



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ψηφιακή Δημιουργία Πρωτοτύπου με Αντίστροφη Μηχανική : Από Τρισδιάστατη Σάρωση σε Τρισδιάστατη Εκτύπωση για την αποτύπωση μορφής και υφής ενός μοντέλου



Στρατής Εμμανουήλ
511/2011079

Επιβλέπων Καθηγητής Παπανίκος Παρασκευάς
Μέλη Επιτροπής Ζαχαρόπουλος Νικόλαος
Κυρατζή Σοφία

ΣΥΡΟΣ 2024

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την υποστήριξη της οικογένειας μου στην οποία οφείλω ευγνωμοσύνη, και στην καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή μου κύριου Παρασκευά Παπανίκου. Επιπλέον τους Λεωνίδα Βασαλάκη, Ελίνα Κοκολιού και Χριστόδουλο Σκορλέτο για την πολυτιμότερη βοήθεια και στήριξή τους. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστώ τον Νίκο Πολυζωγόπουλο και την εταιρία Fourth Dimension SA για την παροχή του εξοπλισμού και των τεχνολογιών για να μπορέσει να διεκπεραιωθεί αυτή η Διπλωματική Εργασία.

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η διπλωματική εργασία είναι εξ' ολοκλήρου δικό μου έργο και κανένα μέρος της δεν είναι αντιγραμμένο από έντυπες ή ηλεκτρονικές πηγές, μετάφραση από ξενόγλωσσες πηγές και αναπαραγωγή από εργασίες άλλων ερευνητών ή φοιτητών. Όπου έχω βασιστεί σε ιδέες ή κείμενα άλλων, έχω προσπαθήσει με όλες μου τις δυνάμεις να το προσδιορίσω σαφώς μέσα από την καλή χρήση αναφορών ακολουθώντας την ακαδημαϊκή δεοντολογία.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Εικόνες	9
Εισαγωγή	13
1. Μετρολογία και Τρισδιάστατη Σάρωση.....	14
1.1 Εισαγωγή.....	14
1.2 Εφαρμογή της Μετρολογίας (Metrology)	14
1.2.1 Εισαγωγή στη Μετρητική Σάρωση	15
1.2.2 Συγκριτική Ανάλυση παραδοσιακών τρόπων μέτρησης με την 3D τεχνολογία.....	17
1.3 Τι είναι τρισδιάστατη σάρωση;.....	18
1.4 Τύποι και κατηγορίες 3D Σαρωτών	19
1.4.1 Σαρωτές επαφής (Contact Scanners)	19
1.4.1.1 Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων - (CMM – Coordinate Measuring Machines).....	20
1.4.2 Σαρωτές μη επαφής (Non-contact Scanners)	21
1.4.2.1 Παθητική Μέθοδος (Passive Method).....	21
1.4.2.2 Ενεργητική Μέθοδος.....	22
1.4.2.2.1 Σαρωτές χρόνου πτήσης (time – of – flight).....	22
1.4.2.2.2 Τριγωνισμού (triangulation)	24
1.4.2.2.3 Φορητοί σαρωτές.....	25
1.4.2.2.4 Δομημένου Φωτισμού (Structured lighting)	27
1.4.2.3 Ογκομετρικές Τεχνικές (volumetric techniques)	28
1.4.2.3.1 Βιομηχανικές	28
1.4.2.3.2 Ιατρικές.....	28
1.4.3 Διαφορές μεταξύ σαρωτών λέιζερ και δομημένου φωτισμού.....	29
1.4.3.1 Λέιζερ	29
1.4.3.2 Δομημένου φωτισμού	30
1.5 Εφαρμογές Τρισδιάστατων σαρωτών	31
1.5.1 Εφαρμογές στην Βιομηχανία	31
1.5.1.1 Ποιοτικός Έλεγχος	31

1.5.1.2	Αντίστροφη Μηχανική και Σχεδιασμός CAD	32
1.5.1.3	Πρωτοτυποποίηση και 3D εκτύπωση	32
1.5.2	Εφαρμογές στην Ιατρική και την Υγεία.....	33
1.5.2.1	Προσθετικά και Ορθοπεδικά	33
1.5.2.2	Χειρουργικός Σχεδιασμός και Βιο-Εκτύπωση.....	33
1.5.3	Άλλες εφαρμογές.....	34
1.5.3.1	Μουσειολογία, Διατήρηση Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Αποκατάσταση και Ψηφιακή Αρχαιοθήκη	34
1.5.3.2	Πολυμέσα και Ψυχαγωγία, Εικονική Πραγματικότητα/Επαυξημένη Πραγματικότητα.....	35
1.6	Ορισμοί και Ορολογίες	35
1.6.1	Φωτογραμμετρία (photogrammetry).....	35
1.6.1.1	Πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η φωτογραμμετρία στη σάρωση 3D;.....	36
1.6.2	Νέφος Σημείων (Point cloud).....	38
1.6.3	STL και Mesh αρχεία.....	39
1.6.3.1	Τεσελλάρισμα (tessellation)	40
1.6.4	Ακρίβεια (Accuracy).....	40
1.6.5	Ανάλυση (Resolution)	40
1.6.6	Raw / Clean Mesh	41
1.7	Πότε είναι σημαντική η καταγραφή του χρώματος - υφής ενός σκαναρισμένου αντικειμένου	41
1.8	Τρισδιάστατος σαρωτής λευκού φωτός : Go!SCAN.....	42
1.8.1	Προδιαγραφές Go!SCAN	44
1.8.2	Τα πλήκτρα πολλαπλών λειτουργιών	45
1.8.3	Χρωματική ένδειξη κατάστασης σαρωτή.....	45
1.8.4	Λειτουργικές Αρχές	46
1.8.4.1	Τοποθέτηση στον χώρο με βάση την γεωμετρία	46
1.8.4.2	Έξυπνη υβριδική τοποθέτηση.....	46
1.8.4.3	Τοποθέτηση με βάση την υφή.....	47
1.8.4.4	Τοποθέτηση με βάση μόνο τους στόχους	47
1.8.5	Βαθμονόμηση Σαρωτή Go!SCAN.....	48
1.8.6	Ρύθμιση κλειστρου (shutter configuration) Go!SCAN.....	49

1.8.7	Προετοιμασία κομματιού	50
1.8.8	Κανόνες Απόκτησης Δεδομένων	50
1.8.8.1	Απόσταση Σάρωσης.....	50
1.8.8.2	Μέτρο απόστασης.....	51
1.8.8.3	Πεδίο Όρασης (Field of View).....	52
1.9	Λογισμικό VX Elements.....	53
1.9.1	VX Scan.....	53
2.	Εφαρμογή τρισδιάστατης Σάρωσης σε ανθρώπινο μοντέλο.....	54
2.1	Σάρωση μοντέλων.....	55
2.2	Καθαρισμός, Ευθυγράμμιση και βελτιστοποίηση του μοντέλου.....	59
3.	Σχεδιασμός και Αντίστροφη Μηχανική	62
3.1	Εισαγωγή.....	62
3.2	Κύκλος ζωής ενός προϊόντος.....	63
3.3	Αντίστροφη μηχανική: Κομμάτι του κύκλου ζωής ενός προϊόντος - Product Lifecycle Management (PLM)	64
3.4	Πως θα εφαρμοστεί η αντίστροφη μηχανική.....	65
3.5	Λογισμικό Αντίστροφης Μηχανικής.....	66
3.5.1	VXElements - VX Model.....	67
3.6	3D Εκτύπωση και Σχεδιασμός CMF.....	68
3.7	Ενσωμάτωση του Keyshot στην διαδικασία προετοιμασίας.....	68
3.7.1	Σύννοψη	68
3.7.2	Υποστηριζόμενα υλικά και ρυθμίσεις.....	69
3.7.3	Μονάδες (units), Διαστάσεις και DPI.....	69
3.7.4	Ανάλυση Επιφάνειας (Tesselation)	70
3.7.5	Χρώμα	71
3.7.6	Διαφάνεια.....	72
3.7.7	Προβολή ετικέτας.....	73
3.7.8	Ανάλυση Ετικέτας και Υφής.....	74
3.7.9	Κουλότητα (Bump) και Μετατόπιση (Displacement).....	75
3.8	Πιστότητα χρωμάτων	76
3.8.1	Πως δουλεύει το χρώμα στην εκτύπωση.....	76

3.8.2	Soft Proofing	77
3.8.3	Hard Proofing.....	79
3.8.4	Απόλυτη και Σχετική απόδοση των χρωμάτων.....	79
4.	Επεξεργασία σαρωμένου αρχείου και προετοιμασία για εκτύπωση	.82
4.1	Τελική επεξεργασία και διόρθωση του μοντέλου.....	82
4.2	Προφίλ χρώματος και επεξεργασία της υφής.....	86
5.	Προσθετική Κατασκευή - Τρισδιάστατη Εκτύπωση.....	89
5.1	Εισαγωγή.....	89
5.2	Πώς δουλεύει η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης- προσθετικής κατασκευής.....	90
5.3	Τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	91
5.4	Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης	92
5.4.1	Εκπαίδευση	93
5.4.2	Κατασκευή κτιρίων.....	93
5.4.3	Παραγωγή εργαλείων και εξαρτημάτων τελικής χρήσης	93
5.4.4	Στον τομέα της υγείας, της ιατρικής και της έρευνας.....	94
5.4.5	Χόμπι και Οικιακή χρήση.....	94
5.4.6	Ρουχισμός.....	95
5.4.7	Ψυχαγωγία.....	95
5.4.8	Τρόφιμα.....	95
5.5	Βασικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης πλαστικού.....	95
5.5.1	Τεχνολογία Εξώθησης Υλικού (Materials Extrusion) - Σύντηξη με εναπόθεση Υλικού (Fused Deposition Modeling -FDM)	96
5.5.2	Σύντηξη με σκόνη (Powder bed fusion) - Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση μέσω λέιζερ (Selective Laser Sintering -SLS)	98
5.5.3	Δέση μέσω ψεκασμού υλικού (Binder Jetting) - Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA)	99
5.5.4	Τεχνολογία ψεκασμού υλικού - Materials Jetting (MJ)	100
5.5.5	Τεχνολογία ψεκασμού με έγχρωμο υλικό - ColorJet Printing CJP	102
5.6	Τεχνολογίες εκτύπωσης πολλαπλών χρωμάτων.....	103
5.7	Εφαρμογές θερμοπλαστικών με πολλαπλά χρώματα	103
5.7.1	Εκτύπωση Χρώματος με Χωριστά Υλικά FDM 3D:	104

5.7.2	Εκτύπωση Χρώματος με Μίξη υλικών FDM 3D:	104
5.7.3	Προσθήκη χρώματος πριν την εκτύπωση.....	104
5.8	Εφαρμογές ρητίνης με πολλαπλά χρώματα.....	105
5.9	Εκτυπωτές με δυνατότητα πολύχρωμης εκτύπωσης.....	106
5.10	Πως δουλεύει η πολύχρωμη εκτύπωση ανά τεχνολογία.....	107
5.11	Τεχνολογία Polyjet – Τρισδιάστατος εκτυπωτής J55 της Stratasys	108
5.12	Τρισδιάστατος εκτυπωτής J55 της Stratasys.....	109
5.12.1	Προδιαγραφές εκτυπωτή J55.....	112
5.13	Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης	112
5.13.1	Θερμοπλαστικά υλικά FDM.....	113
5.13.2	Θερμοπλαστικά υλικά SLS	114
5.13.3	Θερμοσκληρυνόμενα Υλικά SLA	114
5.13.4	Θερμοσκληρυνόμενα Υλικά Polyjet.....	115
5.13.4.1	Οι οικογένειες Vero.....	116
5.13.4.2	Η οικογένεια Vero Opaque.....	117
5.14	Η εφαρμογή του Slicer στην τρισδιάστατη εκτύπωση.....	117
5.14.1	Πρόγραμμα τεμαχισμού (slicer)	117
5.14.2	3D Μοντέλα	119
5.14.3	Παράμετροι Εκτύπωσης 3D.....	119
5.14.4	Χαρακτηριστικά του slicer GrabCAD Print	120
5.15	Μετα-επεξεργασία του μοντέλου μετά την εκτύπωση (Post Processing).....	121
5.15.1	Καθαρισμός και προετοιμασία	121
5.15.1.1	Καθαρισμός και προετοιμασία – Αφαίρεση υλικού υποστήριξης.....	121
5.15.1.2	Καθαρισμός και προετοιμασία – Λείανση.....	122
5.15.1.3	Καθαρισμός και προετοιμασία – Συγκόλληση.....	123
5.15.2	Τελικό Φινίρισμα.....	123
5.15.2.1	Τελικό Φινίρισμα - Αστάρωμα & Βαφή	124
5.15.2.2	Τελικό Φινίρισμα - Εξομάλυνση Επιφάνειας.....	125
5.15.2.3	Τελικό Φινίρισμα - Στίλβωμα – Γυάλισμα (polishing)	125
6.	Εισαγωγή του μοντέλου στον Slicer και εκτύπωση του πρωτοτύπου....	127

6.1	Προετοιμασία του μοντέλου για εκτύπωση	127
6.2	Προετοιμασία εκτυπωτή και εκτύπωση του μοντέλου	129
Συμπεράσματα		131
Περαιτέρω έρευνα και μελέτη.....		132
Βιβλιογραφία		133

Εικόνες

Εικόνα 1	Εφαρμογές της μετρολογίας. Πηγή [v3dtech]	14
Εικόνα 2	Εφαρμογή λέιζερ σαρωτή. Πηγή: [Creaform]	16
Εικόνα 3	Εφαρμογή σαρωτή δομημένου φωτισμού. Πηγή: [Creaform]	16
Εικόνα 4	Παραδοσιακή μέθοδος μέτρησης. Πηγή [hackaday]	17
Εικόνα 5	Οι σαρωτές επαφής 3D σαρώνουν φυσικά αντικείμενα, μέσω φυσικής επαφής με αυτά. Πηγή [Creaform]	19
Εικόνα 6	Οι γεωμετρικές συντεταγμένες του αντικειμένου μετρούνται με CMM και ο χειριστής ελέγχει το μηχάνημα χειροκίνητα. Πηγή [Artec3d]	20
Εικόνα 7	Τρισδιάστατη αναπαράσταση στερεοσκοπικής απεικόνισης. Πηγή [Medium]	21
Εικόνα 8	Εάν t είναι ο χρόνος πτήσης, τότε η απόσταση είναι ίση με $(c*t)/2$. Πηγή [Wikipedia].	23
Εικόνα 9	Χρήση αισθητήρα Time-of-flight για να ανοίξει το πορτ-μπαγκάζ. Πηγή: [all3dp]	23
Εικόνα 10	Εάν το λέιζερ χτυπήσει ένα αντικείμενο στο σημείο A, αυτό θα φανεί από τον αισθητήρα εικόνας του σαρωτή στη θέση A'. Εάν το λέιζερ χτυπήσει ένα αντικείμενο στη θέση B, θα φανεί στο B'. Πηγή: [hermary]	24
Εικόνα 11	Αυτή η μέθοδος ονομάζεται τριγωνισμός επειδή το λέιζερ, η κάμερα και ο πομπός του λέιζερ σχηματίζουν ένα τρίγωνο. Πηγή: [3dnatives]	25
Εικόνα 12	Ο σαρωτής καθορίζει τη θέση του αντικειμένου χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της σαρωμένης επιφάνειας (συνήθως κολλητικοί ανακλαστικοί στόχοι). Πηγή: [creaform3d]	26
Εικόνα 13	Αυτός ο τύπος σαρωτή 3D προβάλλει μια σειρά από ακτίνες φωτός (μοτίβο) στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Πηγή: [3dnatives]	27
Εικόνα 14	Οι σαρωτές λέιζερ 3D προβάλλουν ακτίνες λέιζερ στην επιφάνεια του εκάστοτε αντικειμένου που σαρώνουν και καταγράφουν σημεία. Πηγή: [goengineer]	29
Εικόνα 15	Οι σαρωτές δομημένου φωτισμού αποκτούν δεδομένα εκπέμποντας λευκό φως. Πηγή [goengineer]	30
Εικόνα 16	Εφαρμογές τρισδιάστατων σαρωτών. Πηγή: [Creaform3d]	31
Εικόνα 17	Μηχανικός σαρώνει το κρανίο της μπλε φάλαινας. Πηγή: [Creaform3d]	34
Εικόνα 18	Έγχρωμη σάρωση για την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου. Πηγή: [ireal3dscan]	35
Εικόνα 19	Η φωτογραμμετρία είναι μια τεχνική μέτρησης που λαμβάνει φωτογραφίες από διάφορες οπτικές γωνίες για να αποκτήσει τρισδιάστατες συντεταγμένες. Πηγή: [3d-scantech] ...	36
Εικόνα 20	Χρήση της φωτογραμμετρία στην τρισδιάστατη σάρωση. Πηγή: [Creaform3d]	37
Εικόνα 21	Το σχήμα του σύννεφου προκύπτει από τον αριθμό των μετρημένων σημείων. Πηγή: [sme]	38

Εικόνα 22 Τα αρχεία STL περιλαμβάνουν μόνο τη γεωμετρία της επιφάνειας, τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο τριγώνων. Πηγή: [all3dp].....	39
Εικόνα 23 Χαρακτηριστικό παράδειγμα τεσελλαρίσματος στην καθημερινότητα είναι η κάλυψη ενός δαπέδου ή ενός τοίχου με πλακάκια. Πηγή: [all3dp]	40
Εικόνα 24 Καταγραφή έγχρωμου αντικειμένου για ψηφιακή αποθήκευση. Πηγή: [ireal3dscan].	42
Εικόνα 25 Σαρωτής λευκού φωτός Go!SCAN της Creafom. Πηγή: [qualitymag]	42
Εικόνα 26 Βασικά χαρακτηριστικά σαρωτή. Πηγή: [Creafom3d].....	43
Εικόνα 27 Πλήκτρα λειτουργιών. Πηγή: [Creafom3d].....	45
Εικόνα 28 Χρωματικές ενδείξεις. Πηγή: [Creafom3d]	45
Εικόνα 29 Ο σαρωτής χρειάζεται γεωμετρία για να τοποθετηθεί στον χώρο. Πηγή: [Creafom3d]	46
Εικόνα 30 Η έξυπνη υβριδική τοποθέτηση συνδυάζει τους στόχους θέσης με τις πληροφορίες γεωμετρίας. Πηγή: [Creafom3d].....	46
Εικόνα 31 Ο σαρωτής αποκτά πληροφορίες και ανιχνεύει την υφή του αντικειμένου με την έγχρωμη ψηφιακή κάμερα που διαθέτει. Πηγή: [Creafom3d]	47
Εικόνα 32 Μέσω της βαθμονόμησης, βελτιστοποιούνται και διατηρούνται τα αρχικά χαρακτηριστικά μέτρησης Πηγή: [Creafom3d].....	48
Εικόνα 33 Είναι σημαντικό να ρυθμίζονται οι παράμετροι του κλείστρου για τη βέλτιστη ανίχνευση των ανακλαστικών στόχων. Πηγή: [Creafom3d].....	49
Εικόνα 34 Για καλύτερη ακρίβεια είναι καλό ο χρήστης να βρίσκεται στην βέλτιστη απόσταση από το αντικείμενο που σαρώνει. Πηγή: [Creafom3d]	51
Εικόνα 35 Κατά τη ψηφιοποίηση, οι λευκές ρίγες φωτός που προβάλλονται στο αντικείμενο εμφανίζονται σε διάφορα χρώματα για να υποδείξουν την απόσταση μεταξύ του σαρωτή και της επιφάνειας του αντικειμένου. Πηγή: [Creafom3d].....	52
Εικόνα 36 Τι σημαίνουν οι χρωματικές ενδείξεις του σαρωτή. Πηγή: [Creafom3d].....	52
Εικόνα 37 Οι ενδείξεις LED στις πλευρές του σαρωτή υποδεικνύουν επίσης την απόσταση από το αντικείμενο. Πηγή: [Creafom3d]	52
Εικόνα 38 Σούιτα λογισμικού VX Elements Πηγή: [Creafom3d]	53
Εικόνα 39 3.2 Κύκλος ζωής ενός προϊόντος. Πηγή: [Stratasys]	63
Εικόνα 40 Αντίστροφη μηχανική: Κομμάτι του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Πηγή: [Creafom3d]	64
Εικόνα 41 Από την τρισδιάστατη σάρωση στην δημιουργία μοντέλου σε CAD. Πηγή: [imimg]..	65
Εικόνα 42 Ορισμός οντοτήτων που ορίζουν επίπεδα, επιφάνειες, σχήματα κ.α. για την λήψη των μετρήσεων πάνω στο σαρωμένο μοντέλο Πηγή: [Creafom3d]	67
Εικόνα 43 Εφαρμογή σχεδιασμού CMF (color, material, finish) πριν την εκτόπωση. Πηγή: [Stratasys].....	68
Εικόνα 44 Το KeyShot, είναι λογισμικό 3D φωτορεαλιστικής απεικόνισης από την Luxion Inc, το οποίο συνεργάζεται τώρα με το GrabCAD Print για γρήγορη και ομαλή εξαγωγή αρχείων 3MF Πηγή: [GrabCAD].....	69
Εικόνα 45 Προτεινόμενα υλικά και μη για την εφαρμογή CMF. Πηγή: [GrabCAD]	69
Εικόνα 46 Προτεινόμενες τιμές κατά την εξαγωγή του μοντέλου. Πηγή: [GrabCAD]	70
Εικόνα 47 Παράδειγμα ανάλυσης επιφάνειας. Πηγή: [GrabCAD].....	71
Εικόνα 48 Παράδειγμα τοιχώματος και η εφαρμογή του χρώματος. Πηγή: [GrabCAD].....	71

Εικόνα 49 Εφαρμογή της διαφάνειας (αριστερά) στο μοντέλο και πως ο slicer (δεξιά) διαβάζει την πληροφορία. Πηγή: [GrabCAD].....	72
Εικόνα 50 Ορισμός ίδιου υλικού στον slicer για την έγκυρη εκτόπωση του πυρήνα του κομματιού. Πηγή: [GrabCAD].....	73
Εικόνα 51 Σύγκριση ίδιου υλικού πυρήνα με διάφανο υλικό στον πυρήνα. Πηγή: [GrabCAD].....	73
Εικόνα 52 Εφαρμογή της ετικέτας στο λογισμικό Keyshot. Πηγή: [GrabCAD].....	74
Εικόνα 53 Ανάλυση Ετικέτας κατά την εφαρμογή. Πηγή: [GrabCAD].....	75
Εικόνα 54 Η εφαρμογή της μετατόπισης τροποποιεί τη γεωμετρία του κομματιού και έχει ως αποτέλεσμα αλλαγές στο φυσικό μοντέλο. Πηγή: [GrabCAD]	75
Εικόνα 55 Εύρος χρωματικών προφίλ. Πηγή: [GrabCAD]	76
Εικόνα 56 RGB προφίλ αριστερά και CMYK προφίλ δεξιά. Πηγή [GrabCAD]	77
Εικόνα 57 Μπορούν να εφαρμοστούν ορισμένες τεχνικές προσαρμογής για να επιτευχθεί η διαδικασία soft proofing [GrabCAD].....	78
Εικόνα 58 Μετά την προσαρμογή του χρώματος που θα αποτυπωθεί στην J750 μπορεί να επιτευχθεί μια στενότερη ταύτιση με το κόκκινο RGB. Πηγή: [GrabCAD].....	78
Εικόνα 59 Επιλογή χρώματος και πως θα εκτυπωθεί. Πηγή: [GrabCAD]	79
Εικόνα 60 Εύρος χρωμάτων κατά την οθόνη (RGB) και κατά τις δυνατότητες του σαρωτή (CMYK). Πηγή: [GrabCAD]	80
Εικόνα 61 Αριστερά φαίνεται η απόλυτη απόδοση των χρωμάτων, ενώ δεξιά η Σχετική. Πηγή: [GrabCAD]	80
Εικόνα 62 Εφαρμογή volumetric 3d printing Πηγή: [biofabrication].....	91
Εικόνα 63 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτόπωσης. Πηγή: [semanticscholar]	92
Εικόνα 64 Τεχνολογία Εξώθησης Υλικού (Materials Extrusion) – Σύντηξη με εναπόθεση Υλικού (FDM). Πηγή: [3dpartsunlimited].....	96
Εικόνα 65 Σύντηξη με σκόνη (Powder bed fusion) – Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση μέσω λέιζερ (SLS). Πηγή: [manufactur3dmag]	98
Εικόνα 66 Δέση μέσω ψεκασμού υλικού (Binder Jetting) – Στερεολιθογραφία (SLA). Πηγή: [manufact3dmag].....	99
Εικόνα 67 Τεχνολογία ψεκασμού υλικού - Materials Jetting (MJ). Πηγή: [3ds].....	101
Εικόνα 68 Τεχνολογία εκροής έγχρωμου υλικού - colorjet printing CJP. Πηγή: [ebruary]	102
Εικόνα 69 Τεχνολογίες πολύχρωμης εκτόπωσης. Πηγή: [all3dp]	103
Εικόνα 70 Εφαρμογές με χρώμα στην τρισδιάστατη εκτόπωση. Πηγή: [all3dp].....	105
Εικόνα 71 Πολύχρωμες εφαρμογές με τεχνολογία ρητίνης. Πηγή: [all3dp]	107
Εικόνα 72 Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής J55 της Stratasys. Πηγή: [Stratasys].....	109
Εικόνα 73 Περιστρεφόμενη πλατφόρμα εκτόπωσης, με στατική κεφαλή εκτόπωσης, παρέχει συνεπή εκτόπωση υλικού και γρήγορους χρόνους εκτόπωσης. Πηγή: [all3dp]	110
Εικόνα 74 Αναπαράσταση πως η μηχανή J55 διανέμει το υλικό. Πηγή: [all3dp]	110
Εικόνα 75 Έγχρωμες εκτυπώσεις πολλαπλών υλικών. Πηγή: [all3dp]	111
Εικόνα 76 Θερμοπλαστικά υλικά FDM. Πηγή [formlabs]	113
Εικόνα 77 Πρωτεύων και Δευτερέων υλικό για το συνδυασμό υλικών. Πηγή: [protolabs].....	115
Εικόνα 78 Pantone χρώματα PolyJet Πηγή: [Stratasys].....	116
Εικόνα 79 Παρόλο που συνήθως δεν συσχετίζονται με το λογισμικό slicer, το CAM βοηθά στην κατανόηση του ρόλου του slicer. Πηγή: [Autodesk].....	118

Εικόνα 80 Οποιοσδήποτε slicer απαιτεί να εισαχθούν δύο σημαντικές πληροφορίες. Πηγή: [MakerBot].....	119
Εικόνα 81 Λογισμικό slicer από τη Stratasys, βασισμένο στο cloud, σχεδιασμένο για την απλοποίηση της διαδικασίας 3D εκτόπωσης και την παροχή μιας ομαλής ροής εργασίας από τον σχεδιασμό έως την 3D εκτόπωση. Πηγή: [GrabCAD]	120
Εικόνα 82 Αφαίρεση υλικού υποστήριξης. Πηγή: [GrabCAD]	121
Εικόνα 83 Η λείανση είναι η πιο συνηθισμένη μορφή μετα-επεξεργασίας. Πηγή: [formlabs]	122
Εικόνα 84 Εφαρμογή συγκόλλησης δύο κομματιών. Πηγή: [hubs]	123
Εικόνα 85 Βαφή κομματιού. Πηγή: [hocto3dprint]	124
Εικόνα 86 Αριστερά πριν την εξομάλυνση επιφάνειας και δεξιά το μετά. Πηγή: [all3d]	125
Εικόνα 87 Γυάλισμα. Πηγή: [Stratasys].....	125

Εισαγωγή

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εστιάζει στην ψηφιακή αναπαράσταση μορφής και υφής φυσικού μοντέλου, ακολουθούμενη από την κατασκευή ενός ρεαλιστικού πρωτοτύπου μέσω προσθετικής διαδικασίας (3D Printing). Χωρίζεται σε 3 κύρια κεφάλαια, καθένα από τα οποία αποτελείται από το θεωρητικό και το πρακτικό κομμάτι.

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας θα δημιουργηθεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο μετά από τη σάρωση ενός φυσικού προσώπου, με σκοπό τη χρήση του ως φιγούρα σε επιτραπέζιο παιχνίδι. Η σάρωση, η εκτύπωση και η δημιουργία φιγούρας για επιτραπέζιο παιχνίδι επιλέχτηκε με σκοπό τη μελέτη της τρισδιάστατης σάρωσης, του τρόπου με τον οποίο ένας τρισδιάστατος σαρωτής αποκτά δεδομένα σαρώνοντας ένα μοντέλο, το οποίο δεν είναι σταθερό, όπως ένας άνθρωπος, και την αξιολόγηση της εγκυρότητας των δεδομένων αυτών σε σχέση με το φυσικό αντικείμενο, μέσω της διαδικασίας που αναλύεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Αναλύονται επίσης οι μέθοδοι επεξεργασίας της υφής και του χρώματος ενός σαρωμένου μοντέλου με σκοπό την αποτύπωσή τους σε τρισδιάστατο εκτυπωμένο μοντέλο και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην προσέγγιση που απαιτείται για την πιστότητα του χρώματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της μετρολογίας και της τρισδιάστατης σάρωσης, οι υφιστάμενες τεχνολογίες, και ιδίως η τεχνολογία λευκού φωτός (white light) ή αλλιώς δομημένου φωτισμού (structured lighting), η οποία θα αξιοποιηθεί για την αποτύπωση της υφής του μοντέλου που θα σαρωθεί. Πιο συγκεκριμένα, το πείραμα θα υλοποιηθεί με την τεχνολογία white light Go!SCAN Spark, της εταιρείας «Creaform», καθώς παραχωρήθηκε στον γράφοντα η δυνατότητα χρήσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας από την εταιρεία «Fourth Dimension SA», για τους σκοπούς της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η αντίστροφη μηχανική, η οποία ακολουθεί την τρισδιάστατη σάρωση και η οποία συνίσταται στην επεξεργασία του σαρωμένου μοντέλου, με σκοπό την επανασχεδίαση (CAD Design), τον έλεγχο ακεραιότητας (inspection) ή την απευθείας εκτύπωση, με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή (3D Printing). Επίσης, αναλύεται η έννοια του CMF (color, material, finish) και ο τρόπος με τον οποίο το χρώμα, το υλικό και η υφή μπορούν να αξιοποιηθούν στη δημιουργία του τελικού 3D εκτυπωμένου μοντέλου.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται αρχικά η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing), η τρισδιάστατη εκτύπωση και ορισμένες από τις διαθέσιμες τεχνολογίες της, και συγκεκριμένα αυτές που αξιοποιούν για την εκτύπωση πλαστικό. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τεχνολογίες που αξιοποιούν την πολύχρωμη εκτύπωση και ο ρόλος του slicer (λογισμικό επεξεργασίας) πριν την εκτύπωση. Το πείραμα θα πραγματοποιηθεί με την τεχνολογία Polyjet, και συγκεκριμένα με την μηχανή J55 της εταιρείας «Stratasys», προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τελικό πρωτότυπο, με το επιθυμητό αποτέλεσμα, ως προς την υφή και το χρώμα, σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει προηγηθεί και αναλύεται στα δύο προηγούμενα κεφάλαια. Η συγκεκριμένη τεχνολογία επιλέχθηκε, καθώς παραχωρήθηκε στον γράφοντα η δυνατότητα χρήσης της, για τους σκοπούς της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, από την εταιρεία «Fourth Dimension SA» σε συνεργασία με την «BIC Violex» για το τελικό εκτυπωμένο μοντέλο.

