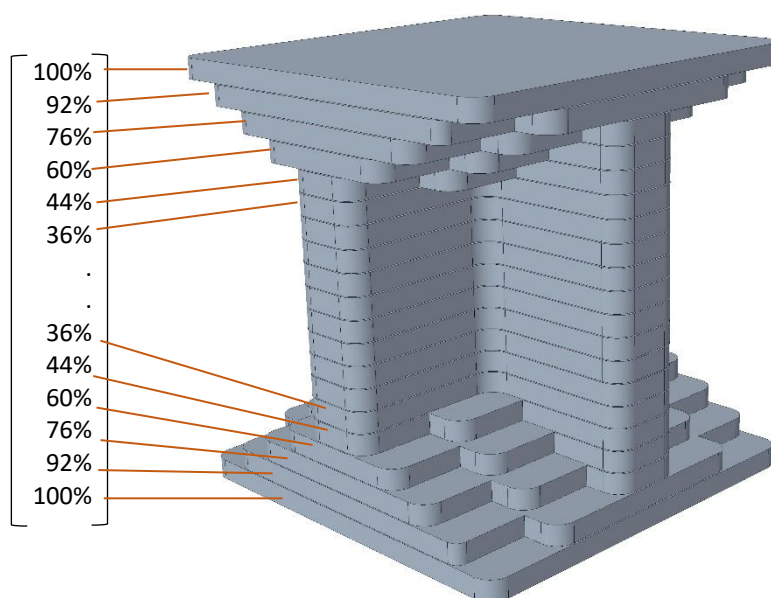
Η μέθοδος ελέγχου αυτού του περιορισμού εξαρτάται με την προσέγγιση που ακολουθείται για την κατασκευή της διαδρομής εναπόθεσης. Εάν ακολουθείται η ημι-τυχαία προσέγγιση, ο έλεγχος του περιορισμού επιβάλλει την άμεση σύγκριση των επιφανειών που καλύπτονται σε δύο διαδοχικά πλακίδια και τον εντοπισμό πιθανών προεξοχών, διότι δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή η διαδρομή που ακολουθείται σε κάθε πλακίδιο. Όπως είναι προφανές, η συγκεκριμένη προσέγγιση συνεπάγεται σημαντική υπολογιστική προσπάθεια. Αντίθετα στην περίπτωση χρήσης πρότυπων διαδρομών, ο περιορισμός στο μήκος της προεξοχής μπορεί να ληφθεί εκ των προτέρων υπόψη στην φάση του σχεδιασμού των αντίστοιχων πρότυπων voxel και δημιουργίας της σχετικής βιβλιοθήκης. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάζεται επίσης η απευθείας σύγκριση του σχήματος των καλυφθέντων περιοχών, αλλά θα μπορούσε να αρκεί η απλή σύγκριση των αντίστοιχων τιμών πυκνότητας. Έτσι ο περιορισμός θα μπορούσε να μεταφραστεί σε μια ανώτατη επιτρεπτή τιμή για τη διαφορά των ποσοστών πυκνότητας μεταξύ διαδοχικών πλακιδίων, δηλ. η πυκνότητα οποιουδήποτε πλακιδίου δεν πρέπει να υπερβαίνει αυτήν του αμέσως προηγούμενου περισσότερο από ένα ορισμένο ποσοστό.

Μια άλλη περίπτωση εμφάνισης στηριγμάτων αφορά στην ύπαρξη προεξοχών μεταξύ διαδοχικών voxel. Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη τιμή προεξοχής παρατηρείται όταν ένα πλήρως στερεό voxel τοποθετείται πάνω από ένα voxel ελάχιστης πυκνότητας. Μια σχηματική απεικόνιση αυτής της (ακραίας) περίπτωσης απεικονίζεται στην Εικ. 5.18. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και τα δύο voxels είναι $2\frac{1}{2}$ διαστάσεων, και οι αντίστοιχες διαδρομές εναπόθεσης ακολουθούν τα αντίστοιχα πρότυπα της βιβλιοθήκης A (διαδρομή 100% για το στερεό voxel και 36% για voxel ελάχιστης πυκνότητας, όπως παρουσιάζονται στην Εικ. 5.13). Το μήκος προεξοχής σε αυτή την περίπτωση, υπερβαίνει σημαντικά τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, ήτοι το πλάτος ψηφίδας/εναπόθεσης (Εικ. 5.18, αριστερά). Για να αποφευχθεί η προσθήκη στηριγμάτων προτείνεται η εξομάλυνση στο βαθμό αύξησης της πυκνότητα εναπόθεσης, τροποποιώντας τις πυκνότητες των πλακιδίων στη περιοχή διεπαφής των δύο voxel. Η τροποποίηση αυτή, πρακτικά, μεταφράζεται σε μείωση της πυκνότητας των κάτω πλακιδίων του άνω voxel, η οποία αντισταθμίζεται από την παράλληλη αύξηση της πυκνότητας εναπόθεσης στα άνω πλακίδια του κάτω voxel (Εικ. 5.18, δεξιά).



Εικόνα 5.18. Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης των μεταβατικών στρωμάτων, η οποία χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση υπερβολικών προεξοχών: πρόοψη (επάνω) και ισομετρική απεικόνιση (κάτω).

Τα σημεία του μοντέλου όπου απαιτείται παρόμοια προσαρμογή, μπορούν να προσδιοριστούν ελέγχοντας τη διαφορά στην πυκνότητα εναπόθεσης διαδοχικών καθ' ύψος voxel. Ωστόσο, η απαίτηση για τέτοιου τύπου προσαρμογές μπορεί να μετριαστεί εάν ληφθεί η σχετική πρόνοια κατά το σχεδιασμό των πρότυπων δομών voxel, όπως αυτή που παρουσιάζεται στην Εικ. 5.19. Με δεδομένο ότι κάθε δυνατό ποσοστό πυκνότητας αντιστοιχεί σε μια και μόνο πρότυπη διαδρομή, προκύπτει ότι η δομή ενός voxel μπορεί να περιγράψει με αναφορά στα αντίστοιχα επίπεδα πυκνότητας πλακιδίων. Έτσι, στην περίπτωση της Εικ. 5.19, η μορφολογία του voxel μπορεί να περιγράψει με μια ταξινομημένη ακολουθία 20 τιμών που αφορούν στα επίπεδα πυκνότητας των αντίστοιχων πλακιδίων.



Εικόνα 5.19. Σχηματική αναπαράσταση ενός voxel αποτελούμενου από πλακίδια μεταβλητής πυκνότητας

Η μορφή των επιμέρους διαδρομών ανά πλακίδιο/στρώση ακολουθεί τα πρότυπα της βιβλιοθήκης A (Εικ. 5.13). Το πρώτο και το τελευταίο πλακίδιο είναι πλήρως πυκνά (100%), έτσι ώστε να λειτουργούν ως σταθερές βάσεις. Στο άνω τμήμα, υφίστανται 4 «μεταβατικά» πλακίδια για την εξομάλυνση στο βαθμό μείωσης της πυκνότητας. Παρόμοια λογική ακολουθείται και στο κάτω μέρος του voxel, όπου η πυκνότητα εναπόθεσης μειώνεται σταδιακά κατά τον άξονα Z (πλακίδια 2–5). Επισημαίνεται ότι δεν είναι απαραίτητη αυτή η μεταβατική αύξηση της πυκνότητας για λόγους απαλοιφής στηριγμάτων, θα μπορούσε όμως να εφαρμοστεί για λόγους συμμετρίας. Τέλος, το κεντρικό τμήμα του voxel αποτελείται από

10 πλακίδια ελάχιστης πυκνότητας (36%). Ακολουθώντας αυτήν την προσέγγιση, διάφορες δομές voxel που ικανοποιούν τον περιορισμό προεξοχής εσωτερικά και επιτρέπουν την ομαλή μετάβαση μεταξύ διαδοχικών voxel, μπορούν να σχεδιαστούν, ανάλογα με τα απαιτούμενα λειτουργικά ή/και μορφολογικά χαρακτηριστικά του μοντέλου καθώς και τις δυνατότητες και χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου συστήματος εξώθησης υλικού.

5.7 Δημιουργία τελικών διαδρομών εναπόθεσης και εντολών κώδικα G

Για την κατασκευή των αντικειμένων με μεθόδους εξώθησης υλικού είναι απαραίτητη η δημιουργία του σχετικού προγράμματος εντολών σε μορφή κώδικα G. Το σχετικό αρχείο περιλαμβάνει τις εντολές κίνησης της κεφαλής εναπόθεσης ανά στρώση, τόσο για την εναπόθεση υλικού στο εσωτερικό της στρώσης (infill) όσο και στο περίγραμμα (border). Οι εντολές εναπόθεσης υλικού στο εσωτερικό της στρώσης δημιουργούνται με βάση τη σχεδιασθείσα συνολική διαδρομή εναπόθεσης. Στην αρχική της μορφή, όμως, η συνολική διαδρομή περιλαμβάνει πολλά πλεονάζοντα σημεία, ειδικά στα σημεία σύνδεσης διαδοχικών κυττάρων. Η ύπαρξη αυτών των σημείων πέραν του ότι αυξάνει σημαντικά το μέγεθος των αρχείων, επιβραδύνει την όλη διαδικασία καθώς μειώνει το μήκος των επιμέρους τμημάτων και κατά συνέπεια τη δυνατότητα επίτευξης υψηλών ταχυτήτων εκτύπωσης. Για την αφαίρεση, λοιπόν, αυτών των σημείων εφαρμόζεται μια απλή ρουτίνα που ελέγχει εάν τρία διαδοχικά σημεία είναι συγγραμμικά, και αν αυτό ισχύει αφαιρείται από την ακολουθία το ενδιάμεσο σημείο.

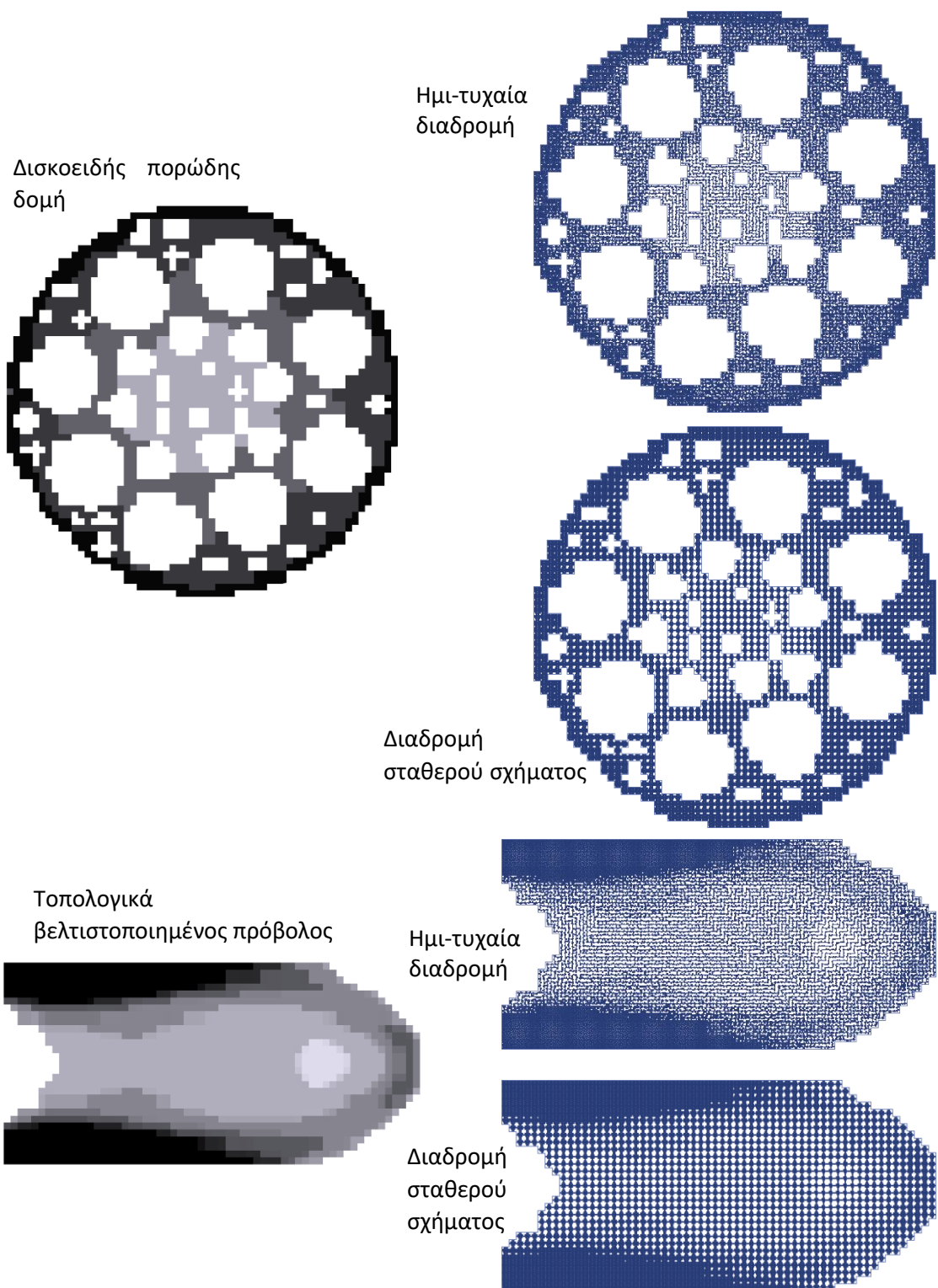
Για τη σχεδίαση της διαδρομής εναπόθεσης του περιγράμματος μιας στρώσης ακολουθείται μια διαδικασία στην οποία εντοπίζονται αρχικά τα πλακίδια που είναι στο εξωτερικό τμήμα της στρώσης, ελέγχοντας τον αριθμό γειτονικών πλακιδίων. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος του 4 τότε το πλακίδιο είναι στο εξωτερικό τμήμα της στρώσης. Στη συνέχεια εντοπίζονται οι ελεύθερες πλευρές κάθε πλακιδίου, οι οποίες ενώνονται διαδοχικά προκειμένου να σχηματιστεί η διαδρομή εναπόθεσης περιγράμματος. Επισημαίνεται ότι είναι δυνατή η συγχώνευση των διαδρομών εναπόθεσης εσωτερικού και περιγράμματος σε μία ενιαία διαδρομή αλλά επιλέχθηκε να μην ακολουθηθεί η συγκεκριμένη προσέγγιση έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρήση διαφορετικών παραμέτρων όπως ταχύτητα εκτύπωσης και πλάτος εναπόθεσης για κάθε διαδρομή. Η διαδικασία δημιουργίας διαδρομών εναπόθεσης, επαναλαμβάνεται για κάθε στρώση.

