



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**Π.Μ.Σ. ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΡΓΩΝ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**

**ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΕΣ  
ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**

**Κυριακή Κούκη**

**2022**

## ΔΗΛΩΣΗ

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού ΜΔΕ ανήκουν στη μεταπτυχιακή φοιτήτρια και το επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς την συναίνεση του άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέλους ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και τον επιβλέποντα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του μη συμμετέχοντα στην συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πριν από την πλοήγηση στα περιεχόμενα αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους, που η βοήθεια τους ήταν πολύτιμη, για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ιωάννη Γιαννατσή γιατί πίστευε σε εμένα και τις δυνατότητές μου, με εμπιστεύτηκε και η παρουσία του ήταν συνεχής, όποτε χρειαζόμουν καθοδήγηση, και ύστερα όλους τους καθηγητές για το ενδιαφέρον τους να μας μεταφέρουν τις γνώσεις και την επαγγελματική τους εμπειρία. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη, που μου προσφέρουν σε κάθε μου επιλογή.

Ένα θερμό ευχαριστώ είναι το λιγότερο που θα μπορούσα να εκφράσω.

Κούκη Κυριακή

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

*Το θέμα προς ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η Ψηφιακή μοντελοποίηση με αλγοριθμικές μεθόδους και οι εφαρμογές των συγκεκριμένων μεθόδων στον σχεδιασμό προϊόντων. Η διαδικαστική μοντελοποίηση (procedural modeling) είναι μια ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνική γεωμετρικής μοντελοποίησης για εφαρμογές γραφικών υπολογιστών και σχεδιασμού. Σε αντίθεση με τον άμεσο ορισμό της γεωμετρίας, δημιουργούνται μοντέλα έμμεσα, ακολουθώντας μια αλγοριθμική διαδικασία που καθορίζεται από ένα σύνολο κανόνων και παραμέτρων. Οι διαδικαστικές μέθοδοι μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται ευρέως στη δημιουργία περιεχομένου για παιχνίδια και εικονικά περιβάλλοντα, καθώς και στην αρχιτεκτονική και στην προσομοίωση φυσικών φαινομένων. Η δύναμή τους προέρχεται από την ικανότητα να παράγουν αυτόματα γεωμετρικές μορφές υψηλής πολυπλοκότητας και μεγάλου μεγέθους. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές διαδικαστικού σχεδιασμού δίνοντας έμφαση σε τρεις μεθόδους: το Γενετικό Σχεδιασμό (Generative Design), τον Αλγοριθμικό Σχεδιασμό (Algorithm Design) και τον Παραμετρικό Σχεδιασμό (Parametric Design). Τέλος μελετάται η περίπτωση σχεδιασμού ενός τραπεζιού χρησιμοποιώντας σχετικές μεθόδους του λογισμικού σχεδίασης Rhinoceros 3D, το οποίο είναι από τα πιο διαδεδομένα σχετικά εργαλεία λογισμικού. Στο πλαίσιο της μελέτης σχεδιάστηκαν τέσσερα εναλλακτικά σχέδια τα οποία αξιολογήθηκαν στη συνέχεια, ως προς το κόστος και την ευκολία κατασκευής τους με τρισδιάστατη εκτύπωση.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> - Εισαγωγή .....	1
1.1 Διαδικαστική Μοντελοποίηση .....	3
1.2 Διαδικαστικός Σχεδιασμός .....	4
1.3 Υπολογιστικός Σχεδιασμός.....	4
1.4 Εργαλεία Υπολογιστικού Σχεδιασμού.....	5
1.5 Τα οφέλη του Υπολογιστικού Σχεδιασμού.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> – Διαδικαστικές Τεχνικές .....	8
2.1 Γενετική Μοντελοποίηση.....	10
2.2 L-Συστήματα .....	12
2.3 Φράκταλ.....	13
2.4 Θόρυβος Perlin .....	15
2.5 Επίστρωση πλακιδίων .....	16
2.6 Βάση υφής Voronoi.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> – Μέθοδοι Διαδικαστικού Σχεδιασμού.....	18
3.1 Αλγοριθμικός Σχεδιασμός .....	18
3.2 Γενετικός Σχεδιασμός .....	19
3.4 Σχέση μεταξύ Παραμετρικού, Γενετικού και Αλγοριθμικού Σχεδιασμού .....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> – Λογισμικά Τριδιάστατης Διαδικαστικής Μοντελοποίησης .....	23
4.1 Λογισμικό Fusion 360.....	23
4.2 Λογισμικό Blender.....	24
4.3 Λογισμικό Houdini .....	24
4.4 Λογισμικό Grasshopper.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> – Τριδιάστατη Εκτύπωση .....	27
5.1 3D εκτύπωση με εξώθηση υλικού.....	27
5.2 Υλικά 3D εκτύπωσης.....	29
5.3 Λογισμικό 3D εκτύπωσης .....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> – Μελέτη Περίπτωσης.....	32
6.1 Έπιπλα με παραμετρικό σχεδιασμό.....	32
6.2 Μελέτη περίπτωσης .....	35
6.2.1 Σχέδιο 1 .....	36
6.2.2 Σχέδιο 2.....	40
6.2.3 Σχέδιο 3.....	42
6.2.4 Σχέδιο 4.....	44
6.3 Παρατηρήσεις - αποτελέσματα.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 <sup>ο</sup> – Το μέλλον του διαδικαστικού σχεδιασμού.....	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	49

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> - Εισαγωγή

Ο διαδικαστικός σχεδιασμός βασίζεται σε αλγόριθμους και αποτελεί το τέταρτο στάδιο ανάπτυξης του σχεδιασμού με τη βοήθεια Η/Υ στους τομείς του αρχιτεκτονικού και βιομηχανικού σχεδιασμού. Ως σημείο έναρξης του διαδικαστικού σχεδιασμού μπορεί να θεωρηθεί η περίοδος του Β' Παγκόσμιου πολέμου, κατά την οποία στο MIT χρησιμοποιώντας ισχυρά για την εποχή υπολογιστικά συστήματα για τον υπολογισμό της τροχιάς πυραύλων.

Το πρώτο στάδιο σχεδιασμού με Η/Υ εστίασε στο πεδίο της δισδιάστατης σχεδίασης. Το 1963, ο Ivan Sutherland ανέπτυξε το Sketchpad, το οποίο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για 2D σχεδίαση. Τρισδιάστατα μοντέλα μπορούσαν, επίσης, να σχεδιαστούν στο Sketchpad με μικρότερες όμως δυνατότητες. Το πιο δημοφιλές λογισμικό δισδιάστατης σχεδίασης, το AutoCAD, εισήχθη στην αγορά τη δεκαετία του 1980. Το συγκεκριμένο λογισμικό διέθετε προηγμένα εργαλεία σχεδίασης και φιλική προς το χρήστη διεπαφή, παρέχοντας έτσι στους σχεδιαστές τη δυνατότητα να δημιουργήσουν μεγάλα σε μέγεθος σχέδια αποδοτικά και με υψηλή ακρίβεια.

Το δεύτερο στάδιο είναι γνωστό και ως η εποχή της τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Η ανάπτυξη τρισδιάστατων μοντέλων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη θεωρία πινάκων και στα γραφικά υπολογιστών. Διάφορα λογισμικά τρισδιάστατης μοντελοποίησης όπως τα Rhinoceros, Catia, Pro-Engineer κ.α. αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1980. Με την χρήση αυτών των εργαλείων κατέστη δυνατό να αναπαρασταθεί οπτικά ένα προϊόν ή κτίριο σε υπολογιστή, για να παρέχει καλύτερη εικόνα στους πελάτες, να διευκολύνει μετέπειτα στάδια της κατασκευής αλλά και να επιτρέψει εργασίες ψηφιακής ανάλυσης και μελέτης.

Κατά το τρίτο στάδιο η εστίαση μεταφέρθηκε στην ανάπτυξη των συστημάτων διαχείρισης, συνολικά, των πληροφοριών που αφορούν ένα προϊόν (Product Lifecycle Management - PLM) ή ένα κτήριο (Building Information Modelling - BIM). Τα σχετικά συστήματα αναπτύχθηκαν, όταν πλέον μπορούσε να ενσωματωθεί και να μεταφερθεί μεγάλος όγκος πληροφοριών στα μοντέλα, ενώ αυξήθηκε και η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς.

Το τέταρτο στάδιο αφορά στην ανάπτυξη και αξιοποίηση των συστημάτων υπολογιστικού σχεδιασμού (computational design) και διαδικαστικού σχεδιασμού (procedural design). Η ανάπτυξη της συγκεκριμένης προσέγγισης επιτρέπει στους σχεδιαστές να μελετήσουν καλύτερα τη μορφολογία των αντικειμένων που σχεδιάζουν, να διερευνήσουν νέες λύσεις και να επιλέξουν τη βέλτιστη. Ο Υπολογιστικός Σχεδιασμός άκμασε και χρησιμοποιήθηκε ευρέως, από τους αρχιτέκτονες, μετά την ανάπτυξη του Grasshopper, το οποίο είναι ένα λογισμικό, που βασίζεται σε οπτικό προγραμματισμό με δυνατότητα κωδικοποίησης στην πλατφόρμα. Η χρήση υπολογιστικού σχεδιασμού γίνεται επίσης στην ανάπτυξη και εφαρμογή ρομπότ, στον κλάδο των κατασκευών και της ψηφιακής κατασκευής.

Το πέμπτο στάδιο εστιάζει στην εκμετάλλευση τεχνικών Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), εξέλιξη η οποία κινείται παράλληλα και βασίζεται εν μέρει στην ανάπτυξη των μεθόδων υπολογιστικού σχεδιασμού. Η μηχανική μάθηση συνδυάζει τα δεδομένα, μέσω μιας σειράς αλγορίθμων, αναγνώρισης προτύπων, νευρωνικών δικτύων, γενετικού σχεδιασμού, όπως και τεχνητής νοημοσύνης για να παράγει ουσιαστικά αποτελέσματα. Η χρήση της μηχανικής μάθησης επιτρέπει στον υπολογιστή να σχεδιάζει λύσεις, με βάση εισροές διαθέσιμες τόσο από τη λειτουργία/χρήση όσο και στατιστικά μοντέλα. Σχετικά πεδία αποτελούν και αυτά της εικονικής πραγματικότητας (virtual reality), της επαυξημένης πραγματικότητας (augmented reality) και της ολογραφικής απεικόνισης (holographic visualization). (Bhattacharjee, 2022)

Οι προσεγγίσεις σχεδιασμού που βασίζονται σε αλγορίθμους αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες και έγιναν γρήγορα δημοφιλείς, μεταξύ των αρχιτεκτόνων και άλλων σχεδιαστών. Οι επαγγελματίες του σχεδιασμού και οι ερευνητές υιοθέτησαν διαφορετικές ορολογίες για να αντιμετωπίσουν αυτές τις προσεγγίσεις. Ωστόσο, ακόμα και σήμερα πολλοί όροι έχουν διφορούμενη έννοια και δεν χρησιμοποιούνται με ιδιαίτερη συνέπεια με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται, συχνά, διαφορετικοί όροι για να εκφράσουν την ίδια έννοια (Ahlquist, 2016), ειδικά μεταξύ διαφορετικών ειδικοτήτων και εφαρμογών, όπως ο αρχιτεκτονικός και ο μηχανολογικός σχεδιασμός.

## 1.1 Διαδικαστική Μοντελοποίηση

Η διαδικαστική μοντελοποίηση (procedural modeling) είναι μια αποτελεσματική τεχνική γραφικών υπολογιστών που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία γεωμετρικών μοντέλων και υφών επιφανειών. Αντί να ορίζει ο χρήστης κάθε λεπτομέρεια ρητά, όπως μεμονωμένες κορυφές ή άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ένα ψηφιακό σύστημα δημιουργεί ένα μοντέλο ή σχέδιο αυτόματα, ακολουθώντας ένα σύνολο κανόνων και παραμέτρων. Η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων αυτής της τεχνικής προϋποθέτει, ο σχεδιαστής να είναι διαθέτει γνώσεις και δεξιότητες τόσο σε ό,τι αφορά στις τεχνικές διαδικαστικής μοντελοποίησης και στα γραφικά υπολογιστή, όσο και εξειδικευμένες γνώσεις που σχετίζονται με το υπό σχεδιασμό αντικείμενο. Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν βρει ευρεία χρήση σε δημιουργία περιεχομένου για εικονικές σκηνές που χρησιμοποιούνται σε ψυχαγωγικές και εκπαιδευτικές εφαρμογές. Τα διαδικαστικά συστήματα σχεδίασης είναι, επίσης, ιδιαίτερα χρήσιμα για τη μοντελοποίηση φυσικών οντοτήτων μεγάλης πολυπλοκότητας και μεγέθους, όπως εδάφη, δέντρα και φυτά. Τα αντικείμενα που δημιουργούνται ψηφιακά συχνά περιλαμβάνουν κτίρια, πόλεις, οδικά δίκτυα και γενικά μοντέλα πολύπλοκης και ελεύθερης γεωμετρίας (T. Ullrich, 2010).

Επιπλέον η διαδικαστική μοντελοποίηση επιτρέπει την επεξεργασία των πλεγμάτων με μη συνεπή τοπολογικά τρόπο. Μπορούν να εκτελεστούν τοπολογικοί μετασχηματισμοί σε ένα πλέγμα, το οποίο μπορεί να τροποποιηθεί, να προσαρμοστεί, ακόμη και να κινηθεί. Μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί επαναφορά ή τροποποίηση των λειτουργιών, διατηρώντας τις υπόλοιπες άθικτες.

Το σύστημα διαδικαστικής μοντελοποίησης λειτουργεί παρόμοια με ένα σύστημα παραμόρφωσης (deformation system). Ένα στρώμα πλέγματος περιέχει το βασικό πλέγμα, το οποίο τροποποιείται ψηφιακά. Αυτό σημαίνει ότι όταν γίνεται επεξεργασία του πλέγματος, οι λειτουργίες τοποθετούνται στο επάνω μέρος του βασικού στρώματος. Σε κάθε τροποποίηση του βασικού επίπεδου, οι λειτουργίες που έχουν τοποθετηθεί στην κορυφή επαναξιολογούνται, για να δημιουργηθεί το αποτέλεσμα (foundry, 2022).



## 1.2 Διαδικαστικός Σχεδιασμός

Ο διαδικαστικός σχεδιασμός (procedural design) συχνά ταξινομείται ως υπολογιστική προσέγγιση, η οποία βασίζεται σε ένα σύνολο οδηγιών που, όταν χρησιμοποιούνται σε μια συγκεκριμένη ακολουθία, παράγουν συγκεκριμένες μορφές. Ενώ σε αυτό το πλαίσιο ορισμένες μέθοδοι μπορεί να είναι επαναληπτικές και κυκλικές, ο διαδικαστικός σχεδιασμός συχνά υποδηλώνει, εννοιολογικά, την κατασκευή μίας γραμμικής λύσης. Πιο εξελιγμένα, ωστόσο, ευφυή συστήματα, παρέχουν μεγαλύτερη ελευθερία στις υπολογιστικές διαδικασίες επιτρέποντας σε αυτές να απορροφήσουν, να ερμηνεύσουν και να ανταποκριθούν δυναμικά, ακολουθώντας, έτσι πιο δικτυωμένες λογικές. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω λειτουργιών, που χρησιμοποιούν δυναμικές λογικές υπολογιστικού σχεδιασμού και μηχανισμούς ανάδρασης, όπως αυτά ορίζονται στο πλαίσιο της Γενικής Θεωρίας Συστημάτων (ΓΘΣ).

Στην ουσία ο Διαδικαστικός Σχεδιασμός είναι μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των σχέσεων, των παραμέτρων, μέσω της επανάληψης. Ο Bertalanffy, ένας από τους ιδρυτές της ΓΘΣ, ταξινόμησε τα στοιχεία ενός συστήματος ανάδρασης ανά μέτρηση, είδος και συσχέτιση. Αυτά έχουν αντικατασταθεί, ως μετρήσεις του σχεδιαστικού χώρου, δεδομένου ότι οι ψηφιακές λειτουργίες επιτρέπουν την εξερεύνηση, τη δοκιμή και τη βελτιστοποίηση των παραμετρικών σχέσεων. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, το σύστημα ανάδρασης αποτελεί ενεργό παράγοντα εξερεύνησης των σχεδιαστικών λύσεων (Ahlquist, 2016).

## 1.3 Υπολογιστικός Σχεδιασμός

Ο υπολογιστικός σχεδιασμός (computational design) ορίζεται ως η εφαρμογή υπολογιστικών στρατηγικών στη διαδικασία σχεδιασμού. Ο στόχος δεν είναι η τεκμηρίωση του τελικού αποτελέσματος απαραίτητα, αλλά τα βήματα που απαιτούνται για τη δημιουργία αυτού του αποτελέσματος. Πρόκειται για μια μέθοδο σχεδιασμού που χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό αλγορίθμων και παραμέτρων για την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού, εκμεταλλευόμενη τις προηγμένες δυνατότητες των σύγχρονων υπολογιστών. Κάθε βήμα της διαδικασίας, ορίζεται μέσω κωδικοποιημένης

γλώσσας στη σχετική εφαρμογή/λογισμικό σχεδίασης που χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες, παράλληλα με συγκεκριμένες παραμέτρους του έργου, για να δημιουργήσει αλγόριθμους, οι οποίοι αναπτύσσουν μοντέλα σχεδίασης ή ολοκληρώνουν τις αναλύσεις σχεδιασμού. Αφού ολοκληρωθεί ο αρχικός προγραμματισμός, ο σχεδιασμός γίνεται μια δυναμική και επαναλαμβανόμενη διαδικασία.

Παραδοσιακά, ο σχεδιασμός είναι παθητικός, ένας σχεδιαστής χρησιμοποιεί τις γνώσεις και τη διαίσθησή του για να δημιουργήσει σχέδια με ένα πρόγραμμα σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Design - CAD). Αυτή η μέθοδος χειρωνακτικής δημιουργίας περιορίζει τον αριθμό των σχεδιαστικών εναλλακτικών που μπορούν να μελετηθούν περαιτέρω, καθώς απαιτεί σχετικά πολύ χρόνο και πόρους. Η λύση έρχεται με τον υπολογιστικό σχεδιασμό, ο οποίος είναι ένα αποτελεσματικό και χρήσιμο εργαλείο για την αύξηση της παραγωγικότητας και τη δημιουργία καλύτερων σχεδίων. Προϋπόθεση για την εφαρμογή του υπολογιστικού σχεδιασμού αποτελεί να μπορούν οι σχεδιαστές να αναλύσουν τη διαδικασία σχεδιασμού σε συγκεκριμένα στάδια. Αυτά τα στάδια μπορούν στη συνέχεια να αντιστοιχιστούν σε ένα πλήρες σύνολο οδηγιών με αναγνωρίσιμα μοτίβα και λειτουργίες, τα οποία θέτουν το πλαίσιο για τη ανάπτυξη των αλγόριθμων που επιλύουν προβλήματα σχεδίασης.