1. Μετρολογία και Τρισδιάστατη Σάρωση

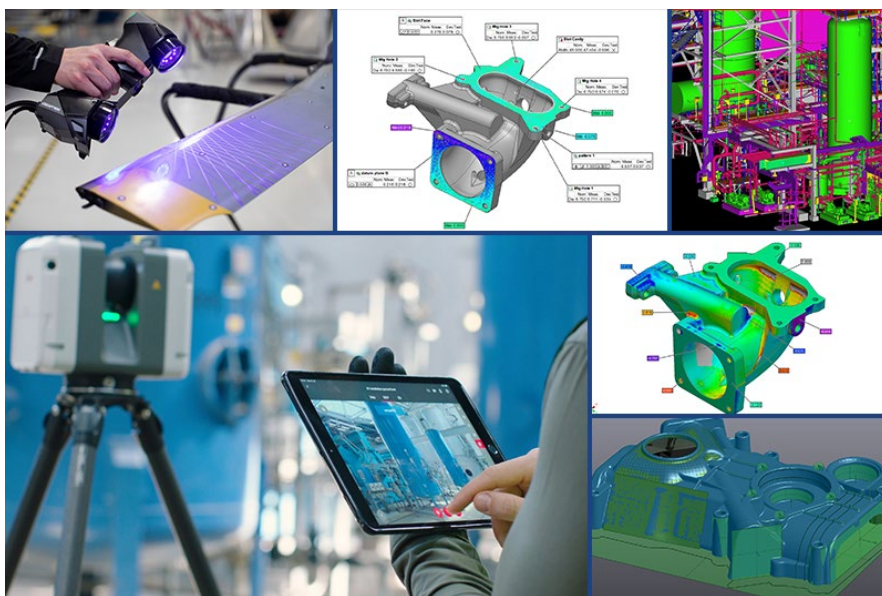
1.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων με σκοπό τη δημιουργία νέων προϊόντων είναι ένα εξαιρετικά ευρύ πεδίο, το οποίο ξεκινά με τη δημιουργία και ανάπτυξη νέων ιδεών και οδηγεί στην κατασκευή νέων προϊόντων. Οι σύγχρονες τεχνολογίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη δημιουργία νέων προϊόντων, καθώς με τη χρήση τους έχει γίνει πλέον δυνατή η μέτρηση προϊόντων και αντικειμένων με μεγάλη ακρίβεια, η εξαγωγή των πληροφοριών τους και η αξιοποίησή τους, με σκοπό την ανακατασκευή και τη βελτίωση των προϊόντων. Στο πλαίσιο αυτό, αναδεικνύεται η εξαιρετική σημασία της μετρολογίας και της τρισδιάστατης σάρωσης αντικειμένων.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εισαγωγή στην έννοια της μετρολογίας και της τρισδιάστατης σάρωσης φυσικών αντικειμένων. Αναφέρονται οι τεχνικές πτυχές της μετρολογίας, παρατίθενται ορισμοί και γίνεται ενδεικτική αναφορά σε διάφορους τύπους 3D σαρωτών και στις εφαρμογές τους. Αναλύεται, επίσης, η πλήρης διαδικασία τρισδιάστατης σάρωσης, από την απόκτηση των δεδομένων μέχρι τον τρόπο χειρισμού των 3D σαρωτών, με σκοπό την καταγραφή της υφής, της επιφάνειας και του χρώματος ενός αντικειμένου.

Για το πρακτικό κομμάτι του κεφαλαίου αυτού, το οποίο περιλαμβάνει τη σάρωση φυσικού μοντέλου και την αρχική επεξεργασία του, θα χρησιμοποιηθεί ο τρισδιάστατος σαρωτής Go!SCAN Spark της εταιρείας «Creaform».

1.2 Εφαρμογή της Μετρολογίας (Metrology)



Εικόνα 1 Εφαρμογές της μετρολογίας. Πηγή [\[v3dtech\]](#)

Ορισμός: Ο όρος Μετρολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει οποιαδήποτε μέθοδο απόκτησης ακριβών 3D μετρήσεων της συνολικής επιφάνειας (ή τμήματος) ενός αντικειμένου. Στο παρελθόν αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν χειροκίνητα με τη χρήση εργαλείων, όπως μικρόμετρα και υψόμετρα. Οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (CMMs), οι οποίες είναι σχεδιασμένες για να επιταχύνουν και να διευκολύνουν τη διαδικασία της μέτρησης, οι οποίες μπορούν να εξοπλιστούν με αισθητήρες αφής ή οπτικούς αισθητήρες που κινούνται κατά μήκος της επιφάνειας ενός αντικειμένου, ανιχνεύοντας, καθώς προχωρούν, τα χαρακτηριστικά του. Επιπλέον, στην Μετρολογία έχουν εισαχθεί τα τελευταία χρόνια και οι τρισδιάστατοι σαρωτές, οι οποίοι ήρθαν να λύσουν προβλήματα των CMM, όπως δύσκολες επιφάνειες ή προϊόντα με περιορισμένη πρόσβαση και περιορισμένη δυνατότητα φορητότητας¹.

Ιστορία: Η επιστήμη της μετρολογίας άρχισε να αναπτύσσεται ήδη από την αρχαιότητα, αποτελεί δε ένα πεδίο, το οποίο γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ μαθηματικών και μηχανικής. Οι πρώτες προσπάθειες για μετρήσεις ξεκίνησαν από τον Πολιτισμό της κοιλάδας του Ινδού το πρώτο μισό της τρίτης χιλιετίας π.Χ., περίπου από το 2600 π.Χ. έως το 1900 π.Χ. Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι χρησιμοποίησαν πρωτόγονα συστήματα μετρολογίας για να χτίσουν τις πυραμίδες. Αργότερα, στην Αναγέννηση, στην εποχή του Γαλιλαίου και του Λεονάρντο ντα Βίντσι αναπτύχθηκαν σημαντικά οι μέθοδοι της μετρολογίας. Σήμερα, αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης κατασκευής, της υγείας και ακόμη και της διαστημικής έρευνας².

1.2.1 Εισαγωγή στη Μετρητική Σάρωση

Η μετρητική σάρωση 3D αποτελεί την πιο εξελιγμένη μορφή της παραδοσιακής μετρολογίας. Με αυτήν στις κλασικές τεχνικές μέτρησης προστίθεται το λέιζερ, ο δομημένος φωτισμός (structured light) και το ψηφιακό λογισμικό. Η μετρητική σάρωση καταγράφει τη γεωμετρία της επιφάνειας ενός αντικειμένου με τη χρήση λέιζερ ή δομημένου φωτισμού. Ο σαρωτής συλλέγει σημεία δεδομένων, τα οποία επεξεργάζεται στη συνέχεια εξειδικευμένο λογισμικό για τη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου 3D.

Σαρωτές Λέιζερ: Οι σαρωτές λέιζερ εκτοξεύουν μία ή πολλές δέσμες λέιζερ στην επιφάνεια του αντικειμένου, συλλέγοντας με αυτόν τον τρόπο χιλιάδες σημεία δεδομένων σε δευτερόλεπτα. (Gabriel Taubin, 2014)

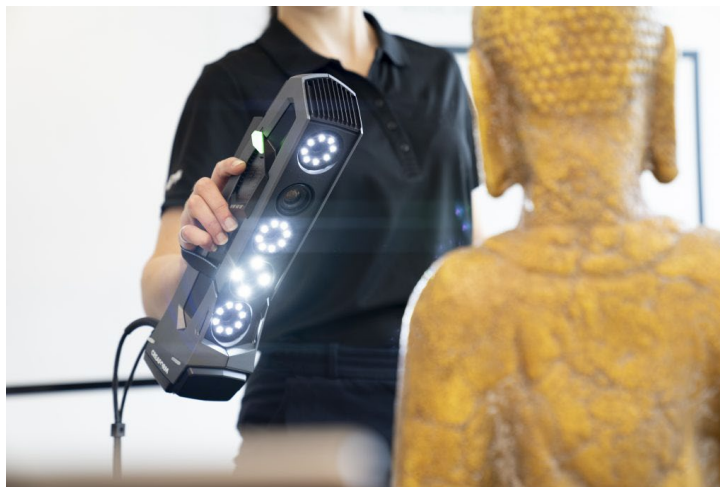
¹ Capture3d, What is 3D Metrology? And Other Things You Should Know if You're New to 3D Scanning, <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/what-is-3d-metrology-and-other-things-you-should-know-if-you-re-new-to-3d-scanning>

² Gabriel Taubin, Daniel Moreno, Douglas Lanman, "3D Scanning for Personal 3D Printing: Build Your Own Desktop 3D Scanner", Συνεδριακό Κέντρο Βανκούβερ (Vancouver Convention Center), 2014, σελ. 1



Εικόνα 2 Εφαρμογή λέιζερ σαρωτή. Πηγή: [Creaform]

Σαρωτές δομημένου φωτισμού: Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί μοτίβα φωτός και σκιάς για να μετρήσει τις διαστάσεις ενός αντικειμένου. Ο τρόπος με τον οποίο το φως κάμπτεται και επεκτείνεται δίνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις διαστάσεις και τη μορφή του αντικειμένου.



Εικόνα 3 Εφαρμογή σαρωτή δομημένου φωτισμού. Πηγή: [Creaform]

Λογισμικό: Τα προηγμένα λογισμικά επεξεργάζονται τα σημεία δεδομένων που συλλέγονται από τους σαρωτές. Έπειτα το λογισμικό μετατρέπει τα σύννεφα σημείων (point cloud) σε ένα λεπτομερές μοντέλο 3D. ³

³ EDM Intelligent Solutions, 3D SCANNING METROLOGY VS. TRADITIONAL METHODS: A COMPARATIVE ANALYSIS <https://www.edmdept.com/3d-scanning-metrology/>

1.2.2 Συγκριτική Ανάλυση παραδοσιακών τρόπων μέτρησης με την 3D τεχνολογία



Εικόνα 4 Παραδοσιακή μέθοδος μέτρησης. Πηγή [\[hackaday\]](#)

Ακρίβεια

Παραδοσιακή Μέθοδος: Όσον αφορά την παραδοσιακή μετρολογία, η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τη δεξιότητα του χειριστή. Ακόμα και τα πιο ακριβή εργαλεία μέτρησης, μπορεί να μην παρέχουν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα, εάν ο χειριστής τους δεν είναι καλά εξοικειωμένος με τη χρήση τους.

3D Μέθοδος: Αντίθετα, αυτός ο προηγμένος τύπος μετρολογίας προσφέρει ένα επίπεδο ακρίβειας που είναι δύσκολο να ξεπεραστεί. Οι προηγμένες τεχνολογίες που αξιοποιεί, όπως τα λέιζερ σκάνερ και το δομημένο φως, ελαχιστοποιούν το περιθώριο ανθρώπινου σφάλματος, καθώς το μηχάνημα κάνει το μεγαλύτερο μέρος της δουλειάς, εξασφαλίζοντας ότι οι μετρήσεις είναι ακριβείς κάθε φορά.

Χρονική Αποτελεσματικότητα

Παραδοσιακή Μέθοδος: Η παραδοσιακή μετρολογία μπορεί να είναι χρονοβόρα, ειδικά για πολύπλοκα αντικείμενα με πολλές λεπτομέρειες. Κάθε μέτρηση πρέπει να πραγματοποιείται ξεχωριστά, με αποτέλεσμα η συνολική μέτρηση της επιφάνειας ενός αντικειμένου με σύνθετη γεωμετρία να καθίσταται μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία.

3D Μέθοδος: Οι 3D σαρωτές μπορούν να καταγράψουν χιλιάδες σημεία δεδομένων σε δευτερόλεπτα, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για τις μετρήσεις αντικειμένων με πολύπλοκη γεωμετρία και μεγάλης κλίμακας.

Κόστος

Παραδοσιακή Μέθοδος: Παρόλο που το κόστος αγοράς παραδοσιακών εργαλείων μετρολογίας είναι γενικά χαμηλότερο, το κόστος συντήρησης και βαθμονόμησης αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου. Σημειώνεται δε ότι για διαφορετικές εργασίες μέτρησης, ενδέχεται να χρειαστούν διαφορετικά εργαλεία μετρολογίας.

3D Μέθοδος: Παρόλο που το κόστος των συστημάτων 3D μετρολογίας είναι υψηλό, αποτελούν ιδιαίτερα ευέλικτα εργαλεία, κατάλληλα για πολλά και διαφορετικά έργα, και συνεπώς μειώνουν την ανάγκη για πολλαπλά εργαλεία.

Επίπεδο Δεξιότητας

Παραδοσιακή Μέθοδος: Η παραδοσιακή μετρολογία απαιτεί εξειδικευμένη εκπαίδευση και πρακτική εξάσκηση πολλών ετών, προκειμένου να επιτευχθούν όσο το δυνατόν περισσότερα ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις.

3D Μέθοδος: Η 3D μετρολογία είναι γενικά πιο φιλική προς τον χρήστη, καθώς παρόλο που προϋποθέτει εκπαίδευση, καθώς ο ρυθμός εκμάθησης είναι πιο γρήγορος καθιστώντας τη συγκεκριμένη τεχνολογία προσιτή σε ευρύτερο κύκλο προσώπων.⁴

1.3 Τι είναι τρισδιάστατη σάρωση;

Η τεχνολογία σάρωσης 3D επιτρέπει την ανάλυση ενός αντικειμένου (ή περιβάλλοντος) μέσω της συλλογής δεδομένων σχετικά με τη μορφή του και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την εμφάνισή του (χρώμα, υφή), με σκοπό την κατασκευή ενός ψηφιακού 3D μοντέλου. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για να πραγματοποιήσει αυτού του είδους την ανάλυση είναι ένας σαρωτής 3D.

Οι σαρωτές 3D προσομοιάζουν στις φωτογραφικές μηχανές, καθώς και αυτοί συλλέγουν πληροφορίες από ορατές επιφάνειες. Μία λεπτομέρεια τις καθιστά διαφορετικές: η φωτογραφική μηχανή συλλέγει πληροφορίες χρώματος και επιφάνειας εντός του οπτικού πεδίου της, δημιουργώντας εικόνες, ενώ ο σαρωτής 3D χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που συλλέγει για την εξαγωγή 3D δεδομένων. Δημιουργεί, δηλαδή, ένα γεωμετρικό σύννεφο σημείων της επιφάνειας του αντικειμένου. Η εικόνα που παράγεται από τον σαρωτή 3D παρέχει τρισδιάστατες θέσεις (συντεταγμένες) για κάθε σημείο της επιφάνειας.⁵

4 EDM Intelligent Solutions, 3D SCANNING METROLOGY VS. TRADITIONAL METHODS: A COMPARATIVE ANALYSIS <https://www.edmdept.com/3d-scanning-metrology/>

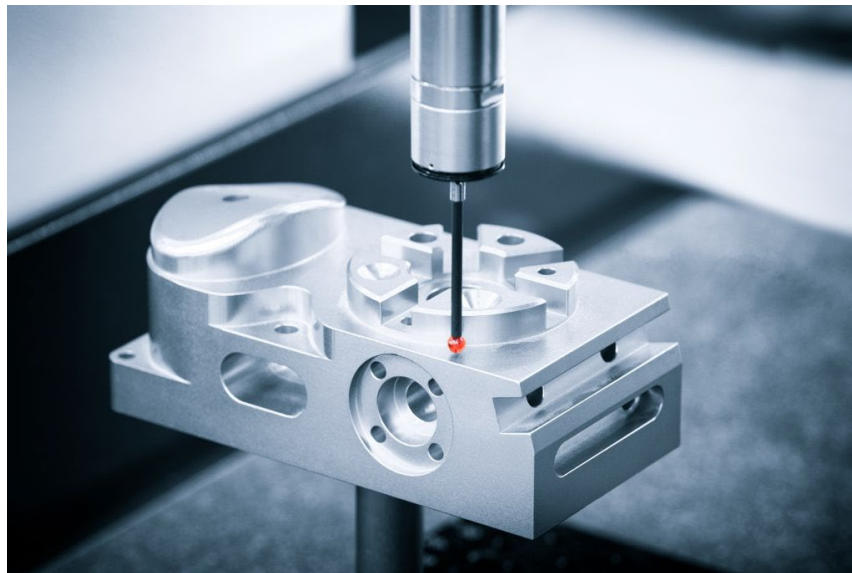
5 REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 8

1.4 Τύποι και κατηγορίες 3D Σαρωτών

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός ψηφιακού τρισδιάστατου μοντέλου, και στις οποίες βασίζονται διαφορετικοί τύποι σαρωτών 3D. Ανάλογα με την τεχνολογία στην οποία βασίζεται ένας σαρωτής 3D, διαφοροποιούνται και οι προδιαγραφές, ο τρόπος λειτουργίας και το κόστος τους. Οι σαρωτές 3D που είναι κατάλληλοι για τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: σαρωτές 3D επαφής και σαρωτές 3D μη επαφής με αντικείμενο. Οι σαρωτές 3D μη επαφής χωρίζονται επίσης σε δύο κατηγορίες: παθητικοί και ενεργητικοί. Στην παρακάτω ενότητα περιγράφονται οι διαφορετικές τεχνολογίες σαρωτών 3D.

1.4.1 Σαρωτές επαφής (Contact Scanners)

Οι σαρωτές επαφής 3D (probes) σαρώνουν φυσικά αντικείμενα, μέσω φυσικής επαφής με αυτά [Εικόνα 5]. Για να πραγματοποιηθεί η σάρωση τα αντικείμενα τοποθετούνται σε μία επιφάνεια ακριβείας. Η δυνατότητα σάρωσης ενός αντικειμένου μέσω σαρωτή επαφής εξαρτάται από τη δυνατότητα σταθεροποίησης του αντικειμένου και από την τραχύτητα της επιφάνειάς του. Όταν το αντικείμενο που πρόκειται να σαρωθεί δεν είναι επίπεδο ή δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί σε μια επίπεδη επιφάνεια, πρέπει να υποστηρίζεται και να σταθεροποιείται με κατάλληλες μεθόδους στήριξης.



Εικόνα 5 Οι σαρωτές επαφής 3D σαρώνουν φυσικά αντικείμενα, μέσω φυσικής επαφής με αυτά. Πηγή [\[Creaform\]](#)

Οι σαρωτές επαφής, δεδομένου ότι έρχονται σε φυσική επαφή με το αντικείμενο, δημιουργούν αρχεία πλέγματος (mesh file) πολύ μεγάλης ακριβείας και ιδιαίτερα λεπτομερή. Για να αντιληφθεί κανείς την ακρίβεια που παρέχουν οι σαρωτές επαφής, αρκεί να αναλογιστεί την ανάλυση μιας οθόνης, η οποία επηρεάζεται από τον αριθμό

των pixels. Αντίστοιχα, οι σαρωτές επαφής είναι σε θέση να δημιουργούν ιδιαίτερα ακριβή τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα, καθώς έρχονται σε επαφή με ολόκληρη την επιφάνεια των αντικειμένων που σαρώνουν και λαμβάνουν πληροφορίες από κάθε σημείο της επιφάνειας αυτής⁶.

1.4.1.1 Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων - (CMM - Coordinate Measuring Machines)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα συσκευών μέτρησης που χρησιμοποιούν τεχνολογία επαφής είναι οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM - Coordinate Measuring Machines). Χρησιμοποιούνται κυρίως στον τομέα της βιομηχανίας και παρέχουν μεγάλη ακρίβεια. Οι γεωμετρικές συντεταγμένες του αντικειμένου μετρούνται με CMM και ο χειριστής ελέγχει το μηχάνημα χειροκίνητα. [Εικόνα 6]



Εικόνα 6 Οι γεωμετρικές συντεταγμένες του αντικειμένου μετρούνται με CMM και ο χειριστής ελέγχει το μηχάνημα χειροκίνητα. Πηγή [Artec3d]

Η αδυναμία των CMM είναι ότι προϋποθέτουν επαφή με το αντικείμενο που σαρώνεται. Η σάρωση του αντικειμένου μπορεί να το αλλοιώσει ή να το καταστρέψει, στοιχείο ιδιαίτερα κρίσιμο, όταν σαρώνονται ευαίσθητα ή πολύτιμα αντικείμενα, όπως ιστορικά αντικείμενα. Μια άλλη αδυναμία των CMM είναι ότι είναι σχετικά αργά σε σύγκριση με άλλες μεθόδους σάρωσης. Ο βραχίονας, στον οποίο είναι τοποθετημένη η κεφαλή/αισθητήρας (probe) κινείται πολύ αργά, αφού και τα πιο γρήγορα CMM μπορούν να λειτουργούν μόνο σε μερικές εκατοντάδες hertz.

Τα συστήματα μέτρησης επαφής είναι επίσης αρκετά ευαίσθητα στις αλλαγές του περιβάλλοντος (δονήσεις, μετατοπίσεις, μεταβολές θερμοκρασίας). Για να λειτουργήσουν σωστά πρέπει να βρίσκονται σε περιβάλλον προστατευμένο από τυχόν μεταβολές (π.χ.

⁶ Jagjit Singh Randhawa, Sepaldeep Singh Dhaliwal, Manarshhhot Singh, 3-D Scanning and 3-D Printing in Archeology, Ιανουάριος 2017, <https://www.researchgate.net/publication/348705294>

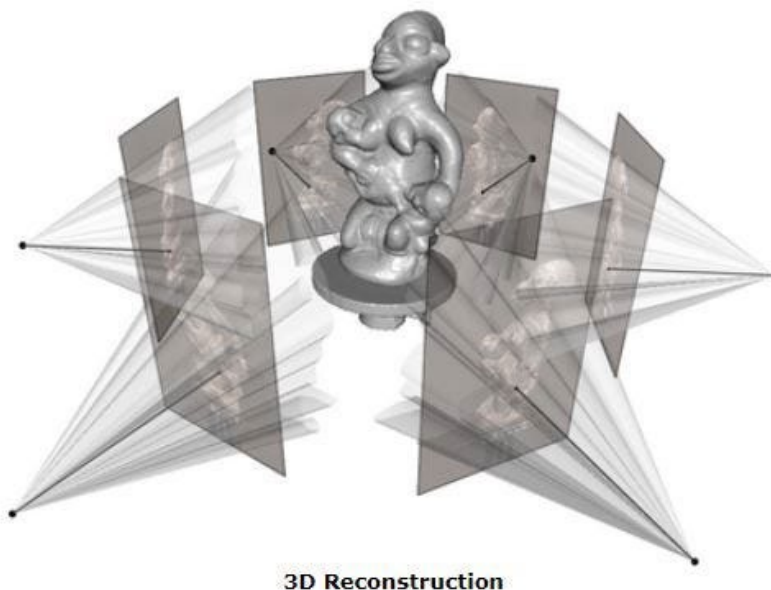
να τοποθετούνται σε ανεξάρτητη βάση ή να χρησιμοποιούνται σε εργαστήριο μετρολογίας).⁷

1.4.2 Σαρωτές μη επαφής (Non-contact Scanners)

1.4.2.1 Παθητική Μέθοδος (Passive Method)

Οι παθητικοί σαρωτές δεν εκπέμπουν οι ίδιοι κάποιο είδος ακτινοβολίας. Οι σαρωτές αυτοί χρησιμοποιούν την ακτινοβολία του περιβάλλοντος, π.χ. το φυσικό φως, και συγκεκριμένα την αντανάκλασή της στον χώρο και στα αντικείμενα, προκειμένου να προσδιορίσουν τη μορφή του υπό σάρωση αντικειμένου. Οι σαρωτές 3D που λειτουργούν βάσει της παθητικής μεθόδου είναι συνήθως και οι πιο οικονομικοί, καθώς δεν απαιτούν ειδικό εξοπλισμό εκτός από ψηφιακές κάμερες και το αντίστοιχο λογισμικό επεξεργασίας.

Η στερεοσκοπική απεικόνιση (stereoscopic imaging) είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα παθητικά συστήματα τρισδιάστατης απεικόνισης, με εφαρμογές τόσο στη βιολογία όσο και στη μηχανική. Η στερεοσκοπική απεικόνιση μοιάζει με τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου οφθαλμού. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως δύο κάμερες, σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, στραμμένες προς το ίδιο αντικείμενο. Κάθε κάμερα λαμβάνει εικόνες του ίδιου αντικειμένου από διαφορετικά σημεία λήψης. Στη συνέχεια, οι διαφορετικές εικόνες που λαμβάνει κάθε κάμερα αναλύονται με κατάλληλα λογισμικά προγράμματα, και με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η απόσταση κάθε σημείου και στη συνέχεια η τρισδιάστατη απεικόνιση του αντικειμένου.⁸



Εικόνα 7 Τρισδιάστατη αναπαράσταση στερεοσκοπικής απεικόνισης. Πηγή [Medium]

⁷ Matthew McMillion, What is a CMM machine?, Απρίλιος 2021, <https://www.artec3d.com/learning-center/what-is-cmm-machine>

⁸ Gabriel Taubin, Daniel Moreno, Douglas Lanman, "3D Scanning for Personal 3D Printing: Build Your Own Desktop 3D Scanner", Συνεδριακό Κέντρο Βανκούβερ (Vancouver Convention Center), 2014, σελ. 2-3

1.4.2.2 Ενεργητική Μέθοδος

Οι ενεργητικοί σαρωτές σαρώνουν αντικείμενα εκπέμποντας φως ή κάποιου είδους ακτινοβολία (π.χ. ακτίνες X ή υπερήχους). Το φως ή η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον σαρωτή αντανακλάται από το αντικείμενο που σαρώνεται, στέλνοντας πίσω πληροφορίες σχετικά με την επιφάνειά του.

Ιδιαίτερα διαδεδομένες είναι οι οπτικές μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων περιλαμβάνουν το κόστος, την ταχύτητα, την κινητικότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων.

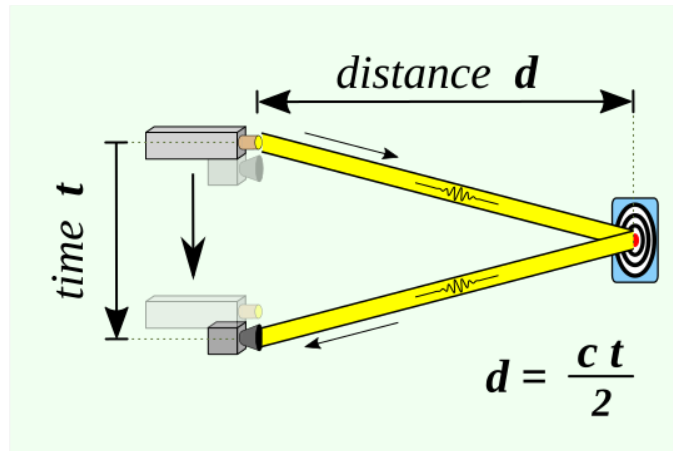
Η αδυναμία του συγκεκριμένου τύπου 3D σαρωτών εντοπίζεται στη σάρωση ιδιαίτερα ανακλαστικών ή διαφανών αντικειμένων, για τη σάρωση των οποίων απαιτείται να ληφθούν πρόσθετα μέτρα.

Όπως και με τα CMMs, η σάρωση με ένα μόνο σημείο είναι ένα διαδικαστικά αργό. Σε αυτόν τον σχεδιασμό, ένας λέιζερ προβολέας δημιουργεί ένα επίπεδο φωτός. Αυτή η "ράγα" στη συνέχεια σαρώνεται μηχανικά σε όλη την επιφάνεια. Όπως πριν, η γνωστή απόκλιση της πηγής του λέιζερ καθορίζει ένα 3D επίπεδο. Το βάθος ανακτάται από τη διασταύρωση αυτού του επιπέδου με το σύνολο γραμμών που διαβαίνουν από την 3D ράγα στην επιφάνεια και το κέντρο προβολής της κάμερας.⁹

1.4.2.2.1 Σαρωτές χρόνου πτήσης (time - of - flight)

Οι σαρωτές χρόνου πτήσης (time - of - flight) χρησιμοποιούν λέιζερ για να εξετάσουν το υπό σάρωση αντικείμενο. Αυτός ο τύπος σαρωτή είναι εξοπλισμένος με τηλεμετρο (rangefinder) λέιζερ, το οποίο υπολογίζει την απόσταση μιας επιφάνειας, χρονομετρώντας τον χρόνο που απαιτείται για την αποστολή και επιστροφή ενός παλμού φωτός (pulse of light). Το λέιζερ εκπέμπει ένα παλμό φωτός προς το αντικείμενο και ο χρόνος υπολογίζεται από την αρχή της εκπομπής της ακτίνας μέχρι ο αισθητήρας εντοπίσει το ανακλώμενο φως.

⁹ Gabriel Taubin, Daniel Moreno, Douglas Lanman, "3D Scanning for Personal 3D Printing: Build Your Own Desktop 3D Scanner", Συνεδριακό Κέντρο Βανκούβερ (Vancouver Convention Center), 2014, σελ. 3-5



Εικόνα 8 Εάν t είναι ο χρόνος πτήσης, τότε η απόσταση είναι ίση με $(c \cdot t) / 2$. Πηγή [\[Wikipedia\]](#)

Δεδομένου ότι η ταχύτητα του φωτός c είναι γνωστή, ο χρόνος πτήσης (από τον σαρωτή προς το αντικείμενο και από το αντικείμενο προς τον σαρωτή) καθορίζει την απόσταση που διανύει το φως, η οποία είναι διπλάσια της απόστασης μεταξύ του σαρωτή και της επιφάνειας. Εάν t είναι ο χρόνος πτήσης, τότε η απόσταση είναι ίση με $(c \cdot t) / 2$ [Εικόνα 8]. Η ακρίβεια ενός σαρωτή λέιζερ 3D χρόνου πτήσης εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία μπορεί να μετρηθεί ο χρόνος t : το φως χρειάζεται περίπου 3,3 πικοδευτερόλεπτα για να διανύσει 1(mm) χιλιοστόμετρο.¹⁰

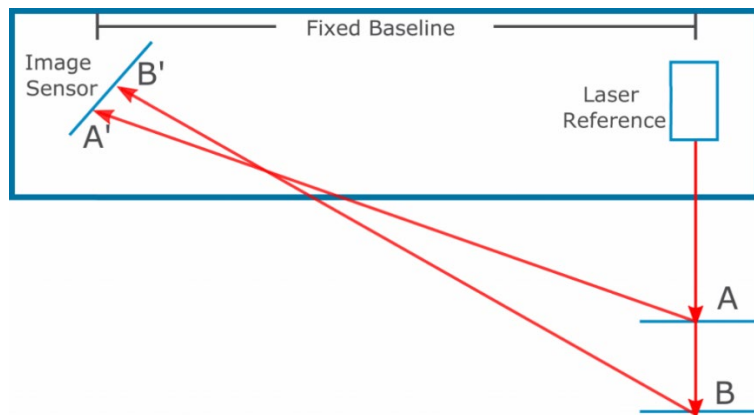


Εικόνα 9 Χρήση αισθητήρα Time-of-flight για να ανοίξει το πορτ-μπαγκάζ. Πηγή: [\[all3dp\]](#)

¹⁰ REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 12 https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

1.4.2.2 Τριγωνισμού (triangulation)

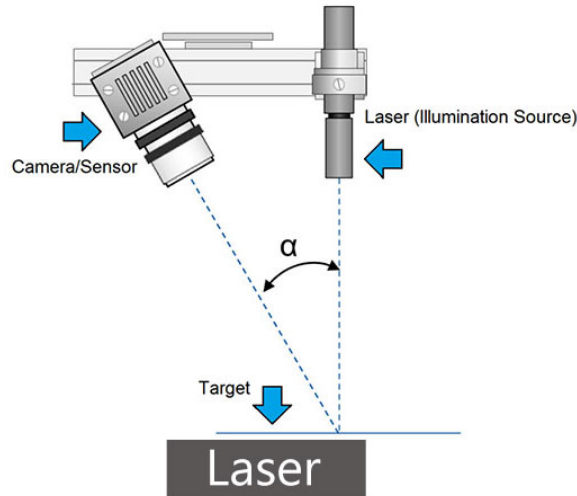
Ο τριγωνισμός (ή τριγωνομετρία) είναι μια μέθοδος για τον προσδιορισμό της απόστασης μεταξύ δύο σημείων. Λειτουργεί χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερες μετρήσεις που πραγματοποιούνται από διαφορετικές θέσεις. Μετρώντας τη γωνία μεταξύ των δύο σημείων και την απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων, είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τον τριγωνισμό. Πολλοί σαρωτές 3D βασίζονται στις αρχές του τριγωνισμού για να εξετάσουν τη γεωμετρική σχέση μεταξύ του αντικειμένου και του σαρωτή.