Τέλος εξάγεται το τελικό αρχείο εντολών σε κώδικα G που εκτός των εντολών κίνησης περιλαμβάνει εντολές που αφορούν στη ρύθμιση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία ακροφυσίου και η θερμοκρασία της πλατφόρμας. Όλες οι σχετικές παράμετροι (ταχύτητα εκτύπωσης, διάμετρος νήματος, θερμοκρασία ακροφυσίου κλπ.) επιλέγονται από τον χειριστή.

5.8 Υπολογιστικές δοκιμές

Οι παραπάνω αλγοριθμικές διαδικασίες δοκιμάστηκαν σε ένα εύρος περιπτώσεων για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους και να ελεγχθεί η δυνατότητα κατασκευής των δομών. Για τη σχεδίαση των αντίστοιχων αντικειμένων σε μορφή voxel χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *MagicaVoxel*, ενώ οι αλγοριθμικές διαδικασίες υλοποιήθηκαν σε γλώσσα *Perl*. Οι υπολογιστικές εργασίες εκτελέστηκαν σε έναν τυπικό προσωπικό Η/Υ εξοπλισμένο με επεξεργαστή *Intel Core i5* (1,9 GHz), 4 GB RAM και λειτουργικό σύστημα *Windows 10*.

Οι πρώτες δοκιμές σχεδίασης διαδρομών για τα απλά μοντέλα $2\frac{1}{2}$ διαστάσεων των Εικ. 5.14 και 5.16 έδειξαν ότι η προτεινόμενη προσέγγιση δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητική από υπολογιστικής πλευράς, καθώς οι διεργασίες για τη σχεδίαση των διαδρομών και την εξαγωγή του αρχείου εντολών σε κώδικα G ολοκληρώθηκαν σε 1-2 δέκατα του δευτερολέπτου. Για την περαιτέρω αξιολόγηση του υπολογιστικού φόρτου εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις στρώσεων μεγαλύτερου μεγέθους και πολυπλοκότητας. Η πρώτη αφορά έναν πρόβολο με τοπολογικά βελτιστοποιημένη μορφή και κατανομή υλικού (Εικ. 5.20, κάτω αριστερά), όπως παρουσιάζεται στη μελέτη των Sigmund et al. (2016), ενώ η δεύτερη αφορά αντικείμενο δισκοειδούς πορώδους μορφής (Εικ. 5.20, πάνω αριστερά). Και τα δύο μοντέλα αποτελούνται από ένα στρώμα voxel, ο αριθμός των οποίων είναι 1.526 και 1.519, αντίστοιχα. Κάθε voxel αποτελείται από 20 πλακίδια, η ανάλυση ανά κύτταρο είναι 5×5 και το μέγεθος ψηφίδας ισούται με 0,4 mm. Οι αντίστοιχες διαστάσεις του ορθογώνιου πλαισίου είναι $240 \times 216 \times 4$ mm για τον πρόβολο και $240 \times 240 \times 4$ mm για τον δίσκο. Και στις δύο περιπτώσεις εξετάστηκαν οι σχεδιαστικές προσεγγίσεις της ημι-τυχαίας σχεδίασης με κεντρικές διαδρομές και της βιβλιοθήκης σταθερών σχημάτων με διαγώνιες διαδρομές. Οι σχεδιασθείσες διαδρομές εναπόθεσης απεικονίζονται σχηματικά στα δεξιά της Εικ. 5.20. Τα χαρακτηριστικά των επιμέρους διαδρομών καθώς και ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος για μία στρώση παρουσιάζονται στον Πίν. 5.1.



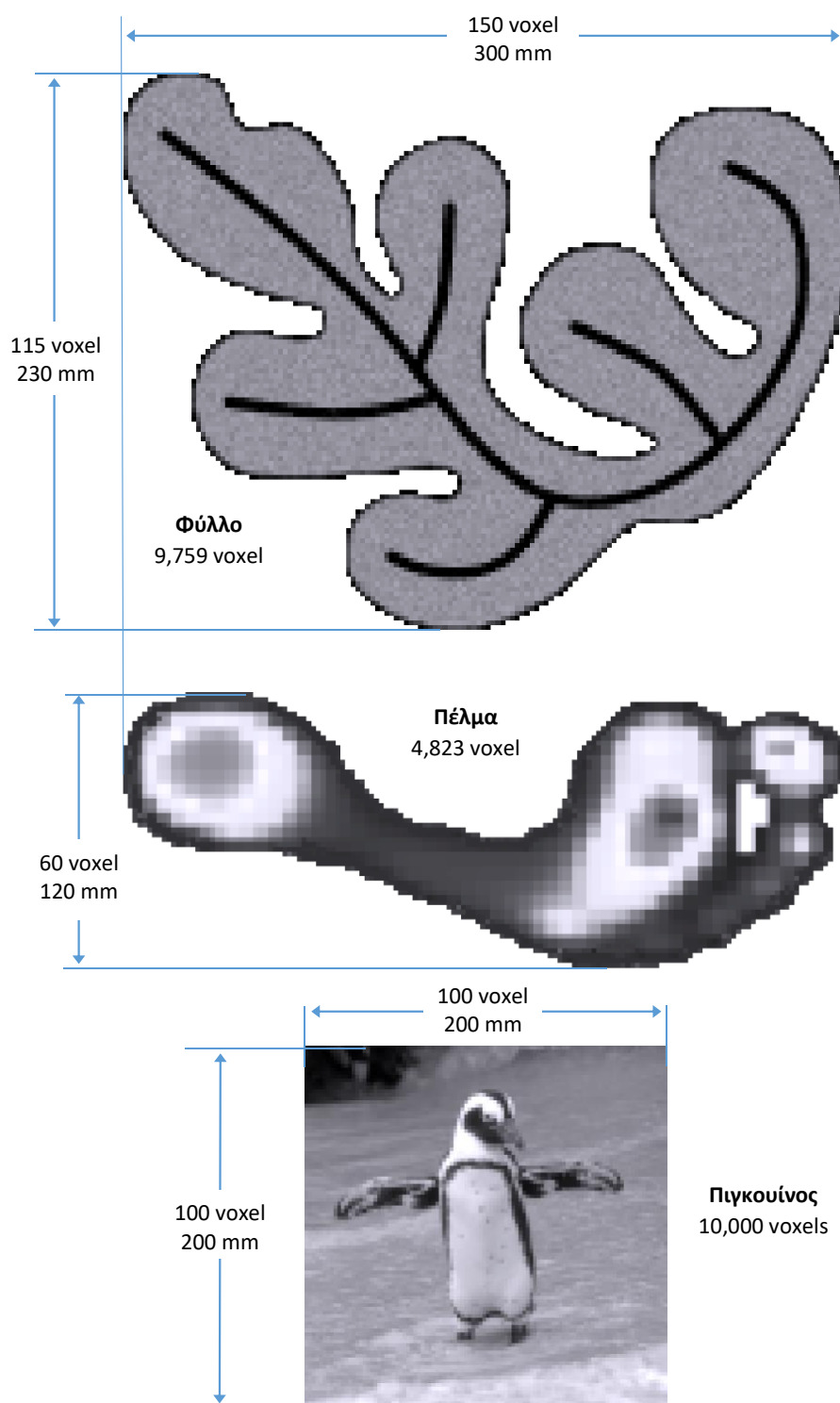
Εικόνα 5.20. Αναπαράσταση voxel representation (left) and the corresponding deposition paths (right) for a disc-shaped porous structure (top) and a topologically optimized cantilever beam structure (bottom).

Όπως αναμενόταν, ο χρόνος σχεδίασης διαδρομών χρησιμοποιώντας πρότυπα σχήματα είναι μικρότερος (περίπου στο μισό) από τον αντίστοιχο χρόνο της ημι-τυχαίας σχεδιαστικής διαδικασίας. Σε ό,τι αφορά στον συνολικό χρόνο επεξεργασίας, παρατηρείται ότι ο χρόνος εξαγωγής αρχείων εντολών G είναι σημαντικά υψηλότερος, καθώς η σχετική διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε στρώση (20 στρώσεις και στις δύο περιπτώσεις). Ο χρόνος σχεδίασης της διαδρομής, από την άλλη πλευρά, είναι σημαντικά μικρότερος καθώς οι σχετικές διαδικασίες εκτελούνται μία φορά, εφόσον πρόκειται για αντικείμενο 2½ διαστάσεων.

Πίνακας 5.1. Αριθμός σημείων διαδρομής, μήκος διαδρομής, χρόνος δημιουργίας αρχείου κώδικα G και χρόνος σχεδίασης διαδρομής για τις δύο δομές της Εικ. 5.20.

Δοκίμιο	Αριθμός σημείων	Μήκος διαδρομής (mm)	Χρόνος εξαγωγής αρχείου εντολών (s)	Χρόνος σχεδίασης διαδρομής (s)
Δίσκος / Ημι-τυχαίο σχήμα / Κεντρική διαδρομή	71.248	46.122	5,6	1
Δίσκος / Σταθερό σχήμα / Διαγώνια διαδρομή	56.965	50.601	5,3	0,4
Πρόβολος / Ημι-τυχαίο σχήμα / Κεντρική διαδρομή	61.789	39.194	5,5	0,8
Πρόβολος / Σταθερό σχήμα / Διαγώνια διαδρομή	52.874	44.692	4,9	0,3

Προκειμένου να αξιολογηθεί περαιτέρω ο υπολογιστικός φόρτος της προτεινόμενης προσέγγισης, διερευνήθηκαν τρεις επιπλέον περιπτώσεις μοντέλων μεγαλύτερου μεγέθους που παρουσιάζονται στην Εικ. 5.21. Τα χαρακτηριστικά των αντίστοιχων διαδρομών και οι καταγεγραμμένοι υπολογιστικοί χρόνοι ανά στρώση αναφέρονται στον Πίν. 5.2. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων δοκιμών ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας μιας στρώσης, σπάνια υπερβαίνει τα 5s, ακόμα και για περιπτώσεις που ο αριθμός voxel ανά στρώση είναι αρκετά μεγάλος (>5.000). Ένα ζήτημα που προέκυψε κατά τη διάρκεια των υπολογιστικών δοκιμών αφορούσε στη σχεδίαση ημι-τυχαίων διαδρομών και την ύπαρξη περιπτώσεων όπου η σχετική αλγοριθμική διαδικασία απέτυχε να παράγει μια έγκυρη διαδρομή. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε κυρίως σε σχετικά μεγάλες διαδρομές εντός κυττάρων, που αντιστοιχούσαν σε ποσοστό πυκνότητας >80%, και οφείλονταν στη αδυναμία αναγνώρισης/προσθήκης νέου ζεύγους ψηφίων με αποτέλεσμα την είσοδο του αλγορίθμου σε ατέρμονα βρόχο επαναλήψεων. Για να αποφευχθεί αυτό, ενσωματώθηκε στο σχετικό αλγόριθμο ένα όριο στον αριθμό επαναλήψεων (50 επαναλήψεις), που όταν ξεπεραστεί ο αλγόριθμος ξεκινά από την αρχή.



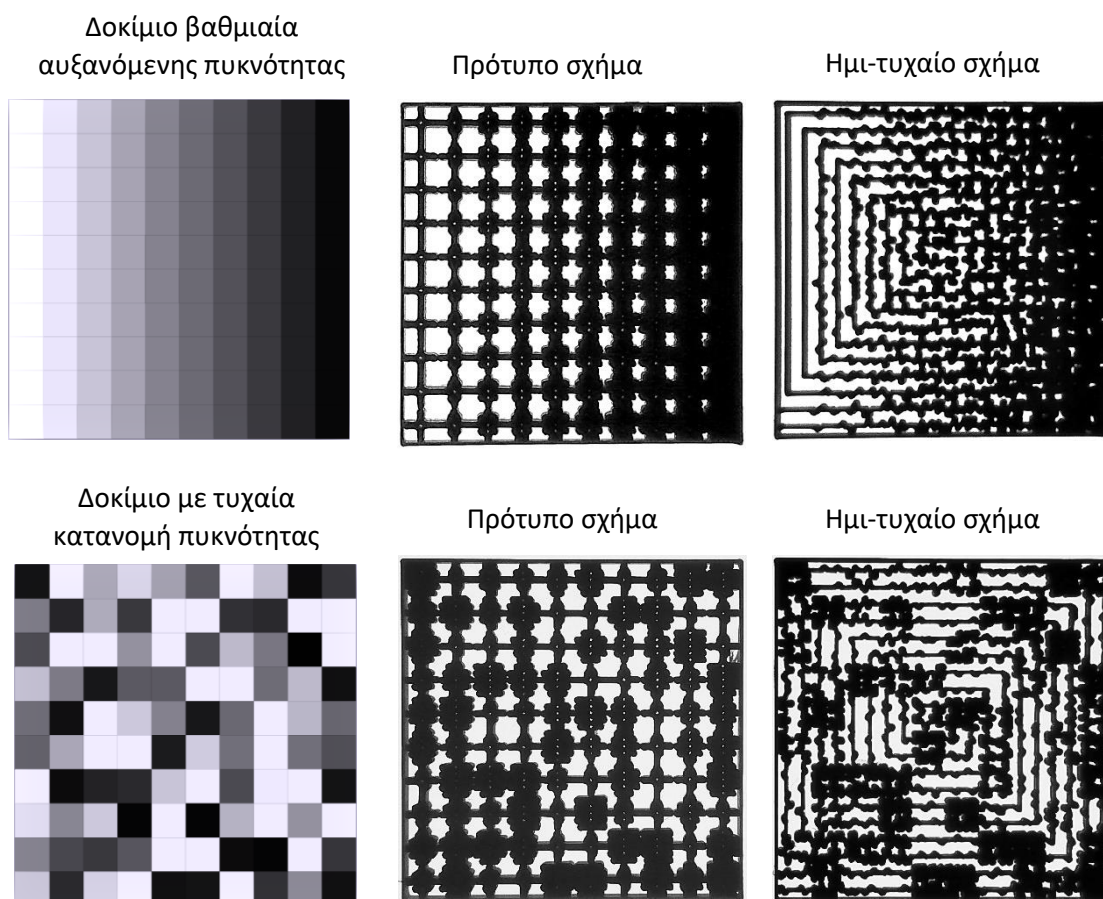
Εικόνα 5.21. Αναπαραστάσεις voxel μοντέλων υπολογιστικών δοκιμών: «φύλλο» (πάνω), «πέσμα» (μέση) and «πιγκουίνος» (κάτω).

Πίνακας 5.2. Στοιχεία των σχεδιασθέντων διαδρομών εναπόθεσης και οι αντίστοιχοι υπολογιστικοί χρόνοι για τα τρία μοντέλα της Εικ. 5.21.