## 1.4 Εργαλεία Υπολογιστικού Σχεδιασμού

Ο υπολογιστικός σχεδιασμός προσφέρει στους σχεδιαστές τη δύναμη του προγραμματισμού χωρίς να χρειάζεται να μάθουν κώδικα. Αυτό συμβαίνει επειδή τα περισσότερα εργαλεία υπολογιστικού σχεδιασμού χρησιμοποιούν οπτικό προγραμματισμό σε αντίθεση με γραμμές κώδικα που βασίζεται σε κείμενο. Με τον οπτικό προγραμματισμό, οι χρήστες συνδέουν εξόδους από έναν κόμβο σε εισόδους άλλου, δημιουργώντας ένα πρόγραμμα που εκτελείται από κόμβο σε κόμβο με συνδέσμους. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια γραφική αναπαράσταση, ή ουσιαστικά ένα διάγραμμα ροής, της διαδικασίας σχεδιασμού.

Αυτά τα οπτικά εργαλεία προγραμματισμού είναι συνήθως πρόσθετα, που συνδυάζονται με λογισμικό μοντελοποίησης σχεδιασμού όπως τα Tekla Structures, Autodesk Revit, Trimble Quadri και Bentley MicroStation. Δύο από τα κορυφαία

πρόσθετα υπολογιστικού σχεδιασμού είναι το Dynamo, συμβατό με το Revit και το Grasshopper, συμβατό με τα Tekla, Quadri και Rhino.

Το Dynamo είναι ένα οπτικό εργαλείο προγραμματισμού από την Autodesk. Οι χρήστες εισάγουν και εξάγουν δεδομένα από το τρισδιάστατο μοντέλο τους, το Excel ή ακόμα και αρχεία εικόνας για να συμπληρώσουν τη διεπαφή δέσμης ενεργειών. Το πρόγραμμα παράγει σύνθετες γεωμετρίες που επιτρέπουν στους σχεδιαστές να αναλύουν τα έργα τους και να κάνουν οπτικές τροποποιήσεις.

Το Grasshopper είναι προγενέστερο του Dynamo και είναι πιθανότατα το πιο δημοφιλές πρόσθετο υπολογιστικού σχεδιασμού. Με αυτό το εργαλείο αλγοριθμικής μοντελοποίησης, οι χρήστες δημιουργούν κανόνες σχεδίασης με τη διεπαφή που βασίζεται σε κόμβους. Οι σχεδιαστές μπορούν επίσης να επωφεληθούν από την εκτενή βιβλιοθήκη κόμβων και τα εργαλεία σχεδίασης που έχουν αναπτυχθεί από τρίτους.

## 1.5 Τα οφέλη του Υπολογιστικού Σχεδιασμού

Η εφαρμογή μεθόδων υπολογιστικού σχεδιασμού απαιτεί μια σημαντικά διαφορετική σχεδιαστική προσέγγιση και εκτεταμένο προγραμματισμό στο front-end (γραφική διεπαφή χρήστη) αλλά μόλις ο/η σχεδιαστής/σχεδιάστρια ξεπεράσει την αρχική καμπύλη μάθησης, θα είναι σε θέση για:

Σχεδίαση καλύτερων λύσεων: Οι σχεδιαστές/σχεδιάστριες μπορούν να εξερευνήσουν εκατοντάδες επιλογές σχεδίασης και όχι μόνο αυτές τις σχετικά περιορισμένες, που θα παρήγαγαν με ακολουθώντας συμβατικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις. Μπορούν επίσης να επωφεληθούν από τις μοναδικές σχεδιαστικές λύσεις που δημιουργούνται, όταν απομακρύνονται από τη συμβατική σκέψη. Οι αλγόριθμοι σχεδιασμού μπορούν να βελτιωθούν, ως αποτέλεσμα μια συνεχής εξέλιξη των αποτελεσμάτων.

Αυτοματοποίηση επαναλαμβανόμενων εργασιών: Η χειρωνακτική ενημέρωση μιας διάστασης ή η μετονομασία μιας επιφάνειας είναι απλή όταν εφαρμόζεται μόνο σε ένα στοιχείο, αλλά καθίσταται κουραστική και χρονοβόρα, όταν εφαρμόζεται σε εκατοντάδες στοιχεία. Με εργαλεία υπολογιστικού σχεδιασμού, συνδεδεμένα με λογισμικό

μοντελοποίησης, ένας σχεδιαστής μπορεί να δημιουργήσει έναν αλγόριθμο, ο οποίος να τροποποιεί ολόκληρο το μοντέλο, σε πραγματικό χρόνο.

Βελτίωση της παραγωγικότητας: Μόλις κωδικοποιηθούν οι διαδικασίες σχεδιασμού για μια επιχείρηση, σε ένα πρόγραμμα, οι σχεδιαστές θα είναι σε θέση να αναθέσουν εργασίες σχεδιασμού σε τρίτους, βελτιώνοντας έτσι την παραγωγικότητα και επιτυγχάνοντας περισσότερα, με λιγότερους πόρους.

Μειρίαση των κινδύνων σχεδίασης: Οι επαναληπτικές διαδικασίες σχεδίασης και τα εύχρηστα εργαλεία οπτικού προγραμματισμού επιτρέπουν στον σχεδιαστή να επιτύχει ποιότητα σχεδίασης πέρα από τις ανθρώπινες δυνατότητες. Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δοκιμή ενός σχεδίου, σε πολλαπλά σενάρια, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο και τις επισφάλειες για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη.

Μείωση του κόστους του έργου: Η ανιαρών, επαναληπτικών και χρονοβόρων διαδικασιών σε εργαλεία υπολογιστικού σχεδιασμού μειώνει το επίπεδο του προσωπικού, που απαιτείται για ένα έργο. Επιπλέον, τα σχέδια που παράγονται αλγοριθμικά θα έχουν λιγότερα σφάλματα, μειώνοντας την πιθανότητα αλλαγών σχεδιασμού πεδίου. Με λιγότερους πόρους και αλλαγές, το κόστος των έργων θα συρρικνωθεί (Ramage, 2022).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> – Διαδικαστικές Τεχνικές

Η βασική ιδιότητα της διαδικαστικής μοντελοποίησης είναι ότι περιγράφει την οντότητα, είτε αυτή είναι γεωμετρία, υφή ή εφέ, βάσει μιας παραγωγικής ακολουθίας εντολών, και όχι ως ένα στατικό μπλοκ δεδομένων. Οι οδηγίες μπορούν στη συνέχεια να κληθούν όταν απαιτείται να δημιουργηθούν συγκεκριμένες υλοποιήσεις (instances) του σχεδίου και η περιγραφή μπορεί να είναι παραμετροποιημένη, ώστε να επιτρέπει τη δημιουργία υλοποιήσεων με ποικίλες χαρακτηριστικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της προσέγγισης αποτελεί η μοντελοποίηση ενός δάσους με μοναδικά δέντρα που δημιουργούνται διαδικαστικά. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαδικαστικές τεχνικές για την παραγωγή ποικίλων οντοτήτων. Μία από τις πιο βασικές τεχνικές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η δημιουργία τρισδιάστατων πρωτοτύπων με τυχαίες παραμέτρους, για παράδειγμα ένα κυβοειδές αντικείμενο με τυχαίο ύψος. Απλοί αλγόριθμοι, που χρησιμοποιούν ψευδοτυχαίες συναρτήσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για τη δημιουργία παραμέτρων, με σκοπό τη χρήση τους στο πλαίσιο πιο πολύπλοκων αλγόριθμων, όπως η φράκταλ μοντελοποίηση ή τα συστήματα L, τα οποία μπορούν να επιτρέπουν τη δημιουργία οργανικών δομών, παρόμοιων με αυτές που εμφανίζονται στη φύση, όπως οι νιφάδες χιονιού και τα δέντρα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά των τεχνικών διαδικαστικού σχεδιασμού.

Χρήση Αφηρημένων Εννοιών: Τα γεωμετρικά δεδομένα και τα δεδομένα υφής δεν προσδιορίζονται με τη συμβατική έννοια, αντίθετα οι λεπτομέρειες κωδικοποιούνται σε έναν αλγόριθμο ή ένα σύνολο των διαδικασιών, που εκτελούνται όταν χρειάζεται. Απαιτούνται ελάχιστες λεπτομέρειες και ο χειριστής μπορεί να ελέγχει τα δεδομένα του μοντέλου εύκολα, χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη εμπειρία ή γνώση της υλοποίησης.

Παραμετρικός έλεγχος: Οι παράμετροι ορίζονται και προσαρμόζονται απευθείας, για να αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη συμπεριφορά ανά διαδικαστική γενιά. Ο προγραμματιστής μπορεί να ορίσει όσα χρήσιμα στοιχεία ελέγχου απαιτούνται για να λειτουργούν αποτελεσματικά οι διαδικασίες, αφήνοντας τον καθορισμό των υπολοίπων στις αλγοριθμικές διαδικασίες. Παραδείγματα βασικών παραμέτρων αποτελούν το ύψος ενός βουνού σε έναν αλγόριθμο δημιουργίας μοντέλων εδάφους ή ο αριθμός των τμημάτων μιας σφαίρας που παράγεται διαδικαστικά.

Ευελιξία: Είναι δυνατό να αποτυπωθεί η ουσία μιας οντότητας χωρίς να προσδιορίζεται ρητά, εντός των ορίων του πραγματικού κόσμου. Οι παράμετροι μπορούν τότε να ποικίλλουν, για να παράγουν ένα ευρύ φάσμα αποτελεσμάτων, που δεν είναι απαραίτητο να περιορίζεται στο αρχικό μοντέλο.

Οι διαδικαστικές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στη δημιουργία γραφικών μοντέλων πολυάριθμων πολύπλοκων φαινομένων. Οι υφές, η γεωμετρία ή τα εφέ που παράγονται σε διαδικαστικούς αλγόριθμους δεν είναι σταθερά από άποψη ανάλυσης ή αριθμού πολυγώνων. Οι διαδικαστικές τεχνικές είναι ως εκ τούτου, εγγενώς πιο ευέλικτες από πλευράς παραγόμενης ανάλυσης και πολυπλοκότητας. Αυτή η δυνατότητα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα γραφικά υπολογιστών. Για παράδειγμα, το επίπεδο λεπτομέρειας (Level Of Detail - LOD) είναι σημαντικό σε οποιοδήποτε σύστημα τρισδιάστατης απεικόνισης και είναι απαραίτητο για εφαρμογές απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο. Η ιδέα πίσω από το LOD είναι να χρησιμοποιείς πιο απλές εκδόσεις μιας οντότητας, εάν συνεισφέρει λιγότερο στην τελική απόδοση της εικόνας. Έτσι για ένα αντικείμενο που καταλαμβάνει μόνο 4 pixel στην τελική εικόνα, 10.000 πολύγωνα δεν απαιτούνται και μια βασική αναπαράσταση, με χρήση 10 πολύγωνων θα ήταν αρκετή. Η πολυ-αναλυτική (multi-resolution) φύση των διαδικαστικών τεχνικών επιτρέπει την αυτόματη δημιουργία μοντέλων με πολλαπλά επίπεδα λεπτομέρειας.

Συνοπτικές περιγραφές για αντικείμενα, που δημιουργούνται είναι δυνατές και μπορεί συχνά να εκφράζονται με όρους μερικών απλών παραμέτρων. Αυτές οι μικρές περιγραφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για τη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων λεπτομερών υφών και γεωμετρίας, ακόμη και εφέ, τεχνική γνώση και ως ενίσχυση δεδομένων (data amplification), η οποία παρέχει στους προγραμματιστές τη δυνατότητα δημιουργίας ενός ολόκληρου εικονικού κόσμου που μπορεί να διανέμεται εύκολα ακόμα και μέσω δικτύων μικρού εύρους και ταχύτητας. Η ευελιξία και ο έλεγχος που παρέχουν οι διαδικαστικές τεχνικές, αυξάνουν επίσης την καλλιτεχνική ελευθερία και νέες δυνατότητες για πειραματισμό. Νέα οπτικά εφέ και καινοτόμα από πλευράς μορφής αντικείμενα μπορούν να δημιουργηθούν, πειραματίζοντας με τιμές παραμέτρων που υπερβαίνουν τα κανονικά όρια. Συνήθως οι διαδικαστικοί αλγόριθμοι υλοποιούνται σε λογισμικό. όσο πρόσφατη κι αν είναι η πρόοδος στο υλικό γραφικών, έχει ανοίξει τη δυνατότητα απευθείας εκτέλεσης. Για παράδειγμα, πολύπλοκες διαδικαστικές τεχνικές όπως οι ογκομετρικές υφές που προηγουμένως ήταν αδύνατο να εκτελεστούν σε

πραγματικό χρόνο μπορούν τώρα να πραγματοποιηθούν με αυτόν τον τρόπο. Παρακάτω περιγράφεται μια σειρά θεμελιωδών διαδικαστικών τεχνικών και αλγόριθμων, που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία, στο πεδίο των γραφικών υπολογιστή (George Kelly, 2022).

## 2.1 Γενετική Μοντελοποίηση

Η γενετική μοντελοποίηση έχει αναπτυχθεί με σκοπό τη δημιουργία εξαιρετικά σύνθετων αντικειμένων, με βάση ένα σύνολο τυπικών κατασκευαστικών κανόνων. Με αυτό τον τρόπο, ο σχεδιασμός ενός σχήματος μεταφράζεται σε σχεδιασμό κανόνων για την υλοποίησή του. Αυτή η προσέγγιση είναι γενική και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε τομέα και σε οποιαδήποτε αναπαράσταση σχήματος, που προκύπτει από ένα σύνολο μορφοποιητικών συναρτήσεων. Ένα από τα πεδία εφαρμογής των τεχνικών γενετικής μοντελοποίησης είναι αυτό της αρχιτεκτονικής όπου, τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί μια σειρά καινοτόμων εργαλείων σχεδιασμού που υποστηρίζουν τον γενετικό σχεδιασμό. Το σχετικό λογισμικό μοντελοποίησης επεκτείνει σημαντικά τις σχεδιαστικές ικανότητες των αρχιτεκτόνων αξιοποιώντας την υπολογιστική ισχύ με νέους τρόπους.

Όπως προαναφέρθηκε, η τεχνική της γενετικής μοντελοποίησης είναι αρκετά γενική, και μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες εφαρμογές σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή και τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Η γενετική μοντελοποίηση χρησιμοποιεί καθιερωμένες μεθοδολογίες τρισδιάστατης μοντελοποίησης και προγραμματισμού, γεγονός που μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα από πλευράς χρηστικότητας και παραγωγικότητας. Η ανάγκη εκμάθησης και χρήσης μιας γλώσσας προγραμματισμού αποτελεί σημαντικό περιορισμό ειδικά για εφαρμογές όπου οι επιστήμονες δεν είναι εξοικειωμένοι με τέτοια εργαλεία, όπως η αρχαιολογία και η μελέτη της της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού επηρεάζει σημαντικά το βαθμό ευκολίας χρήσης ενός λογισμικού διαδικαστικής μοντελοποίησης.

Στο πεδίο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και για την εφαρμογή των εννοιών, των γραμματικών σχημάτων, είναι απαραίτητο να ένα σύστημα γενετικής μοντελοποίησης των αρχιτεκτονικών μοντέλων. Αυτό το σύστημα αποτελεί συνδυασμό ενός συστήματος χωρικής γραμματικής (split grammar) για τον έλεγχο του χωρικού σχεδιασμού και μιας

γραμματικής ελέγχου, η οποία καθορίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των επιμέρους σχεδιαστικών ιδεών (για παράδειγμα, ορίζει διαφορετικά χαρακτηριστικά για τον πρώτο όροφο ενός κτιρίου).

Γραμματικές σχήματος (shape grammar) με επίγνωση παραμόρφωσης, πρόκειται για τα παραγωγικά μοντέλα που βασίζονται σε συστήματα γραμματικής σχήματος και διαχωρισμού και συχνά εμφανίζουν επίπεδες δομές. Αυτό συμβαίνει, επειδή αυτά τα συστήματα βασίζονται σε επίπεδα πρωτόγονα και επίπεδες διασπάσεις. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά γεωμετρικά εργαλεία διαθέσιμα στο λογισμικό μοντελοποίησης για τη μετατροπή των επιπέδων αντικειμένων σε καμπύλα, όπως είναι η παραμόρφωση ελεύθερης μορφής.

Μια δυνατότητα να περιγραφεί ένα σχήμα, πραγματοποιείται από το παράδειγμα της γενετικής μοντελοποίησης. Η βασική ιδέα είναι να κωδικοποιηθεί ένα σχήμα με μια ακολουθία πράξεων που δημιουργούν σχήμα, και όχι μόνο με μια λίστα γεωμετρικών αρχέγονων, χαμηλού επιπέδου. Στην πρακτική του συνέπεια, κάθε σχήμα πρέπει να αντιπροσωπεύεται από ένα πρόγραμμα, δηλαδή, κωδικοποιημένο σε κάποια μορφή γλώσσας προγραμματισμού, γραμματική σχήματος (γλώσσα μοντελοποίησης ή σενάριο μοντελοποίησης). Η δημιουργία των σημασιολογικών πληροφοριών, για ένα αντικείμενο μπορεί να γίνει χειροκίνητα (από έναν ειδικό τομέα) ή αυτόματα (χρησιμοποιώντας μια γενετική περιγραφή).

Χρησιμοποιώντας τεχνικές γενετικής μοντελοποίησης εκτελείται μια βελτιστοποίηση, εντός ενός χώρου διαμόρφωσης, μιας ολοκληρωμένης οικογένειας κτιρίων. Η ρουτίνα αριθμητικής βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται στο "Generative Modelling και Numerical Optimization για Energy-Efficient Buildings" πρέπει να αντιμετωπίσει διάφορα προβλήματα που εμφανίζονται σε πολλές πολύπλοκες, μη γραμμικές εργασίες βελτιστοποίησης: την επιλογή των αρχικών τιμών και το πρόβλημα των τοπικών ελάχιστων. Και τα δύο προβλήματα αντιμετωπίζονται, με μια τροποποιημένη μέθοδο διαφορικής εξέλιξης. (Ulrich Krispel, 2014)

Στα περισσότερα συστήματα CAD, οι γεωμετρικές οντότητες είναι τα εστιασμένα αντικείμενα για λειτουργίες. Οι διαδικαστικές πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο οι σχεδιαστές κατασκευάζουν τα μοντέλα τους διατηρούνται απλώς στο πιο πρωτόγονο επίπεδο, για την υλοποίηση της λειτουργίας αναίρεσης/επαναφοράς.



Δύσκολα παρέχονται εργαλεία, για τον χειρισμό της διαδικασίας μοντελοποίησης. Με τη γενετική μοντελοποίηση, οι σχεδιαστές μοντελοποιούν τη διαδικασία που δημιουργεί σχήματα.