Εικόνα 10 Εάν το λέιζερ χτυπήσει ένα αντικείμενο στο σημείο A, αυτό θα φανεί από τον αισθητήρα εικόνας του σαρωτή στη θέση A'. Εάν το λέιζερ χτυπήσει ένα αντικείμενο στη θέση B, θα φανεί στο B'. Πηγή: [hermary]

Οι σαρωτές λέιζερ 3D που χρησιμοποιούν τη μέθοδο του τριγωνισμού είναι επίσης ενεργοί σαρωτές. Αποκτούν τριδιάστατα δεδομένα χρησιμοποιώντας τις αρχές του τριγωνισμού, με το λέιζερ να είναι η πηγή φωτισμού. Ο σαρωτής συλλέγει σημεία δεδομένων σε ένα αναφερόμενο επίπεδο που ορίζεται από μία ακτίνα λέιζερ. Όλα τα σημεία δεδομένων θα βρίσκονται κάπου σε αυτό το επίπεδο. Εάν το λέιζερ χτυπήσει ένα αντικείμενο στο σημείο A, αυτό θα φανεί από τον αισθητήρα εικόνας του σαρωτή στη θέση A'. Εάν το λέιζερ χτυπήσει ένα αντικείμενο στη θέση B, αυτό θα φανεί από τον αισθητήρα εικόνας του σαρωτή στη θέση B' [Εικόνα 10]. Δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ του λέιζερ και του αισθητήρα εικόνας είναι γνωστή, ο σαρωτής μπορεί να υπολογίσει την απόσταση από το αντικείμενο εξετάζοντας το σημείο στο οποίο εντοπίζει ο αισθητήρας το ανακλώμενο λέιζερ.¹¹

¹¹ Terry Hermary, Principles of Laser Triangulation, Laser triangulation, <https://hermary.com/learning/principles-of-laser-triangulation/>



Εικόνα 11 Αυτή η μέθοδος ονομάζεται τριγωνισμός επειδή το λέιζερ, η κάμερα και ο πομπός του λέιζερ σχηματίζουν ένα τρίγωνο. Πηγή: [3dnatives]

Αυτή η μέθοδος ονομάζεται τριγωνισμός επειδή το λέιζερ, η κάμερα και ο πομπός του λέιζερ σχηματίζουν ένα τρίγωνο [Εικόνα 11]. Τρεις πληροφορίες καθορίζουν το σχήμα και το μέγεθος του τριγώνου.

- Πρώτον, το μήκος της μίας πλευράς του τριγώνου, δηλαδή η απόσταση μεταξύ της κάμερας-αισθητήρα και του πομπού του λέιζερ, είναι γνωστή
- Δεύτερον, η γωνία του πομπού του λέιζερ είναι επίσης γνωστή
- Τρίτον, η γωνία της κάμερας σε σχέση με το αντικείμενο καθορίζεται από τη θέση της αντανάκλασης του λέιζερ στο πεδίο θέασης της κάμερας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα πλέγμα λέιζερ, αντί για μία μοναδικά ακτίνα λέιζερ, εκπέμπεται στο αντικείμενο για να επιταχύνει τη διαδικασία σάρωσης.¹²

1.4.2.2.3 Φορητοί σαρωτές

Οι φορητοί σαρωτές λέιζερ δημιουργούν μια τρισδιάστατη εικόνα χρησιμοποιώντας, επίσης, τη μέθοδο του τριγωνισμού. Ο φορητός σαρωτής προβάλλει μία γραμμή ή ένα σημείο λέιζερ πάνω στο αντικείμενο που σαρώνεται και στη συνέχεια μέσω αισθητήρων μετρά την απόσταση από την επιφάνεια του αντικειμένου. Ένα εσωτερικό σύστημα συλλέγει τα δεδομένα. Δεδομένου ότι ο χειριστής του σαρωτή κινείται, πρέπει να καθορίζεται ανά πάσα στιγμή η θέση του σαρωτή σε σχέση με το αντικείμενο που σαρώνεται. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση σημείων αναφοράς [Εικόνα 12] της επιφάνειας του αντικειμένου (συνήθως κολλητικών ανακλαστικών στόχων).

Ένας ανιχνευτής λέιζερ, ο οποίος παρέχει τη θέση του αισθητήρα, εξασφαλίζει την εξωτερική παρακολούθηση. Μια ενσωματωμένη κάμερα καθορίζει τον προσανατολισμό του σαρωτή. Και οι δύο τεχνικές χρησιμοποιούν υπέρυθρες διόδους συνδεδεμένες με τον

¹² REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 13 https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

σαρωτή. Οι υπέρυθρες διόδους είναι ορατές από τις κάμερες μέσω φίλτρων, παρέχοντας ανθεκτικότητα στο φωτισμό περιβάλλοντος. Ένας υπολογιστής συλλέγει τα δεδομένα (συλλεγμένα σημεία), τα οποία στη συνέχεια καταγράφονται σε ένα τρισδιάστατο χώρο. Αυτό μπορεί να μετατραπεί σε τριγωνισμένο δίκτυο με επεξεργασία και, στη συνέχεια, σε μοντέλο CAD ή να προετοιμαστεί για εκτύπωση σε 3d εκτυπωτή.

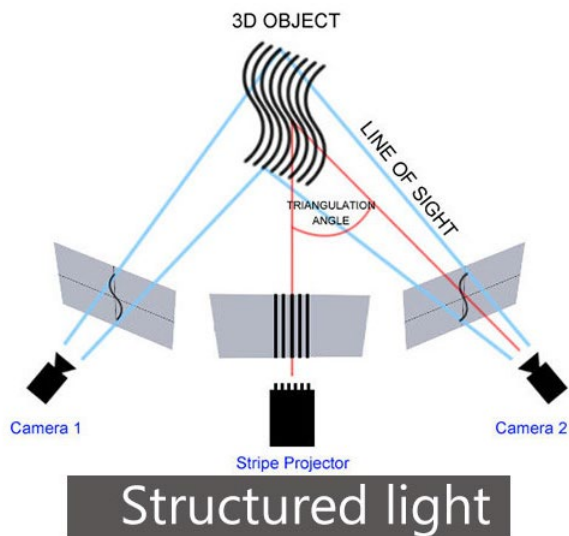


Εικόνα 12 Ο σαρωτής καθορίζει τη θέση του αντικειμένου χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της σαρωμένης επιφάνειας (συνήθως κολλητικοί ανακλαστικοί στόχοι). Πηγή: [\[creaform3d\]](https://www.creaform3d.com)

Αυτοί οι σαρωτές μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν το πραγματικό σχήμα (υφή ή χρώμα αντικειμένου) με μια κάμερα που ανιχνεύει αυτές τις πληροφορίες (σαρωτές δομημένου φωτισμού - βλ. παρακάτω).¹³

¹³ Creaform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 15, https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

1.4.2.2.4 Δομημένου Φωτισμού (Structured lighting)



Εικόνα 13 Αυτός ο τύπος σαρωτή 3D προβάλλει μια σειρά από ακτίνες φωτός (μοτίβο) στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Πηγή: [3dnatives]

Οι σαρωτές 3D με δομημένο φωτισμό χρησιμοποιούν την τεχνική της τριγωνομετρίας που περιεγράφηκε παραπάνω, αλλά βασίζονται στο δομημένο φωτισμό αντί για την χρήση λέιζερ. Αυτός ο τύπος σαρωτή 3D προβάλλει μια σειρά από ακτίνες φωτός (μοτίβο) στην επιφάνεια ενός αντικειμένου [Εικόνα 13]. Στη συνέχεια, μια κάμερα μετρά την παραμόρφωση του προβαλλόμενου μοτίβου και υπολογίζει την απόσταση από τον 3D σαρωτή στην επιφάνεια του αντικειμένου για κάθε σημείο στο πεδίο όρασης. Η πηγή δομημένου φωτισμού που χρησιμοποιείται για τον σαρωτή 3D μπορεί να είναι άσπρος ή μπλε.

Ο κύριος λόγος για την επιλογή ενός σαρωτή 3D με δομημένο φωτισμό αντί για έναν σαρωτή 3D με λέιζερ είναι η ταχύτητα. Αντί να σαρώνει μεμονωμένα σημεία ταυτόχρονα, η τεχνολογία δομημένου φωτισμού σαρώνει ολόκληρο το πεδίο όρασης σε ένα κλάσμα του δευτερολέπτου, επιτρέποντας τη σάρωση μεγάλων περιοχών εκθετικά πιο γρήγορα. Η πλειονότητα των τεχνολογιών δομημένου φωτισμού είναι επίσης ασφαλής για τα μάτια. Ωστόσο, οι σαρωτές 3D με δομημένο φωτισμό είναι πιο ευαίσθητοι στις συνθήκες έντονου εξωτερικού φωτισμού και σε αντανακλαστικές επιφάνειες, καθιστώντας δυσκολότερη τη χρήση τους σε εξωτερικούς χώρους κάτω από το φως του ήλιου.¹⁴

¹⁴ Creaform, WHAT IS THE BEST 3D SCANNER?, Απρίλιος 2023, https://www.creaform3d.com/blog/what-is-the-best-3d-scanner/#What_Are_the_Different_Types_of_Handheld_3D_Scanners

1.4.2.3 Ογκομετρικές Τεχνικές (volumetric techniques)

1.4.2.3.1 Βιομηχανικές

Οι τεχνικές της αξονικής (ή αλλιώς υπολογιστικής) τομογραφίας (CT), της μικροτομογραφίας και της μαγνητικής τομογραφίας (MRI) χρησιμοποιούνται για την απόκτηση ψηφιακής εικόνας αντικειμένου, συμπεριλαμβανομένου του εσωτερικού του, όπως για παράδειγμα στις μη καταστροφικές δοκιμές υλικού, στην αντίστροφη μηχανική ή στη μελέτη βιολογικών και παλαιοντολογικών δειγμάτων. Παρόλο που οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται και στον τομέα της βιομηχανίας, είναι πιο κοινές στον ιατρικό τομέα.¹⁵

1.4.2.3.2 Ιατρικές

Η αξονική (ή υπολογιστική) τομογραφία (CT) είναι μια ιατρική απεικονιστική μέθοδος, η οποία δημιουργεί μια τρισδιάστατη εικόνα του εσωτερικού ενός αντικειμένου από μια μεγάλη σειρά δισδιάστατων εικόνων ακτινογραφίας. Η μαγνητική τομογραφία (MRI) είναι μια άλλη ιατρική τεχνική που παρέχει πολύ μεγαλύτερη αντίθεση από την αξονική/υπολογιστική τομογραφία (CT) ανάμεσα στους διαφορετικούς μαλακούς ιστούς του σώματος, καθιστώντας την ιδιαίτερα χρήσιμη στη νευρολογία (εγκέφαλο), στη μυοσκελετική, στην καρδιαγγειακή και ογκολογική (καρκίνος) απεικόνιση. Αυτές οι τεχνικές παράγουν μια τρισδιάστατη ογκομετρική εικόνα που μπορεί να οπτικοποιηθεί, να χειριστεί ή να μετατραπεί σε παραδοσιακή επιφάνεια 3D μέσω αλγορίθμων εξαγωγής ισοεπιφανείας.¹⁶

¹⁵ Creaform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 15, https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

¹⁶ Creaform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 15, https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

1.4.3 Διαφορές μεταξύ σαρωτών λέιζερ και δομημένου φωτισμού

1.4.3.1 Λείζερ



Εικόνα 14 Οι σαρωτές λέιζερ 3D προβάλλουν ακτίνες λέιζερ στην επιφάνεια του εκάστοτε αντικειμένου που σαρώνουν και καταγράφουν σημεία. Πηγή: [\[goengineer\]](#)

Οι σαρωτές λέιζερ 3D προβάλλουν ακτίνες λέιζερ στην επιφάνεια του εκάστοτε αντικειμένου που σαρώνουν και καταγράφουν σημεία. Κύριο πλεονέκτημα των σαρωτών λέιζερ έναντι των σαρωτών δομημένου φωτός είναι η ακρίβεια και η ταχύτητα. Τα λέιζερ είναι επίσης πιο ακριβή και επιτρέπουν στους σαρωτές να καταγράφουν περισσότερα σημεία ανά δευτερόλεπτο με αποτέλεσμα μια γρήγορη διαδικασία σάρωσης.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες λέιζερ: Κόκκινα και Μπλε.

Τα κόκκινα λέιζερ (κόκκινης ακτίνας) είναι πιο κοντά στο δομημένο φωτισμό όσον αφορά τη σάρωση φωτεινών ή σκούρων επιφανειών και, σε ορισμένες περιπτώσεις, χρειάζονται επεξεργασία της επιφάνειας του αντικειμένου (π.χ. καθάρισμα).

Τα μπλε λέιζερ (μπλε ακτίνας) χρησιμοποιούν μικρότερο μήκος κύματος από τα κόκκινα, πράγμα που σημαίνει υψηλότερη οπτική ανάλυση, γρηγορότερη δημιουργία σημείων και μείωση του θορύβου κατά τη σάρωση. Τα μπλε λέιζερ επίσης ανιχνεύουν φωτεινές και σκούρες επιφάνειες πιο εύκολα οπότε δεν χρειάζεται επεξεργασία της επιφάνειας (στις περισσότερες εφαρμογές).

Πλεονεκτήματα των λέιζερ 3D σαρωτών:

- Γρήγορη ταχύτητα σάρωσης
- Υψηλή ακρίβεια
- Εντοπισμός φωτεινών/σκούρων επιφανειών χωρίς επεξεργασία επιφάνειας
- Κατάλληλοι για λεπτομέρειες
- Λιγότερο θόρυβος σάρωσης για καθαρά δεδομένα

Μειονεκτήματα των λέιζερ 3D σαρωτών:

- Χρειάζεται περισσότερους στόχους θέσης και είναι χρονοβόρα διαδικασία
- Δεν μπορεί να αποτυπώσει το χρώμα
- Συνήθως πιο ακριβοί

Οι λέιζερ σαρωτές είναι υψηλής ακρίβειας και απαραίτητοι για εφαρμογές ελέγχου ποιότητας και μετρολογίας.

1.4.3.2 Δομημένου φωτισμού



Εικόνα 15 Οι σαρωτές δομημένου φωτισμού αποκτούν δεδομένα εκπέμποντας λευκό φως. Πηγή [goengineer]

Όπως υποδηλώνει το όνομα, οι σαρωτές δομημένου φωτισμού αποκτούν δεδομένα εκπέμποντας λευκό φως με την χρήση μοτιβών πάνω από την επιφάνεια ενός αντικειμένου για τη λήψη δεδομένων.

Πλεονεκτήματα των 3D σαρωτών με Δομημένο Φως:

- Μπορούν να αποτυπώσουν πληροφορίες χρώματος
- Χρειάζονται περιορισμένους ή καθόλου στόχους θέσης
- Καμία ή περιορισμένη χρήση στόχων θέσης μπορεί να καθιστά ορισμένα μοντέλα πιο οικονομικά

Μειονεκτήματα των 3D σαρωτών με Δομημένο Φως:

- Μπορεί να αντιμετωπίζουν προβλήματα με φωτεινές/σκούρες επιφάνειες
- Δυσκολεύονται με λεπτές λεπτομέρειες όπως χαραγμένα κείμενα, αιχμηρές γωνίες, κ.λπ.

- Συνήθως έχουν κάπως πιο αργή ταχύτητα σάρωσης
- Συνήθως είναι ελαφρώς λιγότερο ακριβείς

Συνολικά, οι σαρωτές με δομημένο φως είναι απαραίτητοι αν θέλει κανείς να καταγράψει τόσο το χρώμα όσο και το σχήμα ενός αντικειμένου. Επίσης, όταν ο χρήστης του σαρωτή δεν επιθυμεί να τοποθετήσει σημεία θέσης στο αντικείμενο ή θέλει να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο που απαιτείται για τη σάρωση, τότε οι σαρωτές με δομημένο φως είναι επίσης μια καλή επιλογή. Ωστόσο, κατά τη σάρωση γυαλιστερών μηχανικών επιφανειών ή σκουρόχρωμων επιφανειών/αντικειμένων, το φως από αυτούς τους σαρωτές μπορεί να αντανακλάται/απορροφάται και να επηρεάζεται έτσι το τελικό αποτέλεσμα. Μια λύση είναι η επεξεργασία αυτών των επιφανειών με σπρέι πούδρας ή η επιλογή ενός συστήματος σάρωσης με λέιζερ. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε, οι σαρωτές με δομημένο φωτισμό είναι λίγο πιο αργοί, λιγότερο ακριβείς και χειρίζονται χειρότερα τις λεπτές λεπτομέρειες σε σχέση με τους σαρωτές με λέιζερ.¹⁷

1.5 Εφαρμογές Τρισδιάστατων σαρωτών



Εικόνα 16 Εφαρμογές τρισδιάστατων σαρωτών. Πηγή: [Creaoform3d]

1.5.1 Εφαρμογές στην Βιομηχανία

1.5.1.1 Ποιοτικός Έλεγχος

¹⁷ Sam Cheney, Choosing a 3D Scanner: Light vs Lasers, Applications, & Considerations, Μάρτιος 2023, <https://www.goengineer.com/blog/choosing-a-3d-scanner>

Μία από τις πιο κοινές εφαρμογές της σάρωσης 3D είναι ο ποιοτικός έλεγχος. Στις σημερινές αγορές υψηλής ανταγωνιστικότητας, όπου κάθε εταιρεία προσπαθεί να παράγει τα πιο ακριβή εξαρτήματα και εν γένει προϊόντα στο συντομότερο χρόνο, ο έλεγχος ποιότητας είναι απολύτως απαραίτητος. Οι διαδικασίες κατασκευής υψηλής ποιότητας μπορούν να ξεχωρίσουν μία επιχείρηση από τους ανταγωνιστές της, πράγμα που καθιστά τις ακριβείς και επαναλαμβανόμενες διαδικασίες ελέγχου ποιότητας ουσιώδεις για κάθε στάδιο παραγωγής. Το λογισμικό σάρωσης 3D μπορεί να βοηθήσει τις επιχειρήσεις να βελτιώσουν την ποιότητα και την ταχύτητα των ελέγχων τους, δημιουργώντας λεπτομερή 3D μοντέλα των εξαρτημάτων και των προϊόντων που κατασκευάζουν και παρέχοντας βελτιστοποιημένες ροές εργασίας σε συγκεκριμένους τομείς βιομηχανίας. Κάθε εξάρτημα που κατασκευάζεται μπορεί να σαρωθεί και το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να αξιολογηθεί για να διασφαλιστεί ότι κάθε τμήμα του εξαρτήματος είναι εντός των καθορισμένων ορίων ανοχής.¹⁸

1.5.1.2 Αντίστροφη Μηχανική και Σχεδιασμός CAD

Η αντιμετώπιση μιας συχνής πρόκλησης στον κόσμο της μηχανικής και του σχεδιασμού προϊόντων είναι η αντίστροφη μηχανική ενός φυσικού προϊόντος για το οποίο δεν υπάρχει ή δεν είναι διαθέσιμο αρχείο CAD. Η χρήση ενός σαρωτή 3D που θα αποτυπώσει τα πολύπλοκα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι ένας εξαιρετικός τρόπος για την ανάπτυξη ενός αρχείου CAD, όταν δεν είναι διαθέσιμο. Η δημιουργία ή η προμήθεια αρχείων CAD υψηλής ποιότητας στα πρώιμα στάδια της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα αποτελέσματα του έργου, με την μείωση των υποθέσεων που βασίζονται σε ανακριβή δεδομένα.¹⁹

1.5.1.3 Πρωτοτυποποίηση και 3D εκτύπωση

Η δημιουργία πρωτοτύπων και η εκτύπωση 3D αποτελούν ένα άλλο συχνό πεδίο εφαρμογής για το λογισμικό σάρωσης 3D. Οι 3D σαρωτές επιτρέπουν τη μετατροπή ενός φυσικού προϊόντος σε ψηφιακή μορφή (π.χ. μορφή αρχείου STL) και την επεξεργασία του ψηφιοποιημένου μοντέλου για τη δημιουργία πρωτοτύπων που στη συνέχεια εκτυπώνονται από εκτυπωτές 3D. Το υψηλό επίπεδο ακρίβειας που μπορούν να επιτύχουν ποιοτικοί 3D σαρωτές βελτιώνει σημαντικά αυτήν τη διαδικασία, καθώς η

¹⁸ Capture3D, Best Uses of 3D Scanning and Its Applications, <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/best-uses-of-3d-scanning-software>

¹⁹ Capture3D, Best Uses of 3D Scanning and Its Applications, <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/best-uses-of-3d-scanning-software>

αυξημένη λεπτομέρεια και ακρίβεια των δεδομένων σάρωσης μειώνει σημαντικά το χρόνο που απαιτείται χειροκίνητα για τη δημιουργία ενός μοντέλου (solid model).²⁰

1.5.2 Εφαρμογές στην Ιατρική και την Υγεία

1.5.2.1 Προσθετικά και Ορθοπεδικά

Η σάρωση 3D στον τομέα της υγείας έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη στους τομείς των προσθετικών και των ορθοπεδικών επεμβάσεων, επιτρέποντας τη δημιουργία ιατρικών συσκευών προσαρμοσμένων στις ανάγκες του ασθενούς. Η προσαρμογή προσθετικών και ορθοπεδικών βοηθημάτων στην ανατομία του κάθε ασθενούς ενισχύει σημαντικά την άνεση και τη λειτουργικότητά τους. Αυτή η εξατομικευμένη προσέγγιση είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη για ασθενείς που χρειάζονται εξατομικευμένες λύσεις, καθώς εξασφαλίζει καλύτερη εφαρμογή και βελτιωμένη κινητικότητα. Η σάρωση 3D πραγματοποιεί ακριβείς μετρήσεις του μέρους του σώματος του ασθενούς που έχει πληγεί, ευνοώντας τον σχεδιασμό προσθετικών ή ορθωτικών συσκευών που προσαρμόζονται τέλεια στο σώμα. Η ακρίβεια είναι κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα αυτών των βοηθημάτων, καθώς επηρεάζει άμεσα την άνεση του χρήστη και την απόδοση της συσκευής²¹.

1.5.2.2 Χειρουργικός Σχεδιασμός και Βιο-Εκτύπωση

Στον χειρουργικό σχεδιασμό, η σάρωση 3D επαναπροσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι χειρουργοί προσεγγίζουν πολύπλοκες επεμβάσεις, παρέχοντας λεπτομερή και ακριβή 3D μοντέλα της ανατομίας των ασθενών, τα οποία είναι εξαιρετικά χρήσιμα για επεμβάσεις που αφορούν περίπλοκες περιοχές, όπως τον εγκέφαλο ή τη σπονδυλική στήλη.

Ταυτόχρονα, στον αναδυόμενο τομέα της βιο-εκτύπωσης, οι σάρωσεις 3D είναι καθοριστικές για τη χαρτογράφηση της δομής των βιολογικών ιστών, επιτρέποντας τη δημιουργία εξατομικευμένων ιστών και οργάνων. Η εξέλιξη αυτή είναι ένα μεγάλο βήμα προς το μέλλον στις μεταμοσχεύσεις και στη μηχανική ιστών, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα εξατομικευμένων ιατρικών λύσεων και προηγμένων επανορθωτικών επεμβάσεων.²²

²⁰ Capture3D, Best Uses of 3D Scanning and Its Applications, <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/best-uses-of-3d-scanning-software>

²¹ Surphaser, 3D Scanning Applications, <https://surphaser.com/blog/3d-scanning-applications/>

²² Surphaser, 3D Scanning Applications, <https://surphaser.com/blog/3d-scanning-applications/>

1.5.3 Άλλες εφαρμογές

1.5.3.1 Μουσειολογία, Διατήρηση Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Αποκατάσταση και Ψηφιακή Αρχαιοθήκη



Εικόνα 17 Μηχανικός σαρώνει το κρανίο της μπλε φάλαινας. Πηγή: [Creaform3d]

Για την έκθεση του σκελετού της μπλε φάλαινας στο Εθνικό Μουσείο Φυσικής Ιστορίας του Λονδίνου, οι επιστήμονες των εργαστηρίων του Μουσείου χρειάστηκε να σαρώσουν τρισδιάστατα τα κομμάτια του σκελετού της, και κυρίως το τεράστιο κρανίο της. Καθώς το κρανίο της μπλε φάλαινας είχε μήκος περίπου 6 μέτρων, χρειαζόταν μια τεχνολογία που θα μπορούσε να σαρώσει με ακρίβεια ένα μεγάλο κρανίο ζώου, ενώ αυτό κρεμόταν. Οι επιστήμονες του μουσείου είχαν επισημάνει επίσης ότι κατά τη σάρωση δεν έπρεπε να εφαρμοστεί κανένα είδος επιστρώσης ή ψεκασμού στο κρανίο και στην κατασκευή που τον συγκρατούσε. Οι απαιτήσεις ήταν ιδιαίτερα αυξημένες, καθώς ήθελαν να σαρώσουν ένα αντικείμενο μεγάλης κλίμακας, χωρίς ψεκασμούς ή επιστρώσεις, σε δυσμενείς συνθήκες, με υψηλή ακρίβεια, όσο το δυνατόν πιο γρήγορα και εξ αρχής σωστά.

Με τη χρήση προηγμένης τεχνολογίας σάρωσης 3D το έργο ολοκληρώθηκε τελικά σε λιγότερο από 2 ημέρες. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν για το Μουσείο Φυσικής Ιστορίας παρέχουν μια ψηφιακή αναπαράσταση υψηλής ακρίβειας του σκελετού της Μπλε Φάλαινας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τρισδιάστατη απεικόνισή της και να μεταφερθεί σε άλλα μουσεία σε όλο τον κόσμο για τις δικές τους ερευνητικές ανάγκες. Το πιο σημαντικό, τα δεδομένα θα συμβάλουν στην κατανόηση από τους επιστήμονες και τους συντηρητές τόσο τώρα όσο και στο μέλλον της εξέλιξης τέτοιων

μεγάλων ζώων. Η εκθεση "Hope, the Blue Whale" βρίσκεται τώρα στο Hintze Hall στην κύρια είσοδο του Μουσείου Φυσικής Ιστορίας του Λονδίνου.²³

1.5.3.2 Πολυμέσα και Ψυχαγωγία, Εικονική Πραγματικότητα/Επαυξημένη Πραγματικότητα



Εικόνα 18 Έγχρωμη σάρωση για την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου. Πηγή: [\[ireal3dscan\]](https://www.ireal3dscan.com/)

Οι βιομηχανίες πολυμέσων και ψυχαγωγίας μπορούν να χρησιμοποιούν εργαλεία σάρωσης 3D σε διάφορες εφαρμογές, κυρίως για τη μείωση του χρόνου μοντελοποίησης, την επιτάχυνση των διαδικασιών και τη δημιουργία πιο ρεαλιστικών γραφικών 3D.

Ωστόσο η σάρωση 3D δεν είναι μόνο για μικρά/μεσαία αντικείμενα. Ορισμένες συσκευές είναι ικανές να καταγράψουν και να ανακατασκευάσουν ολόκληρο δωμάτιο ή περιβάλλον. Το αποτέλεσμα μπορεί να επεξεργαστεί και να μετατραπεί από 3d περιβάλλον σε 3D εικονικό περιβάλλον.²⁴

1.6 Ορισμοί και Ορολογίες

1.6.1 Φωτογραμμετρία (photogrammetry)

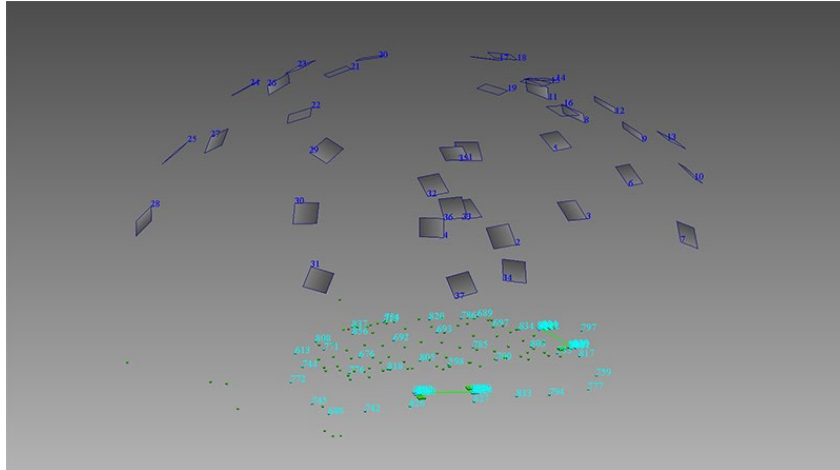
Η φωτογραμμετρία είναι μια τεχνική μέτρησης που λαμβάνει φωτογραφίες από διάφορες οπτικές γωνίες για να αποκτήσει τρισδιάστατες συντεταγμένες [Εικόνα 19]. Συγκεκριμένα, εξάγει γεωμετρικές πληροφορίες με τριγωνισμό διαφόρων σημείων του αντικειμένου. Το λογισμικό φωτογραμμετρίας μπορεί να εντοπίσει χαρακτηριστικά σημεία που επαναλαμβάνονται στις φωτογραφίες. Η απόσταση αυτών των σημείων μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον τριγωνισμό (triangulation). Όσο

²³ Iain Caville, LONDON'S NATURAL HISTORY MUSEUM: A BLUE WHALE 3D SCANNING PROJECT, Οκτώβριος 2017, <https://www.creaform3d.com/blog/londons-natural-history-museum-a-blue-whale-3d-scanning-project/>

²⁴ Ireal3dscan, High-precision Color 3D Modeling Solutions, Which is the Most Suitable One for You?, Δεκέμβριος 2022 <https://www.ireal3dscan.com/news/color-3d-modeling-solutions-comparison/>

περισσότερες φωτογραφίες λαμβάνονται από διαφορετικές γωνίες, τόσο πιο ακριβείς είναι οι θέσεις αυτές. Τελικά, αυτά τα σημεία μετατρέπονται σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο με μορφή πλέγματος.

Η φωτογραμμετρία λειτουργεί όπως η αεροφωτογραφία. Αντίθετα με την αεροφωτογραφία στην οποία μπορεί να εμφολωθήσουν σφάλματα θέσης, η φωτογραμμετρία είναι πιο ακριβής στη μέτρηση αποστάσεων, εμβαδών ή κατευθύνσεων. Χρησιμοποιείται ευρέως στην αρχιτεκτονική, τη μηχανολογία, τη χαρτογράφηση και τον ποιοτικό έλεγχο.



Εικόνα 19 Η φωτογραμμετρία είναι μια τεχνική μέτρησης που λαμβάνει φωτογραφίες από διάφορες οπτικές γωνίες για να αποκτήσει τρισδιάστατες συντεταγμένες. Πηγή: [\[3d-scantech\]](#)

1.6.1.1 Πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η φωτογραμμετρία στη σάρωση 3D;

Ο σαρωτής 3D σαρώνει τη γεωμετρία ενός αντικειμένου, προκειμένου να λάβει τα 3D δεδομένα του. Μόλις καταγραφούν όλα τα σημεία, δημιουργείται ένα πυκνό σύννεφο σημείων, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός 3D μοντέλου. Οι περισσότεροι 3D σαρωτές στην αγορά είναι ικανοί να σαρώνουν αντικείμενα μεγέθους μέχρι 1 μέτρου περίπου, ενώ είναι δύσκολο να σαρώσουν μεγάλα αντικείμενα, όπως ανεμογεννήτριες, αεροπλάνα και κτίρια. Στις περιπτώσεις αυτές αξιοποιούνται οι δυνατότητες που παρέχει η φωτογραμμετρία.