Μοντέλο	Αριθμός voxel	Αριθμός σημείων διαδρομής εναπόθεσης	Μήκος διαδρομής εναπόθεσης (mm)	Χρόνος εξαγωγής αρχείου εντολών (s)	Χρόνος σχεδίασης διαδρομής εναπόθεσης (s)
Πέλμα/Πρότυπο σχήμα/ Διαγώνια διαδρομή	4.823	143.600	62.498	0,82	0,93
Πέλμα/Ημι-τυχαίο σχήμα/ Κεντρική διαδρομή	4.823	178.997	58.073	1,07	1,81
Φύλλο/Πρότυπο σχήμα/ Διαγώνια διαδρομή	9.759	352.108	135.001	2,08	2,39
Φύλλο /Ημι-τυχαίο σχήμα/ Κεντρική διαδρομή	9.759	386.067	120.105	2,27	4,57
Πιγκουίνος/Πρότυπο σχήμα/ Διαγώνια διαδρομή	10.000	334.422	125.707	1,99	1,64
Πιγκουίνος /Ημι-τυχαίο σχήμα/ Κεντρική διαδρομή	10.000	346.665	107.375	2,03	2,94

5.9 Κατασκευαστικές δοκιμές

Προκειμένου να αξιολογηθεί η κατασκευασιμότητα των παραγόμενων δομών πραγματοποιήθηκε μια σειρά κατασκευαστικών δοκιμών στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το σύστημα *Flashforge Creator 3* και νήμα PLA. Οι πρώτες κατασκευαστικές δοκιμές αφορούσαν τα σχετικά απλά, τετραγωνικής μορφής μοντέλα 2½ διαστάσεων που παρουσιάζονται στις Εικ. 5.14 και 5.16. Τα μοντέλα αποτελούνται από ένα στρώμα voxel, 10 κατά μήκος και 10 κατά πλάτος. Κάθε voxel αποτελείται από 10 πλακίδια ύψους 0,2 mm (πάχος στρώσης). Η ανάλυση των κυττάρων ορίστηκε σε 5×5 ψηφίδες και το μέγεθος ψηφίδας (πλάτος εναπόθεσης) σε 0,4 mm, ίσο δηλ. με τη διάμετρο του ακροφυσίου του συστήματος *Flashforge Creator 3* που χρησιμοποιήθηκε. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι διαστάσεις των δοκιμών είναι 40×40×2 mm. Φωτογραφίες των σχετικών δοκιμών από PLA παρουσιάζονται στην Εικ. 5.22. Στοιχεία που αφορούν στα συνολικά χαρακτηριστικά των σχεδιασθέντων διαδρομών και τον κατασκευαστικό χρόνο παρουσιάζονται στον Πιν. 5.3.



Εικόνα 5.22. Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου βαθμιαία αυξανόμενης πυκνότητας (πάνω) και τυχαίας κατανεμημένης πυκνότητας (κάτω) και φωτογραφίες των αντίστοιχων δοκιμίων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των κατασκευαστικών δοκιμών ο κατασκευαστικός χρόνος φαίνεται να συσχετίζεται τόσο με το μήκος των αντίστοιχων διαδρομών όσο και με τον αριθμό των σημείων που περιλαμβάνει κάθε διαδρομή (Πίν. 5.3). Μια πιθανή εξήγηση είναι ότι ο σχετικά υψηλός αριθμός σημείων, συνδέεται με την ανάλυση των διαδρομών σε τμήματα σχετικά μικρού μήκους, τα οποία δεν επιτρέπουν στο σύστημα να επιτύχει πάντα την ορισθείσα ταχύτητα εναπόθεσης (ταχύτητα κίνησης κεφαλής εναπόθεσης). Η παραπάνω υπόθεση ενισχύεται από δύο επιπλέον παρατηρήσεις: α) η εφαρμογή υψηλότερων ταχυτήτων, από κάποιο σημείο και μετά (περ. 40mm/s), δεν οδηγούσε σε σημαντική μείωση του χρόνου κατασκευής και β) οι καταγεγραμμένοι χρόνοι κατασκευής είναι περίπου 30-50% υψηλότεροι από αυτούς καταγράφηκαν για διαδρομές εναπόθεσης τύπου ράστερ, συγκρίσιμου μήκους και χρησιμοποιώντας την ίδια ταχύτητα εναπόθεσης. Μια αύξηση της τιμής επιτάχυνσης (print acceleration) που χρησιμοποιείται από το λογισμικό του συστήματος εξώθησης υλικού, πιθανώς να μείωνε τον χρόνο, αλλά δεν ήταν δυνατόν να τροποποιηθεί η συγκεκριμένη

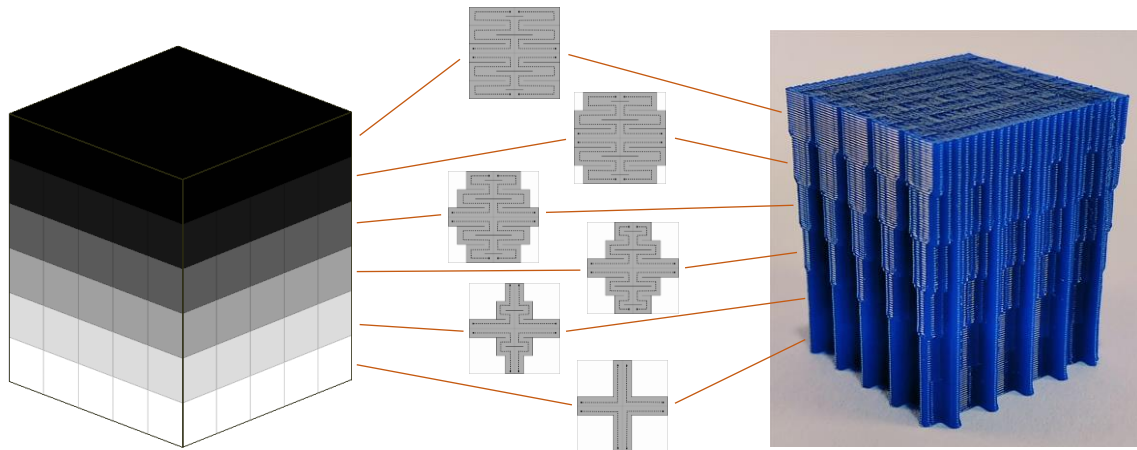
παράμετρος στο δοκιμασθέν σύστημα. Επιπλέον, όπως παρατηρήθηκε, η υπερβολική αύξηση της ταχύτητας εκτύπωσης οδηγούσε σε επιδείνωση της ποιότητας του αντικειμένου λόγω δονήσεων που συνδέονταν με τις απότομες αυξομειώσεις της ταχύτητας. Συνεπώς και για λόγους ποιότητας, δεν είναι δυνατή η αύξηση της ταχύτητας εκτύπωσης πέρα από μια βέλτιστη τιμή, η οποία για το συγκεκριμένο σύστημα εντοπίστηκε στα 30 mm/s. Οι κατασκευαστικοί χρόνοι ανά στρώση που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέρχονται σε 130-140 s για όλες τις διαδρομές. Επισημαίνεται ότι η ταχύτητα της πρώτης στρώσης ορίστηκε σε 10 mm/s έτσι ώστε να εξασφαλισθεί επαρκής πρόσφυση του κομματιού στην πλατφόρμα.

Πίνακας 5.3. Αριθμός σημείων και μέγεθος διαδρομή κατασκευής, μέγεθος αρχείου εντολών σε κώδικα G, μέγεθος αρχείου και χρόνος κατασκευής για τετράγωνο σχήμα

Μοντέλο	Αριθμός σημείων διαδρομής	Μήκος διαδρομής (mm)	Μέγεθος αρχείου εντολών (kb)	Χρόνος κατασκευής ανά στρώση (s)
Βαθμιαία κατανομή / Ημι-τυχαίο σχήμα / Κεντρική διαδρομή	3.670	2.593	1.104	135
Βαθμιαία κατανομή / Πρότυπο σχήμα / διαγώνια διαδρομή	3.024	2.921	913	139
Τυχαία κατανομή / Ημι-τυχαίο σχήμα / Κεντρική διαδρομή	3.530	2.474	1.070	129
Τυχαία κατανομή / Πρότυπο σχήμα / διαγώνια διαδρομή	2.964	2.805	899	134

Για την περαιτέρω αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας, ειδικά στο χειρισμό ετερογενών δομών κατά την κατεύθυνση κατασκευής (Z) και των προεξοχών, εξετάστηκε η κατασκευή μοντέλων αποτελούμενων από πολλά επίπεδα/στρώματα voxel. Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε αφορά στην κατασκευή ενός αντικειμένου με αυξανόμενη πυκνότητα εναπόθεσης στην κατεύθυνση κατασκευής όπως παρουσιάζεται στην Εικ. 5.23. Το σχετικό ψηφιακό μοντέλο αποτελείται από 6 στρώματα voxel που περιέχουν 25 (5×5) voxels το καθένα. Η ανάλυση κυττάρων ορίστηκε σε 5×5 ψηφίδες και το μέγεθος ψηφίδας ορίστηκε σε 0,4 mm, κατά συνέπεια το μήκος/πλάτος του voxel ισούταν με 4 mm. Για να δημιουργηθεί ένα κυβικό voxel επιλέχθηκε η τιμή των 20 πλακιδίων/voxel και το πάχος στρώσης ορίστηκε σε 0,2 mm. Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι 20×20×24 mm. Η πυκνότητα εναπόθεσης του πρώτου στρώματος voxel ορίστηκε στην ελάχιστη τιμή για διαγώνιες διαδρομές (36%), ενώ η πυκνότητα των επόμενων στρωμάτων ορίστηκε σταδιακά αυξανόμενη μέχρι το πλήρες στερεό τελευταίο στρώμα. Για τη δημιουργία των διαδρομών χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα σχήματα της βιβλιοθήκης A (Εικ.

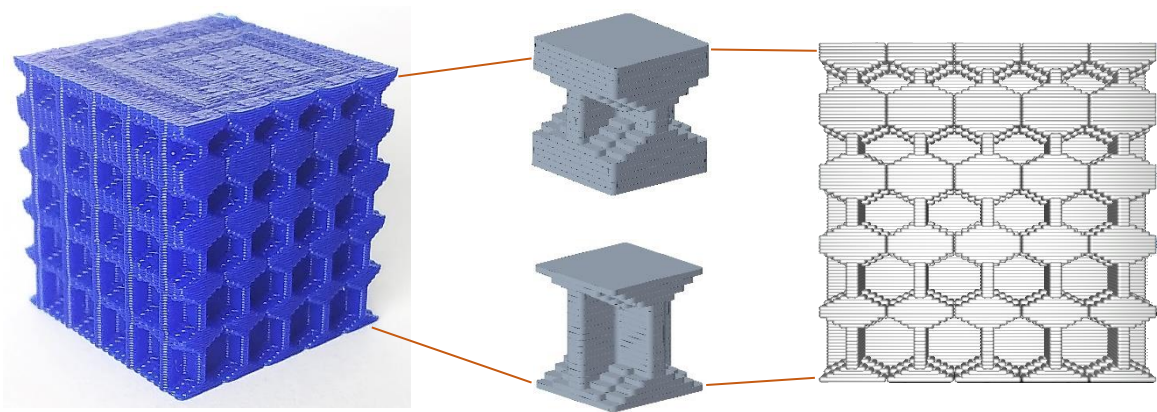
5.9) που απεικονίζεται και στην Εικ. 5.23. Κατά την κατασκευή των στρώσεων δεν εναποτέθηκαν περιγράμματα έτσι ώστε να είναι δυνατή η οπτική αξιολόγηση των εξωτερικών προεξοχών. Όπως είναι εμφανές και στην Εικ. 5.23, δεν παρουσιάστηκε κάμψη των στρώσεων στα σημεία προεξοχών, παρά το γεγονός ότι δεν έχουν χρησιμοποιηθεί δομές υποστήριξης.



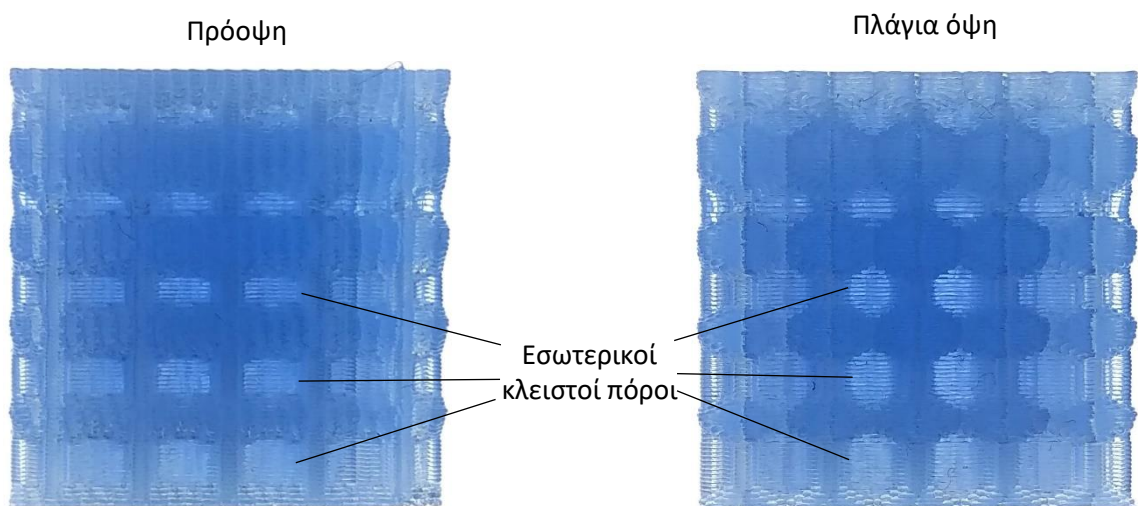
Εικόνα 5.23. Αναπαράσταση Voxel (αριστερά) μιας δομής με αυξανόμενη πυκνότητα εναπόθεσης, στην κατεύθυνση κατασκευής, και την αντίστοιχη κατασκευασμένο μέρος (δεξιά). Οι διαδρομές εναπόθεσης ελασμάτων ανά στρώση voxel απεικονίζονται σχηματικά στο κέντρο.