Επιπλέον, η γενετική μοντελοποίηση επιτρέπει στους σχεδιαστές, να καταγράφουν και να επαναχρησιμοποιούν τις ψηφιακές πληροφορίες, που διαφορετικά θα χάνονταν, αφού τα εργαλεία CAD δεν μπορούν να αναγνωρίσουν και να χειριστούν τη διαδικασία παραγωγής των σχημάτων. Οι χαμένες πληροφορίες θα μπορούσαν να ήταν χρήσιμες, για την αποκάλυψη της διαδικαστικής συμμετρίας, με σκοπό τη δημιουργία πολύπλοκων μορφών και τη μείωση του κόστους λειτουργίας σχεδιασμού και επικοινωνίας. Εικάζεται ότι η παραγωγική μοντελοποίηση μπορεί να διευκολύνει την ενσωμάτωση γνώσης, στα αρχικά στάδια σχεδιασμού. Εμφανίζονται και συζητούνται περιπτώσεις αρχιτεκτονικού σχεδιασμού που χρησιμοποιούν γενετική μοντελοποίηση, για την ενσωμάτωση της γνώσης του τομέα της δομής και της κατασκευής, ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατασκευασιμότητας. (Shih, 2014)

## 2.2 L-Συστήματα

Τα L-συστήματα (L-systems) ή συστήματα Lindenmayer βασίζονται ένα είδος τυπικής γραμματικής, στην οποία χρησιμοποιούνται ένα αρχικό αξίωμα και μια λίστα κανόνων παραγωγής, για να ξαναγραφτεί σταδιακά μια αλυσίδα χαρακτήρων, που αντιπροσωπεύει την τελική μορφή του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, ένα L-σύστημά μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα πεπερασμένο σύνολο χαρακτήρων στις αλυσίδες του, που ονομάζεται «αλφάβητο» (π.χ. οι χαρακτήρες X, T, [, ], -, +). Βάση για τη μοντελοποίηση αποτελεί μια αρχική αλυσίδα, που ονομάζεται "αξίωμα", ας πούμε ότι είναι X, η οποία αναπτύσσεται εφαρμόζοντας ένα ή περισσότερους «κανόνες παραγωγής» που καθορίζουν τους δυνατούς τρόπους μετασχηματισμού κάθε συγκεκριμένου χαρακτήρα. Αυτοί οι κανόνες εφαρμόζονται μόνο στους χαρακτήρες του σετ, από τους οποίους μπορούν να παραχθούν νέοι. Εάν ένα σύμβολο δεν συσχετίζεται με κανένα κανόνα, ορίζεται ως «σταθερά» (ή «τερματικό») και αφήνεται ως έχει στην αλυσίδα. Οι κανόνες εφαρμόζονται για ένα συγκεκριμένο αριθμό (N) επαναλήψεων ή βημάτων, κατά τα οποία το σύστημα εφαρμόζει στην τρέχουσα αλυσίδα όλους τους κανόνες ταυτόχρονα, και

επομένως αντικαθιστά ορισμένους χαρακτήρες με άλλους, αφήνοντας τους τερματικούς χαρακτήρες ανέπαφους. Με αυτό τον τρόπο, το L-σύστημα και η σχετική αλυσίδα χαρακτήρων εξελίσσεται με κάθε νέα επανάληψη. (Foundation, 2021)

Τα L-συστήματα αναπτύχθηκαν για τη μοντελοποίηση της μορφής βιολογικών συστημάτων, και έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στη μοντελοποίηση φυτών καθώς και φράκταλ δομών. Στην πορεία αναπτύχθηκε η ιδέα των παραμετρικών συστημάτων L στα οποία αριθμητικές παράμετροι συσχετίζονται με σύμβολα του L-συστήματος, προκειμένου να παραχθούν μορφές με διαφορετικά χαρακτηριστικά (T. Ullrich, 2010).

Γενικά, τα L-συστήματα είναι μια ιδιαίτερα αποτελεσματική διαδικαστική τεχνική, καθώς επιτρέπουν τον καθορισμό πολύπλοκων μοντέλων και οργανικών δομών, των οποίων η πολυπλοκότητα μπορεί να ελεγχθεί μέσω παραμέτρων όπως ο αριθμός επαναλήψεων. Οι σχετικοί αλγόριθμοι είναι εύρωστοι, διαισθητικά ξεκάθαροι, και εκ φύσεως επεκτάσιμοι κατά τρόπο παρόμοιο με άλλες τυπικές γραμματικές (George Kelly, 2022).

## 2.3 Φράκταλ

Μία από τις πιο σημαντικές πτυχές κάθε συστήματος γραφικών είναι ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιούνται τα αντικείμενα. Τα περισσότερα τεχνητά (κατασκευασμένα) αντικείμενα είναι αρκετά απλά στην περιγραφή, κυρίως επειδή κατά το σχεδιασμό τους επιδιώκεται να είναι εύκολα «κατασκευάσιμα». Ωστόσο, τα αντικείμενα στη φύση (τα ορεινά εδάφη, τα φυτά και τα σύννεφα) είναι συχνά πολύ πιο περίπλοκα. Αυτά τα αντικείμενα χαρακτηρίζονται από μια μη ομαλή, χαοτική συμπεριφορά. Το μαθηματικό πεδίο μελέτης των φράκταλ (fractal) δημιουργήθηκε σε μεγάλο βαθμό, για την καλύτερη κατανόηση αυτών των πολύπλοκων δομών. Μια από τις πρώτες έρευνες που οδήγησε στην ανάπτυξη του πεδίου αφορούσε στη μέτρηση του μήκους της ακτογραμμής της Σκωτίας το οποίο φαινόταν να αυξάνει όσο μειωνόταν το μήκος των στοιχειωδών τμημάτων που χρησιμοποιούνταν για την εκτίμησή του. Ο Benoît Mandelbrot, θεωρείται ο «πατέρας των φράκταλ», καθώς επινόησε τον σχετικό όρο το 1975 με βάση το λατινικό fractus, που σημαίνει σπασμένο. Βασικό χαρακτηριστικό των φράκταλ δομών αποτελεί η αυτό-ομοιότητα (self-similarity), η οποία συνεπάγεται ότι τυπικές μορφές ή

χαρακτηριστικά του αντικειμένου τείνουν να επανεμφανίζονται σε διάφορα σημεία του αντικειμένου και υπό διαφορετικές κλίμακες. Στη φύση, η αυτό-ομοιότητα του εαυτού δεν παρατηρείται με απόλυτη ακρίβεια, αλλά έχει ελαφρώς στοχαστικό χαρακτήρα, καθώς μορφολογικά χαρακτηριστικά σε διαφορετικά επίπεδα/κλίμακες παρουσιάζουν στατιστικά παρόμοια μορφή (Eastman, 2018). Μαθηματικά, τα φράκταλ διαθέτουν άπειρο βαθμό λεπτομέρειας και έτσι για κάθε δεδομένο φράκταλ υπάρχει η δυνατότητα άπειρης εστίασης σε επιμέρους λεπτομέρειες.

Όπως σε κάθε διαδικαστική τεχνική, η παραγωγή ενός φράκταλ σχήματος καθορίζεται από έναν αλγόριθμο (George Kelly, 2022). Στην περίπτωση των φράκταλ, οι αλγόριθμοι είναι επαναληπτικοί και οι διαδοχικές επαναλήψεις παράγουν πιο λεπτομερείς εκδόσεις του βασικού σχήματος. Το παράδειγμα της νιφάδας χιονιού VOC δείχνει την εξέλιξη του αρχικού σχήματος μετά από τέσσερις επαναλήψεις (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Οι πρώτες τέσσερις επαναλήψεις της νιφάδας χιονιού Koch.

Η αυτο-ομοιότητα επιτυγχάνεται με τη δημιουργία των ίδιων σχημάτων ή μοτίβων, σε μικρότερες κλίμακες. Δεν υπάρχει θεωρητικό όριο, στον αριθμό των επαναλήψεων, και επομένως υπάρχουν άπειρα επίπεδα λεπτομέρειας μέσα στο σχήμα. Η χειρωνακτική σχεδίαση φράκταλ δομών είναι κουραστική και περιορισμένη και ως εκ τούτου αναπτύχθηκαν σχετικοί υπολογιστικοί αλγόριθμοι παραγωγής και απεικόνισης φράκταλ δομών. Ο ίδιος ο Mandelbrot επινόησε την ιδέα των φράκταλ, ενώ εργαζόταν στην IBM.

Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους παραγωγής φράκταλ δομών μπορούν να παραχθεί ένα ευρύ φάσμα φυσικών δομών, από απλά φυτά μέχρι ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Οι αλγόριθμοι φράκταλ είναι αποτελεσματικοί καθώς περιγράφουν έμμεσα και αφαιρετικά τη μορφολογική πολυπλοκότητα, επιτρέποντας έτσι την παραγωγή της σε διάφορα επίπεδα λεπτομέρειας. Μέσω της επαναληπτικής εφαρμογή απλών σχέσεων και της ενίσχυσης δεδομένων, μπορούν συνεπώς να παραχθούν σύνθετα μοντέλα. Η ιδιότητα της αυτό-ομοιότητας περιορίζει, ωστόσο, το πεδίο εφαρμογής αυτών των τεχνικών καθώς τα υπό σχεδιασμό μπορεί να μην πρέπει να διαθέτουν αυτή την ιδιότητα. Στην περίπτωση

αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθούν πιο ευέλικτες τεχνικές, όπως η εφαρμογή τυπικών γραμματικών ανάπτυξης μορφών ή τα L-συστήματα (George Kelly, 2022).

## 2.4 Θόρυβος Perlin

Η τεχνική του θορύβου Perlin (Perlin Noise) αναπτύχθηκε, αρχικά, για να βοηθήσει στην απόδοση πιο «φυσικής» υφής σε ψηφιακά μοντέλα. Η τεχνική αναπτύχθηκε από τον Ken Perlin για χρήση στην ταινία *Tron* το 1982. Ο θόρυβος παράγεται από μια ψευδοτυχαία συνάρτηση που παράγει μια σειρά τιμών που στη συνέχεια μετατρέπεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της παρεμβολής (interpolation) σε ένα συνεκτικό σύνολο. Διάφορα στρώματα αυτού του συνεκτικού συνόλου, συντίθεται στη συνέχεια για να επικαλύψουν τα μοντέλα με μια "φυσικής εμφάνισης" υφή με φράκταλ λεπτομέρειες.

Μια συνάρτηση θορύβου δημιουργεί τυχαία δεδομένα. Κάθε φορά λοιπόν που μια συνάρτηση καλείται, επιστρέφεται νέος αριθμός. Αυτό είναι χρήσιμο, ωστόσο δεν επιτρέπει τον έλεγχο των αποτελεσμάτων που επιτεύχθηκαν. Για να αποκτηθεί παραμετρικός έλεγχος από τον θόρυβο γεννήτρια, χρησιμοποιείται μια τυχαία συνάρτηση τυχαίων αριθμών μέσω σποράς (random seed function).

Η μέθοδος της παρεμβολής χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό μιας συνάρτησης, που προσεγγίζει τα σημεία που έχουν παραχθεί από τη γεννήτρια θορύβου. Έτσι από ένα πεπερασμένο σύνολο σημείων μπορεί να προκύψει μία συνάρτηση, που επιτρέπει να δημιουργηθεί ένα άπειρο σύνολο σημείων που εμπλουτίζει το αρχικό σύνολο. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι παρεμβολής που διαφέρουν ως προς τον αριθμό των σημείων εισόδου, την ακρίβεια, την υπολογιστική πολυπλοκότητα και την ομαλότητα των καμπυλών που δημιουργούν.

Τα αποτελέσματα που παράγονται από τη συνάρτηση θορύβου, που καθορίστηκε μέσω παρεμβολής, έχουν κάποια τυχειότητα δεν δείχνουν όμως αρκετά “φυσικά”. Στη φύση,

υπάρχουν πολλά διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας. Για παράδειγμα, σε μια οροσειρά μεγάλα χαρακτηριστικά αποτελούν οι μεγάλες κορυφές και τα κοιλώματα, μεσαίας κλίμακας αποτελούν οι μικρότεροι λόφοι και κορυφές, ενώ μικρές λεπτομέρειες αποτελούν οι ογκόλιθοι και οι πέτρες. Για να επιτευχθεί κάτι αντίστοιχο, συνδυάζονται πολλές υφές θορύβου σε διαφορετικά επίπεδα/κλίμακες με τη μέθοδο της δίνης (turbulence). Το τελικό αποτέλεσμα δείχνει αρκετά πιο “φυσικό” όπως π.χ. το μοντέλο μαρμάρινου βάζου που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Μέσω της μεθόδου Perlin παράχθηκε μια υφή που αναπαριστά πειστικά τις “φλέβες” του μαρμάρου.



Εικόνα 2: Παράδειγμα υφής Perlin.

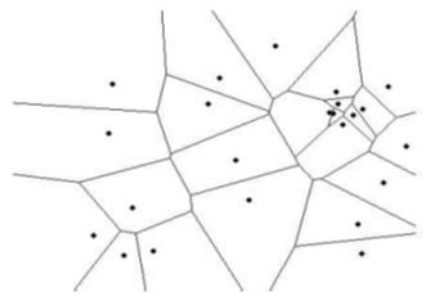
## 2.5 Επίστρωση πλακιδίων

Η μέθοδος της επίστρωσης πλακιδίων (tilling) είναι μια από τις πιο βασικές διαδικαστικές τεχνικές και παραδοσιακά εφαρμόζεται στην ανάπτυξη βιντεοπαιχνιδιών. Χρησιμοποιείται σε πολλά κλασικά παιχνίδια συμπεριλαμβανομένων τίτλων όπως το Sonic, το Mario και το RType. Αρχικά η τοποθέτηση πλακιδίων χρησιμοποιήθηκε με τη δημιουργία μικρών τμημάτων διαστάσεων γραφικών, που θα μπορούσαν να επαναληφθούν στην οθόνη και να συναρμολογηθούν μαζί, για τη δημιουργία του εικονικού κόσμου. Παιχνίδια όπως το Shoot Em Up Construction Kit, το οποίο κυκλοφόρησε το 1987 από την Sensible Software, επέτρεψαν στο χρήστη να κατασκευάσει και να επεξεργαστεί χάρτες παιχνιδιών, χρησιμοποιώντας μια βιβλιοθήκη πλακιδίων. Στην πορεία των χρόνων οι σχετικές τεχνικές εξελίχθηκαν σημαντικά και χρησιμοποιούνται πλέον για τη δημιουργία εξαιρετικά λεπτομερών και ποικίλων υφών από στρώματα βασικών υφών. Παραδείγματα βασικών στρωμάτων υφής αποτελούν πλακίδια απεικόνισης υφής βράχου, γρασιδιού, άμμου και χιονιού. Αυτά τα στρώματα υφής μπορούν να συνδυαστούν με διάφορους βαθμούς επιρροής στην τελική υφή. Αυτή η λύση επιτρέπει σε τεράστιες περιοχές να έχουν υφή με λεπτομέρεια, κάτι που δεν είναι δυνατό χρησιμοποιώντας μια ενιαία υφή υψηλής ανάλυσης (George Kelly, 2022).

## 2.6 Βάση υφής Voronoi

Τα διαγράμματα Voronoi προτάθηκαν ως μέθοδος διαδικαστικής δημιουργίας από τον S. Worley στην εργασία του με τίτλο “A Cellular Texture Basis Function”, στην οποία περιέγραψε έναν αλγόριθμο που χωρίζει το χώρο σε μια τυχαία σειρά κελιών, δημιουργώντας υφές, με κυτταρική/κυψελωτή εμφάνιση (George Kelly, 2022). Η τεχνική επινοήθηκε για να συμπληρώσει υπάρχουσες διαδικαστικές τεχνικές, όπως ο θόρυβος Perlin και παρέχει μια μέθοδο διαδικαστικής δημιουργίας, για κυτταρικές επιφάνειες όπως το δέρμα ή ο φλοιός. Τα διαγράμματα Voronoi έχουν παραδοσιακά χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της χωρικής ανάλυσης, του σχεδιασμού, της ανάλυσης αστικών οικισμών, της γεωλογίας, της ρομποτικής και της οικολογίας.

Ένα διάγραμμα Voronoi αποτελεί διαμερισμό του αντίστοιχου μετρικού χώρου με βάση ένα καθορισμένο διακριτό σύνολο αντικειμένων στο χώρο και τις μεταξύ τους αποστάσεις. Η Εικόνα 3 δείχνει μια περιοχή χωρισμένη σε κελιά κατά γραμμές τα οποία σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας τα σημεία του χάρτη. Κάθε οριακή γραμμή είναι τοποθετημένη σε ίση απόσταση μεταξύ του αντίστοιχου ζεύγους



Εικόνα 3: Voronoi κύτταρα

γειτονικών σημείων. Το διάγραμμα Voronoi, που προκύπτει, είναι αποτέλεσμα της θέσης των αρχικών σημείων. Ένα ευρύ φάσμα κυτταρικών μοτίβων μπορεί να δημιουργηθεί, χρησιμοποιώντας διαφορετικές χωρικές κατανομές σημείων. Στο πλαίσιο της δημιουργίας υφών, ο αλγόριθμος Worley επιτυγχάνει την αποτελεσματική αφαίρεση, για τη δημιουργία κυτταρικών υφών επιφανειών όπως απαιτείται π.χ. για την αναπαράσταση χαρτιού, δέρματος και πλακόστρωτου (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Παραδείγματα εφαρμογής του αλγόριθμου Worley.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> – Μέθοδοι Διαδικαστικού Σχεδιασμού

Στο πεδίο της τρισδιάστατης μοντελοποίησης έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι διαδικαστικού σχεδιασμού, οι οποίες εξελίσσονται συνεχώς καθώς νέα πρότυπα και εφαρμογές αναπτύσσονται. Στην παρούσα φάση μπορούν να διακριθούν τρεις βασικές μέθοδοι διαδικαστικού σχεδιασμού: Ο *αλγοριθμικός σχεδιασμός* (algorithmic design), ο *γενετικός σχεδιασμός* (generative design) και ο *παραμετρικός σχεδιασμός* (parametric design) (Ramage, 2022).

### 3.1 Αλγοριθμικός Σχεδιασμός

Ο αλγοριθμικός σχεδιασμός είναι μια μέθοδος σχεδιασμού, που καθοδηγείται από αλγόριθμους και χρησιμοποιείται συχνά, εναλλακτικά του όρου “υπολογιστικός σχεδιασμός”. Οι σχετικοί αλγόριθμοι βασίζονται σε ένα σύνολο οδηγιών που καθορίζουν τη λύση ενός προβλήματος, που σχετίζεται συνήθως με την εξεύρεση της βέλτιστης μορφής ενός αντικειμένου που καλύπτει συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις. Σε αντίθεση με τον γενετικό σχεδιασμό, στόχος του οποίου είναι η παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων σχεδιαστικών λύσεων για ανάλυση, ο αλγοριθμικός σχεδιασμός εστιάζει στη βελτιστοποίηση μίας λύσης. Αυτό απαιτεί ένα υψηλότερο επίπεδο λεπτομέρειας και ελέγχου σε ό,τι αφορά στους κανόνες βελτιστοποίησης και τις παραμέτρους εισόδου (Ramage, 2022).