Εικόνα 20 Χρήση της φωτογραμμετρία στις τρισδιάστατη σάρωση. Πηγή: [Creaform3d]

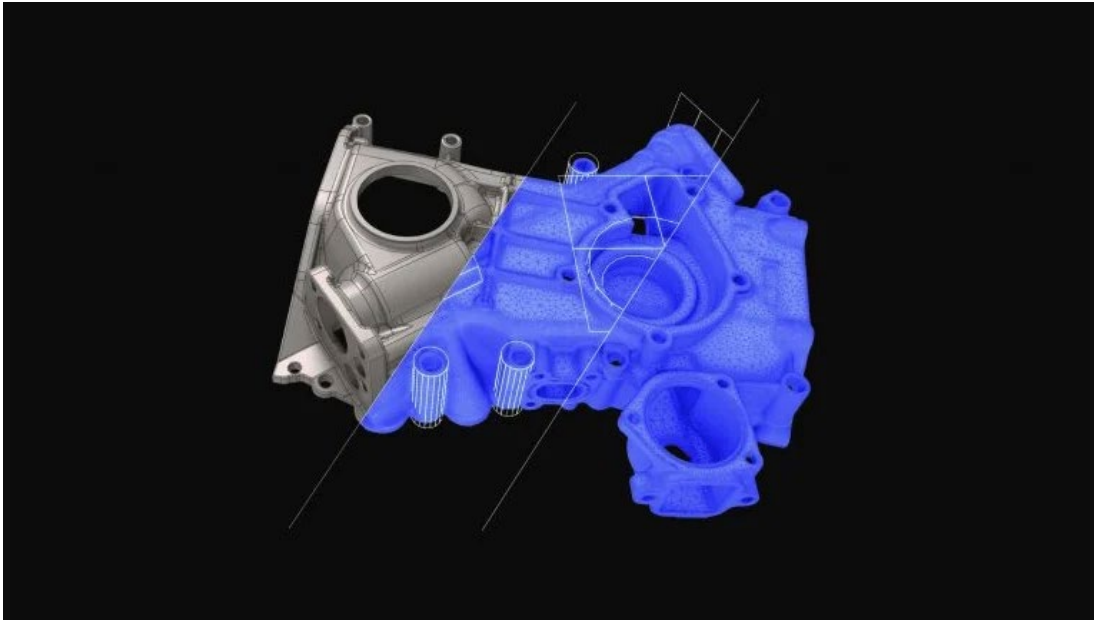
Κατά τη μέτρηση ενός αντικειμένου με φωτογραμμετρία, το πρώτο βήμα είναι η τοποθέτηση ανακλαστικών σημείων στην επιφάνεια του αντικειμένου και κωδικοποιημένων στόχων γύρω από αυτό. Μία ράβδος κλίμακας (calibration bar) είναι επίσης απαραίτητη για να χρησιμεύσει ως σημείο αναφοράς. Στη συνέχεια, λαμβάνονται λήψεις από διάφορες οπτικές γωνίες.

Αυτές οι φωτογραφίες θα βοηθήσουν στην κατασκευή της γενικής 3D γεωμετρίας του αντικειμένου [Εικόνα 20]. Οι λεπτομέρειες της επιφάνειας του αντικειμένου μπορούν στη συνέχεια να καταγραφούν με τη χρήση ενός σαρωτή 3D.

Με εικόνες υψηλής ανάλυσης και πλήρους καρέ (full-frame), ένα σύστημα φωτογραμμετρίας παρέχει την υψηλότερη δυνατή ποιότητα. Χάρη στη μεγάλη περιοχή λήψης και τους ακριβείς αλγόριθμους της, μπορεί να μειώσει τα σφάλματα που προκύπτουν λόγω της απόστασης κατά την σάρωση μεγάλων αντικειμένων.²⁵

²⁵ 3d-scantech, What Is Photogrammetry and How Can It Help in 3D Scanning?, Οκτώβριος 2021, <https://www.3d-scantech.com/what-is-photogrammetry-and-how-can-it-help-in-3d-scanning>

1.6.2 Νέφος Σημείων (Point cloud)



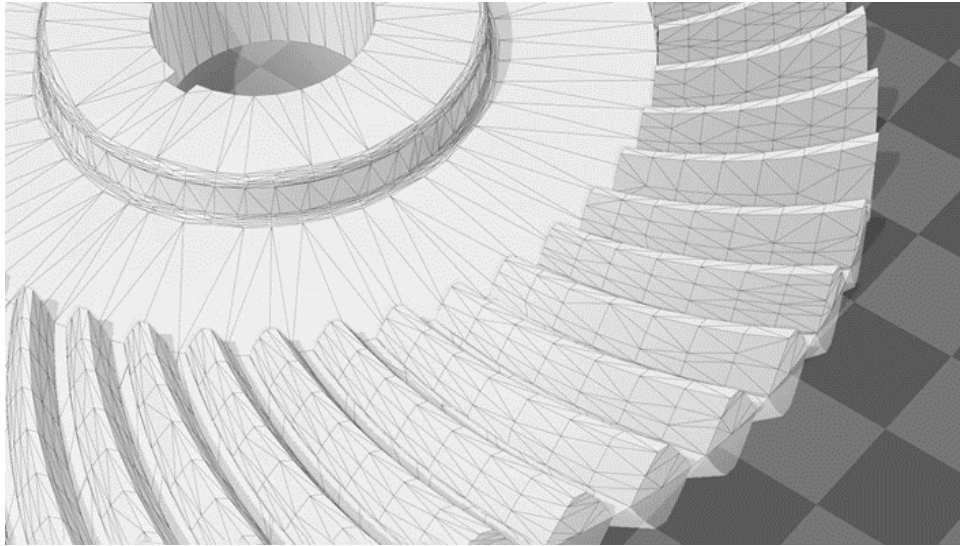
Εικόνα 21 Το σχήμα του σύννεφου προκύπτει από τον αριθμό των μετρημένων σημείων. Πηγή: [\[sme\]](#)

Σε ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων, ένα σύνολο δεδομένων σημείων, γνωστό ως σύννεφο σημείων [Εικόνα 21], καθορίζεται συνήθως με μορφή XYZ και αντιπροσωπεύει ένα σύνολο 3D μετρήσεων. Το σχήμα του σύννεφου προκύπτει από τον αριθμό των μετρημένων σημείων.

Τα σύννεφα σημείων μπορούν να δημιουργηθούν από σαρωτές 3D, οι οποίοι μετρούν ένα μεγάλο αριθμό σημείων επάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου και παράγουν ένα σύννεφο σημείων ως αρχείο δεδομένων. Το σύννεφο σημείων αντιπροσωπεύει τα σημεία που έχει μετρήσει η συσκευή. Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας σάρωσης 3D, τα σύννεφα σημείων χρησιμοποιούνται για πολλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας 3D CAD μοντέλων για εξαρτήματα, μετρολογία, έλεγχο ποιότητας και για πληθώρα εφαρμογών οπτικοποίησης, animation, rendering και μαζικής εξατομίκευσης. Ενώ τα σύννεφα σημείων απεικονίζονται και ελέγχονται απευθείας, συνήθως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμέσως στις περισσότερες εφαρμογές 3D. Συνήθως μετατρέπονται σε μοντέλα δικτύου τριγώνων (αρχείο STL) μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ανακατασκευή επιφάνειας.²⁶

²⁶ Creiform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 23-24, https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

1.6.3 STL και Mesh αρχεία



Εικόνα 22 Τα αρχεία STL περιλαμβάνουν μόνο τη γεωμετρία της επιφάνειας, τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο τριγώνων. Πηγή: [\[all3dp\]](#)

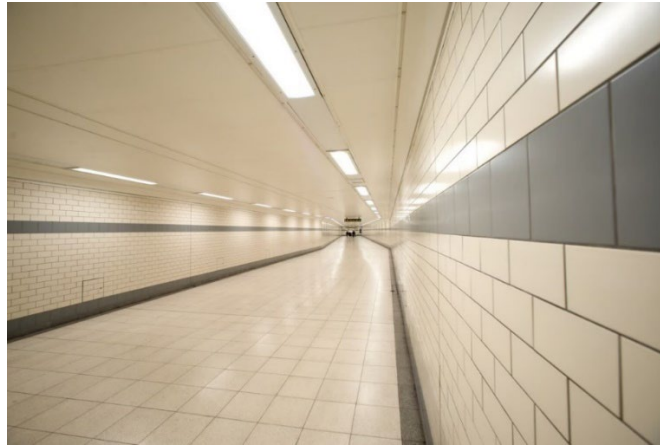
Το STL (Stereolithography ή Standard Tessellation Language) είναι μια μορφή αρχείου χαρακτηριστική του λογισμικού CAD , το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στις βιομηχανίες εκτύπωσης 3D και CAD. Αυτή η μορφή αρχείου υποστηρίζεται και από πολλά άλλα πακέτα λογισμικού.

Τα αρχεία STL περιλαμβάνουν μόνο τη γεωμετρία της επιφάνειας, τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο τριγώνων [Εικόνα 22], ενός τρισδιάστατου αντικειμένου χωρίς χρώμα, υφή ή άλλα συνηθισμένα χαρακτηριστικά των μοντέλων CAD.²⁷

Ο πρωταρχικός σκοπός της μορφής αρχείου STL είναι να κωδικοποιήσει τη γεωμετρία της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Κωδικοποιεί αυτές τις πληροφορίες χρησιμοποιώντας μια απλή διαδικασία που ονομάζεται "tessellation".

²⁷ Creafom Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 24-25, https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

1.6.3.1 Τεσελλάρισμα (tessellation)



Εικόνα 23 Χαρακτηριστικό παράδειγμα τεσελλαρίσματος στην καθημερινότητα είναι η κάλυψη ενός δαπέδου ή ενός τοίχου με πλακάκια. Πηγή: [\[all3dp\]](https://all3dp.com)

Το τεσελλάρισμα είναι η διαδικασία διαμόρφωσης μιας επιφάνειας με έναν ή περισσότερους γεωμετρικούς σχηματισμούς, ώστε να μην υπάρχουν επικαλύψεις ή κενά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τεσελλαρίσματος στην καθημερινότητα είναι η κάλυψη ενός δαπέδου ή ενός τοίχου με πλακάκια.²⁸

1.6.4 Ακρίβεια (Accuracy)

Ακρίβεια (accuracy) είναι η συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα της σάρωσης και της πραγματικότητας. Για την αξιολόγηση της ακρίβειας μιας συσκευής μέτρησης, όπως ενός σαρωτή λέιζερ, τα δεδομένα που αποκτώνται με τη συσκευή αυτή πρέπει συγκριθούν με τα δεδομένα που αποκτά ένα πιο ακριβές εργαλείο μέτρησης (π.χ.: μια μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) και το μετρούμενο στοιχείο πρέπει να κανονικοποιηθεί.²⁹

1.6.5 Ανάλυση (Resolution)

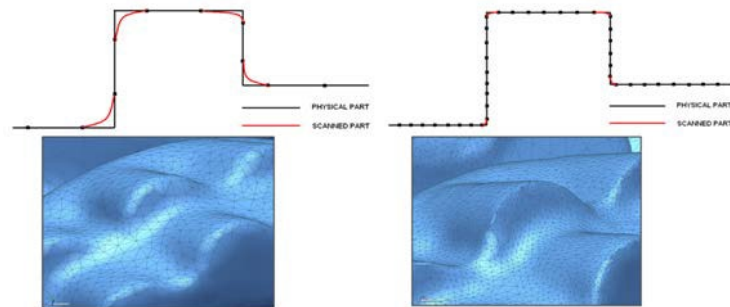
Η ανάλυση είναι μια από τις βασικές ιδιότητες του αρχείου πλέγματος (mesh file), η οποία καθορίζει το επίπεδο των ορατών λεπτομερειών στα δεδομένα σάρωσης. Μπορεί να συγκριθεί με την ανάλυση της οθόνης, η οποία καθορίζεται από τον αριθμό των pixel. Το μέγεθος της πλευράς των τριγώνων στο αρχείο πλέγματος ονομάζεται ανάλυση (μετρημένη σε χιλιοστά). Υψηλότερη ανάλυση αυξάνει τον αριθμό των τριγώνων ενός

²⁸All3DP, How Does the STL File Format Store a Model?, Μάιος 2023, <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/>

²⁹ Creaform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ. 25, https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

αρχείου. Για ένα ισοδύναμο αντικείμενο, το μέγεθος του αρχείου πλέγματος είναι ανάλογο της ανάλυσης.³⁰

Η ανάλυση και η ακρίβεια είναι δύο διαφορετικές έννοιες. Η ανάλυση καθορίζει μόνο το επίπεδο των λεπτομερειών. Ένα κομμάτι μπορεί να είναι εξίσου ακριβές με ένα άλλο με χαμηλότερη ανάλυση. Η διαφορά είναι σημαντική σε περιοχές με υψηλή καμπυλότητα.



Κόκκινη γραμμή: Αριστερά πως φαίνεται η χαμηλή ανάλυση ενώ δεξιά υψηλής ανάλυσης
Μαύρη γραμμή: Ακρίβεια σαρωμένου κομματιού. Πηγή: [Creaform3d]

1.6.6 Raw / Clean Mesh

Raw mesh: Ένα αρχείο πλέγματος που προέρχεται άμεσα από τη συσκευή σάρωσης, και δεν έχει υποστεί οποιαδήποτε επεξεργασία μετά τη σάρωση.

Clean Mesh: Ένα αρχείο που αναφέρεται ως καθαρό είναι ένα αρχείο που έχει υποστεί επεξεργασία και είναι έτοιμο για μετά-επεξεργασία μέσω ενός λογισμικού αντιστροφής μηχανικής.³¹

1.7 Πότε είναι σημαντική η καταγραφή του χρώματος - υφής ενός σκαναρισμένου αντικειμένου

Στις περισσότερες εφαρμογές της 3D σάρωσης, δεν απαιτείται έγχρωμη σάρωση, καθώς σκοπός της είναι η πραγματοποίηση μετρήσεων σχετικά με το εκάστοτε αντικείμενο. Ωστόσο, οι 3D σαρωτές είναι σε θέση να αποτυπώσουν υψηλής ποιότητας πληροφορίες σχετικά με το χρώμα και την υφή ενός αντικειμένου, όταν απαιτείται έγχρωμη σάρωση, με σκοπό τη ρεαλιστική απεικόνιση του αντικειμένου. Ο σαρωτής για

³⁰ Creaform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ. 26
https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

³¹ Creaform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 27
https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

να καταγράψει αυτές τις πληροφορίες χρειάζεται ειδικές κάμερες, που λαμβάνουν έγχρωμη εικόνα.



Εικόνα 24 Καταγραφή έγχρωμου αντικειμένου για ψηφιακή αποθήκευση. Πηγή: [\[ireal3dscan\]](http://ireal3dscan.com)

Εφαρμογές όπου οι έγχρωμες σαρώσεις είναι χρήσιμες:

- Οπτικά εφέ και παιχνίδια για τρισδιάστατο σχεδιασμό
- Έλεγχος 3D (3D inspection) σε περιπτώσεις που είναι σημαντικός ο έλεγχος του χρώματος ενός κατασκευασμένου προϊόντος
- Έγχρωμη Εκτύπωση 3D αντικειμένου
- Τεκμηρίωση και αρχειοθέτηση φυσικών αντικειμένων σε ψηφιακή μορφή που χρειάζεται να είναι έγχρωμα³²

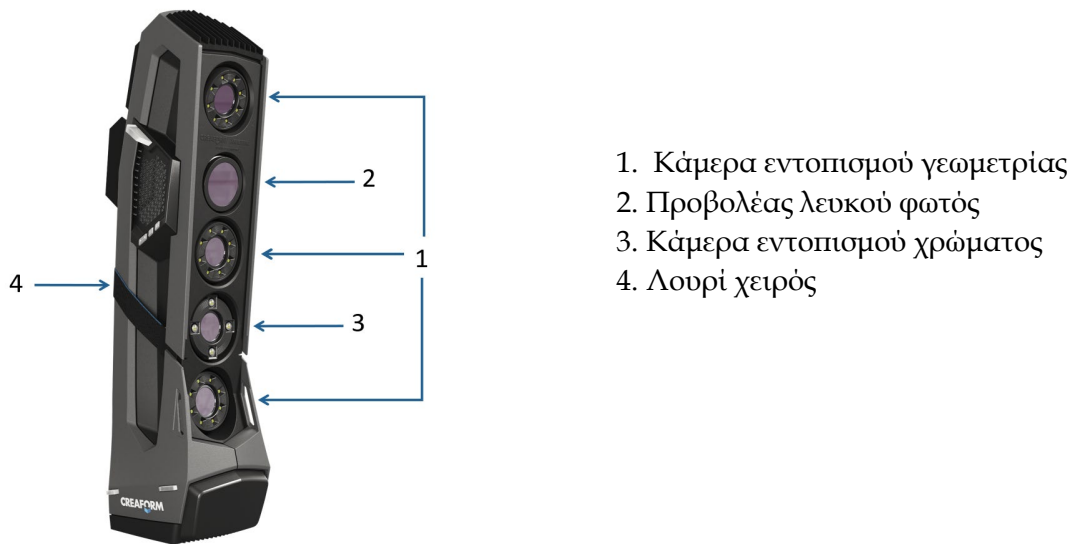
1.8 Τρισδιάστατος σαρωτής λευκού φωτός : Go!SCAN



Εικόνα 25 Σαρωτής λευκού φωτός Go!SCAN της Creafonn. Πηγή: [\[qualitymag\]](http://qualitymag.com)

³² Polyga, When is it important to get color scans?, <https://www.polyga.com/3d-scanning-101/when-is-it-important-to-get-color-scans/>

Στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας επιλέχθηκε για την έρευνα και την εκτέλεση της διαδικασίας τρισδιάστατης σάρωσης, ο σαρωτής λευκού φωτός Go!SCAN της εταιρίας Creaform. Ο συγκεκριμένος σαρωτής επιλέχθηκε αφενός διότι λόγω των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων του (συμπεριλαμβανομένης και της δυνατότητας έγχρωμης σάρωσης) αποτελεί ένα καλό παράδειγμα για την παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας της τεχνολογίας τρισδιάστατης σάρωσης και αφετέρου διότι παραχωρήθηκε στον γράφοντα η δυνατότητα χρήσης του από την εταιρεία «Fourth Dimension SA», για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, και τέλος, λόγω της γνώσης του γράφοντα σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας της συγκεκριμένης συσκευής. Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι βασικές λειτουργίες του συγκεκριμένου σαρωτή.



Εικόνα 26 Βασικά χαρακτηριστικά σαρωτή. Πηγή: [\[Creaform3d\]](#)

1.8.1 Προδιαγραφές Go!SCAN

Accuracy⁽¹⁾	Up to 0.050 mm
Volumetric accuracy⁽²⁾	0.050 mm + 0.150 mm/m
Volumetric accuracy with MaxSHOT Next™ Elite⁽³⁾	0.050 mm + 0.015 mm/m
Measurement resolution	0.100 mm
Mesh resolution	0.200 mm
Measurement rate	1,500,000 measurements/s
Light source	White light (99 stripes)
Positioning methods	Geometry and/or texture and/or targets
Scanning area	390 x 390 mm
Stand-off distance	400 mm
Depth of field	450 mm
Part size range (recommended)	0.1-4 m
Texture resolution	50 to 200 DPI
Texture colors	24 bits
Λογισμικό	VXelements
Output formats	.dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr, .3mf
Compatible software ⁽⁴⁾	3D Systems (Geomagic® Solutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Metrologic Group (Metrolog X4), New River Kinematics (Spatial Analyzer), Verisurf, Dassault Systèmes (CATIA V5, SOLIDWORKS), PTC (Creo), Siemens (NX, Solid Edge), Autodesk (Inventor, PowerINSPECT)
Weight	1.25 kg (2.7 lb)
Dimensions (LxWxH)	89 x 114 x 346 mm (3.5 x 4.5 x 13.6 in)
Connection standard	1 X USB 3.0
Operating temperature range	5-40 °C (41-104 °F)
Operating humidity range (non-condensing)	10-90%
Certifications	EC Compliance (Electromagnetic Compatibility Directive, Low Voltage Directive), compatible with rechargeable batteries (when applicable), IP50, WEEE

(1) Typical value for diameter measurement on a calibrated sphere artifact.

(2) Performance assessed with traceable length artifacts using positioning targets. Objects with sufficient geometry/color texture can enable this level of performance without positioning targets. Results are obtained using integrated photogrammetry with volumetric accuracy optimization.

(3) The volumetric accuracy of the system when using a MaxSHOT 3D cannot be superior to the default accuracy.

(4) Also compatible with all major metrology, CAD, and computer graphic software through mesh and point cloud import.³³

1.8.2 Τα πλήκτρα πολλαπλών λειτουργιών



Εικόνα 27 Πλήκτρα λειτουργιών. Πηγή: [\[Creaform3d\]](#)

Ο σαρωτής διαθέτει ένα σύνολο από 3 πλήκτρα στην κάθε πλευρά. Όλα τα πλήκτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόσβαση σε λειτουργίες κατά τη διάρκεια αλλά και εκτός της λειτουργίας σάρωσης. Τα πλήκτρα 1 και 2 χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν το ζουμ και την πλοήγηση στο Smart Control. Το πλήκτρο 3 χρησιμοποιείται για την αποδοχή μιας λειτουργίας ή ενός μηνύματος.

1.8.3 Χρωματική ένδειξη κατάστασης σαρωτή



Εικόνα 28 Χρωματικές ενδείξεις. Πηγή: [\[Creaform3d\]](#)

Χρώμα	Κατάσταση Σαρωτή
Κόκκινο	Καταγραφή
Πράσινο	Έτοιμο για καταγραφή
Μπλε	Συνδεδεμένο

³³ Creaform3d, Go!SCAN 3D TECHNICAL SPECIFICATIONS, <https://www.creaform3d.com/en/handheld-portable-3d-scanner-goscan-3d/technical-specifications>

1.8.4 Λειτουργικές Αρχές

1.8.4.1 Τοποθέτηση στον χώρο με βάση την γεωμετρία



Εικόνα 29 Ο σαρωτής χρειάζεται γεωμετρία για να τοποθετηθεί στον χώρο. Πηγή: [Creaform3d]

Ο σαρωτής χρειάζεται γεωμετρία για να τοποθετηθεί στον χώρο. Ο προβολέας εκπέμπει ένα μοτίβο λευκού φωτός στο αντικείμενο. Η παραμόρφωση του μοτίβου στο αντικείμενο καταγράφεται από 3 ψηφιακές κάμερες: 1 κάμερα είναι τοποθετημένη στο επάνω μέρος του σαρωτή, 1 στη μέση και η άλλη στο κάτω μέρος του σαρωτή. Ο σαρωτής λαμβάνει δεδομένα από ολόκληρο το φωτεινό μοτίβο. Οι πληροφορίες της γεωμετρίας που συλλέγονται χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της επιφάνειας σε πραγματικό χρόνο.

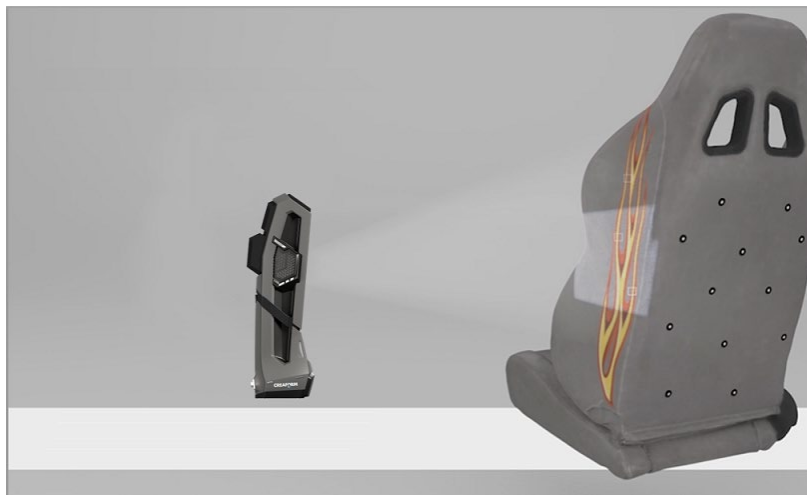
1.8.4.2 Έξυπνη υβριδική τοποθέτηση



Εικόνα 30 Η έξυπνη υβριδική τοποθέτηση συνδυάζει τους στόχους θέσης με τις πληροφορίες γεωμετρίας. Πηγή: [Creaform3d]

Ο σαρωτής ανιχνεύει στόχους θέσης πάνω στο αντικείμενο και γύρω από αυτό. Η έξυπνη υβριδική τοποθέτηση συνδυάζει τους στόχους θέσης με τις πληροφορίες γεωμετρίας, προκειμένου να παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα. Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιεί όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες, δηλαδή τη γεωμετρία και τους στόχους θέσης, για την τοποθέτηση στον χώρο. Παράλληλα διασφαλίζει ότι υπάρχουν επαρκή δεδομένα, τα οποία εξασφαλίζουν την ακρίβεια. Η ενσωματωμένη τεχνολογία έξυπνης συλλογής πληροφοριών αποτρέπει τη λήψη καρέ με ανακριβή θέση.

1.8.4.3 Τοποθέτηση με βάση την υφή



Εικόνα 31 Ο σαρωτής αποκτά πληροφορίες και ανιχνεύει την υφή του αντικειμένου με την έγχρωμη ψηφιακή κάμερα που διαθέτει. Πηγή: [\[Creaform3d\]](#)

Ο σαρωτής αποκτά πληροφορίες και ανιχνεύει την υφή του αντικειμένου με την έγχρωμη ψηφιακή κάμερα που διαθέτει.

1.8.4.4 Τοποθέτηση με βάση μόνο τους στόχους

Είναι δυνατή η χρήση μιας επιλογής μόνο για στόχους. Αυτή η επιλογή χρησιμοποιείται κυρίως για αντικείμενα μεγάλης διαμέτρου και απαιτεί την προβολή τουλάχιστον 4 στόχων καθ' όλη τη διάρκεια της σάρωσης.

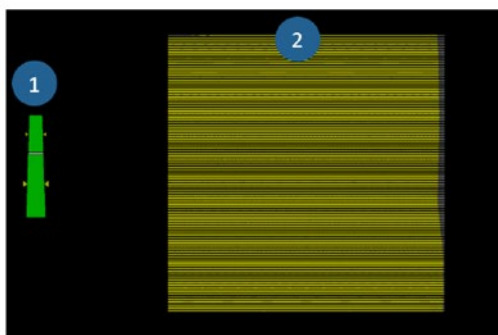
1.8.5 Βαθμονόμηση Σαρωτή Go!SCAN



Εικόνα 32 Μέσω της βαθμονόμησης, βελτιστοποιούνται και διατηρούνται τα αρχικά χαρακτηριστικά μέτρησης Πηγή: [Creaform3d]

Σκοπός της βαθμονόμησης (calibration)

Οι αλλαγές του περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσουν τη βαθμονόμηση του σαρωτή, κυρίως λόγω μεταβολών στην πίεση ή τη θερμοκρασία, οι οποίες επηρεάζουν τις μεταβλητές και τις παραμέτρους του σαρωτή. Μέσω της βαθμονόμησης, βελτιστοποιούνται και διατηρούνται τα αρχικά χαρακτηριστικά μέτρησης. Στον συγκεκριμένο σαρωτή συνιστάται να γίνεται βαθμονόμηση κάθε φορά που χρησιμοποιείται ο σαρωτής. Η βαθμονόμηση χρησιμοποιεί μία πλακέτα βαθμονόμησης (calibration plate) και τοποθετώντας τον σαρωτή σε 14 θέσεις σε σχέση με την πλακέτα, όπως εμφανίζονται από τη σκιά του στον τρισδιάστατο προβολέα.



Distance meter [1] colors

Color	Scanner position	Action
	Too close	Move backward
	Correct	-
	Too far	Move forward

White light stripe pattern [2] colors

Color	Status	Description
	Underexposed	The cameras do not or weakly perceive the reflection of the light. The software lacks enough information to calculate and build a mesh.
	Optimal	The light stripes appear as clean and defined lines. Surface calculation is done under ideal circumstances.
	Saturated	The reflection of the light is so intense that the cameras are dazzled. Light stripes are not clearly defined and may lead to an improper surface reconstruction or an unusual amount of noise in the data.

Εικόνα 33 Είναι σημαντικό να ρυθμίζονται οι παράμετροι του κλείστρου για τη βέλτιστη ανίχνευση των ανακλαστικών στόχων. Πηγή: [Creaform3d]

1.8.6 Ρύθμιση κλείστρου (shutter configuration) Go!SCAN

Σκοπός της ρύθμισης

Δεδομένου ότι κάθε επιφάνεια έχει διαφορετικές ιδιότητες ανακλαστικότητας, είναι σημαντικό να ρυθμίζονται οι παράμετροι του κλείστρου για τη βέλτιστη ανίχνευση των ανακλαστικών στόχων.

Γκρι ή καθόλου γραμμές	Υπερέκθεση	Οι κάμερες δεν αντιλαμβάνονται ή αντιλαμβάνονται ασθενώς την αντανάκλαση του φωτός. Το λογισμικό δεν διαθέτει αρκετές πληροφορίες για τον υπολογισμό και την κατασκευή ενός πλέγματος.
Κίτρινες γραμμές	Βέλτιστο	Οι φωτεινές λωρίδες εμφανίζονται ως καθαρές και καθορισμένες γραμμές. Ο υπολογισμός της επιφάνειας γίνεται υπό ιδανικές συνθήκες.
Κόκκινες γραμμές	Κορεσμένο	Η αντανάκλαση του φωτός είναι τόσο έντονη που οι κάμερες θαμπώνονται. Οι φωτεινές λωρίδες δεν είναι σαφώς καθορισμένες και μπορεί να οδηγήσουν σε ακατάλληλη

		ανακατασκευή της επιφάνειας ή σε ασυνήθιστη ποσότητα θορύβου στα δεδομένα.
--	--	--

1.8.7 Προετοιμασία κομματιού

Πριν από τη σάρωση και με σκοπό την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων, πρέπει να λάβει χώρα η κατάλληλη προετοιμασία του αντικειμένου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το Go!SCAN είναι ένας έξυπνος σαρωτής που αυτοτοποθετείται στον χώρο με βάση τη γεωμετρία του αντικειμένου. Δεν απαιτούνται σημάσεις θέσης (ανακλαστικοί στόχοι) για αντικείμενα που παρέχουν επαρκείς πληροφορίες γεωμετρίας ή υφής (χρώμα, σχέδια κλπ). Αντίθετα, σε περίπτωση επίπεδων ή λαμπερών επιφανειών, με τις σημάσεις θέσης θα επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα σάρωσης.