Η επόμενη δοκιμή αφορούσε επίσης στην κατασκευή μιας δομής με αυξανόμενη πυκνότητα εναπόθεσης κατά Z με τη διαφορά ότι τα voxel ήταν αμιγώς 3 διαστάσεων, δηλ. η πυκνότητα εναπόθεσης δεν ήταν ίδια για όλα τα πλακίδια (Εικ. 5.24). Το σχετικό ψηφιακό μοντέλο voxel έχει κυβικό σχήμα ($20 \times 20 \times 20$ mm) και αποτελείται από πέντε στρώματα voxel, που περιλαμβάνουν (5×5) voxel το καθένα. Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη δοκιμή, η ανάλυση κυττάρων ορίστηκε σε 5×5 ψηφίδες, το μέγεθος ψηφίδων/πλάτος εναπόθεσης σε 0,4 mm, το πάχος στρώσης σε 0,2 mm, και ο αριθμός πλακιδίων ανά voxel σε 20. Στο κέντρο της Εικ. 5.24 παρουσιάζεται η πρότυπη μορφή των voxel στο ανώτατο και κατώτατο στρώμα. Η πρότυπη δομή των voxel αναλύεται ουσιαστικά σε τρία τμήματα: (i) τις βάσεις, στο άνω και κάτω τμήμα του voxel, όπου τα πλακίδια είναι πλήρως στέρεα, (ii) το μεσαίο τμήμα, το οποίο αποτελείται από πλακίδια με την ελάχιστη πυκνότητα εναπόθεσης, και (iii) τα πλακίδια μετάβασης, τα οποία συνδέουν τις βάσεις με το μεσαίο τμήμα, έτσι ώστε να υπάρχει η απαιτούμενη σταδιακή αύξηση ή μείωση του ποσοστού πυκνότητας. Η δομή/αντικείμενο σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζει αυξανόμενη πυκνότητα υλικού διότι ο αριθμός των πλακιδίων βάσης ανά voxel αυξάνεται καθώς ανεβαίνουμε τα στρώματα voxel. Έτσι η πυκνότητα εναπόθεσης αυξάνεται

σταδιακά από 55,2% για το πρώτο στρώμα voxel, σε 80,8% για το ανώτερο στρώμα voxel (Εικ. 5.24). Η προκύπτουσα δομή ενσωματώνει κλειστούς πόρους περίπου εξαγωνικού σχήματος, του οποίου το μέγεθος μειώνεται καθ' ύψος. Το συγκεκριμένο δοκίμιο κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας νήμα αδιαφανούς PLA (Εικ. 5.24) αλλά και ημιδιαφανούς PLA (Εικ. 5.25) έτσι ώστε να είναι δυνατή η οπτική εξέταση των εσωτερικών πόρων/κενών. Όπως είναι εμφανές δεν παρατηρήθηκαν ζητήματα στην κατασκευή των εσωτερικών και εξωτερικών κενών.

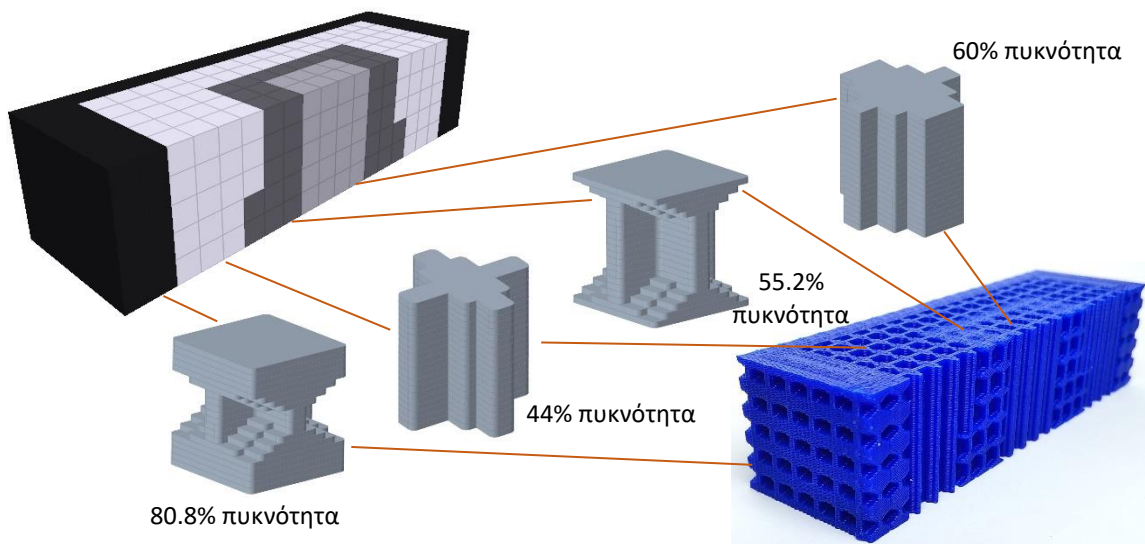


Εικόνα 5.24. Φωτογραφίες του κατασκευασθέντος δοκιμίου αυξανόμενης καθ' ύψος πυκνότητας voxel (αριστερά), 3D απεικονίσεις των πρότυπων δομές voxel για το πρώτο και το τελευταίο στρώμα (κέντρο) και πλάγια όψη της ψηφιακής αναπαράστασης του τελικού αντικειμένου (δεξιά), χρησιμοποιώντας τη λειτουργία G-code Viewer του λογισμικού Craftware.



Εικόνα 5.25. Φωτογραφίες του κατασκευασθέντος δοκιμίου αυξανόμενης καθ' ύψος πυκνότητας voxel από ημιδιαφανές PLA σε πρόοψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά).

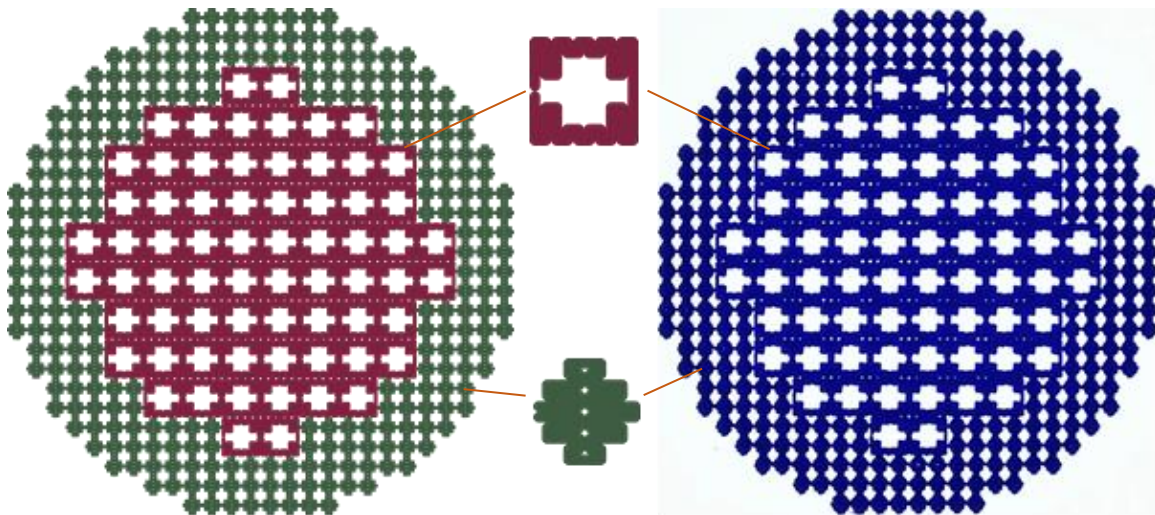
Η επόμενη δοκιμή αφορούσε στην κατασκευή ενός μοντέλου διαστάσεων $20 \times 6 \times 5$ voxel με κλειστούς πόρους αλλά και ανοιχτά κάθετα κανάλια (Εικ. 5.26). Κατ' αντιστοιχία με τις προηγούμενες δοκιμές, η ανάλυση κυττάρου ορίστηκε σε 5×5 ψηφίδες, το μέγεθος ψηφίδων ορίστηκε σε 0,4 mm, το πάχος στρώσης/πλακιδίων σε 0,2 mm και ο αριθμός πλακιδίων ανά voxel σε 20. Οι προκύπτουσες διαστάσεις του δοκιμίου είναι $80 \times 24 \times 20$ mm. Κατά το σχεδιασμό του συγκεκριμένου χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι voxel (Εικ. 5.26). Και σε αυτή τη δοκιμή δεν κατασκευάστηκαν περιγράμματα στρώσεων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η οπτική εξέταση της δομής των εξωτερικών voxel. Ο χρόνος επεξεργασίας για τη δημιουργία των διαδρομών εναπόθεσης ανήλθε σε 2 δευτερόλεπτα, ενώ για την εξαγωγή αρχείου εντολών G σε 4 δευτερόλεπτα. Για την κατασκευή του δοκιμίου, φωτογραφία του οποίου παρουσιάζεται στην Εικ. 5.26 (κάτω δεξιά), απαιτήθηκαν 4 περίπου ώρες.



Εικόνα 5.26. Μοντέλο voxel δοκιμίου με κλειστούς πόρους και κατακόρυφα κανάλια (πάνω αριστερά), και φωτογραφία του αντίστοιχου φυσικού δοκιμίου (κάτω δεξιά). Οι χρησιμοποιηθείσες πρότυπες δομές voxel απεικονίζονται στο κέντρο.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η περίπτωση ενός δοκιμίου που περιλαμβάνει voxel μεταβλητού μήκους/πλάτους και δομής. Το δοκίμιο έχει κυκλικό σχήμα και χωρίζεται σε δύο τμήματα: α) ένα εσωτερικό τμήμα που περιέχει μεγαλύτερα σχετικά voxel, που είναι εσωτερικώς κενά (Εικ. 5.27, κέντρο-πάνω) και κατασκευάστηκαν με πλάτος εναπόθεσης (μέγεθος ψηφίδων) ίσο με 0,4 mm, και (β) ένα εξωτερικό τμήμα, που περιέχει μικρότερα voxel σταυροειδούς μορφής (Εικ. 5.27, κέντρο-πάνω) τα οποία κατασκευάστηκαν με πλάτος εναπόθεσης 0,2 mm. Η ανάλυση κυττάρων και για τους δύο τύπους voxel ορίστηκε σε 5×5 πλακίδια, το πάχος στρώσης

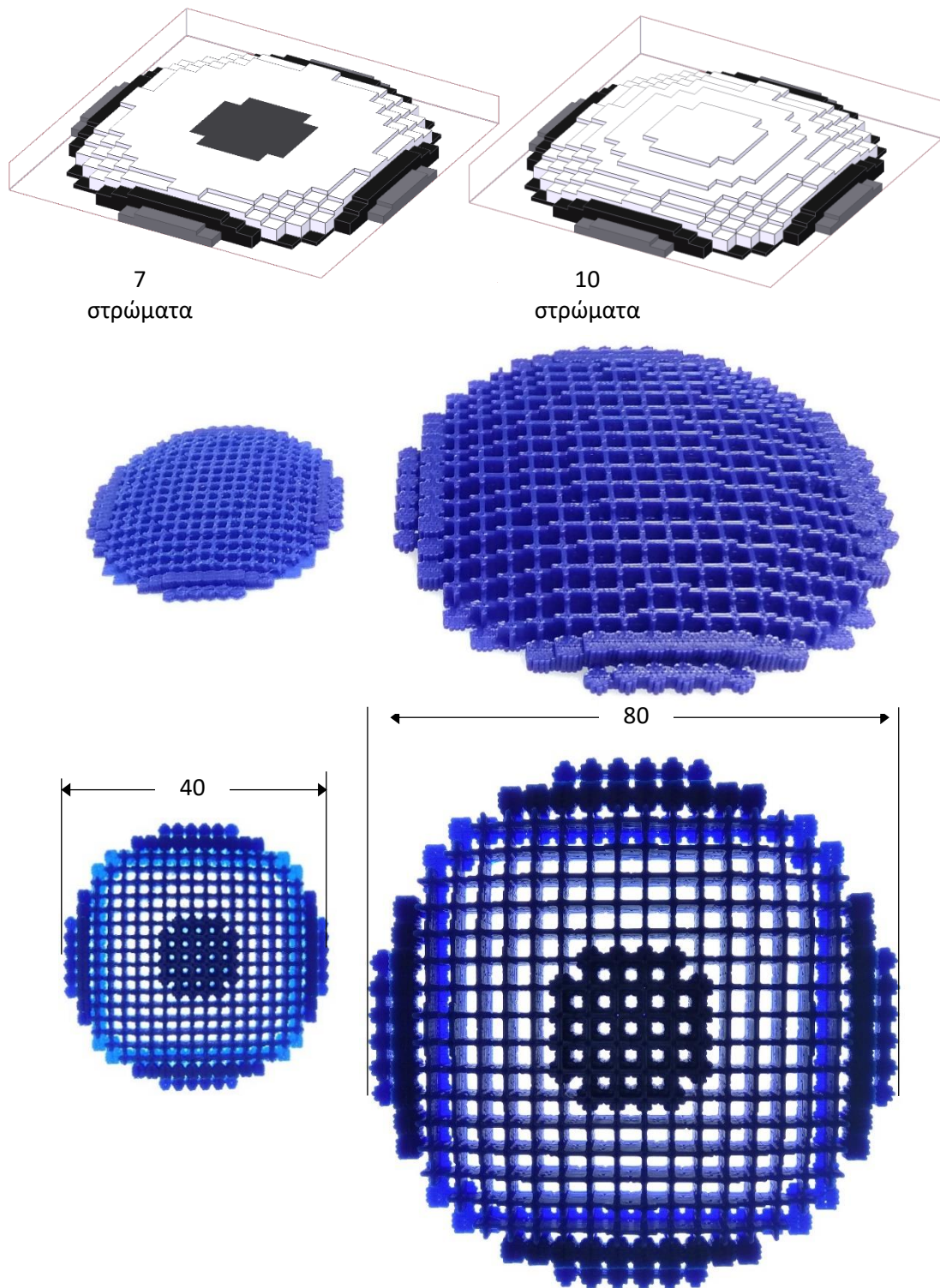
σε 0,1 mm και ο αριθμός πλακιδίων ανά voxel σε 10. Τόσο τα μεγάλα όσο και τα μικρά voxel έχουν την ίδια πυκνότητα εναπόθεσης, ίση με 68%. Οι αντίστοιχες διαστάσεις των voxel, ωστόσο, είναι διαφορετικές λόγω της διαφοράς στο μέγεθος των ψηφίδων, έτσι τα μικρά voxel έχουν το μισό μέγεθος από πλευράς μήκους/πλάτους (2×2 mm). Φωτογραφία του σχετικού δοκιμίου παρουσιάζεται στην Εικ. 5.27 (δεξιά). Επισημαίνεται ότι για την εναπόθεση τόσο των μικρών όσο και των μεγάλων voxel, χρησιμοποιήθηκε ακροφύσιο διαμέτρου 0,4 mm. Παρατηρείται ότι οι δομές που ενσωματώνουν μικρότερα μεγέθη voxel μπορούν να κατασκευαστούν αρκετά αξιόπιστα, ακόμη και αν το πλάτος εναπόθεσης είναι σημαντικά μικρότερο από τη διάμετρο ακροφυσίου εξώθησης.