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization) αποτελεί μια καθιερωμένη προσέγγιση αλγοριθμικού σχεδιασμού, που λαμβάνει ως εισόδους γεωμετρικούς περιορισμούς και οριακές συνθήκες και βελτιστοποιεί τη κατανομή του υλικού σε ένα αντικείμενο έτσι ώστε η τελική δομή να επιτυγχάνει συγκεκριμένες λειτουργικές επιδόσεις (Nate, 2019). Πρόκειται για μια μέθοδο που ως στόχο έχει την ανάπτυξη βελτιστοποιημένων κατασκευών με ελάχιστη μάζα και μέγιστη ακαμψία, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους σχεδιασμού, όπως τα αναμενόμενα φορτία, το διαθέσιμο χώρο, τα υλικά και το κόστος. Τα κορυφαία εργαλεία βελτιστοποίησης τοπολογίας εμπεριέχουν αλγόριθμους βελτιστοποίησης σχήματος (shape optimization), που λαμβάνουν υπόψη διάφορα κριτήρια και περιορισμούς όπως τα μοτίβα συμμετρίας, την αποφυγή

παραγωγής κοιλοτήτων και γωνιών όπου υπάρχει συγκέντρωση τάσεων, η κατασκευασιμότητα κ.α. (Altair, 2022) (Yosef M. Yoelya, 2018).

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας χρησιμοποιείται ευρέως στο σχεδιασμό εξαρτημάτων για την αεροδιαστημική βιομηχανία και την αυτοκινητοβιομηχανία, τα οποία παράγονται με μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Η δημοφιλία των μεθόδων βελτιστοποίησης τοπολογίας και σχήματος έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια ως αποτέλεσμα της εξέλιξης των υπολογιστικών συστημάτων αλλά και της αυξανόμενης πίεσης για μείωση της κατανάλωσης υλικών και ενέργειας για λόγους βιωσιμότητας και κόστους (Grégoire Allaire, 2020).

Η μέθοδος εφαρμόζεται, επίσης, όλο και περισσότερο στο σχεδιασμό καταναλωτικών προϊόντων, για τα οποία η αισθητική αποτελεί σημαντικό γνώρισμα. Οι δομές που παράγονται με μεθόδους βελτιστοποίησης τοπολογίας έχουν, συνήθως, οργανική εμφάνιση, που δεν είναι συνηθισμένη σε βιομηχανικά προϊόντα και μπορεί κατά συνέπεια να θεωρηθεί ελκυστική για τους καταναλωτές. Για παράδειγμα, η "κοκάλινη καρέκλα" του Ολλανδού σχεδιαστή Joris Laarman, η οποία αποτελεί τμήμα της μόνιμης συλλογής πολλών μουσείων σχεδιασμού και μοντέρνας τέχνης, σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας βελτιστοποίηση τοπολογίας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η αισθητική ελκυστικότητα είναι σε μεγάλο βαθμό συμπτωματική καθώς οι καθιερωμένοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης τοπολογίας δεν αξιολογούν την αισθητική ποιότητα των λύσεων (Shannon Loos, 2022).

Σε σύγκριση με τον παραμετρικό σχεδιασμό, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας και σχήματος είναι πιο γενικές και μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη ποικιλία μορφών (Ananthasuresh, 2008).

### 3.2 Γενετικός Σχεδιασμός

Ο γενετικός σχεδιασμός αποτελεί, ουσιαστικά, μια μέθοδο εξερεύνησης και παραγωγής καλών σχεδιαστικών λύσεων. Οι σχεδιαστές ορίζουν, αρχικά, συγκεκριμένους σχεδιαστικούς στόχους και περιορισμούς, όπως οι λειτουργικές επιδόσεις, οι χωρικές απαιτήσεις, τα υλικά, οι μέθοδοι κατασκευής και οι περιορισμοί κόστους. Στη συνέχεια, το λογισμικό διερευνά όλες τις πιθανές λύσεις που προκύπτουν μέσω μεταθέσεων (permutations) μιας λύσης, αναγνωρίζοντας γρήγορα ένα σύνολο από καλές



εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις. Οι σχεδιαστικές λύσεις εξελίσσονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας κατά την οποία ο αλγόριθμος παράγει και δοκιμάζει νέες λύσεις, και με αυτό τον τρόπο “μαθαίνει” σταδιακά τι λειτουργεί και τι όχι. (autodesk, 2022).

Ουσιαστικά, ο γενετικός σχεδιασμός αξιοποιεί τεχνικές μηχανικής μάθησης, για να μιμηθεί τον εξελικτικό χαρακτήρα των δομών που παρατηρούνται στη φύση. Σε αντίθεση με τη συμβατική προσέγγιση σχεδιασμού, δεν ορίζεται μια βασική σχεδιαστική λύση αλλά το πρόβλημα για τη λύση του οποίου οι σχετικοί αλγόριθμοι παράγουν έγκυρες σχεδιαστικές λύσεις (Akella, 2018). Για παράδειγμα, αν κάποιος επιθυμεί να σχεδιάσει ένα κάθισμα, αντί να σχεδιάσει δύο ή τρεις επιλογές (ίσως 10 αν είναι πραγματικά δημιουργικός), ορίζει τις απαιτήσεις του καθίσματος από πλευράς βάρους, κόστους, αντοχής και υλικών. Στη συνέχεια, ο υπολογιστής παράγει εκατοντάδες, αν όχι χιλιάδες, έγκυρες και εύκολα κατασκευάσιμες σχεδιαστικές επιλογές που πληρούν τα κριτήρια, χρησιμοποιώντας μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης και υπολογιστικής νέφους. Οι σχετικές λύσεις βελτιώνονται σταδιακά μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι να παραχθεί ένα τελικό σύνολο καλών λύσεων, τις οποίες οι σχεδιαστές μπορούν να φιλτράρουν προκειμένου να επιλέξουν εκείνες που ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες τους (Datron, 2022).

Με αυτό τον τρόπο, ο γενετικός σχεδιασμός συνδυάζει τις υπολογιστικές δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης στη δημιουργία και αξιολόγηση εκατοντάδων πιθανών σχεδίων με τη ανθρώπινη διαίσθηση προκειμένου να παραχθούν καινοτόμες αλλά και έγκυρες σχεδιαστικές λύσεις. Η συγκεκριμένη προσέγγιση οδηγεί σε πιο καινοτόμες λύσεις καθώς «σπρώχνει» τους σχεδιαστές προς μη συμβατικές λύσεις, ενώ επιταχύνει παράλληλα τη διαδικασία σχεδιασμού μειώνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων δοκιμών (Ramage, 2022).

### 3.3 Παραμετρικός σχεδιασμός

Στο πεδίο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, ο όρος παραμετρικός συνδέεται με την έννοια του “παραμετρισμού” (parametricism), που προτάθηκε το 2009 από τον Patrick Schumacher, διευθυντή του γραφείου Zaha Hadid Architects. Σύμφωνα με τον

Schumacher ο παραμετρισμός αφορά στην εφαρμογή τεχνικών διαδικαστικής σχεδίασης που εκμεταλλεύονται πλήρως την υπολογιστική ισχύ, προκειμένου να παραχθεί ένα σύγχρονο και *avant-garde* στυλ δομών ελεύθερης μορφής (Archistar, 2022). Πρακτικά, ο παραμετρικός σχεδιασμός αποτελεί μια διαδραστική διαδικασία σχεδιασμού που χρησιμοποιεί ένα σύνολο κανόνων και εισαγόμενων παραμέτρων, για τον έλεγχο της μορφής του ψηφιακού μοντέλου. Οι κανόνες καθορίζουν τη σχέση μεταξύ διαφορετικών στοιχείων σχεδιασμού. Οι παράμετροι είναι τιμές ειδικές για το έργο, όπως διαστάσεις, γωνίες και βαρύτητες, που καθορίζουν το μοντέλο σχεδίασης. Όταν τροποποιείται μια παράμετρος, οι αλγόριθμοι ενημερώνουν αυτόματα όλα τα σχετικά στοιχεία σχεδίασης με βάση τις καθορισμένες σχέσεις. Κατά συνέπεια μπορεί να ειπωθεί ότι ο παραμετρικός σχεδιασμός είναι ένα βήμα πάνω από την παραδοσιακή τρισδιάστατη μοντελοποίηση, όπου ο σχεδιαστής είναι υπεύθυνος για την ενημέρωση κάθε στοιχείου σχεδίασης, ξεχωριστά. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά τον παραμετρικό σχεδιασμό ιδανικό στην περίπτωση σχεδιασμού γεωμετρικά περίπλοκων και ασυνήθιστων δομών. Η ευκολία τροποποίησης ενός παραμετρικού μοντέλου επιτρέπει σε έναν σχεδιαστή να εξερευνήσει πολλές πιθανές σχεδιαστικές επιλογές σχετικά γρήγορα όπως και να επαναχρησιμοποιεί δομικά στοιχεία και τμήματα σε διάφορα έργα.

Ο παραμετρικός σχεδιασμός έχει ήδη ενσωματωθεί στη σχεδιαστική πρακτική μέσω εφαρμογών λογισμικού όπως το Grasshopper, που είναι προ-εγκατεστημένο στο λογισμικό σχεδιασμού Rhinoceros. Ορισμένα πρόσθετα υπολογιστικού σχεδιασμού, όπως το Tekla Structures, έρχονται προ-προγραμματισμένα με μια βιβλιοθήκη κόμβων που παράγουν αλγόριθμους βασισμένους σε καθιερωμένους κώδικες και πρότυπα, εξαλείφοντας την ανάγκη εισαγωγής κανόνων σχεδίασης. Το Tekla Structures δίνει τη δυνατότητα στους σχεδιαστές, να δημιουργούν αλγοριθμικά σύνθετες καμπύλες δομές, μέσω ενός οπτικού συστήματος διεπαφής (Ramage, 2022).

Ως απόρροια των παραπάνω, ο παραμετρικός σχεδιασμός έχει να κάνει με τη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών και δομών, που βασίζονται στη διαδικασία της αλγοριθμικής σκέψης και του υπολογιστικού σχεδιασμού. Παράδειγμα αποτελεί η χρήση μοτίβων Voronoi για την παραγωγή τρισδιάστατων γεωμετρικών δομών. Η εξέλιξη των τεχνολογιών μηχανικής και λέιζερ κοπής, όπως και προσθετικής κατασκευής καθιστούν πιο εφικτή, πλέον, την κατασκευή παραμετρικών σχεδίων σε σχετικά μεγάλη κλίμακα. Ωστόσο, είναι σημαντικό για τον σχεδιαστή να ακολουθήσει μια διαφορετική

σχεδιαστική προσέγγιση που αντιμετωπίζει πιο αφαιρετικά τις σχετικές δομές έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά τα σχετικά εργαλεία.

### 3.4 Σχέση μεταξύ Παραμετρικού, Γενετικού και Αλγοριθμικού Σχεδιασμού

Πώς συσχετίζονται οι τρεις βασικές μέθοδοι διαδικαστικού σχεδιασμού μεταξύ τους; Η απάντηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ερμηνεία και την χρήση κάθε όρου σε διαφορετικά σχεδιαστικά πεδία (αρχιτεκτονικός, μηχανολογικός, βιομηχανικός κ.ο.κ.) αλλά και στο βαθμό εξέλιξης των σχετικών μεθόδων και εργαλείων. Τα βασικά σημεία διαφοροποίησης μπορούν, ωστόσο, να προσδιοριστούν με βάση τον ορισμό και το καθορισμένο στόχο κάθε μεθόδου.

Ο παραμετρικός σχεδιασμός χρησιμοποιεί παραμέτρους και κανόνες για τη δημιουργία μιας εύκολα τροποποιήσιμης σχεδιαστικής λύσης/μορφής. Ο γενετικός σχεδιασμός χρησιμοποιεί αλγοριθμικές διαδικασίες για τη δημιουργία και βελτιστοποίηση ενός συνόλου σχεδιαστικών λύσεων που θα αξιολογηθούν περαιτέρω από τον σχεδιαστή. Τέλος, ο αλγοριθμικός σχεδιασμός χρησιμοποιεί επαναληπτικούς, συνήθως, αλγόριθμους για την παραγωγή και βελτιστοποίηση μιας επιλεγθείσας σχεδιαστικής λύσης.

Γίνεται αντιληπτό πώς υπάρχει κάποια επικάλυψη μεταξύ των όρων, υπάρχουν όμως κάποια βασικά στοιχεία που διαφοροποιούν τις μεθόδους. Η μέθοδος του γενετικού σχεδιασμού διαφοροποιείται λόγω του σχετικά μεγάλου συνόλου των παραγόμενων λύσεων που παράγονται εκμεταλλευόμενη μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης. Από την άλλη, οι μέθοδοι του παραμετρικού σχεδιασμού και του αλγοριθμικού σχεδιασμού εστιάζουν στην μελέτη μίας ή σχετικά λίγων λύσεων. Στον παραμετρικό σχεδιασμό ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ευκολία μοντελοποίησης και τροποποίησης πολύπλοκων γεωμετρικά μορφών, χωρίς να εξετάζεται ιδιαίτερα η λειτουργική συμπεριφορά. Στον αλγοριθμικό σχεδιασμό, αντίθετα, δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση ενός σχεδίου που θα καλύπτει συγκεκριμένα κριτήρια και περιορισμούς, λειτουργικότητας και κόστους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> – Λογισμικά Τρισδιάστατης Διαδικαστικής Μοντελοποίησης**

Το λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης είναι ένας τύπος λογισμικού γραφικών υπολογιστή, που επιτρέπει το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την παραγωγή τρισδιάστατων γραφικών και κινούμενων εικόνων. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται μερικά από τα πιο σύγχρονα λογισμικά τρισδιάστατης μοντελοποίησης που διαθέτουν δυνατότητες διαδικαστικού σχεδιασμού.

### **4.1 Λογισμικό Fusion 360**

Το λογισμικό Fusion 360 της Autodesk συνδυάζει εφαρμογές σχεδιασμού (CAD) και κατεργασιών (CAM) σε ένα ενιαίο, καλά ενσωματωμένο λογισμικό. Περιλαμβάνει όλα τα εργαλεία, που χρειάζονται για τη μεταφορά δεδομένων από το σχεδιασμό στην κατασκευή, καλύπτοντας όλες τις φάσεις του σχεδιασμού, από την αρχική σύλληψη της ιδέας μέχρι το τελικό προϊόν. Το συγκεκριμένο λογισμικό διαθέτει, επίσης, έναν ευρύ κατάλογο μεταφραστών δεδομένων, για 50 διαφορετικούς τύπους αρχείων, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί εύκολα να εισαχθούν αρχεία από άλλες εφαρμογές και ελεύθερα προσβάσιμες βιβλιοθήκες τρισδιάστατων μοντέλων, προς περαιτέρω επεξεργασία.

Πέρα από τα παραπάνω, το συγκεκριμένο λογισμικό διαθέτει δυνατότητες γενετικού σχεδιασμού. Η εγκατάσταση και διαμόρφωση πραγματοποιούνται σε τοπικό επίπεδο, όπως και ο ορισμός των παραμέτρων του υπό μελέτη σχεδιαστικού προβλήματος. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε επίπεδο νέφους όπου μια σειρά διακομιστών επιτρέπουν την ταχεία ανάλυση των δεδομένων και την παραγωγή των σχετικών λύσεων (Autodesk, 2022).

## 4.2 Λογισμικό Blender

Το Blender είναι ένα δωρεάν και ανοιχτού κώδικα λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης, που περιλαμβάνει ένα ευρύ σύνολο εργαλείων 3D γραφικών. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία ταινιών κινουμένων σχεδίων, οπτικών εφέ, ψηφιακών έργων τέχνης, διαδραστικών 3D εφαρμογών, εικονικής πραγματικότητας και παλαιότερα, βιντεοπαιχνιδιών. Το συγκεκριμένο λογισμικό δεν διαθέτει στη βασική του διαμόρφωση, εργαλεία παραμετρικά σχεδιασμού, υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα παραγωγής κάποιων παραμετρικών μορφών με βάση υφιστάμενα εργαλεία και την εγκατάσταση σχετικών πρόσθετων (add-on) (Wikipedia, 2022).

## 4.3 Λογισμικό Houdini

Το Houdini είναι ένα λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης, που χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάπτυξη μοντέλων για κινούμενα σχέδια. Το λογισμικό αυτό έχει χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη μερικών από τις πιο εντυπωσιακές παραγωγών του Χόλυγουντ, όπως το Frozen της Disney. Η ροή εργασίας που βασίζεται σε κόμβους (nodes) παρέχει μια απλή επισκόπηση περίπλοκων σκηνών, διευκολύνοντας τις αλλαγές και την εφαρμογή τους σε διάφορα επίπεδα. Τα εργαλεία διαδικαστικής μοντελοποίησης δεν απαιτούν ιδιαίτερους υπολογιστικούς πόρους και ακολουθούν με μεγάλη συνέπεια τους χωρικούς περιορισμούς και τους κανόνες που θέτει ο χρήστης. Το συγκεκριμένο λογισμικό επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, συνεργάζεται όμως καλά και με άλλα δημοφιλή προγράμματα 3D σχεδίασης, όπως τα 3ds Max, Cinema 4D και Maya, μέσω του υποσυστήματος Houdini Engine. Το Houdini είναι, επίσης, διαθέσιμο μέσω αδειών χρήσης Indie και δωρεάν εκμάθησης, δεν είναι παρέχεται όμως δωρεάν για εμπορική χρήση, όπως το Blender, το οποίο βέβαια δεν διαθέτει τις ικανότητες προσομοίωσης του Houdini. (All3DP, 2022)

## 4.4 Λογισμικό Grasshopper

Το Grasshopper είναι ένα πρωτοποριακό εργαλείο παραμετρικής μοντελοποίησης, που συνεργάζεται με το λογισμικό σχεδιασμού Rhino ως πρόσθετο, και επιτρέπει έναν ισχυρό και αποτελεσματικό νέο τρόπο σχεδίασης. Ο ορισμός των παραμέτρων και κανόνων γίνεται μέσω ενός συστήματος οπτικού προγραμματισμού που επιτρέπει τη μεταφορά και την τοποθέτηση στοιχείων σε έναν καμβά. Το οπτικό περιβάλλον προγραμματισμού βοηθά να δημιουργηθούν και να διερευνηθούν σχεδιαστικές λύσεις, με διαισθητικό τρόπο και χωρίς να χρειάζεται η εκμάθηση κώδικα (Simplyrhino, 2022).

Το Grasshopper 3D δημιουργήθηκε με σκοπό να επιτρέψει τη μοντελοποίηση πολύπλοκων δομών που δεν είναι μπορούν να δημιουργηθούν εύκολα χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες λειτουργίες του Rhino 3D (Rhino3d, 2022). Το Rhino 3D αποτελεί ένα αρκετά δημοφιλές εργαλείο στον χώρο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού καθώς παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων καμπυλών και επιφανειών ελεύθερης μορφής. Το συγκεκριμένο λογισμικό, ωστόσο, παρουσίαζε εξαρχής ορισμένα μειονεκτήματα, σε ό,τι αφορά στη μοντελοποίηση πολύπλοκων δομών με βάση συγκεκριμένα δομικά στοιχεία. Για να επιλύσουν το συγκεκριμένο πρόβλημα οι David Rutten και Robert McNeel ανέπτυξαν το πρόσθετο Grasshopper, που χρησιμοποιεί το “Ιστορικό” ενός μοντέλου για να διευκολύνει τη διερεύνηση της μορφής και τις σχεδιαστικές αλλαγές, ενθυμούμενο τις αρχικές εισόδους και τις σχέσεις μεταξύ αυτών.