Οδηγίες προετοιμασίας:

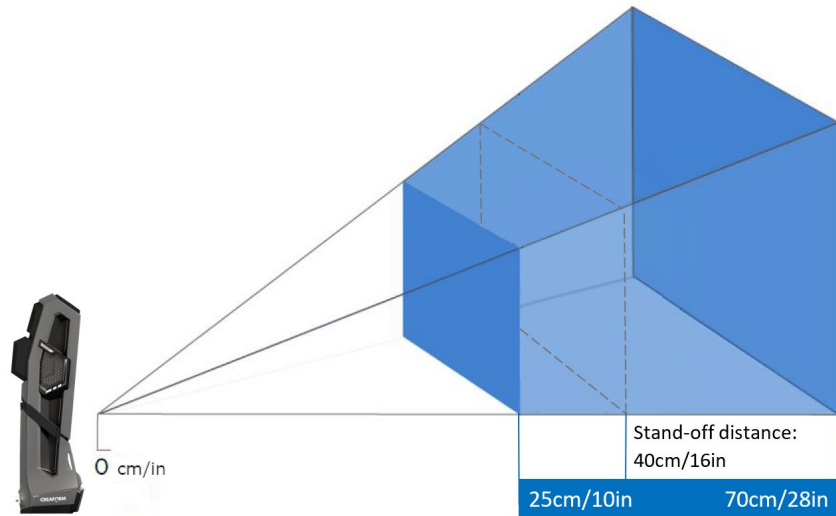
- Το αντικείμενο πρέπει να είναι καθαρό και χωρίς ακαθαρσίες.
- Στην περίπτωση γυαλιστερής επιφάνειας, θα πρέπει πρώτα να τοποθετηθεί πούδρα στο αντικείμενο. Στην περίπτωση αυτή, τυχόν ακαθαρσία (π.χ. σκόνη) μπορεί να λειτουργήσει ως πούδρα που θα μειώσει την ανακλαστικότητα ή τη γυαλάδα του αντικειμένου.
- Σε αντικείμενα είτε με πούδρα είτε με επίπεδη επιφάνεια από τα οποία λείπουν οι γεωμετρικές πληροφορίες, θα πρέπει να τοποθετηθούν σημάσεις θέσης (στόχοι) σε απόσταση 100 mm έως 200 mm μεταξύ τους.

Σε περίπτωση επίπεδων επιφανειών, θα πρέπει να τοποθετούνται τουλάχιστον 3 σημάσεις θέσης εντός του πεδίου προβολής του φωτεινού μοτίβου.

1.8.8 Κανόνες Απόκτησης Δεδομένων

1.8.8.1 Απόσταση Σάρωσης

Για μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια συστήνεται ο χρήστης να βρίσκεται στην βέλτιστη απόσταση (stand-off distance) από το αντικείμενο που σαρώνει:

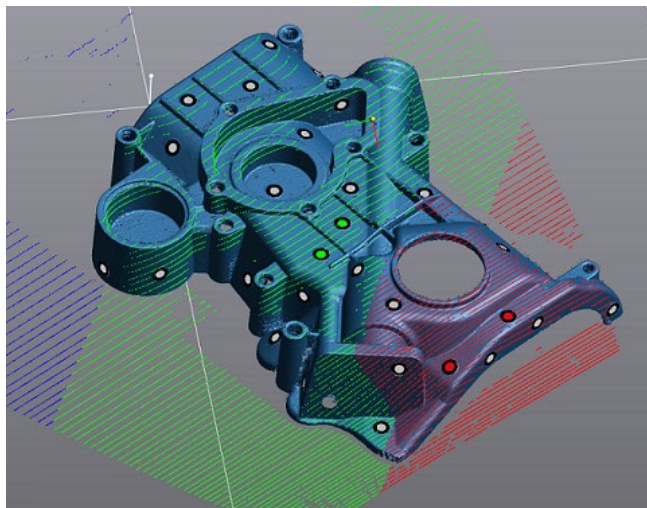


Εικόνα 34 Για καλύτερη ακρίβεια είναι καλό ο χρήστης να βρίσκεται στην βέλτιστη απόσταση από το αντικείμενο που σαρώνει. Πηγή: [Creaform3d]

1.8.8.2 Μέτρο απόστασης




Κατά τη ψηφιοποίηση το μοτίβο λευκού φωτός που προβάλλεται στο αντικείμενο εμφανίζεται σε διαφορετικά χρώματα για να υποδείξει την απόσταση μεταξύ του σαρωτή και της επιφάνειας του αντικειμένου που σαρώνεται. Πράσινο χρώμα σημαίνει ότι το αντικείμενο βρίσκεται εντός εύρους, κόκκινο σημαίνει ότι βρίσκεται πολύ κοντά και μπλε πολύ μακριά. Παρόλα αυτά, πληροφορίες λαμβάνονται σε όλο το εύρος της απόστασης, οπότε δεν είναι πάντα κακή πρακτική να σαρώνεται σε όλες τις φάσεις, ειδικά όταν το κομμάτι έχει διαφορετική γεωμετρία και βάθος.

Τα τοποθετημένα στο αντικείμενο, ή στο περιβάλλον, στοχάκια (targets) επίσης λειτουργούν ως μέτρα απόστασης (οι λευκοί στόχοι αποκτώνται αλλά δεν ανιχνεύονται την εκάστοτε στιγμή και οι γκρι στόχοι παρέχουν μια προοπτική από πίσω).



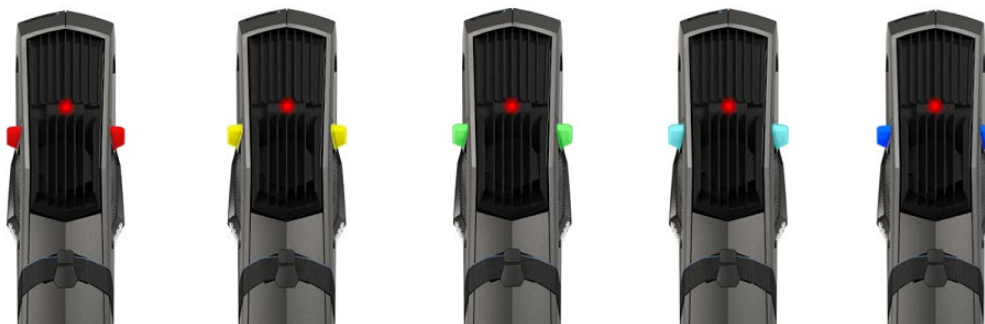
Εικόνα 35 Κατά τη ψηφιοποίηση, οι λευκές ρίγες φωτός που προβάλλονται στο αντικείμενο εμφανίζονται σε διάφορα χρώματα για να υποδείξουν την απόσταση μεταξύ του σαρωτή και της επιφάνειας του αντικειμένου. Πηγή: [Creaform3d]

Scanner sides LEDs colors

Color	Scanner position	Action
	too close	move backward
	correct	-
	too far	move forward

Εικόνα 36 Τι σημαίνουν οι χρωματικές ενδείξεις του σαρωτή. Πηγή: [Creaform3d]

Οι ενδείξεις LED στις πλευρές του σαρωτή υποδεικνύουν επίσης την απόσταση από το αντικείμενο.



Εικόνα 37 Οι ενδείξεις LED στις πλευρές του σαρωτή υποδεικνύουν επίσης την απόσταση από το αντικείμενο. Πηγή: [Creaform3d]

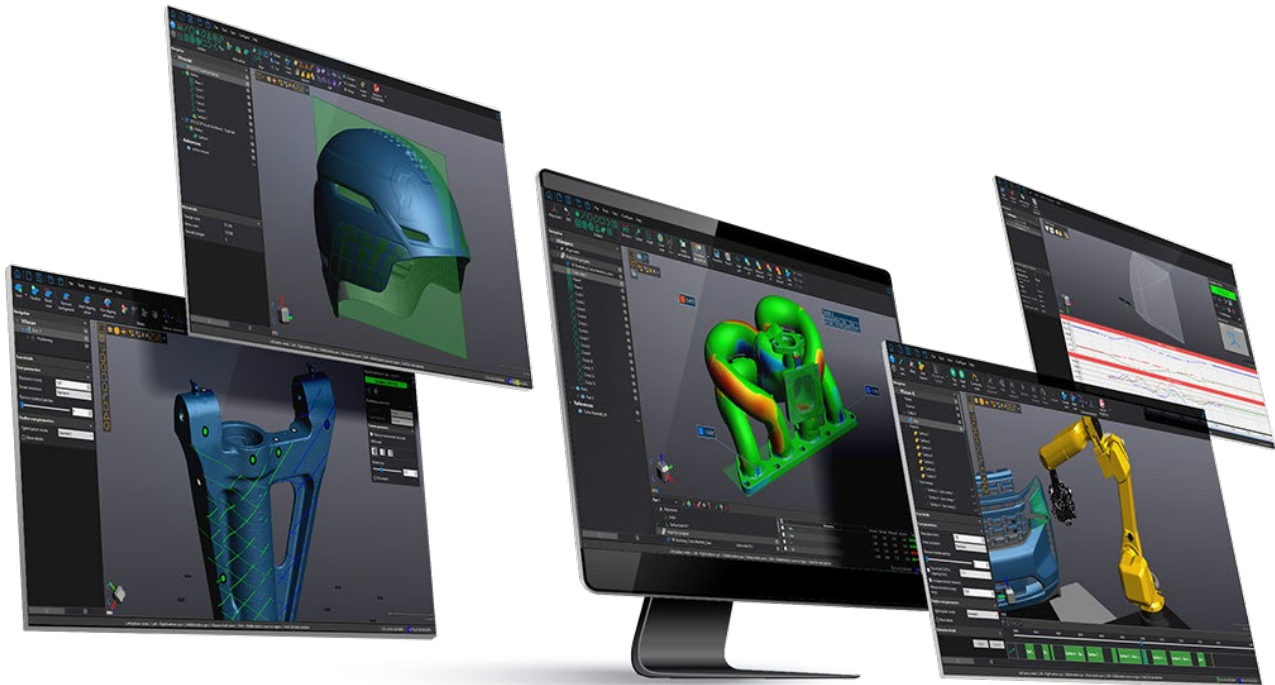
Ο σαρωτής χάνει την θέση του όταν είναι πολύ κοντά ή πολύ μακριά από το αντικείμενο. Εάν χαθεί το ίχνος, απλά χρειάζεται να τοποθετηθεί ο σαρωτής μπροστά από μια προηγούμενως σαρωμένη «γνωστή» επιφάνεια και να πατηθεί ξανά το κουμπί σάρωσης ή, αν γίνεται χρήση στόχων, να προστεθούν επιπλέον στο μοντέλο ή στον χώρο σάρωσης.

1.8.8.3 Πεδίο Όρασης (Field of View)

Το Πεδίο Όρασης είναι το εύρος εικόνας που μπορεί να λάβει ο σαρωτής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σάρωσης και οποιαδήποτε δεδομένα εκτός του πεδίου όρασης του σαρωτή δεν λαμβάνονται. Το πεδίο όρασης του σαρωτή κυμαίνεται από 25 έως 70 εκατοστά. Για καλύτερα αποτελέσματα επιφάνειας και για να εξασφαλίσει ο χρήσης βέλτιστο πεδίο όρασης, πρέπει να τηρείται μια συγκεκριμένη βέλτιστη απόσταση (~40 εκατοστά).³⁴

³⁴ Creaform, Go!SCAN 3D User Manual, Αύγουστος 2023, σελ 17-21

1.9 Λογισμικό VX Elements



Εικόνα 38 Σοφίτα λογισμικού VX Elements Πηγή: [Creaform3d]

Το VXelements είναι μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα (σοφίτα) λογισμικού σάρωσης 3D που λειτουργεί με όλα τα 3D μέσα μέτρησης της Creaform. Συνδυάζει τόσο τις ενότητες απόκτησης όσο και εφαρμογής σε ένα απλό και εύχρηστο περιβάλλον, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη λύση. Οι σαρωτές με την βοήθεια του λογισμικού παρέχουν υψηλή ακρίβεια και ποιότητα δεδομένων από τις 3D μετρήσεις και επιπλέον παρέχουν πραγματική χρονική οπτικοποίηση κατά την σάρωση μέσω του λογισμικού.

1.9.1 VX Scan

Το VX Scan είναι επιπρόσθετο (module) της πλατφόρμας VX Elements και είναι αφιερωμένο στη διαδικασία σάρωσης, επιτρέποντας στους χρήστες να αποκτούν δεδομένα 3D με σαρωτές της Creaform. Παρέχει πραγματική χρονική οπτικοποίηση κατά τη σάρωση και προσφέρει εργαλεία για τον βελτιστοποίηση και την επεξεργασία των σαρωμένων δεδομένων.³⁵

³⁵ Creaform, 3D measurement software platform and application suite, <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/3d-applications-software-platforms>

2. Εφαρμογή τρισδιάστατης Σάρωσης σε ανθρώπινο μοντέλο



Στο κομμάτι της εφαρμογής υπήρξαν 2 εθελοντές και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 3 εφαρμογές, δηλαδή σαρώσεις, σε κάθε μία από τις οποίες εφαρμόστηκε διαφορετική προσέγγιση για την αποτύπωση της πληροφορίας. Ζητήθηκε από τον κάθε εθελοντή ξεχωριστά να πάρει μία άνετη όρθια θέση και να παραμείνει ακίνητος για μερικά λεπτά, δηλαδή για όσο χρόνο θα απαιτούνταν για την ολοκλήρωση της σάρωσης. Πριν την τελική εφαρμογή πραγματοποιήθηκαν μερικές δοκιμαστικές σαρώσεις για τη ρύθμιση και τη βαθμονόμηση του σαρωτή.

2.1 Σάρωση μοντέλων

Μοντέλο 1^ο



Πληροφορίες σάρωσης

Τρόπος σάρωσης: Γεωμετρία και Υφή
Λήψη Υφής: Ενεργοποιημένο
Κλείστρο: Αυτόματο
Ανάλυση: 1mm
Χρόνος Σάρωσης: 6 λεπτά

Μοντέλο 2^ο Εφαρμογή 1^η



Πληροφορίες σάρωσης

Τρόπος σάρωσης: Γεωμετρία και Υφή
Λήψη Υφής: Ενεργοποιημένο
Κλείστρο: Αυτόματο
Ανάλυση: 2mm
Χρόνος Σάρωσης: 3.5 λεπτά

Μοντέλο 2ο Εφαρμογή 2η



Πληροφορίες σάρωσης

Τρόπος σάρωσης:	Γεωμετρία
Λήψη Υφής:	Ενεργοποιημένο
Κλείστρο:	Αυτόματο
Ανάλυση:	1mm
Χρόνος Σάρωσης:	6.5 λεπτά

Κατά τη σάρωση των μοντέλων παρατηρήθηκε ότι ο σαρωτής λαμβάνει πολύ γρήγορα τις πληροφορίες γεωμετρίας και υφής. Για τη λήψη της φόρμας του μοντέλου και για την πραγματοποίηση του μεγαλύτερου μέρους της σάρωσης απαιτήθηκαν 2 με 3 λεπτά, ενώ ο υπόλοιπος χρόνος χρειάστηκε για να προστεθεί πληροφορία σε σημεία που έλειπαν.

Σημειώνεται ότι τα μοντέλα έμειναν με ανοιχτά τα μάτια κατά την σάρωση του προσώπου, η οποία κράτησε μερικά δευτερόλεπτα. Η λήψη του προσώπου και συγκεκριμένα των ματιών, ήταν και το πιο δύσκολο κομμάτι διότι οποιαδήποτε κίνηση,

μπορούσε να παραμορφώσει το μοντέλο λήψης. Εδώ να σημειωθεί ότι το φως που εκπέμπει ο σαρωτής δεν είναι επιβλαβές για τα μάτια.



Παρατηρήθηκε κατά την σάρωση ότι ο σαρωτής σε σημεία με λίγη ή επαναλαμβανόμενη πληροφορία, είτε αυτή είναι το χρώμα είτε το μοτίβο, είχε την τάση να παράγει διπλοτυπία. Αυτό σημαίνει ότι άλλαζε ο προσανατολισμός με τον οποίο λάμβανε ο σαρωτής την πληροφορία και ξεκινούσε να δημιουργεί νέο μοντέλο στο χώρο. Αυτό φαίνεται στο δεύτερο μοντέλο όπου τα πόδια του έχουν σαρωθεί δύο φορές και το ένα μοντέλο επικαλύπτει ή ενσωματώνεται στο άλλο (βλέπε παραπάνω φωτογραφία). Επιπλέον μία άλλη δυσκολία που αντιμετώπισε ο σαρωτής ήταν να διαβάσει στοιχεία όπως μαύρες επιφάνειες, παπούτσια, μαλλιά ή τρίχες.

Το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα αφαίρεσης των καρέ (frames) που έχουν ληφθεί από τον σαρωτή, πράγμα που καθιστά εύκολο τον εντοπισμό και την αφαίρεση τυχόν διπλοτυπίας, όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Παρόλα αυτά η πρώτη εφαρμογή του δεύτερου μοντέλου δεν συνεχίστηκε.



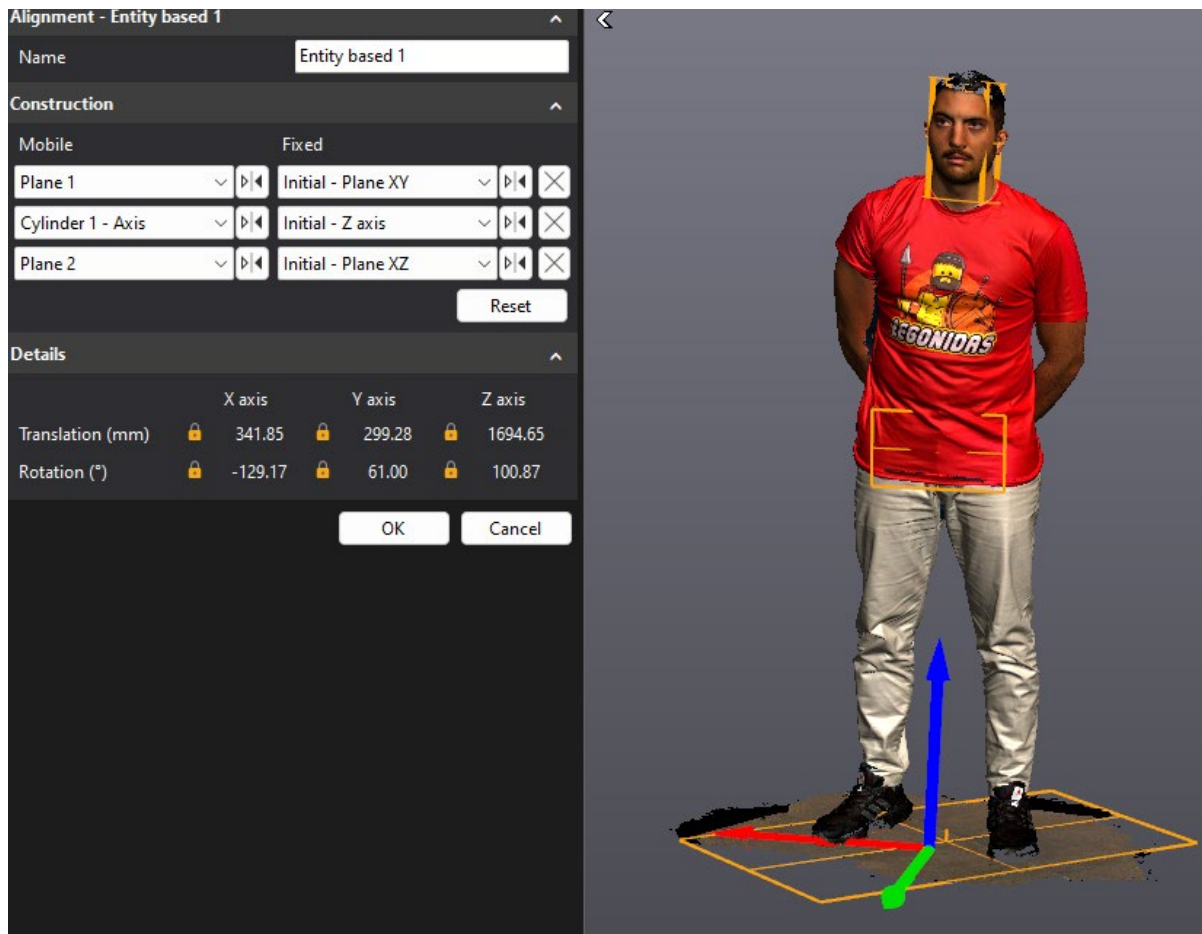
Στη δεύτερη εφαρμογή έγινε αλλαγή από 2mm ανάλυση σε 1mm, η οποία όμως αύξησε τον συνολικό χρόνο σάρωσης σχεδόν στο διπλάσιο, καθόσον η πληροφορία που λάμβανε ο σαρωτής είχε αντίστοιχα διπλασιαστεί. Αυτό φαίνεται και στον αριθμό των τριγώνων στην παρακάτω φωτογραφία.

Scan details		Scan details	
Triangle count	1,262,704	Triangle count	4,772,371
Vertex count	655,593	Vertex count	2,447,809
Target count	0	Target count	0
Scan parameters		Scan parameters	
Resolution (mm)	2.00	Resolution (mm)	1.00
Smart resolution	Standard	Smart resolution	Standard
<input checked="" type="checkbox"/> Acquire texture		<input checked="" type="checkbox"/> Acquire texture	

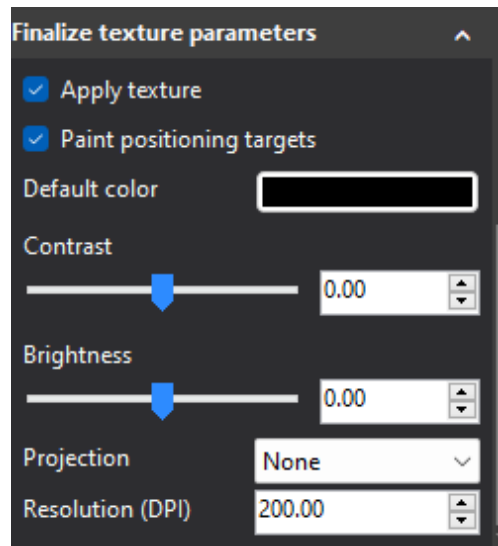
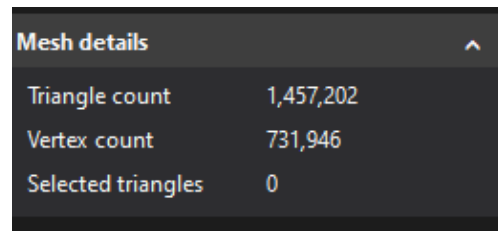
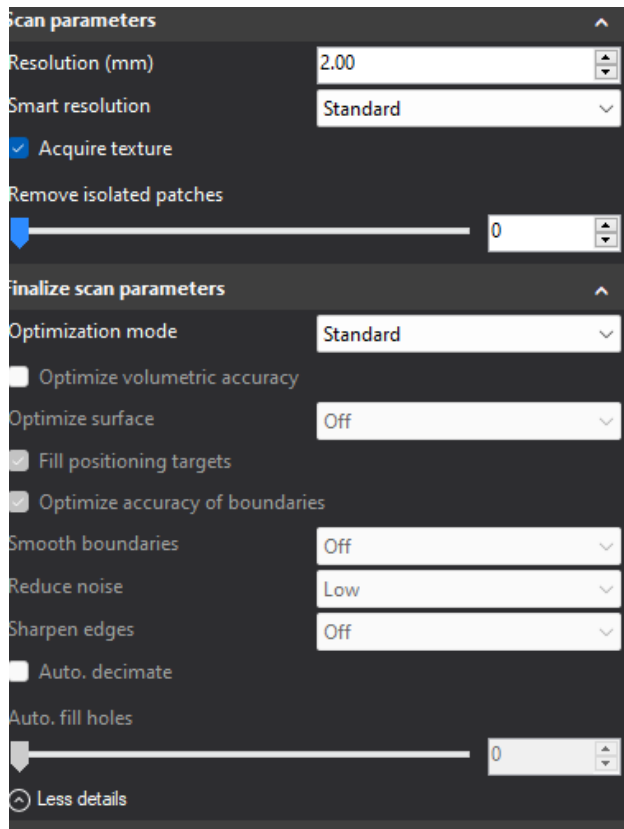
Επιπλέον με βάση τις προηγούμενες εφαρμογές τροποποιήθηκε η λήψη της πληροφορίας από Στόχους, γεωμετρία και υφή σε μόνο στόχους και γεωμετρία. Παρατηρήθηκε ότι μειώθηκαν οι πιθανότητες λάθους από διπλοτυπία, διότι το χρώμα ήταν αυτό που επαναλαμβάνονταν σε μεγάλο βαθμό στα μοντέλα. Να σημειωθεί ότι ανακλαστικοί στόχοι δεν τοποθετήθηκαν σε κανένα από τα μοντέλα και ο σαρωτής είχε ως μόνη πληροφορία εισαγωγής τη γεωμετρία και το χρώμα - υφή των μοντέλων.

2.2 Καθαρισμός, Ευθυγράμμιση και βελτιστοποίηση του μοντέλου

Το επόμενο βήμα είναι να γίνει ένας αρχικός καθαρισμός του μοντέλου και η ευθυγράμμιση του με τους άξονες XYZ.



Δημιουργήθηκαν κάποιες οντότητες (entities) με σκοπό να διευκολύνουν την ευθυγράμμιση και, στην προκειμένη περίπτωση, χρειάστηκαν δύο επίπεδα, και ένας κύλινδρος. Επειδή το μοντέλο δεν έχει καθαρή γεωμετρία (επίπεδα, καμπύλες κλπ) η ευθυγράμμιση θα εφαρμοστεί κατά προσέγγιση.



Τέλος μένει να οριστούν οι τελικές παράμετροι βελτιστοποίησης για την Οριστικοποίηση του μοντέλου, προτού σταλεί στο λογισμικό αντίστροφης μηχανικής. Επιλέχθηκε η αλλαγή της ανάλυσης (resolution) σε 2mm για τη μείωση του όγκου των τριγώνων, αλλά και των τριγώνων που λείπουν για να ολοκληρώσουν την γεωμετρία. Τέλος, ορίστηκε ανάλυση της υφής, με τιμή 200DPI, καθώς όσο καλύτερη είναι η ανάλυση της υφής, τόσο καλύτερη είναι αντίστοιχα και η εκτύπωση μέσω 3D εκτυπωτή.

3. Σχεδιασμός και Αντίστροφη Μηχανική

3.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η αντίστροφη μηχανική, η οποία ακολουθεί την τρισδιάστατη σάρωση και η οποία συνίσταται στην επεξεργασία του σαρωμένου μοντέλου, με σκοπό την επανασχεδίαση (CAD Design), τον έλεγχο ακεραιότητας (inspection) ή την απευθείας εκτύπωση, με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή (3D Printing). Επίσης, αναλύεται η έννοια του CMF (color, material, finish) και ο τρόπος με τον οποίο το χρώμα, το υλικό και η υφή μπορούν να αξιοποιηθούν στη δημιουργία του τελικού 3D εκτυπωμένου μοντέλου.

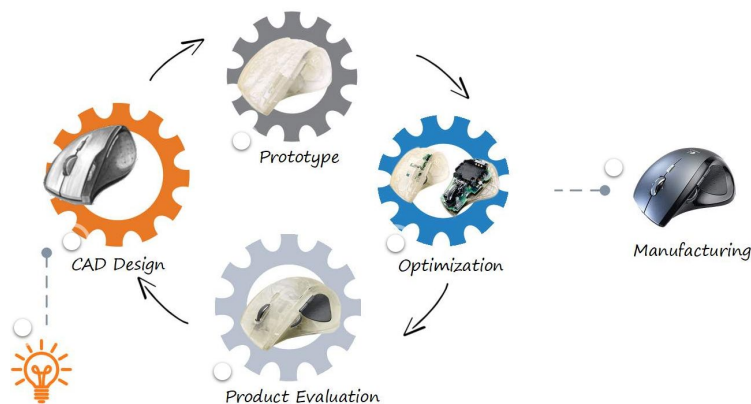
Ειδικότερα, σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η εφαρμογή της αντίστροφης μηχανικής (Reverse Engineering) και τα στάδια επεξεργασίας ενός σαρωμένου αντικειμένου μέχρι να καταλήξει στο τελικό κομμάτι, το οποίο θα σταλεί για εκτύπωση. Μέσα από την διαδικασία αυτή μελετούνται τα λογισμικά και οι χρήσεις τους για την επεξεργασία του νέφους σημείων, την υφή και του χρώματος. Τα προγράμματα που αναλύονται είναι το VXModel της Creaform, το οποίο συνοδεύει το σκάνερ Go!SCAN Spark και τα λογισμικά Photoshop και Keyshot για την επεξεργασία της υφής.

Το πρακτικό κομμάτι του παρόντος κεφαλαίου περιλαμβάνει την τελική επεξεργασία του σαρωμένου μοντέλου, με σκοπό την οριστικοποίησή του και τελικά την εκτύπωσή του. Επιπλέον, σε αυτό το στάδιο γίνεται επεξεργασία της υφής του σαρωμένου μοντέλου και έλεγχος της ποιότητας των χρωμάτων.

3.2 Κύκλος ζωής ενός προϊόντος

Στη βιομηχανία, η διαχείριση του κύκλου ζωής ενός νέου προϊόντος, από τον σχεδιασμό μέχρι την κατασκευή του, ονομάζεται διαχείριση κύκλου ζωής προϊόντος (PLM). Η αντίστροφη μηχανική (reverse engineering) βρίσκεται ανάμεσα σε όλες τις μηχανικές διαδικασίες που συμμετέχουν στην PLM. Στην τρέχουσα εποχή των σύγχρονων υπολογιστών, των λογισμικών CAD (Σχεδίαση με υπολογιστή), CAM (Κατασκευή με υπολογιστή) ή CAE (Μηχανική με υπολογιστή) και τεχνολογιών μέτρησης 3D, η αντίστροφη μηχανική χρησιμοποιείται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος, αναπόσπαστο μέρος του οποίου αποτελεί η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής, η οποία με τη σειρά της αποτελεί τον συνδεδετικό κρίκο ανάμεσα στην τρισδιάστατη σάρωση και στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

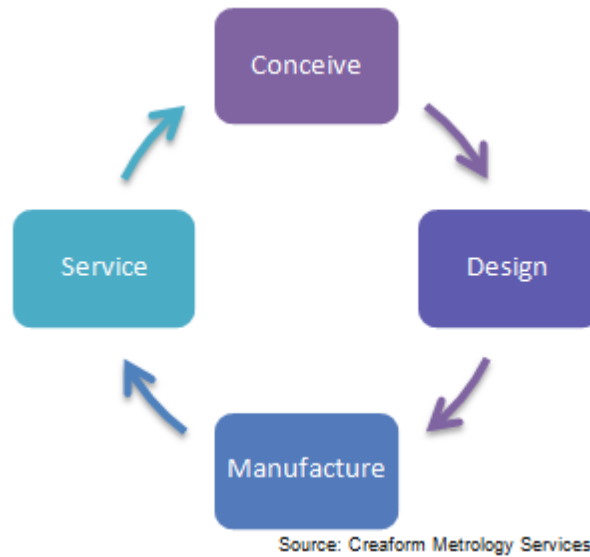


Εικόνα 39 3.2 Κύκλος ζωής ενός προϊόντος. Πηγή: [Stratasys]

- Ιδέα - όλα ξεκινούν με μια ιδέα
- Σχεδίαση - ο σχεδιαστής ή εφευρέτης σχεδιάζει το προϊόν, πρώτα χειροκίνητα και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD 3D
- Πρωτότυπο / Δοκιμή - Το επόμενο βήμα είναι η δοκιμή, η βελτιστοποίηση και η αξιολόγηση του προϊόντος, για το οποίο χρησιμοποιείται ένα πρωτότυπο
- Αλλαγές - το πρωτότυπο υπόκειται σε αλλαγές, τροποποιήσεις και ανασχεδίαση
Αξιολόγηση - το πρωτότυπο αξιολογείται από διάφορους ενδιαφερόμενους, τροποποιείται και ανασχεδιάζεται, μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα.
- Κατασκευή - μετά την βελτιστοποίηση του πρωτοτύπου και την έγκριση από όλους τους ενδιαφερόμενους, μπορεί να ξεκινήσει η κατασκευή.³⁶

36 Stratasys, Product Development Life Cycle, <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/resource-guides/product-development-life-cycle/>

3.3 Αντίστροφη μηχανική: Κομμάτι του κύκλου ζωής ενός προϊόντος - Product Lifecycle Management (PLM)



Εικόνα 40 Αντίστροφη μηχανική: Κομμάτι του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Πηγή: [Creaform3d]

Σύλληψη ιδέας (Conceive)

Το πρώτο στάδιο είναι να καθοριστούν οι απαιτήσεις του προϊόντος. Στη συνέχεια, καθορίζονται οι κύριες τεχνικές παράμετροι του προϊόντος. Πραγματοποιείται ο πρώτος σχεδιασμός, με την ανάπτυξη της αισθητικής και των βασικών λειτουργικών πτυχών του προϊόντος ταυτόχρονα. Χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα για αυτές τις διαδικασίες: από μολύβι και χαρτί έως μοντέλα από πηλό σε λογισμικό CAD (Σύστημα υποστήριξης βιομηχανικού σχεδιασμού με υπολογιστή).