Εικόνα 5.27. Σχηματική απεικόνιση της διαδρομής εναπόθεσης για την περίπτωση δοκιμίου με μεταβλητό μέγεθος voxel (αριστερά), οι χρησιμοποιούμενες διαδρομές εναπόθεσης ανά πλακίδιο για τους δύο τύπους voxel (κέντρο), και φωτογραφία του αντίστοιχου κατασκευασθέντος δοκιμίου (δεξιά).

Η δυνατότητα χρήσης μικρού πλάτους εναπόθεσης εξετάστηκε, τέλος, στην περίπτωση κατασκευής μιας ετερογενούς θολωτής δομής. Το αντίστοιχο ψηφιακό μοντέλο (Εικ. 5.28, πάνω δεξιά) αποτελείται από 10 στρώματα voxel και διαθέτει μια σχετικά πυκνότερη εσωτερική περιοχή, μέχρι το 7 στρώμα voxel (Εικ. 5.28, πάνω αριστερά). Κατασκευάστηκαν δύο αντίστοιχα δοκίμια, ένα με πλάτος εναπόθεσης/μέγεθος ψηφίδων 0,2 mm και ένα με πλάτος εναπόθεσης/μέγεθος ψηφίδων 0,4 mm. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες με αυτές των προηγούμενων δοκιμών. Όπως είναι εμφανές και από τις σχετικές φωτογραφίες (Εικ. 5.28,

μέσο και κάτω) και τα δύο δοκίμια κατασκευάστηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια. Κατά συνέπεια, η μείωση του πλάτους εναπόθεσης μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση των διαστάσεων voxel και αύξηση της κατασκευαστικής ανάλυσης. Δεδομένου ότι η τιμή του πλάτους εναπόθεσης σχετίζεται με τη διάμετρο του ακροφυσίου, για την επίτευξη ακόμα χαμηλότερων τιμών απαιτείται πιθανότατα ένα ακροφύσιο αναλόγως μικρότερης διαμέτρου. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση ενός συστήματος FFF με περισσότερες της μίας κεφαλές εξώθησης ή/και ακροφύσια μεταβλητής διαμέτρου, θα επέτρεπαν την κατασκευή δομών μεταβλητής/προσαρμοστικής ανάλυσης. Αυτό θα μπορούσε να αποδειχθεί ωφέλιμο για την επίτευξη υψηλότερης ανάλυσης σε συγκεκριμένα τμήματα του μοντέλου χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά ο χρόνος κατασκευής.



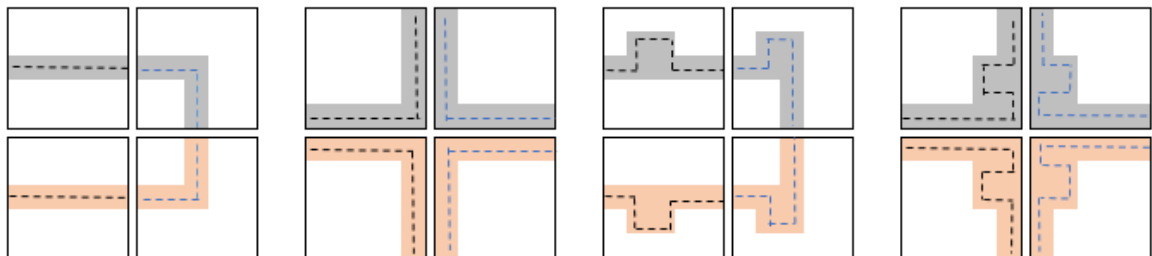
Εικόνα 5.28 Μοντέλο voxel θολωτού δοκιμίου (πάνω) και φωτογραφίες των αντίστοιχων δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με πλάτος εναπόθεσης/μέγεθος ψηφίδας 0,2 mm (αριστερά) και 0,4 mm (δεξιά). Το δοκίμιο διαθέτει μια πυκνότερη εσωτερική περιοχή μέχρι το έβδομο στρώμα (πάνω αριστερά) η οποία καλύπτεται από λιγότερα πυκνά voxel στα επόμενα στρώματα.

5.10 Κατασκευή ετερογενών δομών από περισσότερα του ενός υλικά

Στις προηγούμενες ενότητες η μελέτη εστίασε στην κατασκευή ετερογενών δομών από ένα υλικό, πρακτικά δηλ. δομών που εμπεριέχουν εσωτερικά κενά μεταβλητού μεγέθους και μορφολογίας. Εξετάζοντας την περίπτωση κατασκευής ετερογενών δομών μέσω εξώθησης περισσότερων του ενός υλικών παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές προσεγγίσεις, η προσέγγιση της ανάμιξης υλικών κατά την τροφοδοσία της κεφαλής εναπόθεσης και η προσέγγιση της χρήσης διαφορετικών κεφαλών για κάθε υλικό. Παρότι υπάρχουν μελέτες που εφαρμόζουν την πρώτη στρατηγική (Skylar-Scott et al., 2019 · Hassan & Selvaganapathy, 2022) ειδικά στην περίπτωση της τεχνολογίας DIW όπου το χαμηλό ιξώδες των υλικών διευκολύνει την ταχεία ανάμιξη/αλλαγή, η πλέον διαδεδομένη προσέγγιση είναι αυτή των διαφορετικών κεφαλών διότι επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή υλικών (δεν είναι απαραίτητο να είναι εντελώς συμβατά, όπως όταν εξωθούνται από μία κεφαλή) και επιτρέπει ακριβέστερο έλεγχο της ροής για κάθε υλικό.

Στην περίπτωση διαφορετικών κεφαλών, η εναπόθεση δύο (ή περισσότερων) υλικών μπορεί, θεωρητικά, να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους:

- Παράλληλα, όπου οι κεφαλές ακολουθούν την ίδια διαδρομή.
- Διαδοχικά, όπου οι κεφαλές ακολουθούν μεν την ίδια διαδρομή αλλά καλύπτουν διαφορετικά τμήματα αυτής (Εικ. 5.29).
- Κάθετα (bottom-up), όπου οι κεφαλές ακολουθούν την ίδια διαδρομή αλλά σε διαφορετικά επίπεδα, κάθε υλικό δηλ. εναποτίθεται πάνω από κάποιο άλλο.
- Ανεξάρτητα (συμπληρωματικά), όπου οι κεφαλές ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές.



Εικόνα 5.29. Διαδοχική εναπόθεση δύο υλικών σε μία διαδρομή.

Όπως είναι προφανές στις τρεις πρώτες τεχνικές μπορεί να εφαρμοστεί η αναπτυχθείσα μεθοδολογία χωρίς προσαρμογή, καθώς η διαδρομή εναπόθεσης των δύο υλικών είναι κοινή.

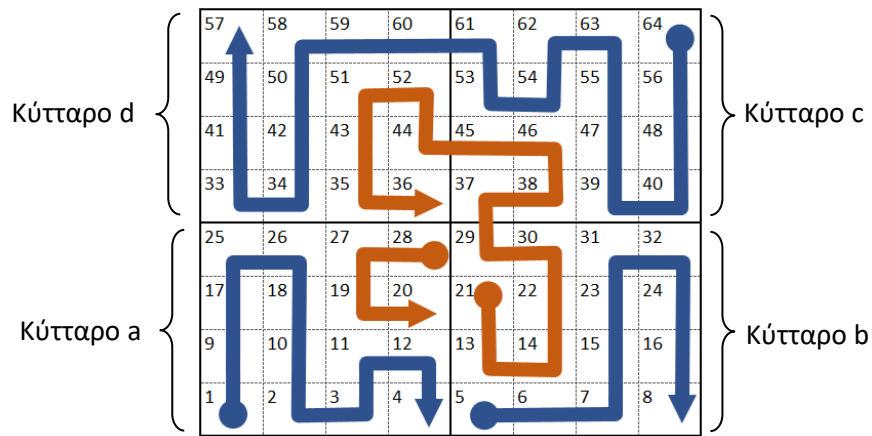
Ωστόσο, η πλέον ευέλικτη τεχνική είναι αυτή των ανεξάρτητων διαδρομών, καθώς παρέχει μεγαλύτερη ελευθερία στην επιλογή υλικών αλλά και στον καθορισμό διαφορετικής σύστασης (αναλογίας υλικών) σε επιμέρους τμήματα της στρώσης. Για αυτό τον λόγο η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι και η πλέον διαδεδομένη στα εμπορικά συστήματα FFF με περισσότερες του ενός κεφαλές. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα συστήματα διαθέτουν δύο κεφαλές, οι οποίες είτε είναι συναρμολογημένες/προσαρμοσμένες στην ίδια διάταξη (π.χ. σύστημα Ultimaker S3) είτε κινούνται εντελώς ανεξάρτητα (IDEX συστήματα, π.χ. σύστημα *Flashforge Creator 3*).

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες στην ανεξάρτητη εναπόθεση δύο υλικών απαιτούνται κάποιες προσαρμογές. Από πλευράς ψηφιακής αναπαράστασης, η αναπαράσταση μέσω voxel καλύπτει τις απαιτήσεις καθώς η χρωματική κωδικοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό διαφορετικών πρότυπων voxel, τόσο από πλευράς μορφολογίας όσο και σύστασης. Σε επίπεδο πλακιδίων και σχεδιασμού των γραμμών εναπόθεσης, μπορεί επίσης να ακολουθηθεί η προσέγγιση της σχεδίασης στοιχειωδών διαδρομών ανά κύτταρο, μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση σχεδιάζονται δύο πρότυπες διαδρομές.

Για τη σχεδίαση των πρότυπων διαδρομών εναπόθεσης ακολουθήθηκε, αρχικά, η στρατηγική του «εσωτερικού-εξωτερικού υλικού». Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη στρατηγική, το ένα υλικό ορίζεται ως «εσωτερικό» και οι σχετικές διαδρομές εναπόθεσης ξεκινούν και καταλήγουν στο κέντρο του πλακιδίου (Εικ. 5.30). Αντίστοιχα, το δεύτερο υλικό ορίζεται ως «εξωτερικό» και εναποτίθεται στην περιφέρεια του πλακιδίου (Εικ. 5.30). Προσαρμόζοντας το μήκος των διαδρομών επιτυγχάνεται η επιθυμητή αναλογία υλικών (σύσταση) του πλακιδίου.

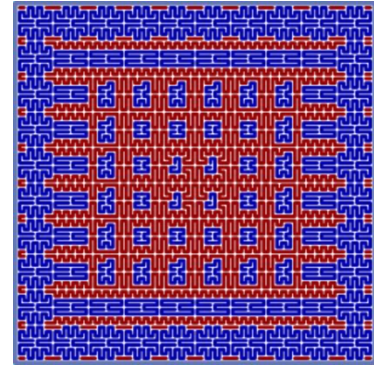
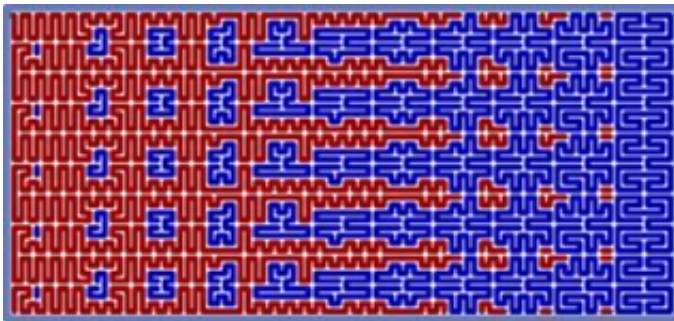
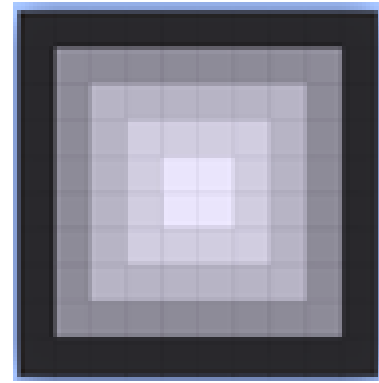
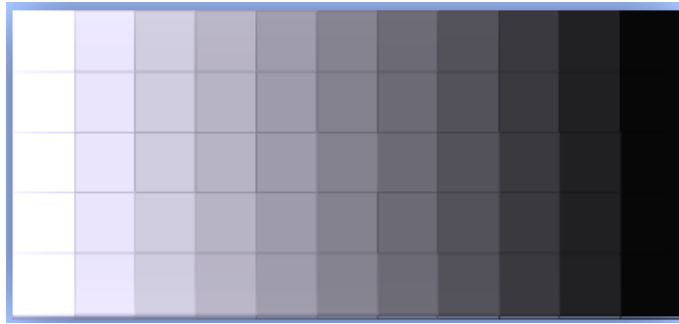
Στο παράδειγμα της Εικ. 5.30, είναι εμφανής και η ουσιώδης διαφορά στην επιλογή των σημείων εκκίνησης και λήξης (σύνδεσης) των διαδρομών ανά κύτταρο για κάθε υλικό, τα οποία στην περίπτωση του εσωτερικού υλικού είναι στο κέντρο του πλακιδίου (ψηφίδες 20, 21, 28, 29, 36, 37, 44, 45), ενώ για το εξωτερικό υλικό είναι στα άκρα (ψηφίδες 1, 4, 5, 8, 57, 60, 61, 64). Παρατηρείται, επίσης, ότι η διαδρομή εναπόθεσης του εσωτερικού υλικού είναι μία και συνεχής εντός του πλακιδίου, ενώ η εναπόθεση του περιφερειακού υλικού επιτελείται σε δύο διαδρομές, μία επάνω (κύτταρα c-d) και μια κάτω (κύτταρα a-b). Εάν εξετάσουμε, όμως, τις διαδρομές εναπόθεσης υλικού σε επίπεδο στρώσης τότε γίνεται εμφανές ότι η εναπόθεση «εσωτερικού» υλικού επιτελείται εξ ορισμού ανά πλακίδιο, και είναι συνεπώς διακοπτόμενη, ενώ στην περίπτωση του «εξωτερικού» υλικού υπάρχει η δυνατότητα σχεδίασης μεγαλύτερων

ενιαίων διαδρομών, σε κάποιες τουλάχιστον περιπτώσεις, ενώνοντας τις διαδρομές γειτονικών πλακιδίων.



Εικόνα 5.30. Σχηματική αναπαράσταση των διαδρομών εναπόθεσης εσωτερικού (πορτοκαλί) και εξωτερικού (μπλε) υλικού.