Επί του παρόντος, το Grasshopper 3D χρησιμοποιεί μια γλώσσα οπτικού προγραμματισμού (Visual Programming Language - VPL) για να χειριστεί διαφορετικά στοιχεία σε έναν καμβά. Η κύρια έξοδος του Grasshopper είναι η τρισδιάστατη γεωμετρία. Χρησιμοποιεί επίσης αριθμητικούς, οπτικούς, κειμενικούς και οπτικοακουστικούς αλγόριθμους, για τη δημιουργία παραμετρικών μοντέλων και γενετικής τέχνης. Ο διαισθητικός τρόπος προγραμματισμού, βοηθά τους σχεδιαστές να πειραματιστούν με γεωμετρίες που είναι καινοτόμες και ενδιαφέρουσες, χωρίς να χρειάζεται να έχουν την τεχνογνωσία του συστήματος προγραμματισμού (Sawantt, Saili, 2021).

Μερικά από τα πλεονεκτήματα που καθιστούν το Grasshopper ιδανικό για τη μελέτη περίπτωσης που θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια είναι τα εξής (Sawantt, Saili, 2021):

Αυτοματισμός: Το Grasshopper διευκολύνει σημαντικά τη διαδικασία σχεδίασης πολλών όμοιων ή παρόμοιων στοιχείων, καθώς σε αντίθεση με άλλα λογισμικά οι σχετικές λειτουργίες εκτελούνται αυτόματα και όχι μέσω επαναλαμβανόμενων εργασιών αντιγραφής-επικόλλησης. Όντας ένα εξαρχής αυτοματοποιημένο λογισμικό, επιτρέπει τη δημιουργία μιας πιο ομαλής ροής εργασίας, που επιτρέπει μια ταχύτερη διαδικασία για επαναλαμβανόμενα στοιχεία σχεδίασης. Τα παραγόμενα δεδομένα μπορούν επίσης να αποθηκευθούν και να χρησιμοποιηθούν σε άλλα σχέδια.

Επαναλαμβανόμενες εργασίες: Υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας εξειδικευμένων λειτουργιών με ποικίλες εισόδους και εξόδους, για την εκτέλεση διαφόρων επαναλαμβανόμενων εργασιών, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο σχεδίασης.

Διαθεσιμότητα Ενοτήτων: Πλήθος προγραμματιστικών ενοτήτων (modules) που έχουν αναπτυχθεί από σχεδιαστές είναι ελεύθερα διαθέσιμο και εύκολα ενσωματώσιμο στο συγκεκριμένο πρόγραμμα. Αυτό επιτρέπει τη γρήγορη εφαρμογή υφιστάμενων λύσεων και ενισχύει τη δημιουργία ενός πνεύματος συνεργασίας, μεταξύ των χρηστών του προγράμματος σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ταχύτητα: Η τροποποίηση ενός παραμετρικού μοντέλου απαιτεί σχετικά λιγότερο χρόνο, καθώς συνδέεται συνήθως με την αλλαγή τιμών σε μεταβλητές ή παραμέτρους. Αυτό επιτρέπει τη μελέτη πολλών σχεδιαστικών λύσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Κοινότητα χρηστών: Το Grasshopper διαθέτει μια ευρεία και ενεργή κοινότητα χρηστών, που μπορούν να προσφέρουν βοήθεια και γνώσεις σε θέματα χρήσης του λογισμικού και επίλυσης πρακτικών προβλημάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> – Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Χρησιμοποιώντας μεθόδους διαδικαστικής μοντελοποίησης και σχεδιασμού παράγονται μορφές υψηλής σχετικά πολυπλοκότητας, οι οποίες είναι δύσκολο να κατασκευασθούν χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους παραγωγής όπως οι κατεργασίες κοπής και χύτευσης. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, έχει αναπτυχθεί μια νέα οικογένεια κατασκευαστικών μεθόδων που επιτρέπει την κατασκευή γεωμετρικά πολύπλοκων αντικειμένων, αυτή της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης (3D Printing) ή Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing). Η κατασκευή ενός 3D εκτυπωμένου αντικειμένου επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας και πρόσθεσης διαδοχικών στρωμάτων υλικού, κάθε ένα εκ των οποίων μπορεί να θεωρηθεί, ως μια λεπτή κομμένη διατομή του αντικειμένου. Πέρα της γεωμετρικής πολυπλοκότητας ένα ακόμα πλεονέκτημα της 3D εκτύπωσης σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους (ειδικά τις κατεργασίες κοπής) είναι η καλύτερη εκμετάλλευση του υλικού, καθώς υπάρχουν ελάχιστα απόβλητα, όπως και η σχετικά υψηλή ταχύτητα παραγωγής. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου 3D εκτύπωσης που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη περίπτωσης που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

### 5.1 3D εκτύπωση με εξώθηση υλικού

Η τεχνολογία της εξώθησης υλικού (Material Extrusion) τεχνολογία είναι μια από τις δημοφιλέστερες τεχνολογίες 3D εκτύπωσης. Κατά κανόνα, ένας 3D εκτυπωτής εξώθησης υλικού περιλαμβάνει έναν εξωθητή (extruder), ένα ακροφύσιο (nozzle), έναν θάλαμο εκτύπωσης (printing chamber) και ένα σύστημα τροφοδοσίας νήματος (filament feeder). Μέσω του συστήματος τροφοδοσίας, το υλικό (κάποιος τύπος θερμοπλαστικού, συνήθως) οδηγείται στον εξωθητή, όπου τήκεται και εξωθείται μέσω του ακροφυσίου, στην πλάκα/πλατφόρμα κατασκευής του θαλάμου εκτύπωσης. Μόλις αποθεθεί, το υλικό ψύχεται και στερεοποιείται, και με αυτό τον τρόπο συγκολλάται στην πλατφόρμα ή προηγούμενα στρώματα. Ο χώρος εκτύπωσης μπορεί να είναι ανοικτός, αναλόγως όμως του υλικού μπορεί να απαιτείται κλειστός θερμαινόμενος θάλαμος για μείωση των παρατηρούμενων παραμορφώσεων και βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού αντικειμένου (Carolo, 2022).



Η κατασκευή σύνθετων δομών απαιτεί συχνά και την κατασκευή μια υποστηρικτικής δομής (support structure) που εξασφαλίζει τη σταθερότητα του αντικειμένου κατά την κατασκευή και την εναπόθεση στρώσεων που εκτείνονται πέρα από τις αμέσως προηγούμενες (overhangs). Η αφαίρεση των υλικών της δομής στήριξης μπορεί να είναι δύσκολη, επιδιώκεται επομένως συχνά να σχεδιαστούν εξαρτήματα, με τέτοιο τρόπο, που ελαχιστοποιεί την ανάγκη για δομές στήριξης. Το υλικό της δομής στήριξης μπορεί να είναι ίδιο με αυτό του τελικού αντικειμένου, διατίθενται όμως και υλικά υποστήριξης που διαλύονται σε ειδικό διάλυμα, ειδικά για εκτυπωτές ανώτερων επιδόσεων.

Σημαντικά χαρακτηριστικά ενός εκτυπωτή αποτελούν το μέγεθος του χώρου εκτύπωσης και το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει το πάχος των στρώσεων. Το τυπικό μέγεθος του χώρου εκτύπωσης ενός επιτραπέζιου (οικιακού) 3D εκτυπωτή είναι 200 x 200 x 200 mm, διατίθενται ωστόσο και βιομηχανικοί εκτυπωτές με μέγεθος που μπορεί να φτάσει 1.000 x 1.000 x 1.000 mm. Εάν προτιμάται η χρήση επιτραπέζιου μηχανήματος, για την εκτύπωση ενός εξαρτήματος, ένα μεγάλο μοντέλο μπορεί να χωριστεί σε μικρότερα μέρη τα οποία στη συνέχεια συναρμολογούνται. Το τυπικό ύψος στρώσης ενός επιτραπέζιου εκτυπωτή ΜΕ κυμαίνεται μεταξύ 0,05 και 0,4 mm, ενώ μεγαλύτεροι εκτυπωτές επιτρέπουν συνήθως και μεγαλύτερα πάχη στρώσεων της τάξης των 0,8-1 mm. Η εκτύπωση μικρότερων στρωμάτων επιτρέπει πιο λείες επιφάνειες και καλύτερη απόδοση λεπτομερειών, ενώ η εκτύπωση παχύτερων στρώσεων μειώνει το κόστος και το χρόνο παραγωγής.

Από πλευράς κόστους, οι βιομηχανικοί εκτυπωτές ΜΕ είναι κατά κανόνα πιο ακριβοί από τους επιτραπέζιους εκτυπωτές. Οι επιτραπέζιοι προορίζονται κυρίως για οικιακή χρήση, αλλά και για παραγωγή μοντέλων σχεδιασμού, ενώ οι βιομηχανικοί χρησιμοποιούνται συχνότερα για την κατασκευή εργαλείων, λειτουργικών πρωτοτύπων αλλά και τελικών προϊόντων και ανταλλακτικών, καθώς μπορούν να επεξεργαστούν περισσότερα και πιο απαιτητικά υλικά. Οι βιομηχανικοί εκτυπωτές προσφέρουν, επίσης, μεγαλύτερη επαναληψιμότητα, αξιοπιστία και ταχύτητα όπως απαιτείται στο πλαίσιο της βιομηχανικής παραγωγής (Hubs, 2022).

## 5.2 Υλικά 3D εκτύπωσης

Τα θερμοπλαστικά υλικά PLA (Polylactic Acid) και ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) αποτελούν τα πλέον γνωστά και χρησιμοποιούμενα υλικά για την 3D εκτύπωση με εξώθηση υλικού. Το PLA, γνωστό και ως πολυγαλακτικό οξύ ή πολυλακτίδιο, είναι ένα θερμοπλαστικό κατασκευασμένο από ανανεώσιμες πηγές, όπως άμυλο καλαμποκιού, ρίζες ταπιόκας ή ζαχαροκάλαμο, σε αντίθεση με άλλα σύνθετα υλικά, που κατασκευάζονται με βάση το πετρέλαιο. Λόγω της πιο οικολογικής προέλευσής του, είναι αρκετά δημοφιλές στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως και σε ιατρικές εφαρμογές και σε προϊόντα διατροφής.

Επιπλέον το PLA γνωρίζει ευρεία αποδοχή, λόγω και των μηχανικών ιδιοτήτων του. Είναι συχνά η προτιμώμενη επιλογή για αρχάριους στην τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς είναι ένα πολύ εύκολο υλικό, στην επεξεργασία. Το PLA είναι ημι-κρυσταλλικό πολυμερές και έχει θερμοκρασία τήξης 180°C, αρκετά χαμηλότερη από το νήμα ABS, το οποίο τήκεται μεταξύ 200°C και 260°C. Αυτό σημαίνει, ότι κατά την εκτύπωση με PLA, δεν είναι απαραίτητη η χρήση θερμαινόμενης πλατφόρμας εκτύπωσης και κλειστού θαλάμου για την αποφυγή των παραμορφώσεων. Σχετικό μειονέκτημα του υλικού είναι το σχετικά υψηλότερο ιξώδες, που μπορεί να προκαλέσει πιο εύκολα φραγή στην κεφαλή εκτύπωσης.

Το νήμα PLA δεν έχει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με το νήμα ABS. Το δεύτερο είναι πολύ πιο ανθεκτικό και ευέλικτο. Ωστόσο, το PLA έχει μεγαλύτερη αντοχή στη θερμότητα, επομένως χρησιμοποιείται συχνά στη βιομηχανία τροφίμων. Ακόμα κι έτσι, συχνά συνιστάται να δουλέψει κάποιος μαζί του, εάν το προϊόν δεν έχει ιδιαίτερες μηχανικές απαιτήσεις, καθώς είναι πολύ πιο εύκολο στην επεξεργασία. Τα 3D εκτυπωμένα PLA κομμάτια δεν απαιτούν ιδιαίτερη μετεπεξεργασία. Μπορούν να λειανθούν ή να καθαριστεί με διάλυμα ακετόνης, εάν απαιτείται, και τα στηρίγματα αφαιρούνται, συνήθως, πολύ πιο εύκολα. Ενδέχεται να υπάρχουν κάποια προβλήματα πρόσφυσης της πρώτης στρώσης στην πλατφόρμα, τα οποία λύνονται σχετικά εύκολα με την προσθήκη κολλητικής ταινίας στην πλατφόρμα εκτύπωσης ή την επάλειψή της με ειδικά υλικά που διευκολύνουν τόσο την προσκόλληση κατά την φάση της κατασκευής όσο και την αποκόλλησή του, μόλις τελειώσει η κατασκευαστική φάση (V, 2019).

Όπως όλα τα υλικά εκτύπωσης με εξώθηση υλικού, το PLA διατίθεται σε μορφή νήματος, το οποίο τροφοδοτείται στην κεφαλή του εξωθητή, όπου το πλαστικό τήκεται και εναποτίθεται σε συνεχή εξώθηση, στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Στη πρωτογενή του μορφή είναι ημιδιαφανές, διάφοροι χρωματισμοί όμως μπορούν να επιτευχθούν με την προσθήκη χρωστικών ουσιών για την κατασκευή έγχρωμων αντικειμένων (Sculpteo, 2022).

### 5.3 Λογισμικό 3D εκτύπωσης

Βασική προϋπόθεση, για να εκτυπωθεί ένα κομμάτι 3D, είναι η ύπαρξη του λογισμικού προγραμματισμού και τεμαχισμού (slicer). Το συγκεκριμένο λογισμικό παράγει με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο και ρυθμίσεις του χειριστή το αρχείο G-κώδικα, που περιέχει όλες τις απαραίτητες οδηγίες για την 3D εκτύπωση. Ένα από τα πιο δημοφιλή λογισμικά τεμαχισμού είναι το Cura, το οποίο αναπτύχθηκε, αρχικά, από τον David Braam το 2014 και αργότερα αποκτήθηκε από την Ultimaker. Είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα και ίσως το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, στην παγκόσμια αγορά προσθετικής κατασκευής. Κύρια πλεονεκτήματα του Cura αποτελούν η ευκολία χρήσης του, η υποστήριξη διαφορετικών μορφών αρχείων (STL, OBJ, X3D και 3MF) και η συμβατότητα με πολλούς τρισδιάστατους εκτυπωτές. Αν και το Cura είναι μέρος του οικοσυστήματος Ultimaker, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό της εκτύπωσης σε μηχανές άλλων κατασκευαστών, τροποποιώντας τις σχετικές ρυθμίσεις.

Το Cura έχει ένα σχετικά απλό περιβάλλον διεπαφής που επιτρέπει στον χειριστή να τροποποιήσει μέρος ή όλες τις ρυθμίσεις, ανάλογα με την εμπειρία του και τις απαιτήσεις της κατασκευής. Στην απλή λειτουργία, ο χειριστής καθορίζει μόνο βασικές παραμέτρους όπως τον προσανατολισμό κατασκευής, το πάχος στρώσης, το ποσοστό πλήρωσης κάθε στρώσης, ενώ στη σύνθετη παρέχεται πρόσβαση σε περισσότερες από 400 παραμέτρους ρυθμίσεων. Οι επιλεχθείσες ρυθμίσεις μπορούν στη συνέχεια να αποθηκευθούν σε συγκεκριμένο σετ έτσι ώστε να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν εύκολα και γρήγορα. Το λογισμικό διαθέτει, επίσης, λειτουργίες αναγνώρισης του βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής και πάχους στρώματος για εξοικονόμηση χρόνου τόσο στην κατασκευή όσο και στη μετεπεξεργασία, καθορισμού της βέλτιστης διάταξης για

περισσότερα του ενός κομμάτια στην πλατφόρμα, και δημιουργίας βελτιστοποιημένης δομής στήριξης. Οι χειριστές μπορούν, επίσης, να πάρουν μια ιδέα της εμφάνισης του τελικού 3D μοντέλου, χρησιμοποιώντας τη λειτουργία προεπισκόπησης (V, 2021).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> – Μελέτη Περίπτωσης**

### **6.1 Έπιπλα με παραμετρικό σχεδιασμό**

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετασθεί η δυνατότητα χρήσης εργαλείων παραμετρικού σχεδιασμού για το σχεδιασμό επίπλων προς κατασκευή με 3D εκτύπωση. Ο παραμετρικός σχεδιασμός παρότι εφαρμόζεται κυρίως στο πλαίσιο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, στο πλαίσιο καθορισμού της βασικής φόρμας ενός κτηρίου, δεν περιορίζεται, όμως μόνο σε αυτό, μπορεί ως τεχνική να χρησιμοποιηθεί και στη σχεδίαση άλλων στοιχείων, όπως διακοσμητικών στοιχείων, χώρων αλλά και προϊόντων. Τα έπιπλα αποτελούν ιδανική μελέτη περίπτωσης καθώς επιτρέπουν τη διερεύνηση σχεδιαστικών καινοτομίας, που αφορούν τόσο σε νέες τεχνικές σχεδιασμού, μορφές και τυπολογίες, όσο και κατασκευαστικές τεχνικές.

Στον τομέα των επίπλων και των συναφών προϊόντων (φωτιστικά, διακοσμητικά στοιχεία κλπ.) συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ο όρος “παραμετρικό” για την περιγραφή ενός συγκεκριμένου στυλ τμηματικού (sectioned) χαρακτήρα που χαρακτηρίζεται, επίσης, από ασυμμετρία και οργανικά σχήματα. Ωστόσο, ο «παραμετρικός σχεδιασμός» στον πυρήνα του περιγράφει μία μέθοδο ή/και μία σχεδιαστική προσέγγιση, και όχι απαραίτητα ένα ιδιαίτερο στυλ. Είναι μια μέθοδος χρήσης αλγοριθμικών διαδικασιών και των σχετικών μεταβλητών, εισροών, εξόδων και παραμέτρων, για τη δημιουργία ιδιαίτερα καινοτόμων σχεδίων. Αυτά μπορεί να αφορούν σε διάφορους κλάδους, από προϊόντα μηχανολογικού χαρακτήρα μέχρι κοσμήματα και ψηφιακά/εικονικά μοντέλα. Για να γίνει καλύτερα κατανοητή, η συγκεκριμένη σχεδιαστική προσέγγιση χρησιμοποιείται συχνά η αναλογία μεταξύ μαλακού πηλού και του τελικού «ψημένου» κεραμικού προϊόντος. Στη φάση διαμόρφωσης του πηλού, το υλικό είναι μαλακό και εύπλαστο. Η μορφή μπορεί να αλλάξει εύκολα και να επαναπροσδιοριστεί με άπειρους διαφορετικούς τρόπους. Σε αυτή την φάση ο τεχνίτης/μοντελιστής έχει πλήρη, σχεδόν, ελευθερία. Η μορφή σταθεροποιείται, αφού το μοντέλο ψηθεί, οπότε και προκύπτει το τελικό προϊόν, το οποίο είναι, πλέον, άκαμπτο και αμετάβλητο. Δεν αποτελεί έκπληξη, λοιπόν, το γεγονός ότι διάφορα λογισμικά παραμετρικής σχεδίασης, όπως το Grasshopper, χρησιμοποιούν τον όρο «ψήσιμο» (bake) για να περιγράψουν τη λειτουργία οριστικοποίησης των μοντέλων, που έχουν σχεδιαστεί παραμετρικά.