Σχεδίαση

Το επόμενο στάδιο είναι η σχεδίαση και ανάπτυξη του προϊόντος. Το κύριο εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη είναι το λογισμικό CAD ή ένα freeform - ελεύθερης σχεδίασης, που μπορεί να είναι απλή σχεδίαση/σχεδίαση 2D ή 3D παραμετρική μοντελοποίηση βασισμένο σε στερεά/επιφανειακή μοντελοποίηση. Το λογισμικό CAD περιλαμβάνει τεχνολογίες όπως η υβριδική μοντελοποίηση, η αντίστροφη μηχανική, η KBE (Knowledge-base engineering), το NDT (Nondestructive testing), και το μοντέλο συναρμολόγησης.

Κατασκευή Πρωτοτύπων

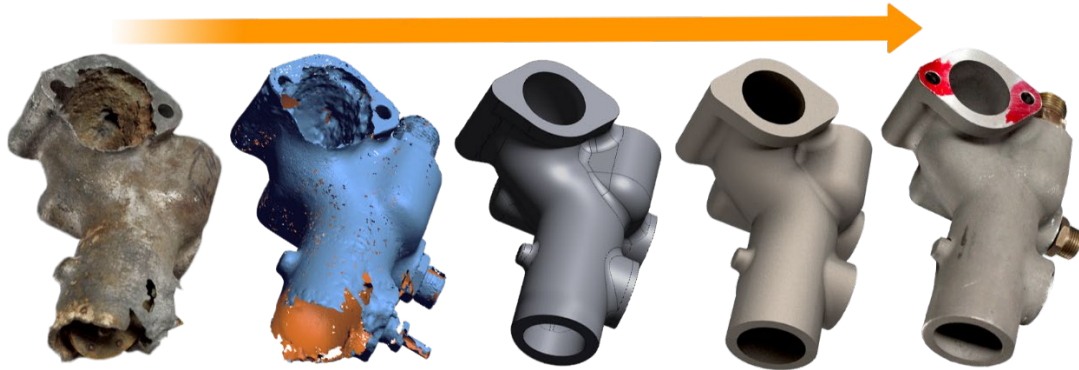
Τα πρωτότυπα είναι τα πρώτα δείγματα, μοντέλα ή εκδόσεις ενός προϊόντος που κατασκευάζονται για να δοκιμάσουν την ιδέα, τη διαδικασία ή για να λειτουργήσουν ως αντικείμενα προς αντιγραφή. Είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς,

όπως σημασιολογία, ηλεκτρονικά συστήματα, προγραμματισμό λογισμικού και σχεδιασμό προϊόντος. Ένα πρωτότυπο σχεδιάζεται κυρίως για να δοκιμάσει ένα νέο σχέδιο (από αναλυτές και/ή χρήστες) και να βελτιώσει την ακρίβεια και την ποιότητα ενός προϊόντος.

Προηγουμένως γνωστό ως γρήγορη πρωτοτυποποίηση (rapid prototyping), η προσθετική κατασκευή ή εκτύπωση 3D είναι η διαδικασία κατασκευής ενός τρισδιάστατου στερεού αντικειμένου οποιασδήποτε εικονικής μορφής από ένα ψηφιακό μοντέλο. Χρησιμοποιείται για την παροχή προδιαγραφών για ένα πραγματικό αντικείμενο (αντί για ένα θεωρητικό σύστημα).

Επικύρωση, Δοκιμή και Ανάλυση

Εργασίες προσομοίωσης, επικύρωσης και βελτιστοποίησης πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας λογισμικό CAE (Μηχανική που βασίζεται σε υπολογιστή) είτε ενσωματωμένο στο πακέτο CAD είτε αυτόνομο. Χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση εργασιών όπως ανάλυση έντασης, FEA (Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων), κινηματική, CFD (Υπολογιστική Δυναμική Ρευστών) και MES (Μηχανική Προσομοίωση Συμβάντων).³⁷



Εικόνα 41 Από την τρισδιάστατη σάρωση στην δημιουργία μοντέλου σε CAD. Πηγή: [imimg]

3.4 Πως θα εφαρμοστεί η αντίστροφη μηχανική

Η αντίστροφη μηχανική είναι η διαδικασία που αναγνωρίζει τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου, μίας συσκευής ή ενός συστήματος μέσω της σφαιρικής ανάλυσης της δομής και των λειτουργιών του. Στη μηχανική, αυτή η

³⁷ Creaform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 27 https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf

διαδικασία στοχεύει στη δημιουργία ενός εικονικού 3D μοντέλου από ένα υπάρχον φυσικό αντικείμενο με σκοπό την αναπαραγωγή ή τη βελτίωσή του.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τη χρήση της αντίστροφης μηχανικής σε φυσικά αντικείμενα. Για παράδειγμα, η διαδικασία αυτή θα χρησιμοποιηθεί εάν το αρχικό σχέδιο δεν υποστηρίζεται από επαρκή τεκμηρίωση ή εάν το αρχικό μοντέλο CAD δεν είναι κατάλληλο για να υποστηρίξει τροποποιήσεις και/ή κανονικές μεθόδους παραγωγής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο αρχικός κατασκευαστής δεν υπάρχει ή δεν παράγει πλέον ένα προϊόν, αλλά ορισμένες απαιτήσεις παραμένουν για αυτό το προϊόν. Και σε αυτές τις περιπτώσεις αναδεικνύεται η σημασία της αντίστροφης μηχανικής. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η αντίστροφη μηχανική στην περίπτωση φθαρμένων ή κατεστραμμένων εξαρτημάτων, για τα οποία δεν υπάρχει πηγή εφοδιασμού, στην ανάλυση προϊόντων, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης και των χαρακτηριστικών τους, σε περιπτώσεις έλλειψης ανταλλακτικών, καθώς και στην επικαιροποίηση και αναβάθμιση ξεπερασμένων υλικών ή μεθόδων κατασκευής.

Για τη δημιουργία ενός 3D μοντέλου του αντικείμενου, το αντικείμενο πρέπει να μετρηθεί χρησιμοποιώντας τεχνολογίες σάρωσης 3D (CMM, λέιζερ ή λευκού φωτός). Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία σάρωσης, το 3D μοντέλο μπορεί να ανακατασκευαστεί με τη χρήση λογισμικών CAD, CAM, CAE ή άλλων³⁸.

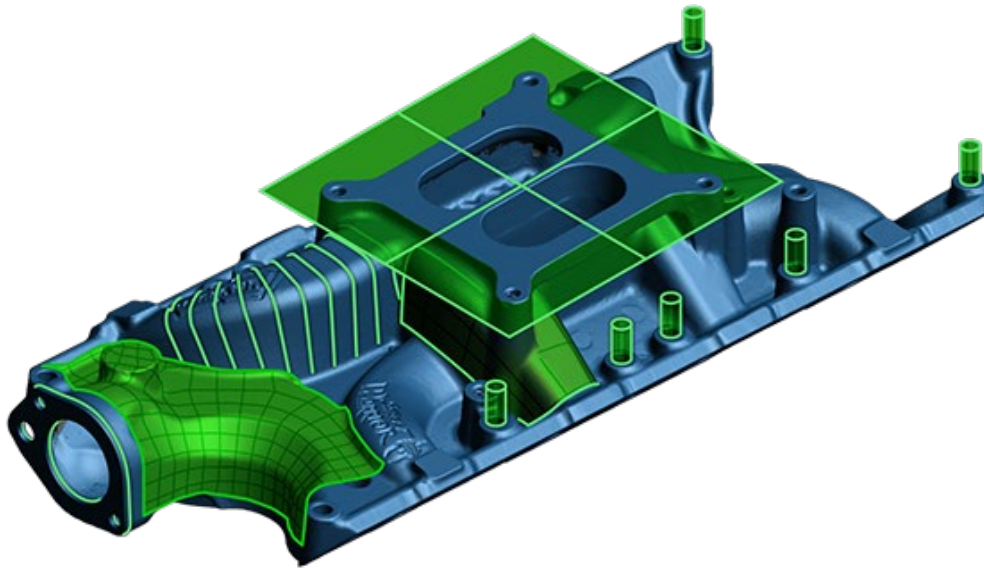
3.5 Λογισμικό Αντίστροφης Μηχανικής

Ορισμένα προγράμματα λογισμικού είναι αφιερωμένα στην 3D σχεδίαση και περιλαμβάνουν ενότητες αντιστροφής μηχανικής, ενώ άλλα έχουν σχεδιαστεί αποκλειστικά για τον συγκεκριμένο σκοπό.

Το κύριο χαρακτηριστικό των προγραμμάτων αντίστροφης μηχανικής είναι η δυνατότητά τους να επεξεργάζονται τα δεδομένα από το υπάρχον αντικείμενο. Τα δεδομένα που σαρώνονται ή αποκτώνται από το αντικείμενο που πρόκειται να υποστεί αντιστροφή μηχανική χρησιμοποιούνται ως βάση για τον σχεδιασμό του τελικού σχεδίου.

³⁸

Creaform Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS – TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014, σελ 8, https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_1.pdf



Εικόνα 42 Ορισμός οντοτήτων που ορίζουν επίπεδα, επιφάνειες, σχήματα κ.α. για την λήψη των μετρήσεων πάνω στο σαρωμένο μοντέλο Πηγή: [\[Creaform3d\]](#)

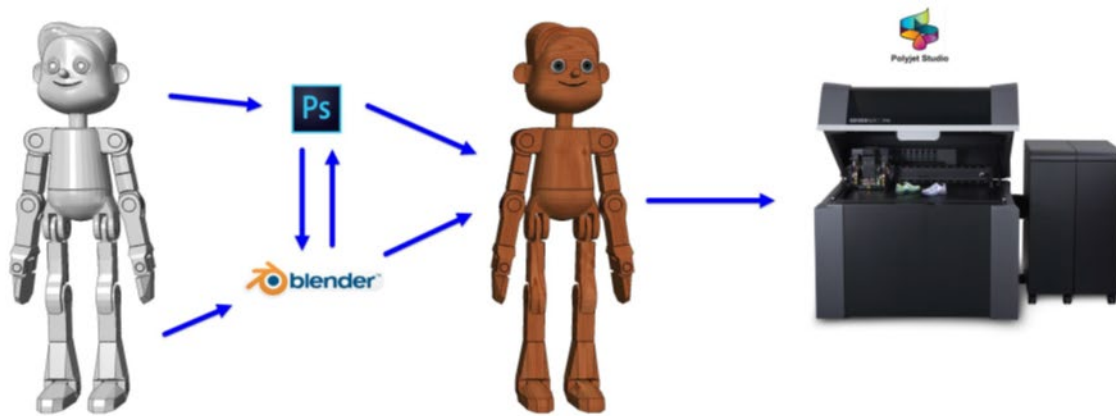
3.5.1 VXElements – VX Model

Το VX Model είναι επιπρόσθετο (Module) του VX Elements, το οποίο επικεντρώνεται στις δυνατότητες μετά-επεξεργασίας. Επιτρέπει στους χρήστες να επεξεργάζονται, να καθαρίζουν και να ολοκληρώνουν τα δεδομένα σάρωσης 3D για διάφορες εφαρμογές, όπως η αντίστροφη μηχανική και η γρήγορη πρωτοτυποποίηση.

Το VX Model είναι ένα αυτόνομο λογισμικό που εξειδικεύεται στην επεξεργασία και τη βελτιστοποίηση δεδομένων σάρωσης 3D. Συχνά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τους 3D σαρωτές της Creaform, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με δεδομένα από άλλες πηγές. Παρέχει εργαλεία για την επεξεργασία και τον έλεγχο του 3D μοντέλου που έχει αποκτηθεί από σαρώσεις. Περιλαμβάνει λειτουργίες για λείανση, απλοποίηση και επισκευή του μοντέλου, ορισμό οντοτήτων που καθορίζουν επίπεδα, επιφάνειες, σχήματα κ.α., για την λήψη των μετρήσεων πάνω στο σαρωμένο μοντέλο. Το λογισμικό επιτρέπει τη μετατροπή σύννεφων σημείων σε ακριβείς και επεξεργάσιμες επιφάνειες. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής.³⁹

³⁹ Creaform, VXmodel: SCAN-TO-CAD SOFTWARE MODULE, <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/3d-applications-software-platforms/vxmodel-scan-cad-software-module>

3.6 3D Εκτύπωση και Σχεδιασμός CMF



Εικόνα 43 Εφαρμογή σχεδιασμού CMF (color, material, finish) πριν την εκτύπωση. Πηγή: [Stratasys]

Ο σχεδιασμός μέσω CMF (χρώμα, υλικό, φινιρίσμα) είναι η διαδικασία δημιουργίας της εμφάνισης ενός προϊόντος. Στο παρελθόν, η δημιουργία πλήρους χρωματικού υλικού φινιρίσματος (CMF) ήταν περίπλοκη, αλλά η τεχνολογία εκτύπωσης 3D και ο σχεδιασμός CMF άλλαξαν αυτό το πεδίο. Οι σχεδιαστές δημιουργούν προϊόντα που όχι μόνο είναι οπτικά ελκυστικά, αλλά προσφέρουν και μια εξαιρετική εμπειρία χρήστη (look and feel) εφαρμόζοντας όλα αυτά κατά την σχεδίαση. Η τεχνολογία εκτύπωσης 3D κατέστησε δυνατή τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων σχεδιασμού CMF.⁴⁰

3.7 Ενσωμάτωση του Keyshot στην διαδικασία προετοιμασίας

3.7.1 Σύνοψη

Το KeyShot είναι λογισμικό 3D φωτορεαλιστικής απεικόνισης από την Luxion Inc, το οποίο συνεργάζεται με το GrabCAD Print για γρήγορη και ομαλή εξαγωγή αρχείων 3MF. Στην αρχή της διαδικασίας σχεδιασμού γίνεται η προετοιμασία και ο έλεγχος Color-Material-Finish (CMF) του μοντέλου με όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένου σχήματος, χρώματος, διαφάνειας, υλικών και υφών. Αφού το μοντέλο CMF είναι έτοιμο, το αρχείο εξάγεται σε μορφή αρχείου 3MF (το οποίο συμπεριλαμβάνει όλη την πληροφορία) και εκτυπώνεται χρησιμοποιώντας το GrabCAD Print σε εκτυπωτές 3D PolyJet.

⁴⁰ Stratasys, Get tips for perfect product design with a full color 3D printer and rapid CMF modeling iterations, <https://www.stratasys.com/en/resources/resource-guides/cmf-ebook/>



Εικόνα 44 Το KeyShot, είναι λογισμικό 3D φωτορεαλιστικής απεικόνισης από την Luxion Inc, το οποίο συνεργάζεται τώρα με το GrabCAD Print για γρήγορη και ομαλή εξαγωγή αρχείων 3MF. Πηγή: [GrabCAD]

Παρακάτω θα αναλυθούν μερικές από τις βέλτιστες πρακτικές κατά την επεξεργασία με το KeyShot πριν περαστούν στο GrabCAD Print.

3.7.2 Υποστηριζόμενα υλικά και ρυθμίσεις

Πολλά από τα υλικά που είναι διαθέσιμα στο KeyShot μπορούν να εκτυπωθούν με υψηλή πιστότητα. Ωστόσο, ορισμένα υλικά δεν υποστηρίζονται. Για βέλτιστα αποτελέσματα, ο παρακάτω πίνακας δείχνει ποια υλικά συστήνονται και ποια είναι καλό να αποφεύγονται.

✓

✗

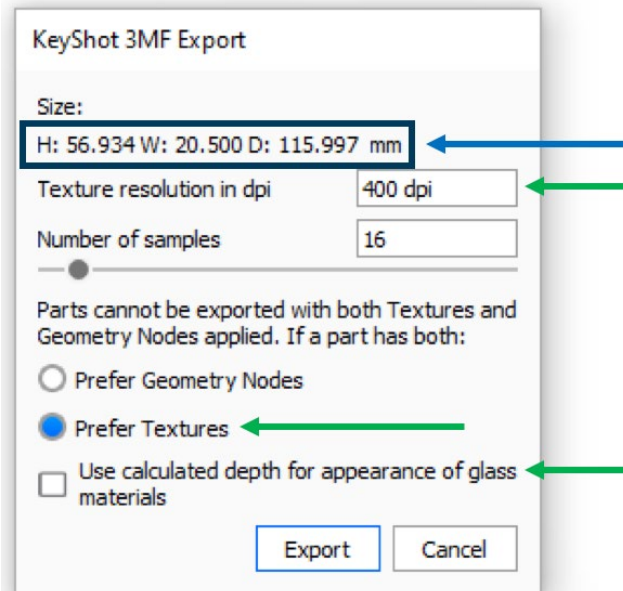
Προτεινόμενα	Προς αποφυγή
<ul style="list-style-type: none"> • Paint • Plastics • Textures - procedural and mapped • Metal color • Most transparencies • Labels • Gradients • Displacement • Bump • Wood, stone, fabric 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuzz • Sub-surface • Reflective • Light • Real metal • Soft • X-Ray • Cutaway • Other render-only appearances

Εικόνα 45 Προτεινόμενα υλικά και μη για την εφαρμογή CMF. Πηγή: [GrabCAD]

3.7.3 Μονάδες (units), Διαστάσεις και DPI

Κατά την εισαγωγή αρχείων στο KeyShot, ορισμένοι τύποι αρχείων δεν περιέχουν πληροφορίες για τις μονάδες (Units). Εάν οι μονάδες δεν έχουν καθοριστεί, μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά το μέγεθος του μοντέλου και ο χρόνος εξαγωγής. Εάν χρειάζεται να τροποποιηθούν οι μονάδες, αυτό συστήνεται να γίνει στο πρόγραμμα CAD.

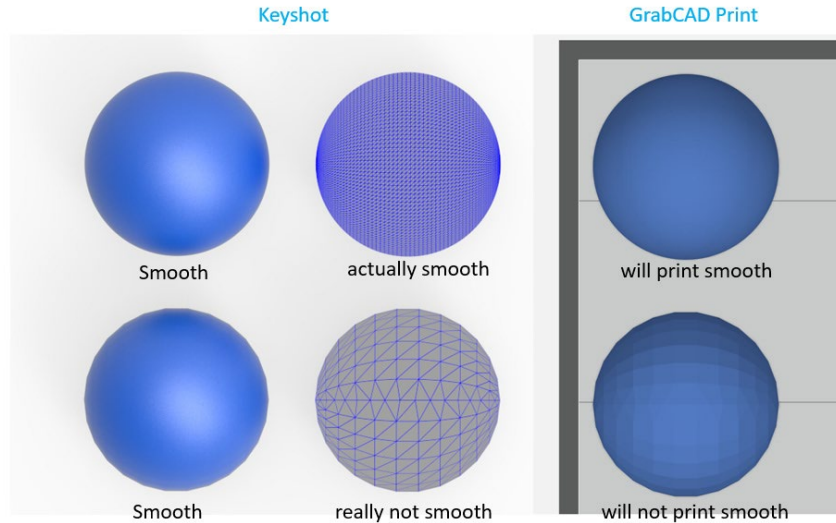
Κατά την εξαγωγή 3MF αρχείου προτείνεται η χρήση DPI που κυμαίνεται από 400 έως 600. Κατά κανόνα η ανάλυση του τμήματος θα πρέπει να είναι υψηλότερη από την ανάλυση του εκτυπωτή. Το KeyShot εφαρμόζει το DPI μόνο σε υφές, ετικέτες και χρώματα. Αν δεν υπάρχουν υφές, ετικέτες ή χρώματα, το KeyShot αγνοεί το DPI. Κάτω από 300 DPI, το μοντέλο θα έχει φτωχή εμφάνιση. [Εικόνα 46]



Εικόνα 46 Προτεινόμενες τιμές κατά την εξαγωγή του μοντέλου. Πηγή: [GrabCAD]

3.7.4 Ανάλυση Επιφάνειας (Tesselation)

Η ποιότητα του εκτυπωμένου αντικειμένου καθορίζεται από την πυκνότητα (density) του τριγωνικού δικτύου (triangle mesh). Όσο πιο πολύπλοκη είναι η επιφάνεια, τόσο περισσότερα τρίγωνα δημιουργούνται. Εάν δεν υπάρχουν αρκετά τρίγωνα για να καθορίσουν την πολυπλοκότητα της επιφάνειας, το μοντέλο που θα εκτυπωθεί θα έχει πτυχώσεις. Εάν οι πτυχώσεις είναι ορατές στην οθόνη, θα εμφανιστούν επίσης στο εκτυπωμένο μοντέλο. [Εικόνα 47]

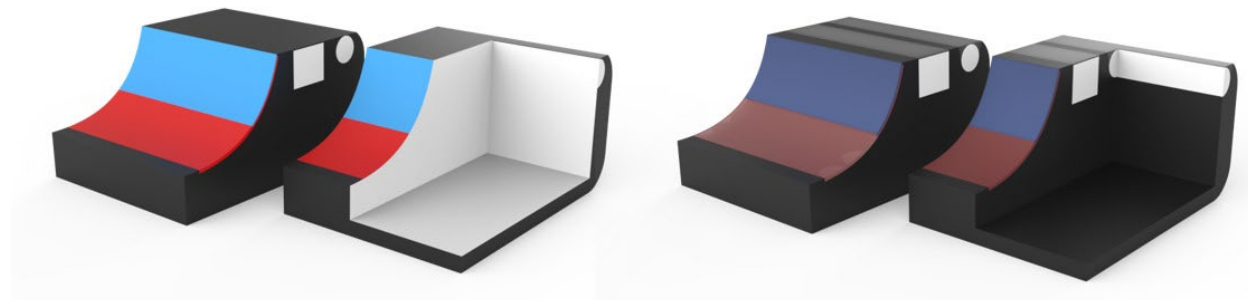


Εικόνα 47 Παράδειγμα ανάλυσης επιφάνειας. Πηγή: [GrabCAD]

3.7.5 Χρώμα

Γειτονικές επιφάνειες που είναι λεπτότερες από 2 χιλιοστά και έχουν διαφορετικά χρώματα μπορεί να οδηγήσουν σε ανακριβή και θαμπά χρώματα στο εκτυπωμένο μοντέλο.

- Το εσωτερικό κέλυφος του μοντέλου εκτυπώνεται αυτόματα σε λευκό, όταν το πάχος του κελύφους είναι τουλάχιστον 2 χιλιοστά. Αυτό το λευκό εσωτερικό κέλυφος εξασφαλίζει ζωηρά και ακριβή χρώματα στα εκτυπωμένα μοντέλα. Εάν το πάχος του εσωτερικού κελύφους είναι λιγότερο από 2 χιλιοστά, δεν υπάρχει περιθώριο για το λευκό εσωτερικό κέλυφος, και τα χρώματα είναι λιγότερο ακριβή και λιγότερο ζωηρά.
- Όταν τα γειτονικά κελύφη έχουν διάφορα χρώματα και το πάχος τους είναι λιγότερο από 2 χιλιοστά, μία καλή πρακτική είναι να ενωθούν τα κελύφη πριν εισαχθούν στο KeyShot, και στη συνέχεια να βαφτούν οι επιφάνειες (χρώμα ανά κέλυφος).



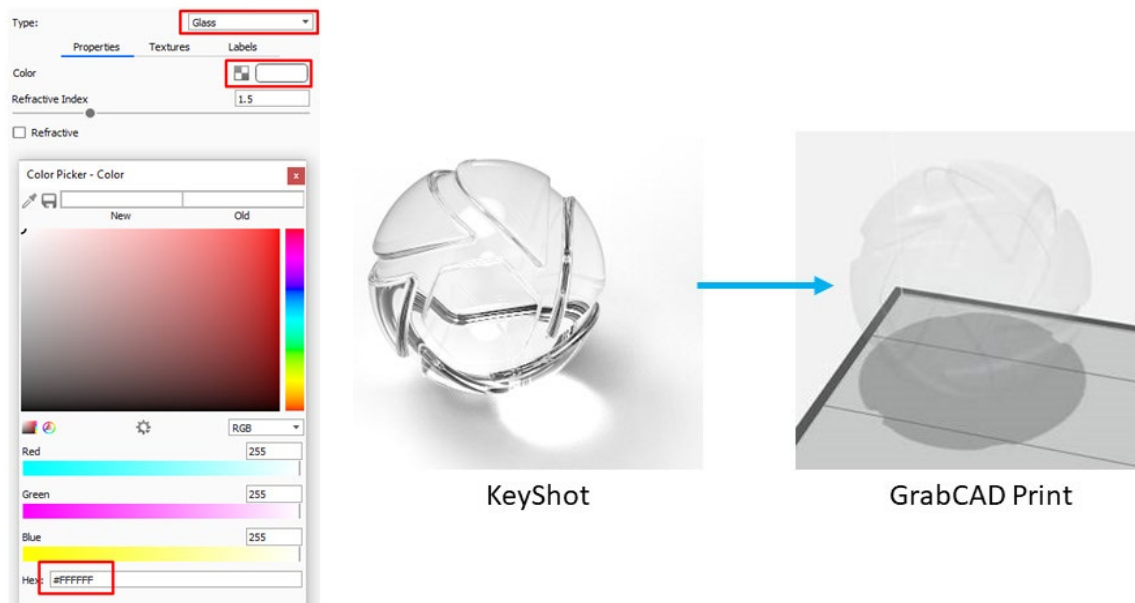
Εικόνα 48 Παράδειγμα τοιχώματος και η εφαρμογή του χρώματος. Πηγή: [GrabCAD]

3.7.6 Διαφάνεια

Ορισμένοι τύποι διαφάνειας στο KeyShot μπορεί να προκαλέσουν απρόβλεπτα και ασυνεπή αποτελέσματα στο εκτυπωμένο 3D μοντέλο.

Για να εκτυπωθούν πλήρως διαφανή μοντέλα στο KeyShot, προτείνεται η χρήση ενός από τους παρακάτω τύπους υλικού και η ρύθμιση του χρώματος σε λευκό (#FFFFFF).

- Γυαλί (glass)
- Πολύτιμος λίθος (gem)
- Υγρό (liquid)
- Διηλεκτρικό (Dielectric)

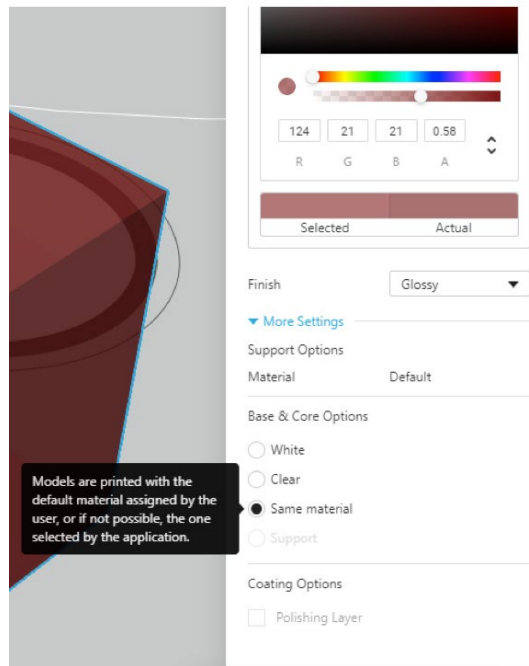


Εικόνα 49 Εφαρμογή της διαφάνειας (αριστερά) στο μοντέλο και πως ο slicer (δεξιά) διαβάζει την πληροφορία. Πηγή: [\[GrabCAD\]](#)

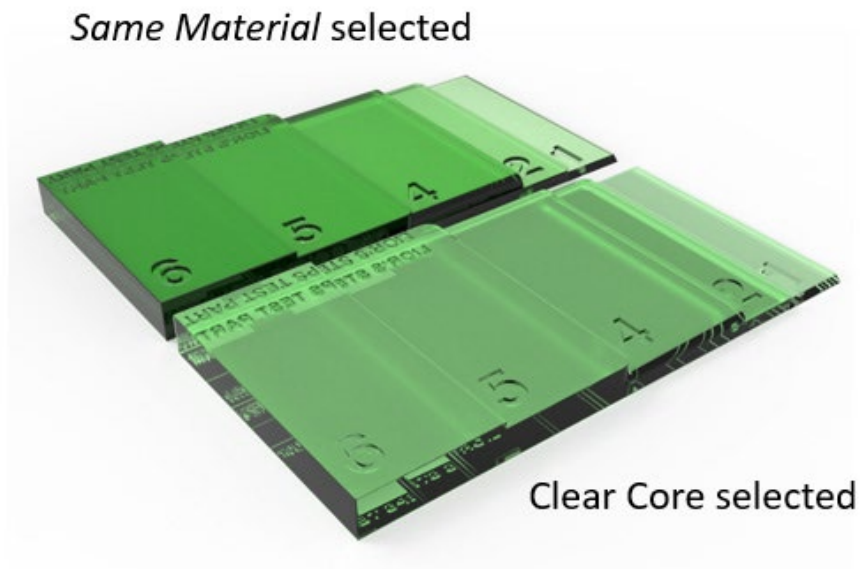
Δεν προτείνεται η χρήση αυτών των παρακάτω τύπων υλικού, καθώς δεν υποστηρίζονται από το GrabCAD Print και η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτα αποτελέσματα:

- Μερική Διαφάνεια (Translucent Medium)
- Μερική Διασπορά (Scattering Medium)
- Πλαστικό (Διαφανές) – ρυθμίσεις Διάχυσης (diffuse)/ Κατοπτρισμός (Specular) / Μετάδοσης (Transmission)

Για να διασφαλισθεί ότι τα μοντέλα έχουν ρεαλιστική εμφάνιση στερεού πλαστικού / γυαλιού στο GrabCAD Print (όσο πιο παχύ είναι το τμήμα, τόσο πιο σκούρα και κορεσμένα τα χρώματα), υπάρχει η επιλογή «Same material» [Εικόνα 50]. Η ρύθμιση αυτή εφαρμόζει στον πυρήνα (core) το ίδιο χρώμα και διαφάνεια που χρησιμοποιείται για την επίστρωση (coating). [Εικόνα 51]



Εικόνα 50 Ορισμός ίδιου υλικού στον slicer για την έγκριση εκτόπωση του πυρήνα του κομματιού. Πηγή: [\[GrabCAD\]](#)



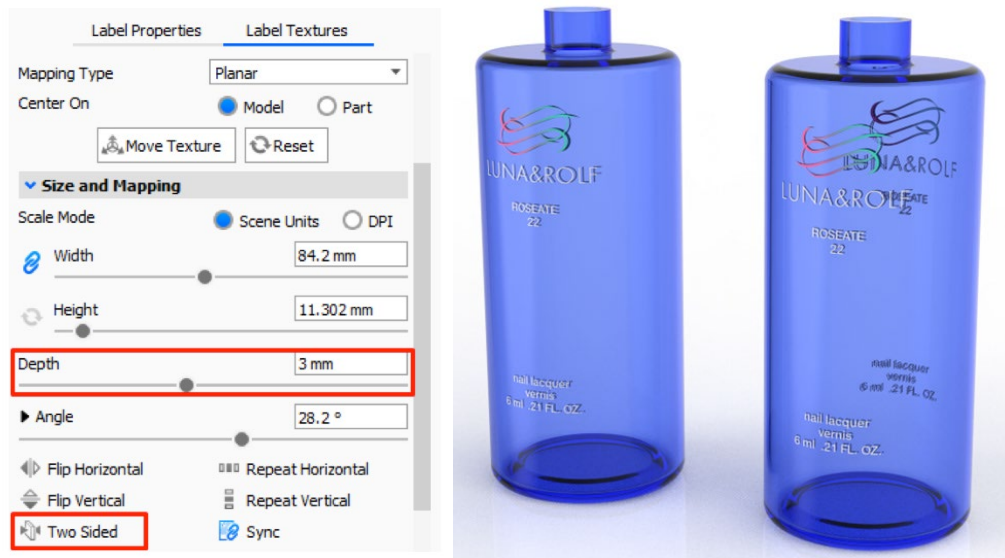
Εικόνα 51 Σύγκριση ίδιου υλικού πυρήνα με διάφανο υλικό στον πυρήνα. Πηγή: [\[GrabCAD\]](#)

3.7.7 Προβολή ετικέτας

Κατά την προβολή ετικέτας σε ένα μοντέλο, ενδέχεται να αποτυπωθεί καλά στο KeyShot. Ωστόσο, αν χρησιμοποιηθούν οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις, η ετικέτα

αποτυπώνεται και στο πίσω μέρος του μοντέλου. Επιπλέον, αν το μοντέλο είναι κούφιο, η ετικέτα είναι ορατή στην εσωτερική πλευρά του τοίχου πάνω στην οποία προβάλλεται. Αυτό το πρόβλημα του αντικατοπτρισμού, το οποίο είναι λιγότερο ορατό και μπορεί να κρύβεται πλήρως στις απεικονίσεις 2D, παρουσιάζεται μόνο στα πραγματικά μοντέλα 3D. Για να διασφαλιστεί ότι η ετικέτα αποτυπώνεται μόνο στην επιθυμητή επιφάνεια του αντικειμένου, υπάρχει η ρύθμιση του βάθους, το οποίο πρέπει να είναι μικρότερο από το πάχος του μοντέλου. Σημείωση: Το προεπιλεγμένο βάθος 0 είναι άπειρο.