Στην Εικ. 5.31, για παράδειγμα, παρουσιάζονται οι περιπτώσεις δύο στρώσεων, μιας αποτελούμενης από 55 πλακίδια με γραμμικά μεταβαλλόμενη αναλογία (Εικ. 5.31, αριστερά) μεταξύ εσωτερικού (μπλε) και εξωτερικού (κόκκινο) υλικού, και μίας στρώσης με ακτινικά μεταβαλλόμενη αναλογία (Εικ. 5.31, δεξιά). Στην πρώτη περίπτωση η αναλογία εσωτερικού-εξωτερικού υλικού μεταβάλλεται από 3/97 (πρώτη/λευκή στήλη) σε 100/0 (τελευταία/μαύρη στήλη), ενώ στη δεύτερη από 15,6/84,4 (κέντρο) σε 87,5/12,5 (περίγραμμα).

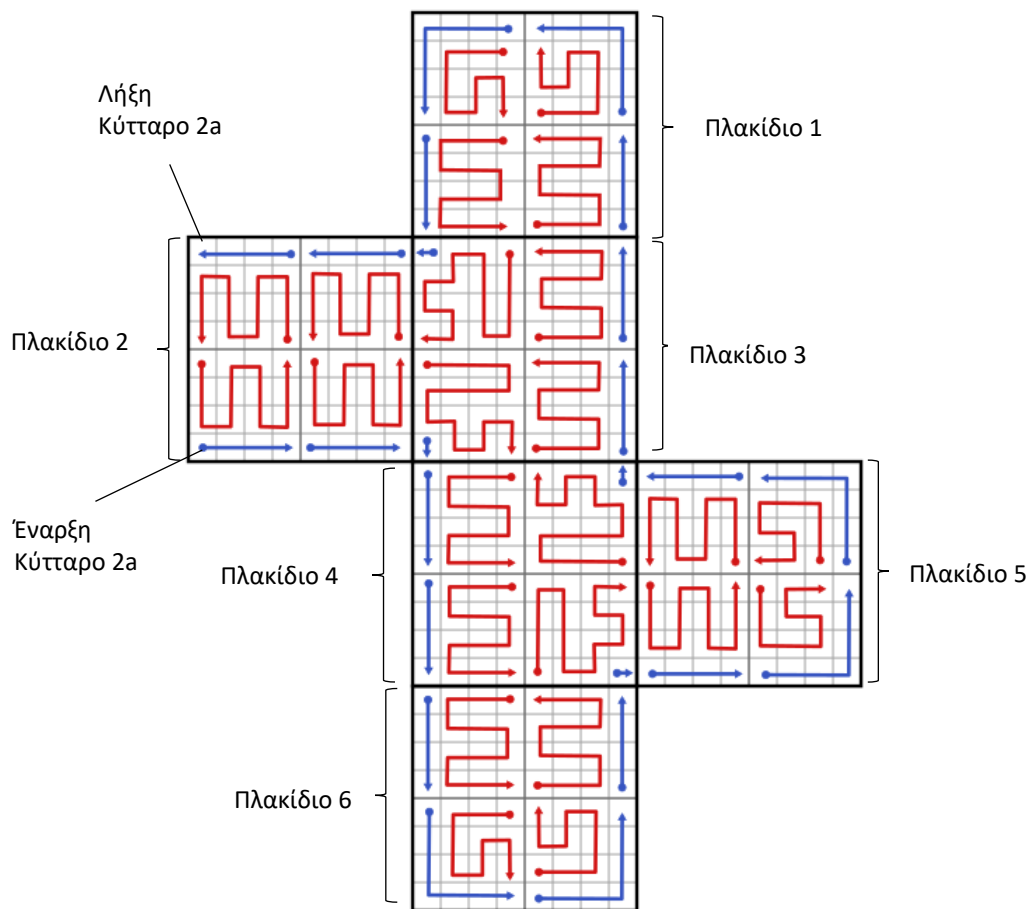


Εικόνα 5.31. Μοντέλα voxel δύο αντικειμένων (πάνω) και οι αντίστοιχες διαδρομές εναπόθεσης δύο υλικών ακολουθώντας τη στρατηγική εσωτερικής/εξωτερικής εναπόθεσης (εσωτερικό-μπλε/εξωτερικό-κόκκινο).

Μελετώντας περαιτέρω το πρόβλημα κατέστη σαφές ότι στην περίπτωση της εναπόθεσης δύο υλικών από ανεξάρτητες κεφαλές είναι δύσκολο να εξασφαλισθεί η συνέχεια στις διαδρομές εναπόθεσης και των δύο υλικών, ειδικά εάν η αναλογία υλικών είναι αρκετά ετεροβαρής (τα ποσοστά αναλογίας των δύο υλικών διαφέρουν αρκετά). Εφαρμόζοντας, ωστόσο, τη μεθοδολογία διαγώνιων διαδρομών, μπορεί να εξασφαλισθεί η συνέχεια στο ένα τουλάχιστον υλικό, είτε το εσωτερικό (σταυροειδείς διαδρομές, βιβλιοθήκη Α, Εικ. 5.13) είτε το εξωτερικό υλικό (περιφερειακές διαδρομές, βιβλιοθήκη Β, Εικ. 5.13). Σε κάθε περίπτωση η εναπόθεση του δεύτερου υλικού είναι εξ ορισμού διακοπτόμενη και ο σχεδιασμός των σχετικών διαδρομών πρέπει, ουσιαστικά, να γίνει ad-hoc.

Εάν είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξασφαλισθεί η συνέχεια των διαδρομών εναπόθεσης και για τα δύο υλικά τότε μπορεί να εφαρμοσθεί η προσέγγιση εσωτερικού-εξωτερικού υλικού με κάποιες προσαρμογές. Στην Εικ. 5.32 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της συγκεκριμένης προσέγγισης, έτσι ώστε να καταστεί πιο ξεκάθαρος ο τρόπος σχεδίασης των διαδρομών ανά κύτταρο. Η ανάλυση των κυττάρων στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 4x4 και η αλληλουχία

επίσκεψης των κυττάρων ξεκινά από το κύτταρο 1-a και ακολουθεί την φορά εναπόθεσης του εξωτερικού υλικού (μπλε). Η αναλογία των δύο υλικών είναι 3/1 (εσωτερικό/εξωτερικό).

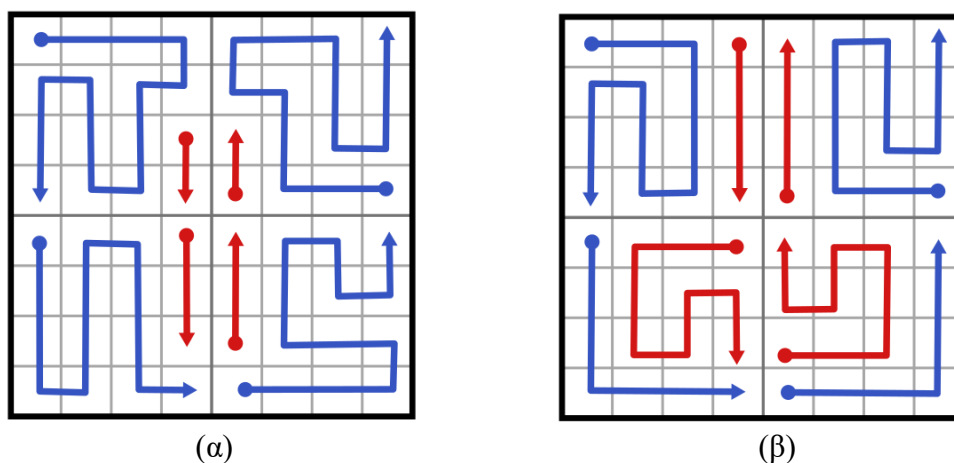


Εικόνα 5.32. Σχηματική αναπαράσταση των συνεχών διαδρομών εναπόθεσης εσωτερικού (κόκκινο) και εξωτερικού (μπλε) υλικού για την κάλυψη μιας στρώσης από 6 πλακίδια.

Η πρώτη προσαρμογή αφορά τον τύπο των διαδρομών εναπόθεσης εντός των κυττάρων, οι οποίες δεν είναι πλέον διαγώνιες (σταθερό πρότυπο ανεξαρτήτως κατεύθυνσης) αλλά διαφοροποιούνται ανάλογα θέση με τη θέση του προηγούμενου και του επόμενου κυττάρου στην αλληλουχία. Εξετάζοντας π.χ. την περίπτωση των κυττάρων τύπου a και τις διαδρομές εναπόθεσης εξωτερικού υλικού (μπλε) παρατηρείται ότι υπάρχουν 4 πιθανά σχήματα διαδρομής (δες π.χ. κύτταρα 2-a, 3-a και 6-a). Αντίστοιχα, διαφοροποιείται το μήκος (αριθμός ψηφίδων) της διαδρομής, π.χ. η διαδρομή του κυττάρου 2-a έχει μήκος 4 ψηφίδες, του κυττάρου 3-a έχει μήκος 1 ψηφίδα και του κυττάρου 6-a 7 ψηφίδες. Αντίστοιχη μεταβολή στα σημεία έναρξης/λήξης και το μήκος των διαδρομών υπάρχει στις διαδρομές του εσωτερικού υλικού. Οι προσαρμογές που απαιτούνται για την επίτευξη μιας ενιαίας διαδρομής εναπόθεσης, συνεπάγεται τη μη αυστηρή τήρηση της αναλογίας υλικών σε επίπεδο κυττάρου/πλακιδίου

(π.χ. 3/1 στο πλακίδιο 2 αλλά 1,9/1 στο πλακίδιο 5). Ωστόσο, σε επίπεδο ευρύτερων περιοχών ή στρώσης, η αναλογία είναι κοντά στην ορισθείσα.

Το παράδειγμα της Εικ. 5.32 αποτελεί, υπό μία έννοια, ιδανική περίπτωση γιατί οι διαδρομές και των δύο υλικών είναι απόλυτα συνεχείς. Αυτό, ωστόσο, είναι δυνατό μόνο εφόσον η αναλογία των δύο υλικών εμπίπτει σε κάποια όρια. Αν αντίθετα υπάρχει μεγάλη διαφορά στην αναλογία τότε δημιουργούνται, εκ των πραγμάτων, απομονωμένες νησίδες του ενός υλικού, είτε του εσωτερικού υλικού όπως π.χ. στην Εικ. 5.33(α) είτε του εξωτερικού. Όπως είναι προφανές, η επίτευξη συνεχών διαδρομών στην εναπόθεση δύο υλικών παρουσιάζει περισσότερους περιορισμούς από την περίπτωση εναπόθεσης ενός υλικού και συνεπώς, εάν θεωρείται απαραίτητη, επιβάλλει να καθοριστούν πολύ πιο λεπτομερώς και αναλυτικά τα αντίστοιχα πρότυπα. Αυτό, παρότι αυξάνει την προσπάθεια που απαιτείται για τη δημιουργία των αντίστοιχων βιβλιοθηκών πρότυπων σχημάτων, επιτρέπει τη δημιουργία εσωτερικών χαρακτηριστικών σύμπλεξης (interlocking features) των δύο υλικών, όπως στο παράδειγμα της Εικ. 5.33(β). Η ενσωμάτωση τέτοιων χαρακτηριστικών τόσο σε επίπεδο στρώσης, όσο και voxel θα μπορούσε να αυξήσει συνολικά τη συνοχή του αντικειμένου, ειδικά στην περίπτωση υλικών που δεν είναι συμβατά από χημικής άποψης (Kuipers et al., 2022).



Εικόνα 5.33. Σχηματική αναπαράσταση των διαδρομών εναπόθεσης εσωτερικού (κόκκινο) και εξωτερικού (μπλε) υλικού σε ένα πλακίδιο: (α) απομονωμένη «νησίδα» εσωτερικού υλικού και (β) δημιουργία χαρακτηριστικών που ενισχύουν τη σύμπλεξη των δύο υλικών.

Κλείνοντας, να επισημανθεί ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί σε περισσότερα υλικά, όπως είναι δυνατή και η ενσωμάτωση κενών περιοχών εντός των στρώσεων αλλά και κάθετα για τη δημιουργία ανοικτών ή κλειστών πόρων. Στην περίπτωση

αυτή, κατά τη σχεδίαση των πρότυπων voxel πρέπει να ληφθεί πρόνοια για τη δημιουργία αυτό υποστηριζόμενων δομών, ακολουθώντας τη σχεδιαστική στρατηγική που περιγράφεται στην ενότητα 5.6.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής διερευνήθηκε το πρόβλημα της κατασκευής ετερογενών δομών/αντικειμένων με τη μέθοδο της εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία ψηφιακής αναπαράστασης και κατασκευής των δομών που ικανοποιεί τους βασικούς περιορισμούς τους οποίους θέτει η μέθοδος της εξώθησης υλικού, ήτοι της απαίτησης για αδιάλειπτη ροή κατά την εναπόθεση των στρώσεων και της απουσίας υποστηρικτικών δομών στο εσωτερικό των δομών. Για την ψηφιακή αναπαράσταση των δομών επιλέχθηκε η μέθοδος αναπαράστασης μέσω voxel, η οποία πέρα από την αναπαράσταση της μορφής επιτρέπει και τον τοπικό ορισμό της σύστασης. Τα σχετικά ψηφιακά μοντέλα μπορούν να σχεδιαστούν είτε άμεσα, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό σχεδίασης voxel αντικειμένων, είτε έμμεσα χρησιμοποιώντας αλγόριθμους μετατροπής/ανάλυσης μοντέλων CAD σε μορφή voxel. Τα χρησιμοποιούμενα voxel έχουν κυβοειδή μορφή και αναλύονται καθ' ύψος σε οριζόντια στρώματα (πλακίδια), τα οποία χρησιμεύουν για τον ορισμό της ετερογενούς δομής σε επίπεδο στρώσης. Με βάση την καθορισμένη σχετική πυκνότητα ή σύσταση, δημιουργούνται οι διαδρομές εναπόθεσης υλικού ανά πλακίδιο, οι οποίες ενώνονται σε μια ενιαία διαδρομή εναπόθεσης για κάθε μία από τις απαιτούμενες στρώσεις.