Δεδομένου ότι όλο και περισσότερα νέα έπιπλα, φωτιστικά, αρχιτεκτονικά στοιχεία και συναφή προϊόντα σχεδιάζονται ακολουθώντας την παραμετρική προσέγγιση, ο όρος «παραμετρικό» έχει αρχίσει να αποκτά και μια δεύτερη σημασία που εστιάζει στα χαρακτηριστικά αυτών των αντικειμένων. Κάποια στοιχεία που τείνουν να είναι κοινά, στα περισσότερα σχέδια αυτής της νέας κατηγορίας είναι τα παρακάτω (ODonnell, 2018).

Οργανική μορφή. Με τον όρο «οργανική» περιγράφονται συνήθως μορφές και σχήματα που παράγονται στη φύση ή προσομοιάζουν σε αυτά που παρατηρούνται σε φυσικούς οργανισμούς και σχηματισμούς. Μερικά από τα πιο λειτουργικά και όμορφα σχέδια βασίζονται στις εξελικτικές και φυσικές διαδικασίες, και δεν είναι λοιπόν περίεργο ότι μπορούν να αποτελούν σημεία έμπνευσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα φυσικών δομών που λειτουργούν ως σχεδιαστική έμπνευση είναι οι κυψέλες των μελισσών, η μορφή και η απλότητα των μοριακών δεσμών, και η εσωτερική δομή ενός μπαμπού που ενέπνευσε το Ταίρει 101 στην Ταϊβάν, το ψηλότερο κτίριο στον κόσμο τη στιγμή που τελείωσε. Πολλοί καλλιτέχνες, αρχιτέκτονες και σχεδιαστές, που χρησιμοποιούν παραμετρικά εργαλεία λατρεύουν να εμπνέονται από σχήματα και μοτίβα που βρίσκονται στη φύση, επειδή αυτά τα αρχέγονα σχέδια έχουν αντέξει στην απόλυτη δοκιμασία του χρόνου και επιβίωσαν.

Τμηματική κατασκευή. Πολλοί σχεδιαστές που ακολουθούν την παραμετρική προσέγγιση, αναζητούν συνεχώς και νέους, πρακτικούς και αξιόπιστους τρόπους, για να υλοποιήσουν/πραγματώσουν τις αφηρημένες μορφές που αναπτύσσουν. Μία από τις πιο ελκυστικές ιδιότητες των έργων παραμετρικού στυλ είναι η έμφυτη δυνατότητα παραγωγής μορφών που οι άνθρωποι δεν έχουν συνηθίσει να βλέπουν (π.χ. ένας πάγκος που προσομοιάζει σε καρχαρία ή ένα πάνελ τοίχου που κυματίζει, όπως η επιφάνεια της θάλασσας). Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη λύση για την κατασκευή αυτών των πολυμορφικών σχημάτων είναι η ανάλυση σε τμήματα 2,5 διαστάσεων (προφίλ), τα οποία στη συνέχεια συνενώνονται είτε με μηχανικά μέσα σύνδεσης είτε με συγκόλληση. Για την κατασκευή αυτών των τμημάτων/προφίλ χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά όπως ξύλο και πλαστικά, τα οποία συνήθως κόβονται χρησιμοποιώντας εξοπλισμό λέιζερ ή μηχανικής CNC κοπής .

3D εκτύπωση. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί, πλέον, δημοφιλή εναλλακτική λύση για την υλοποίηση ενός παραμετρικού σχεδίου. Πολλοί σχεδιαστές παραμετρικών προϊόντων, έχουν προωθήσει με επιτυχία 3D εκτυπωμένα έργα τους στην αγορά, όπως κρεμαστά φωτιστικά. Η 3D εκτύπωση, ωστόσο, μπορεί να παρουσιάζει επίσης προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν. Σε σύγκριση λ.χ. με τις διαδικασίες χύτευση ή διαμόρφωσης, η 3D εκτύπωση μπορεί να είναι αρκετά πιο δαπανηρή ή/και χρονοβόρα. Με βάση την παρούσα τεχνολογία, οποιοδήποτε αντικείμενο είναι μεγαλύτερο από 25-30 cm σε κάθε διάσταση είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα απαιτήσει τουλάχιστον 8 ώρες για την κατασκευή του. Επιπλέον, τα υλικά 3D εκτύπωσης είναι συνήθως πολύ ακριβότερα από τα αντίστοιχα χύτευσης. Από την άλλη πλευρά, βέβαια, η 3D εκτύπωση μπορεί να επιτρέψει την παραγωγή μορφών και σύνθετων σχημάτων, που δεν μπορούν να κατασκευαστούν με άλλο τρόπο, κάτι που για πολλούς πελάτες δικαιολογεί τις υψηλότερες τιμές των αντίστοιχων προϊόντων. Η 3D εκτύπωση έχει, επίσης, επιτρέψει σε εκατοντάδες νέους παραμετρικούς σχεδιαστές, να διαθέτουν γρήγορα και να πωλούν απευθείας τα προϊόντα τους στην αγορά, αντί να περιμένουν εβδομάδες ή ακόμα και μήνες να κατασκευαστούν τα αντίστοιχα καλούπια αξίας πολλών χιλιάδων ευρώ, όπως συνέβαινε τις προηγούμενες δεκαετίες. Εξειδικευμένοι ιστότοποι, όπως το [Shapeways.com](https://www.shapeways.com) έχουν αναπτύξει μια πλατφόρμα προώθησης και πώλησης προϊόντων 3D εκτύπωσης που φέρνει κοντά δημιουργούς και πιθανούς αγοραστές με μηδενικό, σχεδόν, κόστος για τους δημιουργούς.

Μορφολογική ελευθερία. Πολλά παραμετρικά σχέδια μιμούνται τη φύση και τις μορφές που παράγονται από αυτή. Καθώς, όμως, προχωράμε εποχή της ψηφιακά επαυξημένης πραγματικότητας, οι κόσμοι των αφηρημένων μαθηματικών και του σχεδιασμού προϊόντων αρχίζουν να αλληλεπιδρούν, να συγχωνεύονται και μερικές φορές να συγκρούονται μεταξύ τους, με αξιοσημείωτους τρόπους. Μοτίβα και σχήματα που παραμορφώνουν την πραγματικότητα και δεν μπορούσαν να δημιουργηθούν πριν δεν είναι μόνο δυνατά τώρα, αλλά και εύκολα. Καθώς η εξέλιξη της τεχνολογίας είναι ραγδαία είναι ουσιαστικά αδύνατο να προβλέψει κανείς πως θα είναι τα σχέδια του μέλλοντος. Σε αντίθεση με τα μοτίβα και τις μορφές που παρατηρούνται στη φύση, δεν μπορεί κανείς να προβλέψει τι θα αντέξει στη δοκιμασία του χρόνου στο πεδίο της καθαρής, αδέσμευτης γεωμετρικής δημιουργίας.

## 6.2 Μελέτη περίπτωσης

Το έπιπλο που επιλέχθηκε ως αντικείμενο της μελέτης περίπτωσης είναι ένα τραπέζι μικρού σχετικά μεγέθους, το οποίο αποτελεί βασικό στοιχείο πολλών καθιστικών δωματίων. Για τον παραμετρικό σχεδιασμό του τραπεζιού επιλέχθηκε το λογισμικό Rhinoceros v.7 εξοπλισμένο με το πρόσθετο Grasshopper. Ως κατασκευαστική μέθοδος αξιολογήθηκε η μέθοδος της 3D εκτύπωσης με εξώθηση υλικού. Παρότι πρόκειται για σχετικά μικρού μέγεθος έπιπλο, η κατασκευή του σε ένα τυπικό 3D εκτυπωτή απαιτεί την τμηματική του κατασκευή και την μετέπειτα συγκόλληση, γεγονός που αναιρεί κάποια από τα πλεονεκτήματα της 3D εκτύπωσης. Για το λόγο αυτό εξετάστηκε η δυνατότητα κατασκευής του σε έναν εκτυπωτή μεγαλύτερων διαστάσεων και συγκεκριμένα στον εκτυπωτή Builder Extreme 1500 PRO. Οι διαστάσεις του χώρου εκτύπωσης στο συγκεκριμένο εξοπλισμό είναι 1100x500x820 mm (XYZ), και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή προϊόντων από διάφορα υλικά όπως ABS, PLA, PETG και PEI, σε μορφή νήματος. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ως υλικό κατασκευής το PLA.

Σε ό,τι αφορά στις παραμέτρους κατασκευής παρατηρείται ότι σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η διάμετρος του ακροφυσίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του ακροφυσίου, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγιστο δυνατό πάχος στρώσης (70%-80% της διαμέτρου, συνήθως). Ένα μεγαλύτερο πάχος στρώσης συχνά οδηγεί σε λιγότερα ελαττώματα εκτύπωσης και βελτιωμένες ιδιότητες υλικού. Εάν το εξάρτημα πρόκειται να επεξεργαστεί εκ νέου, τότε είναι βέλτιστο, ένα μεγαλύτερο ύψος στρώσης. Η μέγιστη ταχύτητα εκτύπωσης σχετίζεται επίσης, από τη διάμετρο του ακροφυσίου. Η μεγαλύτερη διάμετρος ακροφυσίου επιτρέπει ταχύτερη εκτύπωση. Η χρήση μικρότερης διαμέτρου ακροφυσίου επιτρέπει χαμηλότερες τιμές πάχους στρώσεων (25% της διαμέτρου, συνήθως) και καλύτερη απόδοση λεπτομερειών, αυξάνοντας παράλληλα τον χρόνο εκτύπωσης. Εάν π.χ. μειωθεί στο μισό το ύψος του στρώματος, τότε ο χρόνος εκτύπωσης θα διπλασιαστεί. (Martin, 2022). Η βέλτιστη τιμή διαμέτρου ακροφυσίου για τους οικιακούς εκτυπωτές φαίνεται να είναι αυτή των 0,4 mm, καθώς επιτυγχάνεται σχετικά καλή απόδοση λεπτομερειών για εκτύπωση λεπτομερειών χωρίς μεγάλη επιβάρυνση του χρόνου. Για μεγαλύτερου μεγέθους αντικείμενα όμως, όπως αυτά που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη συνιστάται η χρήση μηχανισμού εξώθησης με



μεγαλύτερη διάμετρο ακροφυσίου, καθώς το επίπεδο λεπτομέρειας δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, ενώ απαιτείται και καλύτερη μηχανική συμπεριφορά.

Για μείωση του χρόνου εκτύπωσης και εξοικονόμηση υλικών, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές εξώθησης υλικού δεν παράγουν, συνήθως, συμπαγή εξαρτήματα. Αντίθετα, ο εκτυπωτής εναποθέτει ένα εξωτερικό τοίχος (Shell/wall) διαγράφοντας το περίγραμμα της στρώσης (όπως και κάποια εσωτερικά περιγράμματα για ενίσχυση), ενώ το εσωτερικό της στρώσης καλύπτεται μόνο εν μέρει. Η πυκνότητα γεμίματος/πλήρωσης του εσωτερικού σπάνια ξεπερνά το 50% (συνήθως είναι της τάξης του 20%) ενώ το συνολικό πάχος του τοιχώματος είναι συνήθως 1 mm. Αυτές οι ρυθμίσεις παρέχουν έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ αντοχής και ταχύτητας, στις περισσότερες περιπτώσεις.

Με βάση τα παραπάνω αλλά και τις οδηγίες που παρέχονται από τους κατασκευαστές εκτυπωτών μεγάλου μεγέθους, ορίστηκαν οι τιμές των βασικών παραμέτρων εκτύπωσης ως εξής:

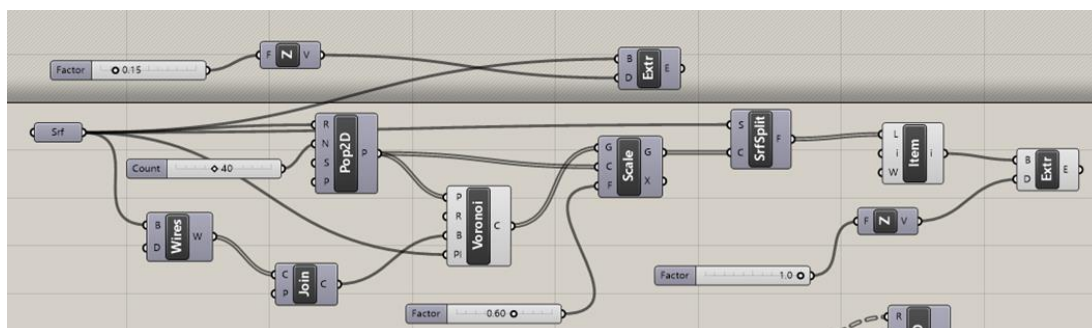
- ✓ Θερμοκρασία εκτύπωσης: 200°
- ✓ Διάμετρος Ακροφυσίου: 0,8 mm
- ✓ Ταχύτητα εκτύπωσης: 150 mm/s
- ✓ Πάχος στρώσης: 0,6mm
- ✓ Πάχος τοιχώματος κελύφους: 0,8mm
- ✓ Πάχος κορυφής και βάσης κελύφους: 1,6 mm
- ✓ Πλάτος εξώθησης: 0,8mm
- ✓ Πυκνότητα γεμίματος: 30%

### 6.2.1 Σχέδιο 1

Ως πρώτη σχεδιαστική ιδέα εξετάστηκε η δημιουργία ενός τραπεζιού, του οποίου η επίπεδη επιφάνεια έχει κυψελωτή Voronoi μορφολογία. Για τη στήριξη της επιφάνειας σχεδιάστηκε μια δομή δενδροειδούς μορφολογίας. Για τη δημιουργία της επιφάνειας του τραπεζιού με το λογισμικό Grasshopper, σύμφωνα με το πρώτο σχέδιο πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα (Εικόνα 5).

1. Δημιουργία επιπέδου (plane) στο Rhinoceros.

2. Δημιουργία επιφάνειας (surface) στον καμβά του Grasshopper και σύνδεση με το επίπεδο στο Rhinoceros.
3. Τοποθέτηση μιας δισδιάστατη περιοχής, με σαράντα σημεία (populate 2d).
4. Δημιουργία πλέγματος με πολύγωνα, που έχουν κέντρο τα σημεία (Voronoi).
5. Δημιουργία πλαισίου για τις καμπύλες του πλέγματος (Brep Wireframe) και ένωση των καμπυλών (Join). Ένωση με τα όρια του Voronoi.
6. Ορισμός της απόστασης μεταξύ των γραμμών του πλέγματος.
7. Μείωση σε κλίμακα (Scale) κατά 0,6 των πολυγώνων, που έχουν δημιουργηθεί με την εντολή Voronoi.
8. Αφαίρεση της κατά 0,6 μικρότερης κλίμακας επιφάνειας, που έχει δημιουργηθεί, από την αρχική επιφάνεια με την εντολή, surface split.
9. Επαναφορά τη κομμένης επιφάνειας (Item List) και εξώθηση (extrude) κατά 1mm στο άξονα Z.

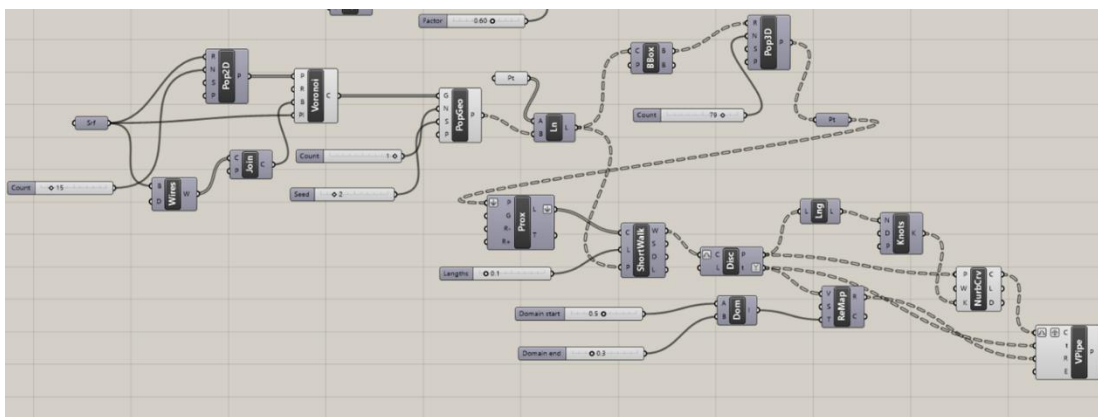


Εικόνα 5: Σχέδιο 1, διάγραμμα κόμβων Grasshopper επιφάνειας τραπέζιού.

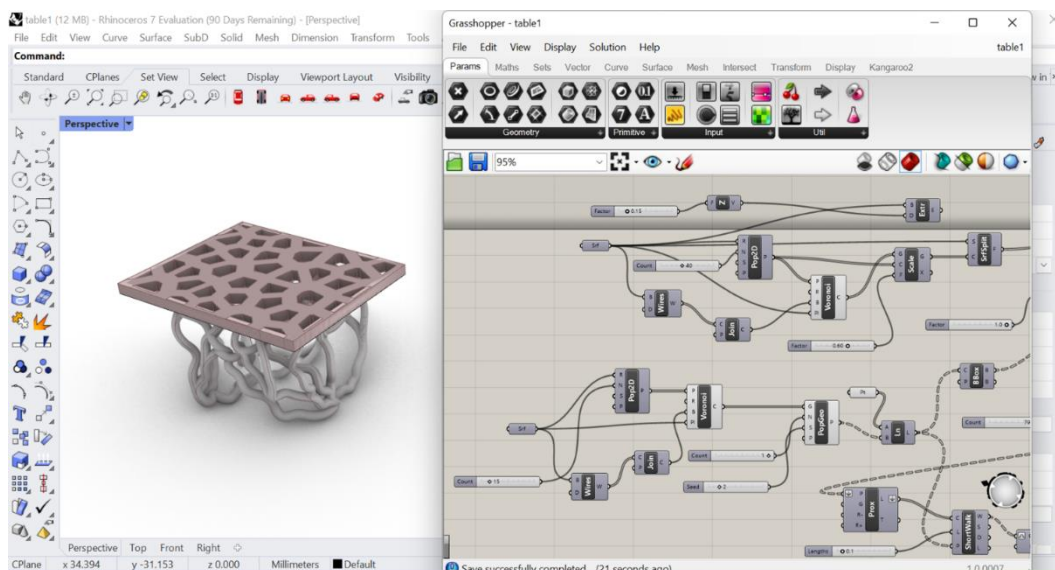
Για τη μορφοποίηση των ποδιών του τραπεζιού με το λογισμικό Grasshopper, σύμφωνα με το πρώτο σχέδιο πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα (Εικόνα 6).