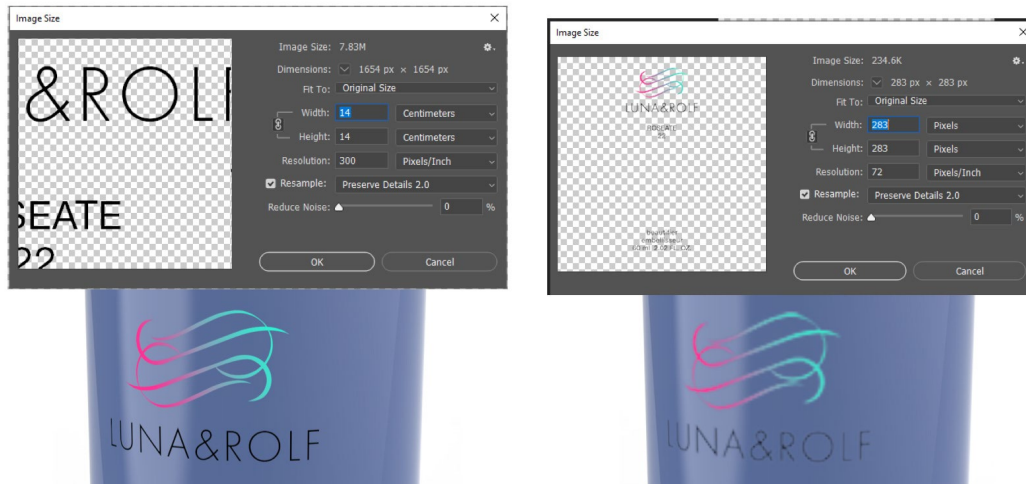
Επίσης η από-επιλογή του πλαισίου «Two-sided» εμποδίζει την εμφάνιση της ετικέτας στο πίσω και εμπρός μέρος του μοντέλου, πράγμα ιδιαίτερα σημαντικό για κούφια και διαφανή μοντέλα, όπως αυτό που φαίνεται παρακάτω. Όταν χρησιμοποιείται η κυλινδρική προβολή, για να αποφευχθεί η εμφάνιση της ετικέτας στην εσωτερική πλευρά της επιφάνειας, συνιστάται να χωριστεί η επιφάνεια (στο KeyShot ή άλλο λογισμικό μοντελοποίησης).



Εικόνα 52 Εφαρμογή της ετικέτας στο λογισμικό Keyshot. Πηγή: [GrabCAD]

3.7.8 Ανάλυση Ετικέτας και Υφής

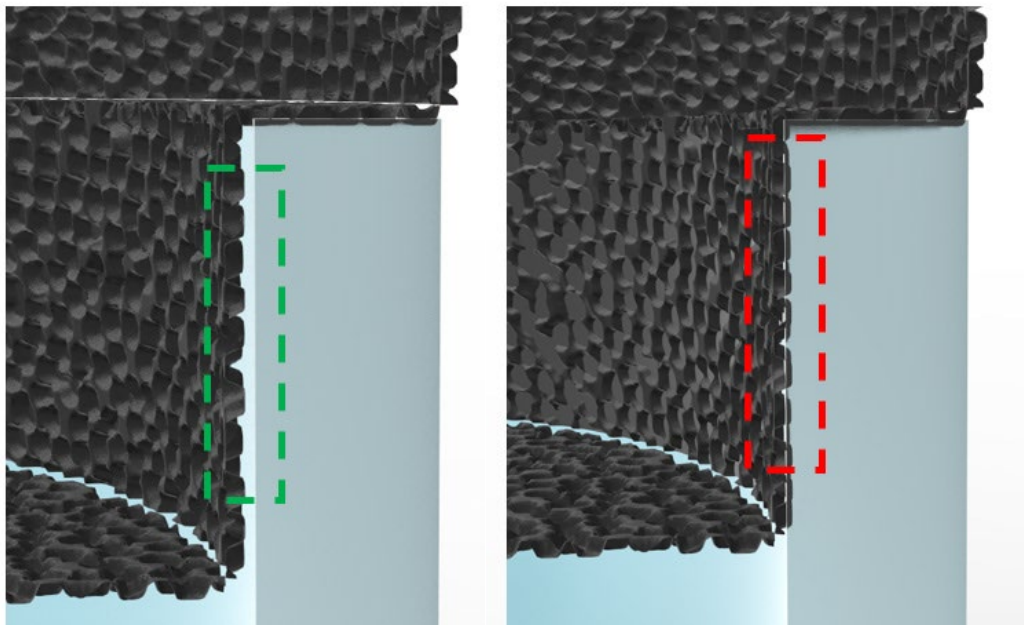
Για βέλτιστα αποτελέσματα κατά την προσθήκη ετικετών και υφών, προτείνεται η χρήση υψηλής ανάλυσης μεταξύ 300 και 600 DPI. Συνιστάται επίσης στον χρήστη να μεγεθύνει το γραφικό και να βεβαιωθεί ότι φαίνεται πιο ξεκάθαρο και όχι θολό. Στις 2D απεικονίσεις, η χαμηλή ανάλυση μπορεί να εμφανίζεται όπως αναμένεται στην οθόνη, αλλά όταν εκτυπώνεται σε 3D, τα αποτελέσματα δεν είναι καλής ποιότητας.



Εικόνα 53 Ανάλυση Ετικέτας κατά την εφαρμογή. Πηγή: [GrabCAD]

3.7.9 Κοιλότητα (Bump) και Μετατόπιση (Displacement)

Η εφαρμογή της μετατόπισης τροποποιεί τη γεωμετρία του αντικειμένου και έχει ως αποτέλεσμα αλλαγές στο φυσικό μοντέλο. Για να αποφευχθεί αυτό είναι σημαντικό να έχει εφαρμοστεί ένα ευρύ πεδίο ανοχής. Χαμηλό εύρος ανοχής μπορεί να οδηγήσει σε επικαλύψεις στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Αντίθετα, το υψηλό εύρος ανοχής επιτρέπει τη μετατόπιση χωρίς επικαλύψεις, οπότε είναι συνετό η ανοχή να είναι μεγαλύτερη από το ύψος της μετατόπισης (displacement).⁴¹

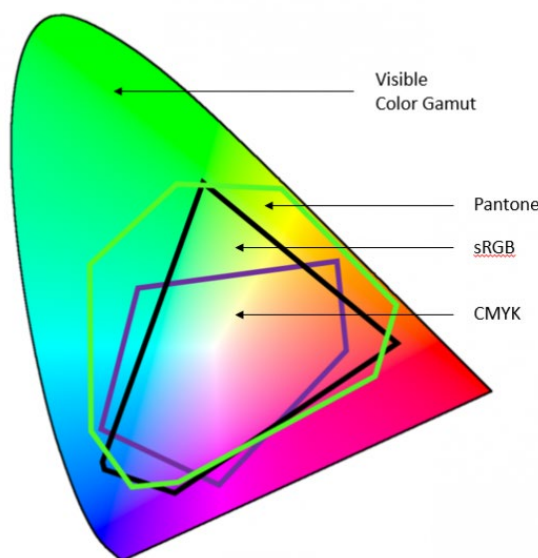


Εικόνα 54 Η εφαρμογή της μετατόπισης τροποποιεί τη γεωμετρία του κομματιού και έχει ως αποτέλεσμα αλλαγές στο φυσικό μοντέλο. Πηγή: [GrabCAD]

⁴¹ Stratasys, Designing in KeyShot for PolyJet 3D Printing, σελ 2-9

3.8 Πιστότητα χρωμάτων

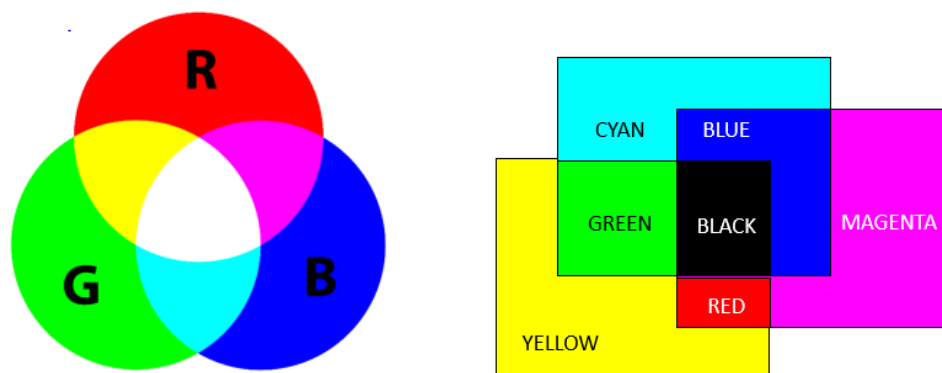
Πολλές φορές, τα χρώματα του αντικείμενου που εκτυπώνεται διαφέρουν από τα χρώματα που είχε δώσει ο σχεδιαστής κατά τον σχεδιασμό του στο σχετικό πρόγραμμα. Για να επιτευχθεί μία έγκυρη μετάφραση των πληροφοριών που δίνει ο σχεδιαστής (χρώμα, υφή κλπ) στο αντικείμενο που σχεδιάζει με σκοπό την τρισδιάστατη εκτύπωση, θα χρειαστεί να γίνει αντιληπτό πώς διαβάζει ο εκτυπωτής τα χρώματα αυτά. Παρακάτω θα αναλυθούν το πώς μεταφράζονται τα χρώματα στην μηχανή εκτύπωσης και τι τεχνικές μπορεί να ακολουθήσει ο σχεδιαστής για να επιτύχει την αντιστοιχία των χρωμάτων και υφών από αυτά που βλέπει στην οθόνη στο τελικό αντικείμενο.



Εικόνα 55 Εύρος χρωματικών προφίλ. Πηγή: [\[GrabCAD\]](#)

3.8.1 Πως δουλεύει το χρώμα στην εκτύπωση

Κατά την διαδικασία εφαρμογής χρώματος και υφής μπορεί να παρατηρηθεί ότι το χρώμα που επιλέχθηκε στην οθόνη του υπολογιστή δεν ταιριάζει με το χρώμα του εκτυπωμένου αντικείμενου. Αυτό συμβαίνει, διότι οι οθόνες χρησιμοποιούν το χρωματικό πεδίο RGB [Εικόνα 56], ενώ οι εκτυπωτές (και 2D και 3D) εκτυπώνουν χρησιμοποιώντας το χρωματικό πεδίο CMYK [Εικόνα 57]. Κάθε χρωματικό πεδίο έχει το δικό του ελαφρώς διαφορετικό εύρος χρωμάτων.



Εικόνα 56 RGB προφίλ αριστερά και CMYK προφίλ δεξιά. Πηγή [GrabCAD]

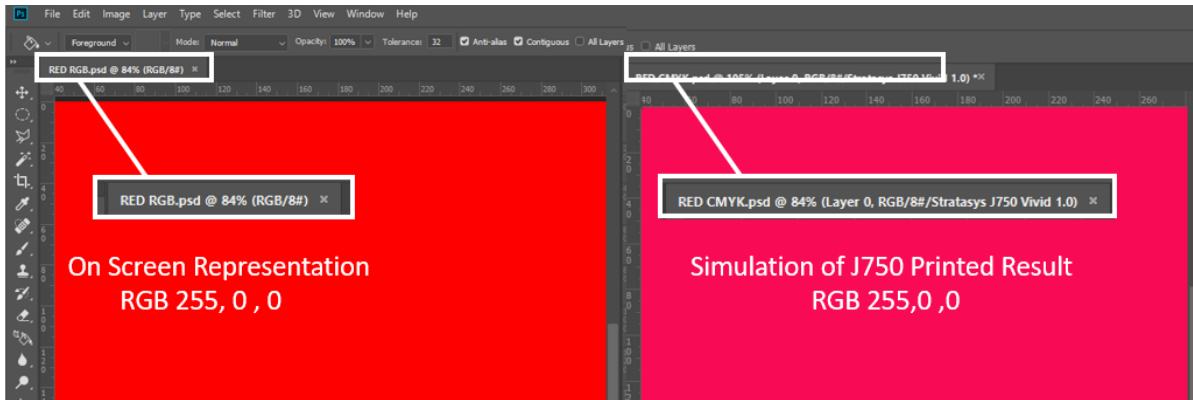
Τα λογισμικά εκτύπωσης (τόσο 2D όσο και 3D) χρησιμοποιούν ένα προφίλ χρωμάτων για να ανασχηματίσουν τα χρώματα που βρίσκονται έξω από το χρωματικό πεδίο CMYK. Για να ταιριάξουν τα χρώματα, ο χρήστης/σχεδιαστής μπορεί να πάρει το χρώμα RGB που θέλει να δημιουργήσει και, χρησιμοποιώντας κάποιο λογισμικό, όπως το Adobe Photoshop, να συγκρίνει το χρώμα RGB που έχει επιλέξει με το χρώμα CMYK που θα εξαχθεί από τον εκτυπωτή. Αφού δει τα χρώματα δίπλα-δίπλα στην οθόνη, μπορεί να προσαρμόσει το χρώμα που θα εκτυπωθεί μέχρι να ταιριάζει καλύτερα με το χρώμα RGB που έχει επιλέξει. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται πιστότητα χρώματος (color proofing). Η πιστότητα χρώματος βοηθά στην αντιστοίχιση των χρωμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κανένας εκτυπωτής, είτε 2D είτε 3D, δεν μπορεί να αναπαράγει το πλήρες φάσμα των χρωμάτων που μπορούν να αναπαρασταθούν σε μια οθόνη. Η οθόνη βασίζεται σε μια πηγή φωτός και τα εκτυπωμένα αντικείμενα όχι. Ορισμένα έντονα (vivid) και φθορίζοντα (fluorescent) χρώματα απλώς δεν θα φαίνονται ποτέ τόσο φωτεινά χωρίς μια ενσωματωμένη πηγή φωτός που να τα φωτίζει.⁴²

3.8.2 Soft Proofing

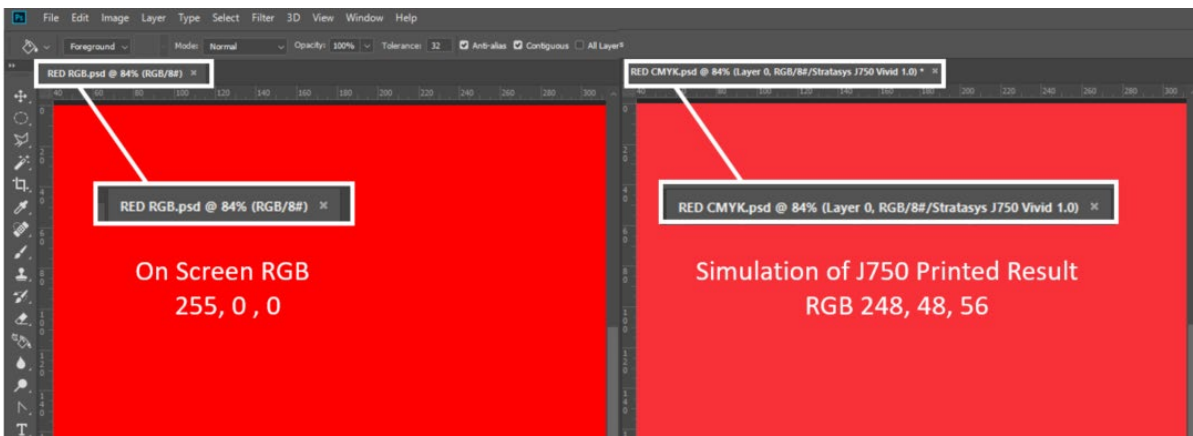
Το Soft Proofing εμφανίζει στην οθόνη το επιθυμητό RGB χρώμα και το αντιστοιχίζει με την προσομοίωσή του σε CMYK (για παράδειγμα, με το Adobe Photoshop).

⁴²ALEXA NAHUM, 3D Printing in Full Color: An Introduction, Οκτώβριος 2018, <https://blog.grabcad.com/blog/2018/10/31/3d-printing-in-full-color-an-introduction/>



Εικόνα 57 Μπορούν να εφαρμοστούν ορισμένες τεχνικές προσαρμογής για να επιτευχθεί η διαδικασία soft proofing [GrabCAD]

Μπορούν να εφαρμοστούν ορισμένες τεχνικές προσαρμογής για να επιτευχθεί η διαδικασία soft proofing [Εικόνα 58]. Μετά την προσαρμογή του χρώματος που θα αποτυπωθεί στην J750 (Τρισδιάτατος εκτυπωτής της Stratasy) μπορεί να επιτευχθεί μια στενότερη ταύτιση με το κόκκινο RGB. [Εικόνα 59]



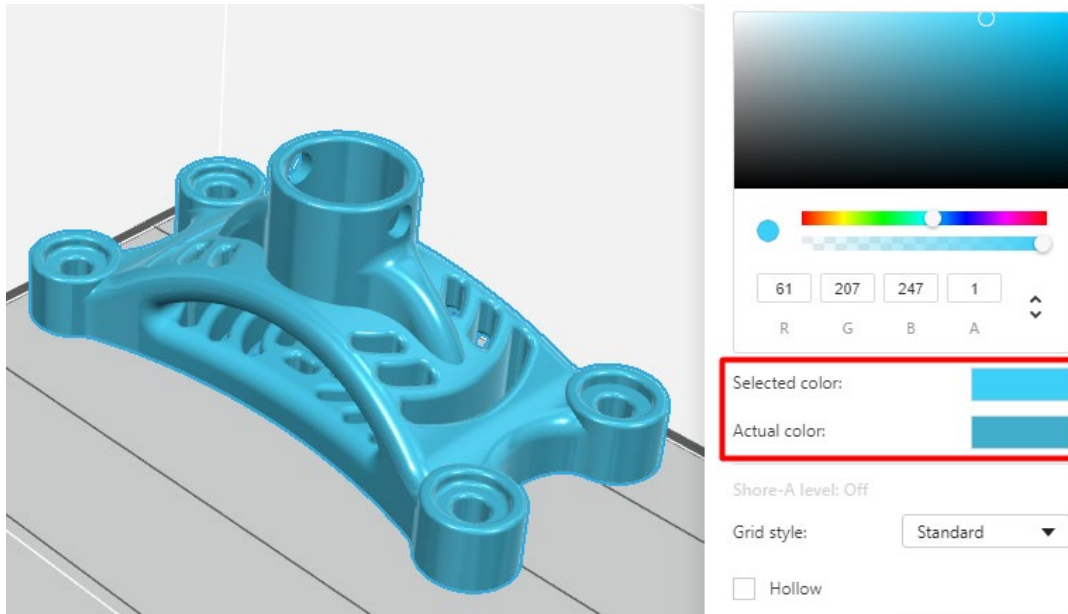
Εικόνα 58 Μετά την προσαρμογή του χρώματος που θα αποτυπωθεί στην J750 μπορεί να επιτευχθεί μια στενότερη ταύτιση με το κόκκινο RGB. Πηγή: [GrabCAD]

Η αρχική τιμή RGB που επιλέχθηκε εδώ υπάρχει μόνο στην οθόνη. Μία οθόνη χρησιμοποιεί μια πηγή φωτός για να αναπαράγει το χρώμα, και πολλά από αυτά τα υψηλού κορεσμού (saturated) χρώματα είναι αδύνατο να εκτυπωθούν σε οποιαδήποτε πλατφόρμα, είτε 2D είτε 3D.

Εκτός από τη χρήση του λογισμικού όπως το Photoshop για την προβολή και την ακριβή ρύθμιση των χρωμάτων, ένας βασικός έλεγχος της πιστότητας του χρώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της χρήσης του GrabCAD Print, το οποίο εμφανίζει στην οθόνη ένδειξη του πραγματικού χρώματος που θα εκτυπωθεί.⁴³

⁴³ Naftali Eder, Part 1: A Look at Color Proofing, Ιανουάριος 2019, <https://grabcad.com/tutorials/part-1-a-look-at-color-proofing>

3.8.3 Hard Proofing



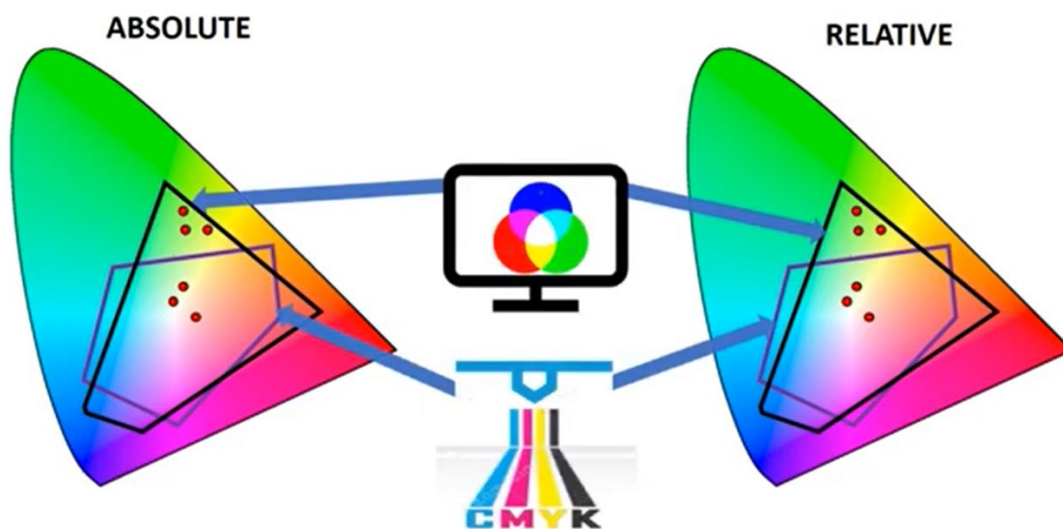
Εικόνα 59 Επιλογή χρώματος και πως θα εκτυπωθεί. Πηγή: [GrabCAD]

Το hard proofing περιλαμβάνει τη λήψη του επιθυμητού χρώματος, συνήθως εκτός οθόνης μέσω κάποιου δείγματος χρώματος, και την εκτύπωση αντιγράφων αυτού του χρώματος μέσω του GrabCAD Print μέχρι να είναι ικανοποιητική η αντιστοίχιση των χρωμάτων. Αυτό μπορεί να αναφέρεται και ως συμφωνία χρωμάτων (color matching).⁴⁴

3.8.4 Απόλυτη και Σχετική απόδοση των χρωμάτων

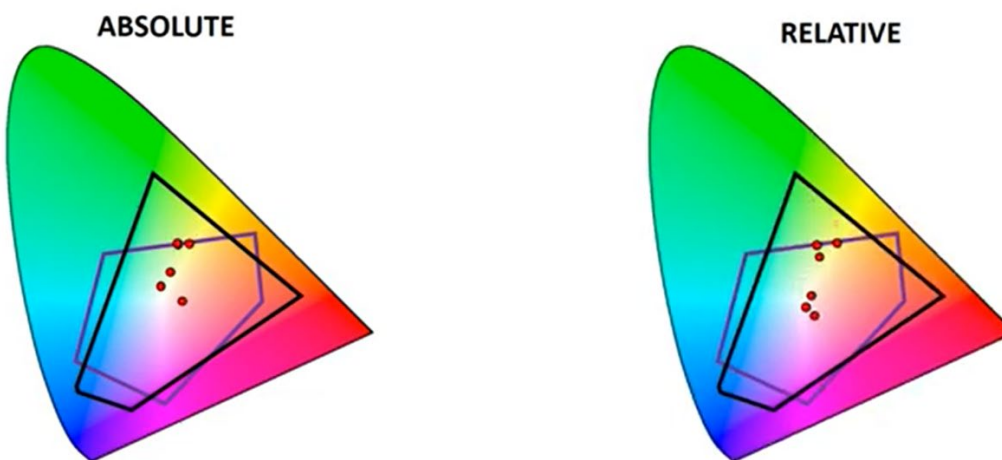
Αναφέρθηκε παραπάνω ότι υπάρχει μία σειρά από τεχνικές που μπορούν να αξιοποιηθούν για να αναδιαμορφώσουν τα χρώματα από RGB σε CMYK. Δύο κοινές μέθοδοι είναι η απόλυτη (absolute) απόδοση και η σχετική (relative) απόδοση. Να σημειωθεί ότι το μάτι βλέπει όλο το φάσμα όπως φαίνεται παρακάτω.

⁴⁴ Naftali Eder, Part 1: A Look at Color Proofing, Ιανουάριος 2019, <https://grabcad.com/tutorials/part-1-a-look-at-color-proofing>



Εικόνα 60 Εύρος χρωμάτων κατά την οθόνη (RGB) και κατά τις δυνατότητες του σαρωτή (CMYK). Πηγή: [GrabCAD]

Σε αυτό το παράδειγμα παρουσιάζεται τι συμβαίνει κατά τη μετάφραση των χρωμάτων χρησιμοποιώντας τις τεχνικές της απόλυτης και της σχετικής απόδοσης. Παρατηρείται ότι υπάρχουν κάποια χρώματα που ανήκουν και στους δύο χρωματικούς χώρους.



Εικόνα 61 Αριστερά φαίνεται η απόλυτη απόδοση των χρωμάτων, ενώ δεξιά η Σχετική. Πηγή: [GrabCAD]

Με τη διαδικασία απόδοσης των χρωμάτων, τα χρώματα που βρίσκονται έξω από το χρωματικό χώρο CMYK θα αναδιαμορφωθούν σε χρώματα που μπορούν να εκτυπωθούν εντός του χρωματικού χώρου CMYK, ενώ τα χρώματα που βρίσκονται εντός θα αναδιαμορφωθούν εξίσου σχετικά με την μετακίνηση των εξωτερικών χρωμάτων.

Με την εφαρμογή της απόλυτης απόδοσης, τα χρώματα που βρίσκονται έξω από τον χρωματικό χώρο CMYK μετακινούνται στο πλησιέστερο χρώμα εντός του χρωματικού χώρου CMYK, ενώ τα χρώματα που βρίσκονται εντός του χρωματικού χώρου CMYK παραμένουν στην αρχική τους θέση [Εικόνα 62]. Αυτό μπορεί να οδηγήσει

σε ένα αντικείμενο, όπου κάποια χρώματα μπορεί να φαίνονται ελαφρώς διαφορετικά, ενώ τα υπόλοιπα θα φαίνονται ίδια.

Με την εφαρμογή της σχετικής απόδοσης όλα τα χρώματα μετακινούνται αναλογικά προς το εσωτερικό του χρωματικού χώρου. Με αυτόν τον τρόπο, το αντικείμενο θα έχει καλή εμφάνιση και τα χρώματα θα έχουν μεγαλύτερη ομοιομορφία μεταξύ τους [Εικόνα 62]. Ωστόσο, όταν το κάποιος συγκρίνει το εκτυπωμένο αντικείμενο με ένα πραγματικό αντικείμενο που περιέχει κάποια εκτυπωμένα χρώματα, μπορεί να είναι προφανές ότι όλα τα χρώματα είναι διαφορετικά.

Για την πιο ακριβή χρωματική αντιστοίχιση, συνιστάται η χρήση της απόλυτης απόδοσης. Ωστόσο, τα αντικείμενα που εκτυπώνονται μπορεί να έχουν μεγαλύτερη συνοχή με τη χρήση της σχετικής απόδοσης. Συνεπώς, προτείνεται η διεξαγωγή δοκιμαστικών εκτυπώσεων για να καθοριστεί ποια χρωματική απόδοση είναι πιο κατάλληλη για κάθε χρήση.⁴⁵

⁴⁵ Naftali Eder, Part 1: A Look at Color Proofing, Ιανουάριος 2019, <https://grabcad.com/tutorials/part-1-a-look-at-color-proofing>

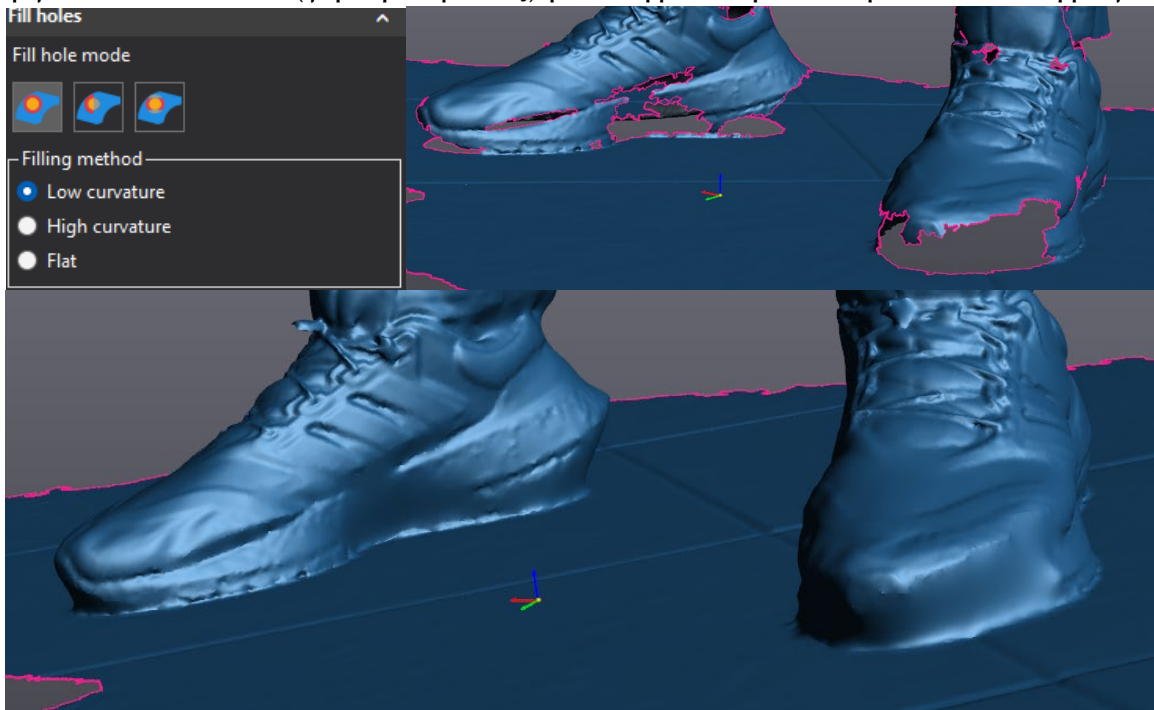
4. Επεξεργασία σαρωμένου αρχείου και προετοιμασία για εκτύπωση

Μετά την σάρωση και τα πρώτα βήματα προετοιμασίας, το μοντέλο θα εισαχθεί στο λογισμικό VX Model, το οποίο διαθέτει περισσότερα εργαλεία για περαιτέρω επεξεργασία. Ο λόγος που δεν προτιμάται η επεξεργασία του μοντέλου στο λογισμικό VX Scan είναι γιατί η πληροφορία είναι πρωτογενής (raw data), πράγμα που σημαίνει ότι οποιαδήποτε επεξεργασία δεχθεί το μοντέλο στο νέφος σημείων είναι μόνιμη (όπως διαγραφή τριγώνων). Διευκρινίζεται ότι το finalize (οριστικοποίηση) δεν επηρεάζει το αρχικό νέφος, αλλά προσαρμόζει το μοντέλο με βάση τις παραμέτρους που έχουν δοθεί.