Η αναπτυχθείσα μεθοδολογία δοκιμάστηκε σε διάφορες περιπτώσεις δοκιμίων προκειμένου να διερευνηθούν τόσο οι υπολογιστικές όσο και οι κατασκευαστικές πτυχές της. Τα αποτελέσματα των σχετικών δοκιμών δείχνουν ότι δεν απαιτείται ιδιαίτερος υπολογιστικός εξοπλισμός, καθώς και ότι η υπολογιστική επιβάρυνση δεν είναι σημαντικά υψηλότερη σε σύγκριση με εκείνη των συμβατικών μεθόδων, δηλαδή του τεμαχισμού STL μοντέλων και του σχεδιασμού διαδρομών, ειδικά εάν ληφθεί υπόψη και η μορφολογική πολυπλοκότητα των δοκιμίων. Ο χρόνος κατασκευής της διαδρομής εναπόθεσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν χρησιμοποιηθούν στοιχειώδη τμήματα τυποποιημένης/σταθερής μορφής. Από πλευράς υπολογιστικού χρόνου, σημαντικό τμήμα του συνολικού χρόνου φαίνεται σχετίζεται με τη δημιουργία και εξαγωγή των αρχείων εντολών σε κώδικα G. Συνεπώς, περαιτέρω μείωση του υπολογιστικού χρόνου θα μπορούσε να επιτευχθεί με την εκτέλεση των αντίστοιχων λειτουργιών εξαγωγής και μεταφοράς δεδομένων, παράλληλα με την κατασκευή του εξαρτήματος (on-the-fly).

Οι κατασκευαστικές δοκιμές σε ένα μεσαίου κόστους σύστημα FFF, έδειξαν ότι είναι εφικτή η κατασκευή αντικειμένων/κομματιών ετερογενούς εσωτερικής δομής από PLA, με ικανοποιητική ακρίβεια. Από πλευράς χρόνου, οι δοκιμές έδειξαν ότι ο χρόνος κατασκευής ετερογενών στρώσεων είναι υψηλότερος από αυτόν που απαιτείται για την κατασκευή ομοιογενών στρώσεων με συγκρίσιμο συνολικό μήκος διαδρομών εναπόθεσης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην υψηλή πολυπλοκότητα των ετερογενών διαδρομών εναπόθεσης που μεταφράζεται, πρακτικά, σε μεγαλύτερο αριθμό σημείων (στροφών) ανά στρώση και μικρότερη μέση ταχύτητα εναπόθεσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των κατασκευαστικών δοκιμών υφίσταται, επίσης, μια αντίστροφη σχέση μεταξύ του επιπέδου ανάλυσης των επιμέρους στοιχείων και της δυνατότητας αναπαράστασης εξωτερικών μορφολογικών λεπτομερειών. Πιο συγκεκριμένα, η χρησιμοποίηση voxel και πλακιδίων σχετικά υψηλής ανάλυσης, επιτρέπει τον ακριβέστερο καθορισμό της πυκνότητας εναπόθεσης (περισσότερα διακριτά/-ές επίπεδα/τιμές πυκνότητας/σύστασης), αυξάνει, όμως, και το αντίστοιχο μέγεθος των ελάχιστων δυνατών στοιχείων (voxel και πλακιδίων), γεγονός που μειώνει τις δυνατότητες απεικόνισης λεπτομερειών μικρότερου μεγέθους στην περιφέρεια των στρώσεων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, ωστόσο, προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα επιλογής του κατάλληλου επιπέδου λεπτομέρειας ανάλογα με την εφαρμογή και τις σχετικές απαιτήσεις από πλευράς μορφολογικής πολυπλοκότητας στο εσωτερικό και το εξωτερικό των αντικειμένων. Μείωση του μεγέθους των voxel/πλακιδίων μπορεί επίσης να επιτευχθεί με την εφαρμογή μικρότερου πλάτους εναπόθεσης και μεγέθους ψηφίδων, ή με τη χαλάρωση του περιορισμού για μία συνεχή διαδρομή εναπόθεσης ανά στρώση, που καταργεί πρακτικά την ανάγκη διαίρεσης των πλακιδίων σε κύτταρα.

Όσον αφορά τη μελλοντική έρευνα, θα ήταν αρκετά ενδιαφέρον να δοκιμαστεί η αναπτυχθείσα μεθοδολογία σε μεγαλύτερο εύρος υλικών, όπως εύκαμπτα/ελαστικά υλικά, σύνθετα υλικά, ημιδιαφανή υλικά, αγωγά υλικά και κεραμικά υλικά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη διάφορων συνδυασμών υλικών που εκμεταλλεύονται τις διαφορετικές ιδιότητες των υλικών για την κατασκευή αντικειμένων με ιδιαίτερα λειτουργικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Σχετικές μελέτες θα μπορούσαν επίσης να επικεντρωθούν σε λειτουργικά ζητήματα, όπως η μηχανική συμπεριφορά ή οι οπτικές ιδιότητες των κομματιών/δοκιμίων. Στο ίδιο πλαίσιο, η προτεινόμενη μεθοδολογία θα μπορούσε να δοκιμασθεί σε άλλες τεχνολογίες ΠΚ μέσω συνεχούς εναπόθεσης, όπως η βιοεκτύπωση με εξώθηση υλικού (bioextrusion), οι τεχνολογίες άμεσης εγγραφής (DIW), η εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (DED) και η ΠΚ μεγάλων κατασκευών με εξώθηση (LAAM/BAAM). Σύμφωνα με τα

ευρήματα της μελέτης, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό και είναι συνεπώς εφικτό να δοκιμαστεί με σχετικά μικρό κόστος. Η επίτευξη, ωστόσο, ικανοποιητικών αποτελεσμάτων ανά εφαρμογή απαιτεί προσεκτική εξέταση διαφόρων παραμέτρων που συνδέονται με την εκάστοτε τεχνολογία ΠΚ.

Τέλος, σε ότι αφορά στη βελτίωση της μεθοδολογίας θα είχε ενδιαφέρον να εξεταστούν τρόποι εξομάλυνσης της διαδρομής μέσω μείωσης του αριθμού των σημείων καμπής (στροφών) ή/και των σχετικών γωνιών, έτσι ώστε να αυξηθεί η μέση ταχύτητα εναπόθεσης και να μειωθεί ο κατασκευαστικός χρόνος χωρίς απώλεια ακρίβειας/ποιότητας λόγω δονήσεων. Ενδιαφέρον θέμα μελλοντικής έρευνας αποτελεί, επίσης, η χρήση στοιχείων όγκου μεταβλητού μεγέθους και μορφής τα οποία θα μπορούν να προσαρμοστούν τοπικά, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ακριβέστερη απεικόνιση της εξωτερικής μορφολογίας των αντικειμένων αλλά και η εκμετάλλευση της δυνατότητας χρήσης κεφαλών με διαφορετικές διαμέτρους ακροφυσίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahn, D., Kweon, J. H., Kwon, S., Song, J., & Lee, S. (2009). Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16), 5593-5600.
- Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid prototyping journal*, 8(4), 248-257.
- Ahsan, A. M. M., Xie, R., & Khoda, B. (2018). Heterogeneous topology design and voxel-based bio-printing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(7), 1142-1154.
- Ang, X., Tey, J. Y., Yeo, W. H., & Shak, K. P. Y. (2023). A review on metallic and ceramic material extrusion method: Materials, rheology, and printing parameters. *Journal of Manufacturing Processes*, 90, 28-42.
- Anitha, R., Arunachalam, S., & Radhakrishnan, P. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 385-388.
- Aremu, A. O., Brennan-Craddock, J. P. J., Panesar, A., Ashcroft, I. A., Hague, R. J., Wildman, R. D., & Tuck, C. (2017). A voxel-based method of constructing and skinning conformal and functionally graded lattice structures suitable for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 13, 1-13.
- Armillotta, A., Bellotti, M., & Cavallaro, M. (2018). Warpage of FDM parts: Experimental tests and analytic model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 50, 140-152.
- ASTM ISO. (2015). ASTM52900-15 standard terminology for additive manufacturing—general principles—terminology. ASTM International, West Conshohocken, PA, 3(4), 5.
- Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 129, 1-16.
- Bártolo, P. J. (2011). Stereolithographic processes. In *Stereolithography: Materials, Processes and Applications* (pp. 1-36). Boston, MA: Springer US.
- Bertoldi, M., Yardimci, M., Pistor, C. M., & Guceri, S. I. (1998). Domain decomposition and space filling curves in toolpath planning and generation. In *1998 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Bogue, R. (2013). 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?. *Assembly automation*, 33(4), 307-311.
- Bosch, R., & Herman, A. (2004). Continuous line drawings via the traveling salesman problem. *Operations research letters*, 32(4), 302-303.
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, 66(2), 659-681.

- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2011). Could 3D printing change the world. *Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*, Atlantic Council, Washington, DC, 3, 1-16.
- Chaidas, D., & Kechagias, J. D. (2022). An investigation of PLA/W parts quality fabricated by FFF. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(5), 582-590.
- Chandru, V., Manohar, S., & Prakash, C. E. (1995). Voxel-based modeling for layered manufacturing. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(6), 42-47.
- Chen, Z., Shen, Z., Guo, J., Cao, J., & Zeng, X. (2017). Line drawing for 3D printing. *Computers & Graphics*, 66, 85-92.
- Cheng, L., Zhang, P., Biyikli, E., Bai, J., Robbins, J., & To, A. (2017). Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 660-677.
- Chiu, W. K., & Yu, K. M. (2008). Direct digital manufacturing of three-dimensional functionally graded material objects. *Computer-Aided Design*, 40(12), 1080-1093.
- Chiu, W. K., Yeung, Y. C., & Yu, K. M. (2006). Toolpath generation for layer manufacturing of fractal objects. *Rapid Prototyping Journal*, 12(4), 214-221.
- Choset, H. (2001). Coverage for robotics—a survey of recent results. *Annals of mathematics and artificial intelligence*, 31, 113-126.
- Conde-Rodríguez, F., Torres, J. C., García-Fernández, Á. L., & Feito-Higueruela, F. R. (2017). A comprehensive framework for modeling heterogeneous objects. *The Visual Computer*, 33, 17-31.
- Cuellar, J. S., Smit, G., Plettenburg, D., & Zadpoor, A. (2018). Additive manufacturing of non-assembly mechanisms. *Addit Manuf* 21: 150–158.
- Cui, H., Nowicki, M., Fisher, J. P., & Zhang, L. G. (2017). 3D bioprinting for organ regeneration. *Advanced healthcare materials*, 6(1), 1601118.
- Dass, A., & Moridi, A. (2019). State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings*, 9(7), 418.
- Deckers, J., Meyers, S., Kruth, J. P., & Vleugels, J. (2014). Direct selective laser sintering/melting of high density alumina powder layers at elevated temperatures. *Physics Procedia*, 56, 117-124.
- Dey, A., Roan Eagle, I. N., & Yodo, N. (2021). A review on filament materials for fused filament fabrication. *Journal of manufacturing and materials processing*, 5(3), 69.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2014). A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 73, 173-183.
- Dong, G., Tang, Y., Li, D., & Zhao, Y. F. (2020). Design and optimization of solid lattice hybrid structures fabricated by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 33, 101116.

- Doshi, M., Mahale, A., Singh, S. K., & Deshmukh, S. (2022). Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2269-2275.
- Durgun, I., & Ertan, R. (2014). Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 228-235.
- Duro-Royo, J., Mogas-Soldevila, L., & Oxman, N. (2015). Flow-based fabrication: An integrated computational workflow for design and digital additive manufacturing of multifunctional heterogeneously structured objects. *Computer-Aided Design*, 69, 143-154.
- Dwivedi, R., & Kovacevic, R. (2004). Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding. *Journal of Manufacturing Systems*, 23(4), 278-291.
- Espalin, D., Alberto Ramirez, J., Medina, F., & Wicker, R. (2014). Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 236-244.
- Es-Said, O. S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., & Pregger, B. A. (2000). Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*, 15(1), 107-122.
- Fan, Z., & Liou, F. (2012). Numerical modeling of the additive manufacturing (AM) processes of titanium alloy. *Titanium alloys-towards achieving enhanced properties for diversified applications*, 3-28.
- Gabriely, Y., & Rimon, E. (2002, May). Spiral-STC: An on-line coverage algorithm of grid environments by a mobile robot. In *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 02CH37292) (Vol. 1, pp. 954-960). IEEE.
- Galceran, E., & Carreras, M. (2013). A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous systems*, 61(12), 1258-1276.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- Giachini, P. A. G. S., Gupta, S. S., Wang, W., Wood, D., Yunusa, M., Baharlou, E., ... & Menges, A. (2020). Additive manufacturing of cellulose-based materials with continuous, multidirectional stiffness gradients. *Science advances*, 6(8), eaay0929.
- Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2009). Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 116-127.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Design for additive manufacturing. In *Additive manufacturing technologies*, 555-607.

- Gopakumar, S. (2004). RP in medicine: a case study in cranial reconstructive surgery. *Rapid Prototyping Journal*, 10(3), 207-211.
- Gupta, V., Kasana, K. S., & Tandon, P. (2010). Computer aided design modeling for heterogeneous objects. arXiv preprint arXiv:1004.3571.
- Huang, P, Wang, C.C., & Chen, Y. (2014). Algorithms for Layered Manufacturing in Image Space. In *Advances in Computers and Information in Engineering Research*, ed. by J. G. Michopoulos, C. J. Paredis, D. W. Rosen, and J. M. Vance, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.860328>
- Huang, P., Wang, C. C., & Chen, Y. (2013). Intersection-free and topologically faithful slicing of implicit solid. *Journal of computing and information science in engineering*, 13(2), 021009.
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International journal of advanced manufacturing technology*, 67, 1191-1203.
- Ivanova, O., Williams, C., & Campbell, T. (2013). Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid prototyping journal*, 19(5), 353-364.
- Jiang, J., Stringer, J., Xu, X., & Zhong, R. Y. (2018). Investigation of printable threshold overhang angle in extrusion-based additive manufacturing for reducing support waste. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(10), 961-969.
- Jin, Y. A., He, Y., Xue, G. H., & Fu, J. Z. (2015). A parallel-based path generation method for fused deposition modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, 927-937.
- Jin, Y., He, Y., Fu, G., Zhang, A., & Du, J. (2017). A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 132-144.
- Jin, Y., He, Y., Fu, G., Zhang, A., & Du, J. (2017). A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 132-144.
- Joharji, L., Mishra, R. B., Alam, F., Tytov, S., Al-Modaf, F., & El-Atab, N. (2022). 4D printing: A detailed review of materials, techniques, and applications. *Microelectronic Engineering*, 111874.
- Joint Development Foundation. (2023). 3MF Specification. avail. at <https://3mf.io/3mf-specification/>
- Joshi, S., Martukanitz, R. P., Nassar, A. R., & Michaleris, P. (2023). Digital Processing Workflow for AM. In *Additive Manufacturing with Metals: Design, Processes, Materials, Quality Assurance, and Applications* (pp. 13-58). Cham: Springer International Publishing.
- Kapil, S., Joshi, P., Yagani, H. V., Rana, D., Kulkarni, P. M., Kumar, R., & Karunakaran, K. P. (2016). Optimal space filling for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 22(4), 660-675.