10. Γέμισμα της επιφάνειας (Voronoi) με σημεία, χρησιμοποιώντας την εντολή Populate Geometry.
11. Τοποθέτηση δύο σημείων πάνω στο επίπεδο (plane) τα οποία στη συνέχεια ενώνονται (line) με τα σημεία του populate geometry.

12. Δημιουργία περιβάλλοντος κουτιού (Bounding Box) που εμπλουτίζεται με σημεία (populate 3d).
13. Επιλογή 3 κατευθύνσεων για κάθε σημείο (Proximity 3d) για τη δημιουργία δενδροειδούς μορφής.
14. Δημιουργία καμπυλών διασύνδεσης σημείων με την εντολή Shortest Walk, θέτοντας ως μονοπάτι την αντίστοιχη γραμμή (line).
15. Εντοπισμός των ασυνεχειών (Discontinuity) στις καμπύλες, και κατασκευή καμπυλών (Nurbs Curve PWK) με τους κόμβους της συγκεκριμένης λίστας (Knot Vector).
16. Δημιουργία σωλήνων, με βάση τις καμπύλες (Pipe Variable).
17. Κατασκευή τομέα, τα όρια του οποίου ορίζονται από δύο σχετικές παραμέτρους (Construct Domain).
18. Μετασηματισμός μιας λίστας αριθμών, με ορισμένες από τις τιμές να αλλάζουν ομαλά (Remap Numbers).



Εικόνα 6: Σχέδιο 1, διάγραμμα κόμβων Grasshopper ποδιών τραπέζιού.



Εικόνα 7: Σχέδιο 1, σχεδιασμός με το λογισμικό Rhinoceros

Το τελικό αποτέλεσμα για το Σχέδιο 1 με διαστάσεις 0,4 m X 0,32 m X 0,25 m (μήκος X πλάτος X ύψος) παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται μια προεπισκόπηση του 3D εκτυπωμένου αντιγράφου του σχεδίου 1 στο λογισμικό Cura. Με γαλάζιο χρώμα απεικονίζονται τα στηρίγματα (supports) που απαιτούνται σε αρκετά σημεία για την υποστήριξη των επιμέρους στρώσεων, και τα οποία θα αφαιρεθούν στη φάση της μετεπεξεργασίας. Η μορφή και το εύρος της υποστηρικτικής αυτής δομής ελέγχεται μέσω των καρτελών, της καρτέλας «Δημιουργία υποστηρικτικής δομής» και της καρτέλας «Πρόσφυση στην πλατφόρμα».

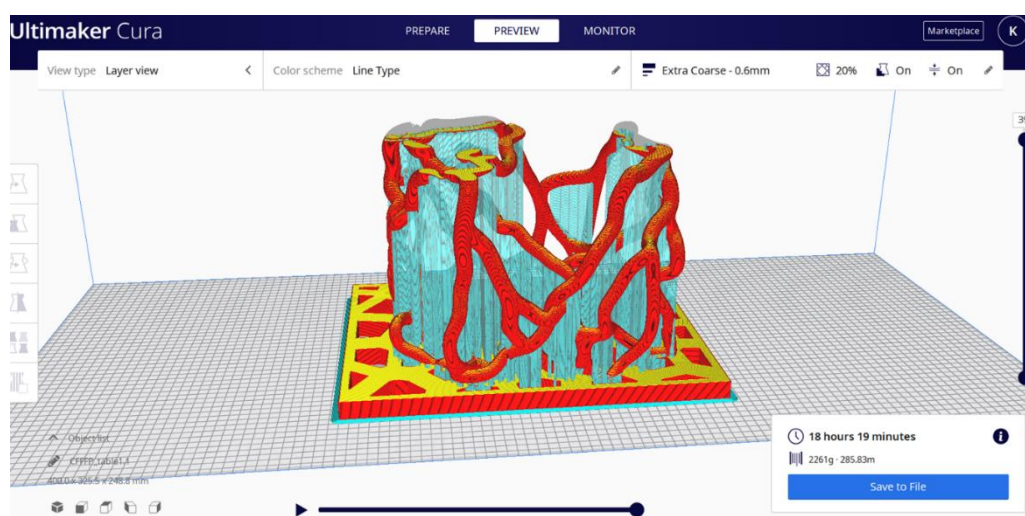
Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το κέλυφος (shell) του αντικειμένου, που σχηματίζεται ουσιαστικά από τα περιγράμματα των επιμέρους στρώσεων. Το πάχος του κελύφους ισούται συνήθως με το πλάτος εξώθησης του περιγράμματος επί τον αριθμό των περιγραμμάτων (perimeters/walls) ανά στρώση. Περισσότερα περιγράμματα ανά στρώση συνεπάγονται, συνήθως, μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, αλλά και βάρος και χρόνο εκτύπωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις αρκούν 2-3 περιγράμματα ανά στρώση.

Με πορτοκαλί χρώμα, απεικονίζεται οι εσωτερικές περιοχές των στρώσεων που περιγράφονται με τον όρο «γέμισμα» (infill). Βασική σχετική παράμετρο αποτελεί η πυκνότητα ή ποσοστό πλήρωσης (infill density), που καθορίζει την ποσότητα πλαστικού που εναποτίθεται στο εσωτερικό κάθε στρώσης. Μια υψηλότερη πυκνότητα πλήρωσης

σημαίνει ότι εναποτίθεται περισσότερο πλαστικό στο εσωτερικό των στρώσεων, με αποτέλεσμα ένα πιο ανθεκτικό (αλλά και βαρύ) αντικείμενο. Έτσι για μοντέλα σχεδιασμού χρησιμοποιείται συνήθως χαμηλή πυκνότητα, της τάξης του 20%, ενώ υψηλότερες πυκνότητες επιλέγονται κατά την κατασκευή εξαρτημάτων/κομματιών τελικής χρήσης.

Τέλος, με κίτρινο χρώμα αναπαρίστανται οι επάνω και κάτω στρώσεις και περιοχές που καλύπτονται εξολοκλήρου (100% πυκνότητα γεμίματος) και αποτελούν μέρος του εξωτερικού κελύφους του εκτυπωμένου μοντέλου. Τόσο το πάχος των σχετικών στρώσεων όσο και ο αριθμός τους μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αισθητικό και λειτουργικό αποτέλεσμα. Και στην περίπτωση αυτή, μεγαλύτερο πάχος συνεπάγεται περισσότερο βάρος, χρόνο και κόστος εκτύπωσης.

Ο εκτιμώμενος χρόνος εκτύπωσης με βάση τις επιλεχθείσες παραμέτρους από το λογισμικό Cura είναι 18 ώρες και 19 λεπτά.

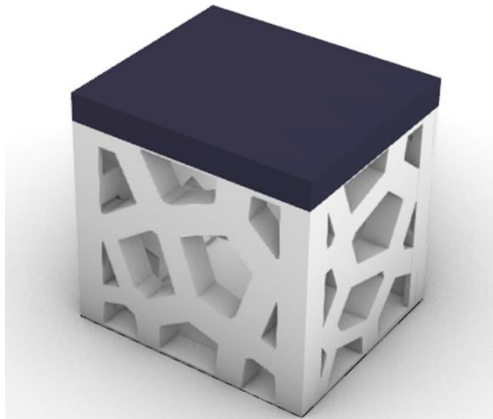


Εικόνα 8: Σχέδιο 1, προεπισκόπηση εκτύπωσης λογισμικού Cura.

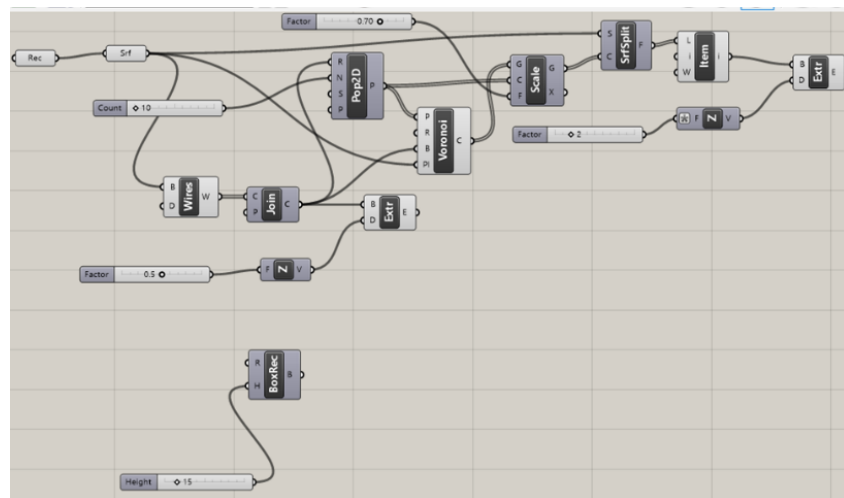
## 6.2.2 Σχέδιο 2

Το δεύτερο εναλλακτικό σχέδιο είναι μορφολογικά πιο απλό, καθώς έχει κυβική μορφή, συμπαγή επίπεδη επιφάνεια και πλάγια τοιχώματα κυψελωτής Voronoi μορφολογία (Εικόνα 9). Για τη σχεδιάσή του σχηματίστηκε, αρχικά, ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο στις διαστάσεις του τραπέζιού (0,35 m X 0,3 m X 0,34 m), χρησιμοποιώντας την εντολή

Box Rectangle. Για το σχηματισμό των Voronoϊ κυψελών στα πλαϊνά τοιχώματα δημιουργήθηκαν τα σχετικά προφίλ, τα οποία στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στις πλάγιες επιφάνειες χρησιμοποιώντας την εντολή Flow Along Surface. Το σχετικό διάγραμμα κόμβων στην εφαρμογή Grasshopper παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.

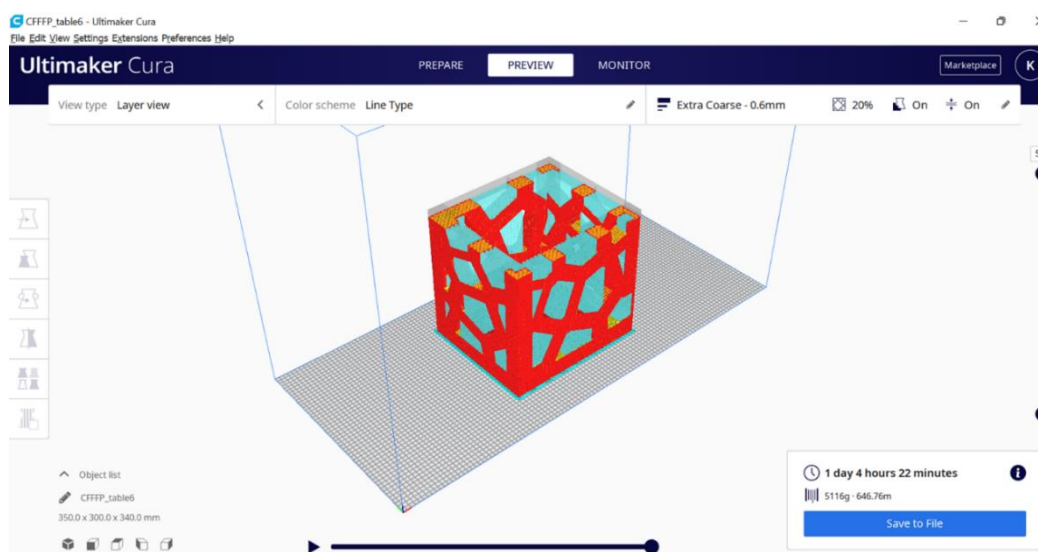


Εικόνα 9: Σχέδιο τραπέζιου 2.



Εικόνα 10: Σχέδιο 2, διάγραμμα κόμβων Grasshopper.

Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται μια προεπισκόπηση του 3D εκτυπωμένου αντιγράφου του σχεδίου 2 στο λογισμικό Cura. Με χρωματική κωδικοποίηση απεικονίζονται το κέλυφος, το εσωτερικό, οι συμπαγείς στρώσεις και τα στηρίγματα, όπως περιγράφεται στην ενότητα 6.2.1. Ο εκτιμώμενος χρόνος εκτύπωσης από το λογισμικό Cura με βάση τις επιλεγθείσες παραμέτρους είναι 28 ώρες και 22 λεπτά.



Εικόνα 11: Σχέδιο 2, προεπισκόπηση εκτύπωσης λογισμικού Cura.

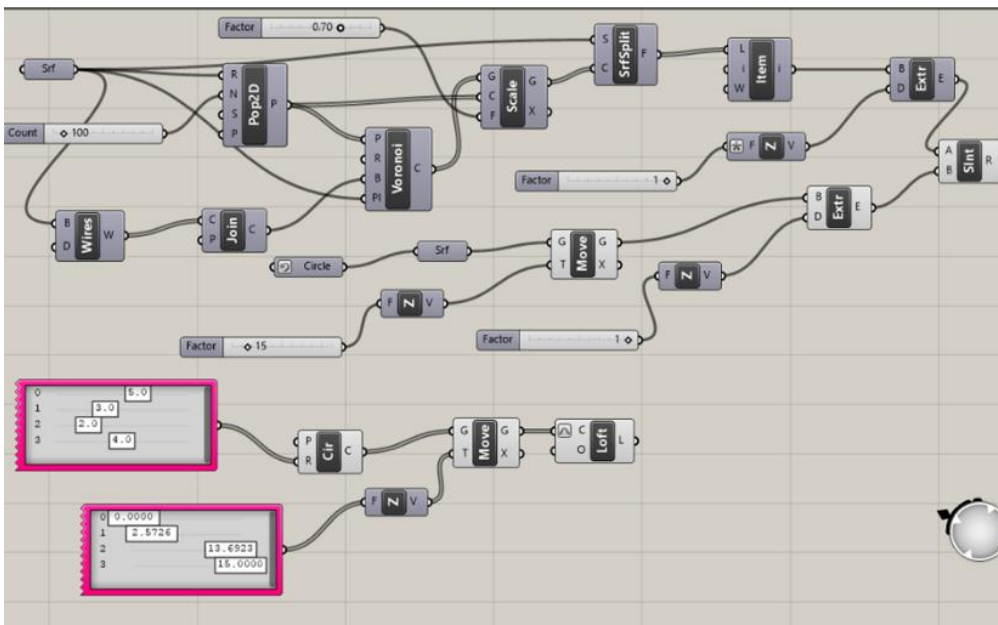
### 6.2.3 Σχέδιο 3

Το τρίτο εναλλακτικό σχέδιο έχει περιστροφική μορφή (διαστάσεις: 0,46 m X 0,46 m X 0,48 mm) με ένα κεντρικό συμπαγές στήριγμα και Voronoi κυψελωτή επιφάνεια (Εικόνα 12).

Η κωνικής μορφής βάση του τραπεζιού, σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας την εντολή εντολής Loft. Αντίστοιχα, η κυψελωτή επιφάνεια αποτελεί την τομή δύο στερεών (solid intersection), ενός κυλίνδρου και μιας τετράγωνης κυψελωτής δομής 2,5 διαστάσεων. Το σχετικό διάγραμμα κόμβων στην εφαρμογή Grasshopper παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.

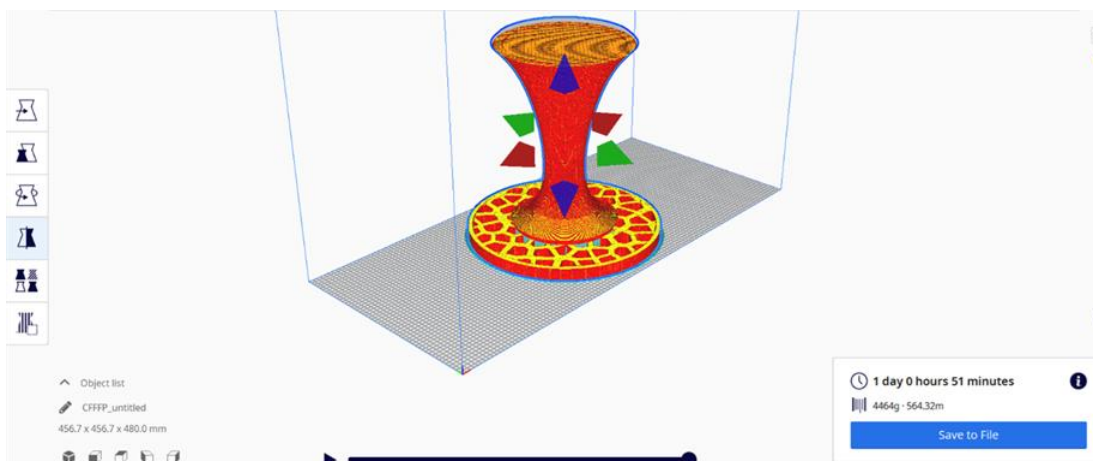


Εικόνα 12: Σχέδιο τραπεζιού 3



Εικόνα 13: Σχέδιο 3, διάγραμμα κόμβων Grasshopper.

Στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται μια προεπισκόπηση του 3D εκτυπωμένου αντιγράφου του σχεδίου 3 στο λογισμικό Cura. Με χρωματική κωδικοποίηση απεικονίζονται το κέλυφος, το εσωτερικό, οι συμπαγείς στρώσεις και τα στηρίγματα, όπως περιγράφεται στην ενότητα 6.2.1. Ο εκτιμώμενος, από το λογισμικό Cura, χρόνος εκτύπωσης με βάση τις επιλεγθείσες παραμέτρους, είναι 24 ώρες και 51 λεπτά.

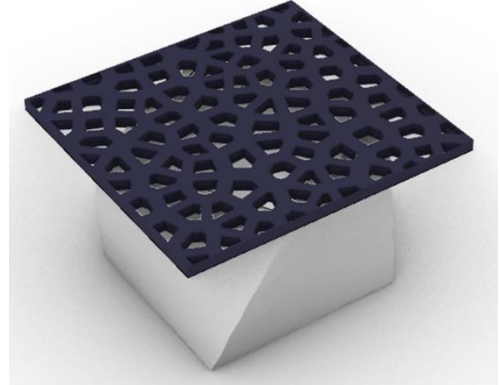


Εικόνα 14: Σχέδιο 3, προεπισκόπηση εκτύπωσης λογισμικού Cura.

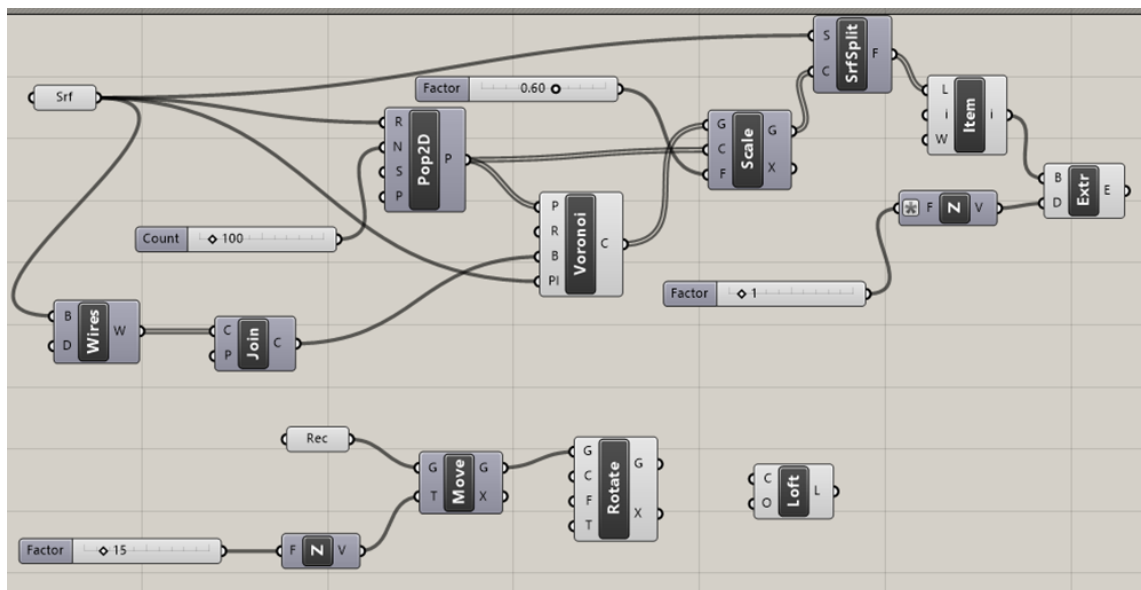


## 6.2.4 Σχέδιο 4

Το τέταρτο εναλλακτικό σχέδιο είναι παρόμοιο μορφολογικά με το τρίτο. Οι διαστάσεις του είναι 0,48 m X 0,48 m X 0,25 mm) και αποτελείται από μια επίπεδη επιφάνεια τετράγωνης κυψελωτής Voronoi μορφής και ένα κεντρικό συμπαγές στήριγμα (Εικόνα 15). Η κωνικής μορφής βάση του τραπέζιου, σχεδιάστηκε και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιώντας την εντολή εντολής Loft και σχηματίζοντας την επιφάνεια μεταξύ 2 παραλληλογράμμων. Το σχετικό διάγραμμα κόμβων στην εφαρμογή Grasshopper παρουσιάζεται στην Εικόνα 16.



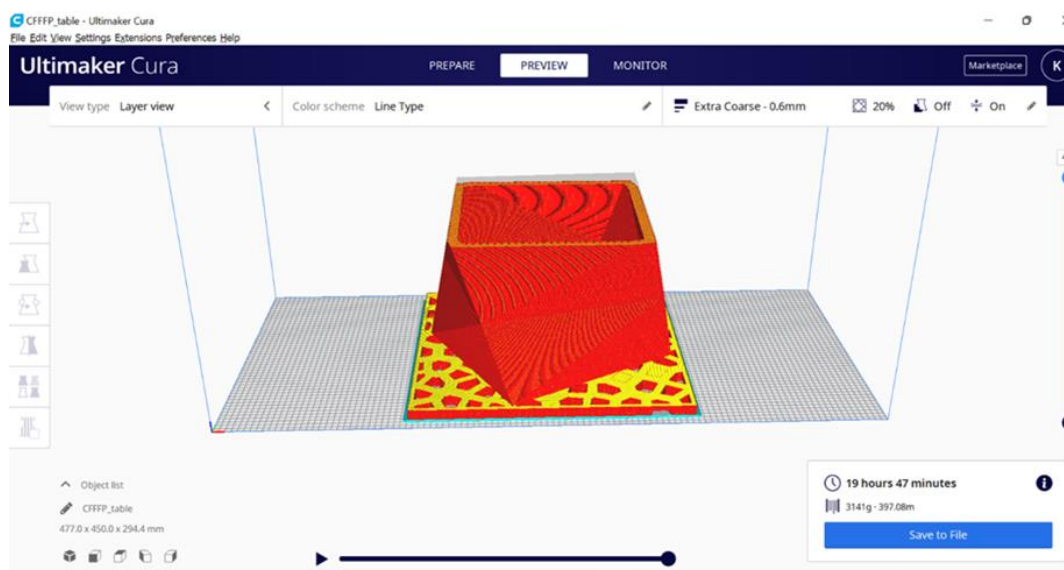
Εικόνα 14: Σχέδιο τραπέζιου 4



Εικόνα 15: Σχέδιο 4, διάγραμμα κόμβων Grasshopper

Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται μια προεπισκόπηση του 3D εκτυπωμένου αντιγράφου του σχεδίου 4, στο λογισμικό Cura. Με χρωματική κωδικοποίηση απεικονίζονται το κέλυφος, το εσωτερικό, οι συμπαγείς στρώσεις και τα στηρίγματα, όπως περιγράφεται

στην ενότητα 6.2.1. Ο εκτιμώμενος, από το λογισμικό Cura, χρόνος εκτύπωσης με βάση τις επιλεχθείσες παραμέτρους, είναι 19 ώρες και 47 λεπτά.



Εικόνα 16: Σχέδιο 4, προεπισκόπηση εκτύπωσης λογισμικού Cura.

### 6.3 Παρατηρήσεις - αποτελέσματα

Η μελέτη των τεσσάρων εναλλακτικών σχεδίων και της διαδικασίας κατασκευής του οδήγησε σε ορισμένα ενδιαφέροντα αποτελέσματα και παρατηρήσεις. Το πρώτο σχέδιο, παρότι ιδιαίτερα καινοτόμο από πλευράς μορφής, δεν αποτελεί πιθανότατα την καλύτερη λόγω του μεγάλου σχετικά κόστους και χρόνου μετεπεξεργασίας που απαιτείται για την αφαίρεση των στηριγμάτων. Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας μπορεί επίσης να οδηγήσει σε περισσότερες δοκιμές και αλλαγές μέχρι να προσδιοριστεί μια μορφή που θα κατασκευάζεται από τον εκτυπωτή χωρίς ελαττώματα (αυτού του είδους η ανάλυση δεν είναι δυνατή μέσω του Cura). Ο σχετικά μικρότερος χρόνος εκτύπωσης, θα μπορούσε, βέβαια, να λειτουργήσει εν μέρει αντισταθμιστικά το κόστος όμως εκτιμάται ότι θα είναι σχετικά υψηλό και κατά συνέπεια επαφίεται στον πελάτη να κρίνει αν η καινοτόμα μορφή δικαιολογεί τη μεγαλύτερη δαπάνη.

Το δεύτερο σχέδιο απαιτεί σχετικά μεγάλο χρόνο εκτύπωσης που αυξάνει επίσης το κόστος, ο χρόνος αφαίρεσης των στηριγμάτων, όμως, εκτιμάται ότι θα είναι μικρότερος λόγω απλούστερης μορφολογίας. Ο χρόνος εκτύπωσης στη συγκεκριμένη περίπτωση,

σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το πάχος των πλάγιων τοιχωμάτων, τα οποία θα μπορούσαν πιθανώς να είναι λεπτότερα. Ο καθορισμός του βέλτιστου πάχους απαιτεί επίσης εξειδικευμένο λογισμικό και γνώσεις μηχανικής ανάλυσης, η επένδυση όμως σε αυτά σίγουρα μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη.

Το τρίτο σχέδιο απαιτεί ελάχιστο χρόνο μετεπεξεργασίας, γεγονός που το καθιστά σίγουρα ελκυστικό. Το ίδιο ισχύει και για το σχέδιο 4 που απαιτεί και μικρότερο χρόνο εκτύπωσης, λόγω του σχετικά μικρού του ύψους. Η σχετική απλότητα των μορφών εκτιμάται, επίσης, ότι θα απαιτήσει λιγότερες δοκιμές προκειμένου να καθοριστούν οι βέλτιστες παράμετροι εκτύπωσης. Εάν, λοιπόν, απαιτείται ο περιορισμός του κόστους οι εναλλακτικές 3 και 4 φαίνεται να υπερτερούν. Από την άλλη πλευρά, πιο πολύπλοκες μορφολογικά λύσεις, όπως το σχέδιο 1, πιθανώς να είναι πιο ελκυστικές για τους υποψήφιους πελάτες καθώς παρουσιάζουν περισσότερα καινοτόμα χαρακτηριστικά. Σε αυτή την περίπτωση είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη και ο εκτιμώμενος αριθμός παραγόμενων προϊόντων, ο οποίος εάν είναι σχετικά μεγάλος μπορεί να δικαιολογήσει το αρχικό κόστος δοκιμών και τροποποιήσεων, όπως και μετεπεξεργασίας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> – Το μέλλον του διαδικαστικού σχεδιασμού**

Η Ψηφιακή Μοντελοποίηση με αλγόριθμους ή αλλιώς Διαδικαστική Μοντελοποίηση είναι ένας ευέλικτος και αποτελεσματικός τρόπος γεωμετρικής μοντελοποίησης. Με βάση σχετικά λίγους κανόνες και παραμέτρους, μπορεί να παραχθεί περίπλοκη γεωμετρία για τη μοντελοποίηση, όχι μόνο φυσικών φαινομένων, αλλά και διάφορων τεχνητών αντικείμενων. Ο αυτόματος χαρακτήρας των διαδικαστικών συστημάτων επιτρέπει, επίσης, τη γρήγορη παραγωγή μεγάλου αριθμού και μεγάλης ποικιλίας μοντέλων. Ωστόσο, ένα από τα κύρια προβλήματα στη διαδικαστική μοντελοποίηση είναι ο σχετικά μικρός έλεγχος της περίπλοκης διαδικασίας παραγωγής των μορφών. Ως εκ τούτου, η διευκόλυνση και η βελτιστοποίηση του ελέγχου κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης είναι ένας ενεργός τομέας έρευνας. Οποιαδήποτε πρόοδος σε αυτόν τον τομέα εκτιμάται ότι θα βοηθήσει είναι ευεργετική τους επαγγελματίες διάφορων έργων και αντικείμενων, από αντικείμενα τέχνης μέχρι ακριβές παραγωγές περιεχομένου, να πετύχουν καλύτερα ποιοτικά αποτελέσματα.

Η διαδραστικότητα των συστημάτων διαδικαστικής μοντελοποίησης έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, χάρη στη διαθεσιμότητα ταχύτερου εξοπλισμού και πιο εξελιγμένων μεθόδων παράλληλης επεξεργασίας. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να βελτιωθεί η ταχύτητα ακόμη περισσότερο, τόσο όσον αφορά τη βελτιστοποίηση της μορφής όσο και την κατασκευή/αναπαράστασή της, για να γίνει ακόμα πιο εύκολη η διαδικασία μοντελοποίησης και να επιτραπεί η μοντελοποίηση εξαιρετικά λεπτομερούς γεωμετρίας.

Ο διαδικαστικός σχεδιασμός, φαίνεται να κατακτά σιγά-σιγά τον χώρο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και των κλάδο των κατασκευών. Στο πεδίο αυτό, ο διαδικαστικός σχεδιασμός επιτρέπει να λυθούν συστημικά προβλήματα αλλά και να αναπτυχθούν καινοτόμες ιδέες, ειδικά σε συνδυασμό με άλλες ψηφιακές τεχνολογίες. Για παράδειγμα, η εταιρεία ρομποτικής MX3D με έδρα το Άμστερνταμ ολοκλήρωσε το 2018 την κατασκευή μιας χαλύβδινης γέφυρας, κατασκευασμένης με 3D ρομποτικής εκτύπωσης. Η γέφυρα είναι πλήρως λειτουργική και διασχίζει ένα από τα κανάλια στο κέντρο της πόλης. Σύμφωνα με πολλούς αναλυτές αποτελεί αναμφισβήτητο γεγονός ότι

η τεχνητή νοημοσύνη και οι ψηφιακές τεχνολογίες θα έχουν όλο και περισσότερο ρόλο στο κλάδο των κατασκευών, στο μέλλον.

Στο πεδίο του βιομηχανικού σχεδιασμού και της ανάπτυξης προϊόντων, τα εργαλεία διαδικαστικού σχεδιασμού είναι λιγότερο διαδεδομένα αλλά και εδώ φαίνεται κάτι να αλλάζει με την εμφάνιση εργαλείων γενετικού σχεδιασμού και σχεδιασμού για ΠΚ. Εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες αυτών των νέων συστημάτων, οι σχεδιαστές μπορούν να αναπτύξουν σχέδια που υπερβαίνουν τα όρια της φαντασίας. Ωστόσο, θα χρειαστεί αρκετός χρόνος, για να καταστούν τα νέα αυτά εργαλεία πλήρως λειτουργικά και αποτελεσματικά όπως και για να εξοικειωθούν οι σχεδιαστές με τη νέα σχετική προσέγγιση σχεδιασμού. Και στο συγκεκριμένο πεδίο, ο διαδικαστικός σχεδιασμός βοηθά στη βελτίωση της παραγωγικότητας των σχεδιαστών, καθώς και στην ενίσχυση της καινοτομίας και της ευελιξίας. Και εδώ όμως θα απαιτηθεί χρόνος μέχρι να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός τέχνης, αποτελεσματικότητας και ταυτότητας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahlquist, S., 2016. *Procedural Design*, University of Michigan, Taubman College of Architecture and Urban Planning: Sean Ahlquist.

Akella, R., 2018. *What Generative Design Is and Why It's the Future of Manufacturing*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.newequipment.com/research-and-development/article/22059780/what-generative-design-is-and-why-its-the-future-of-manufacturing>

[Πρόσβαση 12 October 2022].

All3DP, 2022. *All3DP*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-modeling-software-3d-cad-3d-design-software/>  
[Πρόσβαση 29 October 2022].

Altair, 2022. *Altair*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: [https://www.altair.com/topology-optimization/?utm\\_source=google-ads&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=2020-Simulation-Search&utm\\_source=adwords&utm\\_term=%2Bgenerative%20%2Bdesign&utm\\_campaign=2020-Simulation-Search&utm\\_medium=ppc&hsa\\_mt=b&hsa\\_ad=452058639255&hs](https://www.altair.com/topology-optimization/?utm_source=google-ads&utm_medium=cpc&utm_campaign=2020-Simulation-Search&utm_source=adwords&utm_term=%2Bgenerative%20%2Bdesign&utm_campaign=2020-Simulation-Search&utm_medium=ppc&hsa_mt=b&hsa_ad=452058639255&hs)

[Πρόσβαση 12 October 2022].

Ananthasuresh, G., 2008. Shape Optimization. Στο: O. T. a. H. Z. Yogesh B. Gianchandani, επιμ. *Comprehensive Microsystems*. India: Elsevier, pp. 559-583.

Archistar, 2022. *archistar*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.archistar.ai/blog/parametric-design-vs-generative-design-the-pros-and-cons/>

[Πρόσβαση 13 October 2022].

autodesk, 2022. *autodesk*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design>  
[Πρόσβαση Monday October 2022].

Autodesk, 2022. *Autodesk*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.autodesk.eu/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=F360>

[Πρόσβαση 13 October 2022].

Bhattacharjee, S., 2022. *re-thinkingthefuture*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.re-thinkingthefuture.com/art-history-of-architecture/a2466-a-brief-history-of-computational-design/>

[Πρόσβαση Monday October 2022].

Carolo, L., 2022. *all3dp*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>

[Πρόσβαση monday October 2022].

- Datron, 2022. *datron*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.datron.com/what-is-generative-design/>  
[Πρόσβαση 12 October 2022].
- Eastman, D. M. & R., 2018. *Procedural Generation: Fractals and L-Systems*, Calgary, Alberta, Canada: Algorithmicbotany.
- Foundation, I. W., 2021. *L-system*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/L-system>  
[Πρόσβαση Monday October 2022].
- foundry, l., 2022. *learn foundry*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at:  
[https://learn.foundry.com/modo/content/help/pages/modeling/procedural\\_modeling.html](https://learn.foundry.com/modo/content/help/pages/modeling/procedural_modeling.html)  
[Πρόσβαση Monday October 2022].
- George Kelly, H. M., 2022. *A Survey of Procedural Techniques for City Generation*, Dublin, Ireland: ITB.
- Grégoire Allaire, C. D. F. J., 2020. Shape and topology optimization. Στο: A. Bonito, επιμ. *Handbook of Numerical Analysis*. Paris: ELSEVIER, pp. 4-7.
- Hubs, 2022. *Hubs*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>  
[Πρόσβαση 13 October 2022].
- Martin, 2022. *the3dprinterbee*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://the3dprinterbee.com/3d-printing-layer-height-vs-nozzle-size/>  
[Πρόσβαση 15 October 2022].
- Nate, 2019. *Proving ground*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://provingground.io/2019/11/19/free-generative-design-a-brief-overview-of-tools-created-by-the-grasshopper-community/>  
[Πρόσβαση 12 October 2022].
- O'Donnell, N., 2018. *Terraform design*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.terraform-design.com/news/2018/11/16/parametric-style-furniture-the-definitive-guide>  
[Πρόσβαση 15 October 2022].
- Ramage, M., 2022. *Trimble Constructible*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://constructible.trimble.com/construction-industry/what-is-computational-design>  
[Πρόσβαση Monday October 2022].
- Rhino3d, 2022. *Rhino3d*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.rhino3d.com/6/new/grasshopper/>  
[Πρόσβαση 15 October 2022].
- Sawant, Saili, 2021. *Grasshopper 3D: A Modeling Software Redefining The Design Process*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://parametric-architecture.com/grasshopper-3d-a-modeling-software-redefining-the-design-process/>  
[Πρόσβαση 13 October 2022].

Sculpteo, 2022. *Sculpteo*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.sculpteo.com/en/materials/fdm-material/pla-material/>  
[Πρόσβαση 15 October 2022].

Shannon Loos, S. v. d. W. N. d. G. P. H. J. W., 2022. Towards intentional aesthetics within topology optimization by applying the principle of unity-in-variety. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(185), pp. 1-2.

Shih, S.-G., 2014. Notes on Generative Modeling, Procedural Symmetry, and Constructability of Architectural Design. *Shen-Guan Shih*, 11(5), pp. 518-525 .

Simplify3d, 2022. *Simplify3d*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>  
[Πρόσβαση 15 October 2022].

Simplyrhino, 2022. *Simplyrhino*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://simplyrhino.co.uk/3d-modelling-software/grasshopper>  
[Πρόσβαση 13 October 2022].

T. Ullrich, C. S. D. W. F., 2010. *Procedural Modeling in Theory and Practice*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/1119/1/Ullrich.pdf>  
[Πρόσβαση Monday October 2022].

top3dshop, 2022. *top3dshop*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://top3dshop.com/blog/fff-vs-fdm-difference-and-best-printers>  
[Πρόσβαση 15 October 2022].

Torsten Ullrich, C. S. D. W. F., 2010. Procedural modeling in theory and practice. January.

Ulrich Krispel, C. S. T. U., 2014. *Tutorial on Generative Modeling*, Austria: parametrichouse.

V, C., 2019. *All you need to know about PLA for 3D printing*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.3dnatives.com/en/pla-3d-printing-guide-190820194/#!>  
[Πρόσβαση 15 October 2022].

V, C., 2021. *3dnatives*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.3dnatives.com/en/cura-software-3d-printing-250320204/#!>  
[Πρόσβαση 13 October 2022].

Wikipedia, 2022. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Blender\\_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Blender_(software))  
[Πρόσβαση 13 October 2022].

Yosef M. Yoelya, O. A. I. H., 2018. Topology and shape optimization with explicit geometric constraints using a spline-based representation and a fixed grid. Στο: G. Vosniakos, επιμ. *Procedia Manufacturing*. Israel: Elsevier, p. 189–196.