- Kapil, S., Joshi, P., Yagani, H. V., Rana, D., Kulkarni, P. M., Kumar, R., & Karunakaran, K. P. (2016). Optimal space filling for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 22(4), 660-675.
- Kaplan, C. S., & Bosch, R. (2005). TSP art. In *Renaissance Banff: Mathematics, music, art, culture* (pp. 301-308).
- Karapetyan, D., & Gutin, G. (2011). Lin–Kernighan heuristic adaptations for the generalized traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 208(3), 221-232.
- Kechagias, J., Chaidas, D., Vidakis, N., Salonitis, K., & Vaxevanidis, N. M. (2022). Key parameters controlling surface quality and dimensional accuracy: A critical review of FFF process. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(9), 963-984.
- Kechagias, J., & Chaidas, D. (2023). Fused filament fabrication parameter adjustments for sustainable 3D printing. *Materials and Manufacturing Processes*, 38(8), 933-940.
- Kechagias, J., & Zaoutsos, S. (2024). Effects of 3D-printing processing parameters on FFF parts' porosity: outlook and trends. *Materials and Manufacturing Processes*, 1-11.
- Kellens, K., Baumer, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R., & Duflou, J. R. (2017). Environmental dimensions of additive manufacturing: mapping application domains and their environmental implications. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S49-S68.
- Khoda, A. B., & Koc, B. (2013). Functionally heterogeneous porous scaffold design for tissue engineering. *Computer-Aided Design*, 45(11), 1276-1293.
- Kou, X. Y., & Tan, S. T. (2007). Heterogeneous object modeling: A review. *Computer-Aided Design*, 39(4), 284-301.
- Kou, X. Y., & Tan, S. T. (2007). Heterogeneous object modeling: A review. *Computer-Aided Design*, 39(4), 284-301.
- Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2013). Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(12), 1511-1519.
- Krimpenis, A. A., & Iordanidis, D. M. (2023). Design and Analysis of a Desktop Multi-Axis Hybrid Milling-Filament Extrusion CNC Machine Tool for Non-Metallic Materials. *Machines*, 11(6), 637.
- Krueckemeier, S., Anderl, R., & Schleich, B. (2023). FILE FORMAT SELECTION FOR EFFICIENT DIGITAL PROCESS CHAINS IN ADDITIVE MANUFACTURING. *Proceedings of the Design Society*, 3, 1875-1884.
- Kuipers, T., Wu, J., & Wang, C. C. (2019). CrossFill: foam structures with graded density for continuous material extrusion. *Computer-Aided Design*, 114, 37-50.
- Kuipers, T., Wu, J., & Wang, C. C. (2019). CrossFill: foam structures with graded density for continuous material extrusion. *Computer-Aided Design*, 114, 37-50.
- Kumar, G. S., Pandithevan, P., & Ambatti, A. R. (2009). Fractal raster tool paths for layered manufacturing of porous objects. *Virtual and Physical Prototyping*, 4(2), 91-104.

- Kumar, S., & Kruth, J. P. (2010). Composites by rapid prototyping technology. *Materials & Design*, 31(2), 850-856.
- Kumar, V., Burns, D., Dutta, D., & Hoffmann, C. (1999). A framework for object modeling. *Computer-aided design*, 31(9), 541-556.
- Larimore, Z., Jensen, S., Parsons, P., Good, B., Smith, K., & Mirotznik, M. (2017). Use of space-filling curves for additive manufacturing of three dimensionally varying graded dielectric structures using fused deposition modeling. *Additive Manufacturing*, 15, 48-56.
- Le Bourhis, F., Kerbrat, O., Dembinski, L., Hascoët, J. Y., & Mognol, P. (2014). Predictive model for environmental assessment in additive manufacturing process. *Procedia CiRP*, 15, 26-31.
- Lee, W. C., Wei, C. C., & Chung, S. C. (2014). Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2366-2374.
- Li, B., Fu, J., Feng, J., Shang, C., & Lin, Z. (2020). Review of heterogeneous material objects modeling in additive manufacturing. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 3, 1-18.
- Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., & Gu, P. (2002). Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties. *Journal of manufacturing processes*, 4(2), 129-141.
- Li, Q., Hong, Q., Qi, Q., Ma, X., Han, X., & Tian, J. (2018). Towards additive manufacturing oriented geometric modeling using implicit functions. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 1(1), 1-16.
- Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical reviews*, 117(15), 10212-10290.
- Liu, H., Maekawa, T., Patrikalakis, N. M., Sachs, E. M., & Cho, W. (2004). Methods for feature-based design of heterogeneous solids. *Computer-Aided Design*, 36(12), 1141-1159.
- Liu, S., Liu, T., Zou, Q., Wang, W., Doubrovski, E. L., & Wang, C. C. (2021). Memory-efficient modeling and slicing of large-scale adaptive lattice structures. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(6), 061003.
- Loh, G. H., Pei, E., Harrison, D., & Monzón, M. D. (2018). An overview of functionally graded additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 23, 34-44.
- Lu, L., Sharf, A., Zhao, H., Wei, Y., Fan, Q., Chen, X., ... & Chen, B. (2014). Build-to-last: Strength to weight 3D printed objects. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 33(4), 1-10.
- Lubombo, C., & Huneault, M. A. (2018). Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. *Materials Today Communications*, 17, 214-228.

- Luo, Y., Ji, Z., Leu, M. C., & Caudill, R. (1999, May). Environmental performance analysis of solid freedom fabrication processes. In Proceedings of the 1999 IEEE international symposium on electronics and the environment (Cat. No. 99CH36357) (pp. 1-6). IEEE.
- Mandrycky, C., Wang, Z., Kim, K., & Kim, D. H. (2016). 3D bioprinting for engineering complex tissues. *Biotechnology advances*, 34(4), 422-434.
- Martínez, J., Hornus, S., Song, H., & Lefebvre, S. (2018). Polyhedral Voronoi diagrams for additive manufacturing. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 37(4), 1-15.
- Meteyer, S., Xu, X., Perry, N., & Zhao, Y. F. (2014). Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes. *Procedia Cirp*, 15, 19-25.
- Montero, M., Roundy, S., Odell, D., Ahn, S. H., & Wright, P. K. (2001). Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. *Society of Manufacturing Engineers*, 10(13552540210441166), 1-21.
- Morvan, S. M., & Fadel, G. M. (1999). Heterogeneous solids: possible representation schemes. In 1999 International Solid Freeform Fabrication Symposium.
- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., ... & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707.
- Munaz, A., Vadivelu, R. K., John, J. S., Barton, M., Kamble, H., & Nguyen, N. T. (2016). Three-dimensional printing of biological matters. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1(1), 1-17.
- Murphy, S. V., & Atala, A. (2014). 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature biotechnology*, 32(8), 773-785.
- Nancharaiah, T. R. D. R. V., Raju, D. R., & Raju, V. R. (2010). An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. *International Journal on Emerging Technologies*, 1(2), 106-111.
- Ng, W. L., Wang, S., Yeong, W. Y., & Naing, M. W. (2016). Skin bioprinting: impending reality or fantasy?. *Trends in biotechnology*, 34(9), 689-699.
- Noriega, A., Blanco, D., Alvarez, B. J., & Garcia, A. (2013). Dimensional accuracy improvement of FDM square cross-section parts using artificial neural networks and an optimization algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 2301-2313.
- Novakova-Marcincinova, L., Novak-Marcincin, J., Barna, J., & Torok, J. (2012, June). Special materials used in FDM rapid prototyping technology application. In 2012 IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES) (pp. 73-76). IEEE.
- Oxman, N. (2011). Variable property rapid prototyping: Inspired by nature, where form is characterized by heterogeneous compositions, the paper presents a novel approach to layered manufacturing entitled variable property rapid prototyping. *Virtual and physical prototyping*, 6(1), 3-31.

- Oxman, N., Keating, S., & Tsai, E. (2011). Functionally graded rapid prototyping. *Innovative developments in virtual and physical prototyping*, 483-489.
- Pandithevan, P., & Saravana Kumar, G. (2009). Personalised bone tissue engineering scaffold with controlled architecture using fractal tool paths in layered manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 4(3), 165-180.
- Papacharalampopoulos, A., Bikas, H., & Stavropoulos, P. (2018). Path planning for the infill of 3D printed parts utilizing Hilbert curves. *Procedia Manufacturing*, 21, 757-764.
- Papapaschos, V., Bontarenko, E., & Krimpenis, A. A. (2020). HydraX, a 3D printed robotic arm for hybrid manufacturing. Part II: control, calibration & programming. *Procedia Manufacturing*, 51, 109-115.
- Papazetis, G., & Vosniakos, G. C. (2016). Direct porous structure generation of tissue engineering scaffolds for layer-based additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 871-883.
- 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. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(12), 2241-2250.
- Pasko, A., Adzhiev, V., & Comninou, P. (Eds.). (2008). *Heterogeneous objects modelling and applications: collection of papers on foundations and practice (Vol. 4889)*. Springer.
- Pei, E. (2014). 4D printing—revolution or fad?. *Assembly Automation*, 34(2), 123-127.
- Petousis, M., Vidakis, N., Mountakis, N., Papadakis, V., Kanellopoulou, S., Gaganatsiou, A., ... & Kechagias, J. (2022). Multifunctional material extrusion 3D-printed antibacterial polylactic acid (PLA) with binary inclusions: the effect of cuprous oxide and cellulose nanofibers. *Fibers*, 10(6), 52.
- Pham, D. T., & Gault, R. S. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of machine tools and manufacture*, 38(10-11), 1257-1287.
- Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., & Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69, 157-166.
- Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.
- Rane, K., & Strano, M. (2019). A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts. *Advances in Manufacturing*, 7, 155-173.
- Rego, C., Gamboa, D., Glover, F., & Osterman, C. (2011). Traveling salesman problem heuristics: Leading methods, implementations and latest advances. *European Journal of Operational Research*, 211(3), 427-441.

- Rezaie, R., Badrossamay, M., Ghaie, A., & Moosavi, H. J. P. C. (2013). Topology optimization for fused deposition modeling process. *Procedia Cirp*, 6, 521-526.
- Rias, A. L., Bouchard, C., Segonds, F., & Abed, S. (2016). Design for additive manufacturing: A creative approach. In *DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th international design conference* (pp. 411-420).
- Ridgeway, B. (2014). Open for Business: 3-D Printer Creates First Object in Space on International Space Station. *Newsletter, NASA*. Available at <http://www.nasa.gov/content/open-for-business-3-d-printer-creates-first-object-in-space-on-international-space-station/#.VHbjLTGUdK2> (12/10/2023).
- Rosen, D.W. (2014). What are principles for design for additive manufacturing?. In *Proc. Of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2014)*, DOI: 10.3850/978-981-09-0446-3_027.
- Russo, D., & Rizzi, C. (2014). Structural optimization strategies to design green products. *Computers in industry*, 65(3), 470-479.
- Saadi, M. A. S. R., Maguire, A., Pottackal, N. T., Thakur, M. S. H., Ikram, M. M., Hart, A. J., ... & Rahman, M. M. (2022). Direct ink writing: a 3D printing technology for diverse materials. *Advanced Materials*, 34(28), 2108855.
- Sacco, E., & Moon, S. K. (2019). Additive manufacturing for space: status and promises. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 4123-4146.
- Schumacher, C., Bickel, B., Rys, J., Marschner, S., Daraio, C., & Gross, M. (2015). Microstructures to control elasticity in 3D printing. *ACM Transactions on Graphics (Tog)*, 34(4), 1-13.
- Shaqour, B., Abuabiah, M., Abdel-Fattah, S., Juaidi, A., Abdallah, R., Abuzaina, W., ... & Cos, P. (2021). Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3D printing: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 1279-1291.
- Sigmund, O., Aage, N., & Andreassen, E. (2016). On the (non-) optimality of Michell structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54, 361-373.
- Solomon, I. J., Sevel, P., & Gunasekaran, J. (2021). A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*, 37, 509-514.
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2009). Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials & design*, 30(10), 4243-4252.
- Stiltner, L. J., Elliott, A. M., & Williams, C. B. (2011, August). A method for creating actuated joints via fiber embedding in a polyjet 3D printing process. In *2011 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- Tao, Y., Kong, F., Li, Z., Zhang, J., Zhao, X., Yin, Q., ... & Li, P. (2021). A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 4860-4879.

- Tian, S., Zhao, H., & Lewinski, N. (2021). Key parameters and applications of extrusion-based bioprinting. *Bioprinting*, 23, e00156.
- Valvez, S., Reis, P. N., Susmel, L., & Berto, F. (2021). Fused filament fabrication-4D-printed shape memory polymers: a review. *Polymers*, 13(5), 701.
- Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2013). Identification on some design key parameters for additive manufacturing: application on electron beam melting. *Procedia CIRP*, 7, 264-269.
- Vidakis, N., Kechagias, J. D., Petousis, M., Vakouftsi, F., & Mountakis, N. (2023). The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption. *Materials and Manufacturing Processes*, 38(8), 915-932.
- Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., ... & Xie, Y. M. (2016). Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*, 83, 127-141.
- Wasser, T., Jayal, A. D., & Pistor, C. (1999). Implementation and evaluation of novel buildstyles in fused deposition modeling (FDM). In 1999 International Solid Freeform Fabrication Symposium.
- Wasser, T., Jayal, A. D., & Pistor, C. (1999). Implementation and evaluation of novel buildstyles in fused deposition modeling (FDM). In 1999 International Solid Freeform Fabrication Symposium.
- Wohlers Assoc. (2023). WOHLERS REPORT 2023, 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry: Executive summary, avail. at <https://wohlersassociates.com/wp-content/uploads/2023/03/Wohlers-Report-2023-Executive-summary.pdf>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012.
- Wu, J., Wang, C. C., Zhang, X., & Westermann, R. (2016). Self-supporting rhombic infill structures for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 80, 32-42.
- Yaman, U., Butt, N., Sacks, E., & Hoffmann, C. (2016). Slice coherence in a query-based architecture for 3D heterogeneous printing. *Computer-Aided Design*, 75, 27-38.
- Zhai, X., & Chen, F. (2019). Path planning of a type of porous structures for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 115, 218-230.
- Zhao, H., Gu, F., Huang, Q. X., Garcia, J., Chen, Y., Tu, C., ... & Chen, B. (2016). Connected fermat spirals for layered fabrication. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 35(4), 1-10.
- Zopf, D. A., Hollister, S. J., Nelson, M. E., Ohye, R. G., & Green, G. E. (2013). Bioresorbable airway splint created with a three-dimensional printer. *New England Journal of Medicine*, 368(21), 2043-2045.