Στην πρώτη φάση, το σαρωμένο μοντέλο θα πρέπει να καθαριστεί, να αφαιρεθεί από αυτό τυχόν περιττή πληροφορία (π.χ. το πάτωμα) και να «στεγανοποιηθεί» (watertight), δηλαδή να καλυφθούν τυχόν κενά. Στη φάση αυτή η επεξεργασία του μοντέλου πραγματοποιείται ξεχωριστά από την επεξεργασία της υφής. Η υφή θα επεξεργαστεί κατά την εξαγωγή του τελικού μοντέλου σε .OBJ (εξαγωγή διαφορετικών αρχείων, ένα για τη γεωμετρία και ένα για την υφή, όπως εκτίθεται αναλυτικά παρακάτω).

4.1 Τελική επεξεργασία και διόρθωση του μοντέλου

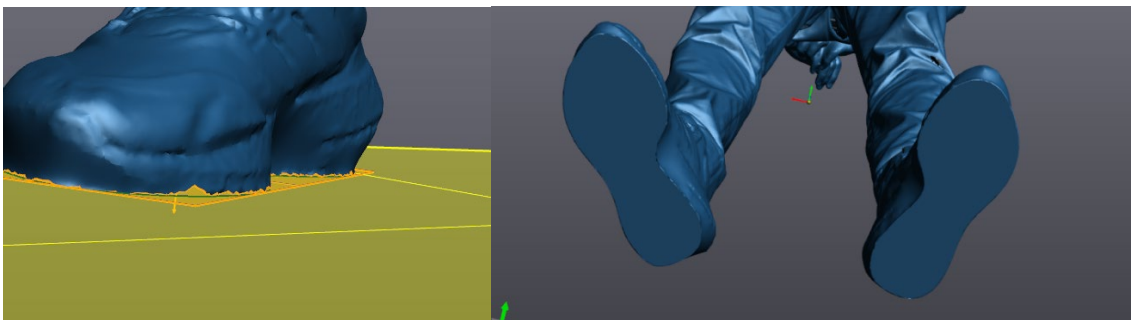
Στην πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε διόρθωση του μοντέλου στα παπούτσια, με το εργαλείο «fill holes» (γέμισμα τρύπας) με ελαφριά καμπυλότητα κατά το σφράγισμα.



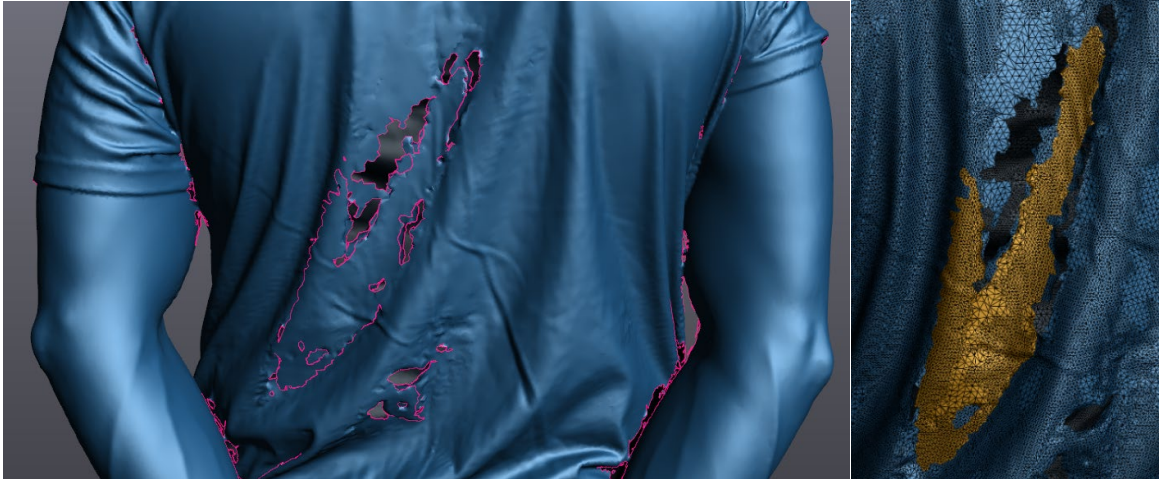
Το επόμενο βήμα ήταν η αφαίρεση του δαπέδου ώστε να απομονωθεί το μοντέλο από το υπόλοιπο περιβάλλον και να «στεγανοποιηθεί» πλήρως.



Κατά την αφαίρεση δημιουργήθηκε κενό στο κάτω μέρος του παπουτσιού, το οποίο έπρεπε να καλυφθεί. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν ήταν η χρήση της επιλογής «extrude boundary» που επιτρέπει στο όριο (boundary) να επεκταθεί μέχρι το επίπεδο που έχει οριστεί νωρίτερα κατά το στάδιο της δημιουργίας οντοτήτων. Με αυτή την τεχνική, το όριο, το οποίο είναι τραχύ καθώς αφαιρέθηκε από το πάτωμα, επεκτείνεται μέχρι το καθορισμένο επίπεδο, με σκοπό να αποκτήσει ένα ίσιο - φλατ φινίρισμα. Στη συνέχεια, πολύ εύκολα καλύπτονται τυχόν κενά με φλατ γέμισμα.



Αφού το κομμάτι αποκοπεί από το πάτωμα, το επόμενο βήμα είναι να καθαριστεί από τυχόν διπλοτυπίες και περιττές πληροφορίες και να καλυφθούν τα υπόλοιπα κενά (τρύπες). Παρακάτω φαίνεται ότι στην πλάτη υπάρχει ένα στρώμα το οποίο έχει επικαλύψει το προηγούμενο. Αυτό μπορεί να καθαριστεί είτε στην πρώτη φάση κατά την οποία αφαιρούνται κάποια καρέ (frames) από την σάρωση είτε μετά στην επεξεργασία, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Δεδομένου ότι υπάρχουν δύο στρώματα που το ένα επικαλύπτει το άλλο, αν εφαρμοστεί το γέμισμα της τρύπας σε αυτό το στάδιο, θα παραμορφώσει το μοντέλο, διότι η επιφάνεια δεν είναι συνεχόμενη. Υπάρχει, επίσης, πιθανότητα να επηρεάσει και την υφή.



Ο στόχος σε αυτή την επεξεργασία είναι η αφαίρεση των διπλοτυπιών, πράγμα που θα γίνει «ξεκολλώντας» αυτές από το κυρίως μοντέλο. Αρχικά θα αφαιρεθούν τα τρίγωνα που ενώνονται με το υπόλοιπο μοντέλο και μετά θα επιλεγεί, το «αιωρούμενο» πλέον κομμάτι, το οποίο και θα διαγραφεί, ώστε να καλυφθούν τα κενά που απέμειναν.





Το επόμενο και πιο απαιτητικό κομμάτι είναι το γέμισμα στο κομμάτι του κεφαλιού. Ο λόγος είναι ότι λείπει αρκετή πληροφορία, με αποτέλεσμα να έχει το λογισμικό μεγαλύτερη ελευθερία στη δημιουργία της γεωμετρίας, πράγμα που συνήθως δεν είναι επιθυμητό. Για να περιοριστεί η ελευθερία στο λογισμικό ακολουθήθηκε μία σειρά από γεμίσματα, τα λεγόμενα «γεφυρώματα» (bridges), τα οποία στη συνέχεια θα γεμίσουν αποσπασματικά.



Πριν την εξαγωγή του κομματιού, θα χρειαστεί να μειωθεί το μέγεθος του μοντέλου και μετά να εισαχθεί στο λογισμικό slicer. Αυτό γίνεται γιατί το μοντέλο είναι σε κλίμακα 1:1 (ένα προς ένα) με αποτέλεσμα το σχετικό αρχείο να είναι ιδιαίτερα «βαρύ» και μεγάλο.

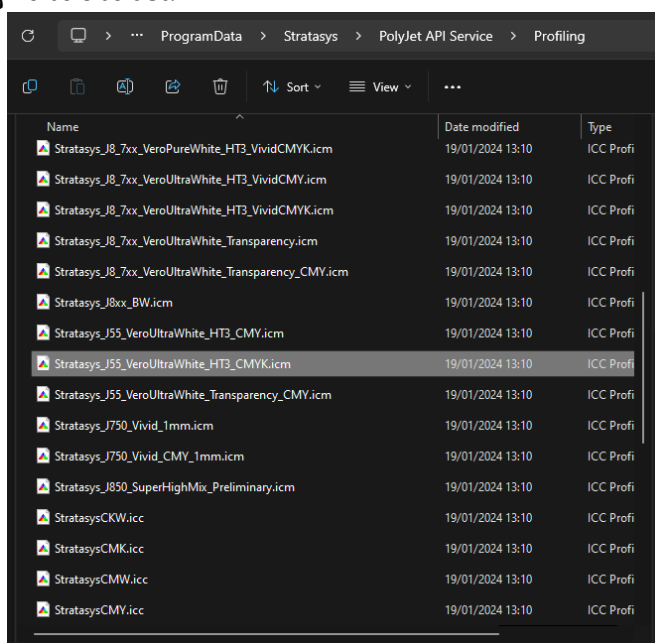
Στη συνέχεια, θα γίνει εξαγωγή του μοντέλου σε OBJ αρχείο, το οποίο περιέχει την πληροφορία της γεωμετρίας και σε αρχείο .bmp, το οποίο περιλαμβάνει πληροφορία της υφής. Έτσι εξάγονται ξεχωριστά οι πληροφορίες της γεωμετρίας και της υφής του μοντέλου, ώστε να μπορεί να γίνει επεξεργασία του στο Photoshop.

4.2 Προφίλ χρώματος και επεξεργασία της υφής

Στο θεωρητικό κομμάτι μελετήθηκαν τα βασικά στοιχεία του χρωματικού ελέγχου (color proofing) και οι διάφορες διαθέσιμες επιλογές ελέγχου.

Αυτή η διαδικασία γίνεται επειδή οι εκτυπωτές 2D και 3D χρησιμοποιούν την CMYK κωδικοποίηση. Για να εξασφαλισθούν τα πιο ακριβή αποτελέσματα, πρέπει να γίνει βέβαιο ότι το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται εμφανίζει όχι μόνο το γενικό χρωματικό χώρο CMYK αλλά ένα συγκεκριμένο προφίλ χρωμάτων. (στην συγκεκριμένη εφαρμογή θα μελετηθεί πως το εφαρμόζει αυτό η Stratasys)

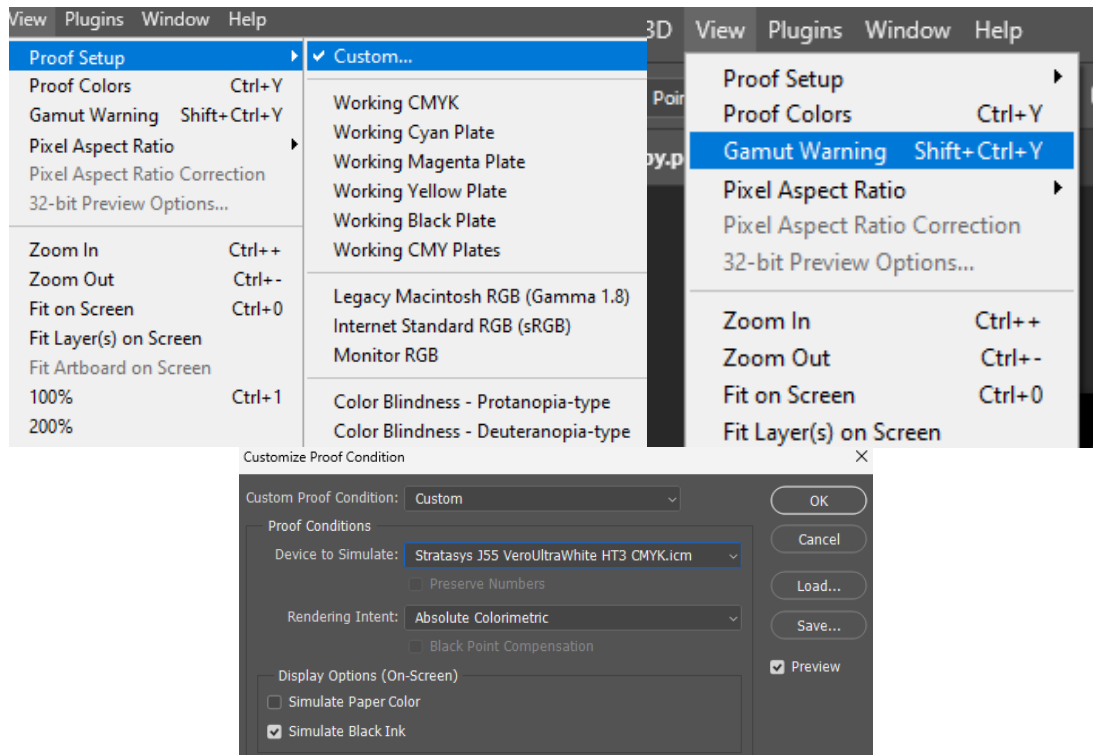
Για να γίνει αυτό θα χρειαστεί να βρεθεί το Profile, όπως φαίνεται στην διαδρομή παρακάτω, και να εγκατασταθεί.



Επιλέχθηκε το Stratasys_J55_VeroUltraWhite_HT3_CMY, το οποίο αντιπροσωπεύει την μηχανή και το προφίλ που θα χρησιμοποιηθεί για να ταιριάζει με τα χρώματα του εκτυπωτή.

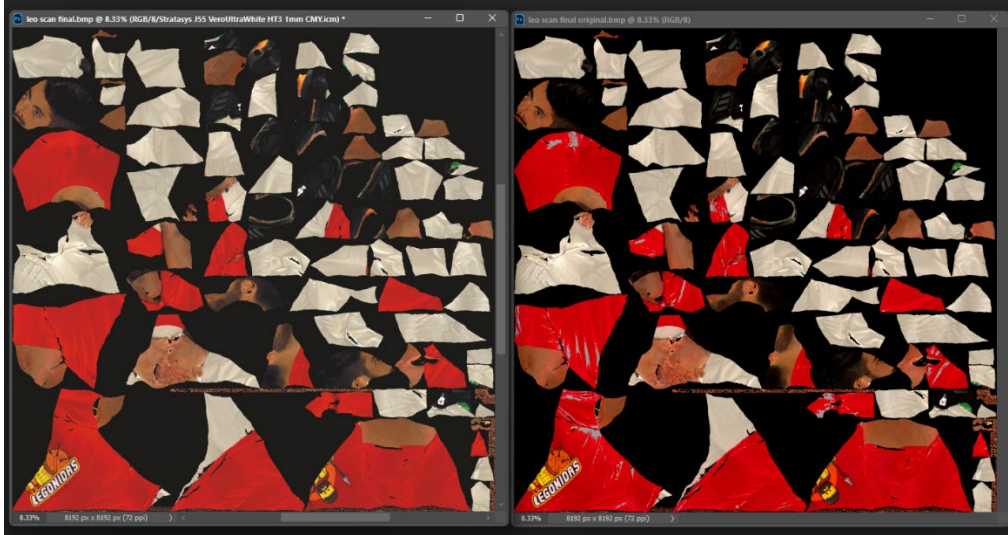
Μετά το άνοιγμα του .bmp αρχείου στο λογισμικό θα εφαρμοστεί το προφίλ χρωμάτων.

Επιλογή View > Proof Setup > Custom... και επιλογή του επιθυμητού προφίλ Stratasys από το αναπτυσσόμενο μενού.



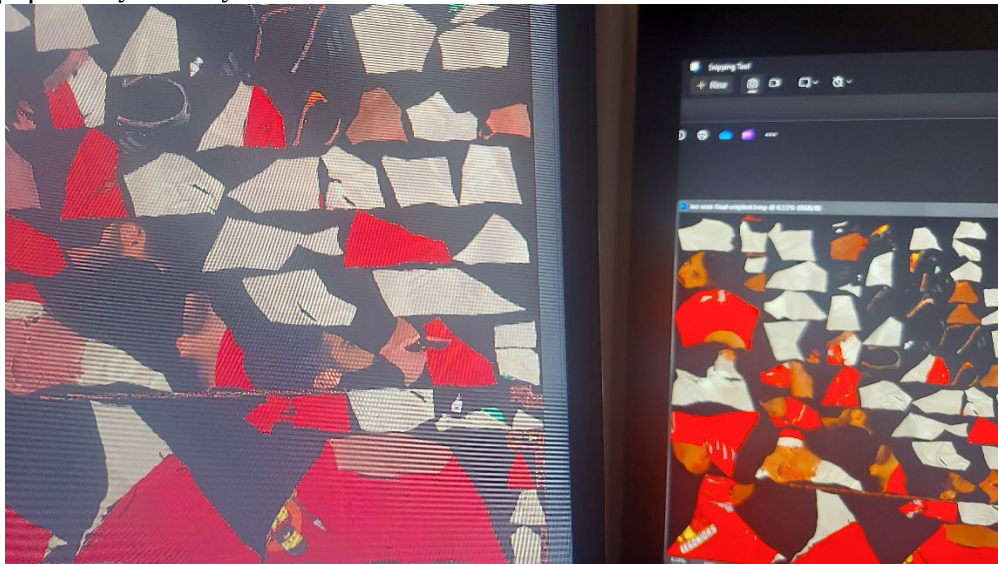
Επίσης είναι σημαντικό να ελεγχθεί ότι το «Black Point Compensation» είναι απενεργοποιημένο και η επιλογή «Simulate Black Ink» είναι ενεργοποιημένη σε περίπτωση που δεν υπάρχει Μαύρο χρώμα στον εκτυπωτή. Αυτό γίνεται γιατί ο εκτυπωτής κάνει προσομοίωση μαύρου με τον συνδυασμό CMY χρωμάτων, και μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μαύρο στην αριστερή [φωτογραφία] δεν είναι καθαρό.

Μία επιλογή που είναι χρήσιμη και βοήθησε να εντοπιστούν τα χρώματα που είναι εκτός φάσματος, είναι το «Gamut Warning» όπως φαίνεται παρακάτω, έτσι ώστε να υπάρχει ανατροφοδότηση των χρωμάτων που αλλάζουν. Στο συγκεκριμένο μοντέλο τα χρώματα είναι πολύ κοντά και δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά.



Όταν ολοκληρωθεί η επεξεργασία της υφής, το επόμενο και τελευταίο κομμάτι είναι να γίνει η εξαγωγή από το λογισμικό σε .bmp αρχείο και να αντικαταστήσει το προηγούμενο πριν την εισαγωγή του στο λογισμικό slicer. Σημειώνεται ότι το αρχείο .bmp θα πρέπει να έχει το ίδιο όνομα με αυτό που είχε πριν, αλλιώς δεν θα το αναγνωρίσει το πρόγραμμα για την εισαγωγή.

Τέλος μία παρατήρηση η οποία είναι χρήσιμη να γνωρίζει ο σχεδιαστής είναι αυτό που αναφέρθηκε στην θεωρία, ότι η ο κάθε οθόνη έχει τις δικές της ρυθμίσεις χρώματος (RGB) και η απόδοση τους μπορεί να διαφέρει, όπως φαίνεται παρακάτω η ίδια υφή, σε δύο διαφορετικές οθόνες δίπλα δίπλα.



5. Προσθετική Κατασκευή - Τρισδιάστατη Εκτύπωση

5.1 Εισαγωγή

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί πλέον αναπόσπαστο μέρος της βιομηχανίας και της παραγωγής προϊόντων. Έχει ένα τεράστιο εύρος χρήσης, από την αξιοποίησή της για την κατασκευή ειδών καθημερινής χρήσης (π.χ μίας οδοντόβουρτσας, αθλητικών παπουτσιών κ.ά.) μέχρι την εφαρμογή της στη διαστημική τεχνολογία. Η εκτύπωση 3D χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της δημιουργικής διαδικασίας, της οπτικοποίησης, της δοκιμής και παραγωγής προϊόντων σε όλα τα στάδια μέχρι και την είσοδό τους στην αγορά.

Η τεχνολογία της εκτύπωσης 3D έχει αυξήσει την παραγωγικότητα στον τομέα της κατασκευής. Μακροπρόθεσμα, έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τους κλάδους της κατασκευής, του εφοδιασμού και της διαχείρισης αποθεμάτων, ιδιαίτερα αν ενσωματωθεί στη μαζική παραγωγή. Προς το παρόν, η ταχύτητά της εκτύπωσης 3D είναι υπερβολικά χαμηλή για να χρησιμοποιηθεί σε μαζική παραγωγή προϊόντων.

Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή έχει συντελέσει στη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την ανάπτυξη πρωτοτύπων εξαρτημάτων και συσκευών, καθώς και των εργαλείων που απαιτούνται για την παραγωγή τους. Αυτό είναι ιδιαίτερος επωφελές για κατασκευαστές μικρής αλλά και μεγάλης κλίμακας, διότι μειώνει το κόστος και τον χρόνο εισαγωγής των προϊόντων στην αγορά, δηλαδή το χρονικό διάστημα από τη σύλληψη ενός προϊόντος μέχρι τη διάθεσή του προς πώληση. Επιπλέον, η δυνατότητα παραγωγής in-house (εντός της επιχείρησης) ανταλλακτικών μειώνει το κόστος και τον χρόνο παραγωγής και παραλαβής τους, αφού δίνει τη δυνατότητα στην επιχείρηση να τα έχουν έχει διαθέσιμα ακόμα και την επόμενη ημέρα.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται αρχικά η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing), η τρισδιάστατη εκτύπωση και ορισμένες από τις διαθέσιμες τεχνολογίες της, και συγκεκριμένα αυτές που αξιοποιούν για την εκτύπωση πλαστικό. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τεχνολογίες που αξιοποιούν την πολύχρωμη εκτύπωση και ο ρόλος του slicer (λογισμικό επεξεργασίας) πριν την εκτύπωση. Το πείραμα θα πραγματοποιηθεί με την τεχνολογία Polyjet, και συγκεκριμένα με την μηχανή J55 της εταιρείας «Stratasys», προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τελικό πρωτότυπο, με το επιθυμητό αποτέλεσμα, ως προς την υφή και το χρώμα, σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει προηγηθεί και αναλύεται στα δύο προηγούμενα κεφάλαια. Η συγκεκριμένη τεχνολογία επιλέχθηκε, καθώς παραχωρήθηκε στον γράφοντα η δυνατότητα χρήσης της, για τους σκοπούς της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, από την εταιρεία «Fourth Dimension SA» για το τελικό εκτυπωμένο μοντέλο.

5.2 Πώς δουλεύει η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης-προσθετικής κατασκευής

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) είναι μία διαδικασία προσθετικής κατασκευής (additive Manufacturing) που δημιουργεί ένα φυσικό αντικείμενο με εναπόθεσή υλικού στρώμα - στρώμα (layer-by-layer) από ένα ψηφιακό σχέδιο. Η διαδικασία λειτουργεί με εναπόθεση υλικού σε μορφή υγρού ή σκόνης πλαστικού, μετάλλου ή τοιμέντου και στην συνέχεια συγκολλώντας αυτά τα στρώματα μαζί, συνήθως μέσω θερμότητας ή ακτινοβολίας. Αυτό το στρώμα υλικού μπορεί να θεωρηθεί ως λεπτή οριζόντια τομή του αντικειμένου.

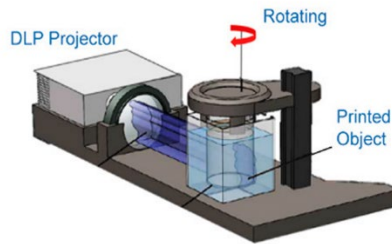
Αν ήθελε κανείς να δώσει μία γρήγορη και πιο γνώριμη ερμηνεία στον τρόπο λειτουργίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αφετηρία της θα ήταν η γνωστή έως τώρα τεχνολογία των διδιάστατων εκτυπωτών (χαρτιού), με την προσθήκη μίας ακόμα διάστασης (Z άξονας). Δηλαδή εκεί που υπήρχαν X - Y άξονες σε ένα χαρτί προστίθεται και ο Z άξονας για να γίνει τρισδιάστατη εκτύπωση με πολλές στρώσεις «χαρτιού» για να παράξουν τώρα ένα αντικείμενο.

Αυτός ο τρόπος κατασκευής είναι αντίθετος από την αφαιρετική κατασκευή (subtractive manufacturing), όπως το φρεζάρισμα (milling), όπου το υλικό αφαιρείται. Η 3D εκτύπωση προσφέρει το πλεονέκτημα της δημιουργίας πολύπλοκων σχημάτων χρησιμοποιώντας λιγότερο υλικό σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Η εκτύπωση 3D μπορεί να δημιουργήσει λεπτομερή και σύνθετα σχήματα χρησιμοποιώντας λιγότερο υλικό από τις διαδικασίες αφαίρεσης υλικού, όπως drilling, welding, injection molding και άλλες διαδικασίες. Η ταχεία, ευκολότερη και πιο οικονομική δημιουργία πρωτοτύπων επιτρέπει περισσότερη καινοτομία, πειραματισμό και εκκίνηση επιχειρήσεων βασισμένων σε προϊόντα.⁴⁶

Υπάρχει μια εξαίρεση, όμως, και ονομάζεται ογκομετρική τρισδιάστατη εκτύπωση (volumetric 3d printing) [Εικόνα 63]. Με την ογκομετρική τρισδιάστατη εκτύπωση, ολόκληρες κατασκευές μπορούν να δημιουργηθούν αμέσως χωρίς την ανάγκη κατασκευής στρώμα προς στρώμα. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η ογκομετρική τεχνολογία βρίσκεται κυρίως στο στάδιο της έρευνας.⁴⁷

⁴⁶ Joan Horvath, Rich Cameron, Mastering 3D Printing A Guide to Modeling, Printing, and Prototyping, Έκδοση 2^η, σελ 3-14

⁴⁷ Lucía Rodríguez-Pombo, Xiaoyan Xu, Alejandro Seijo-Rabina, Jun Jie Ong, Carmen Alvarez-Lorenzo, Carlos Rial, Daniel Nieto, Simon Gaisford, Abdul W. Basit, Alvaro Goyanes, Volumetric 3D printing for rapid production of medicines, Απρίλιος 2022, Additive Manufacturing Volume 52, σελ 1-3



Εικόνα 62 Εφαρμογή volumetric 3d printing Πηγή: [biofabrication]

5.3 Τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Βελτίωση του χρόνου Σχεδιασμού - Η εκτύπωση 3D χρησιμοποιείται για τη βελτίωση και επιτάχυνση του σχεδιασμού. Σε ένα δυναμικό περιβάλλον, όπου τα πάντα κινούνται και μεταβάλλονται με ταχύτατους ρυθμούς, ο αυξημένος ανταγωνισμός δημιουργεί ανάγκη μείωσης του χρόνου που απαιτείται μέχρι να φτάσει ένα προϊόν στην αγορά. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιταχύνει τη διαδικασία του σχεδιασμού και μειώνει τον χρόνο που απαιτείται μέχρι να κυκλοφορήσει ένα προϊόν στην αγορά.

Ελευθερία στον Σχεδιασμό - Χρησιμοποιώντας την εκτύπωση 3D, όλες οι ιδέες και τα σκίτσα αποκτούν άμεσα υλική υπόσταση. Βγαίνουν από τον εκτυπωτή με όλες τις λεπτομέρειες τους, έτοιμες για περαιτέρω επεξεργασία, ενισχύοντας έτσι τη δημιουργική διαδικασία.

Μείωση Χρόνου - Κόστους - Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει τη δημιουργία πρωτότυπων μοντέλων μέσα σε λίγες μόνο ώρες, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής και κατασκευής, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις χρειάζονται ακόμα και εβδομάδες για την ολοκλήρωση του τελικού προϊόντος. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση οι πολλαπλές επαναλήψεις στον κύκλο ζωής του σχεδιασμού γίνονται πιο γρήγορα και φθηνά.

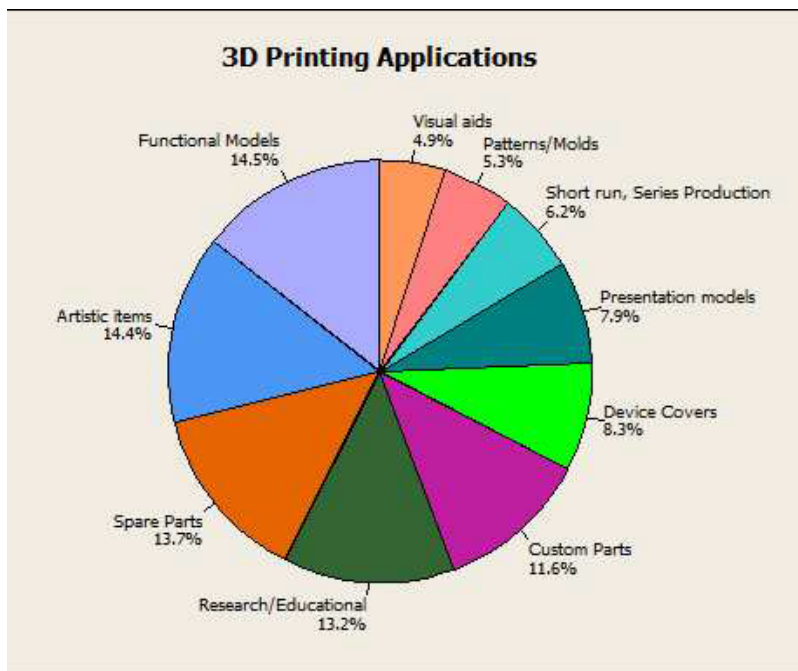
Αξιολόγηση του προϊόντος - Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την εκτέλεση δοκιμών για τη φόρμα, την εξωτερική εμφάνιση και τη λειτουργικότητα του εκτυπωμένου πρωτοτύπου. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται εάν το μοντέλο ανταποκρίνεται στην αρχική σχεδίαση, εάν τα τμήματά του εφαρμόζουν σωστά μεταξύ τους και εάν είναι λειτουργικό και κατάλληλο για τους σκοπούς που δημιουργήθηκε.

Έγκαιρη Ανίχνευση και Διόρθωση προβλημάτων - Η εκτύπωση 3D επιτρέπει την ανίχνευση και διόρθωση λαθών στα πρώιμα στάδια του σχεδιασμού, βελτιώνοντας και

τελειοποιώντας τον σχεδιασμό πριν από την πραγματική κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο, εξοικονομείται το κόστος μεταβολής του σχεδιασμού (ECO), καθώς και πολύτιμος χρόνος.

Εμπιστευτικότητα και Ασφάλεια - Στις περιπτώσεις νέων και καινοτόμων προϊόντων και για όσο διάστημα διαρκεί ο κύκλος σχεδίασης, τυχόν εξωτερική παραγωγή του πρωτοτύπου, θέτει την ιδέα σε κίνδυνο έκθεσης σε τρίτους, πράγμα που δίνει χρόνο σε ανταγωνιστικές επιχειρήσεις να αντιδράσουν - και ακόμη χειρότερα - να αντιγράψουν και να μιμηθούν την ιδέα αυτή. Με έναν εκτοπωτή 3D, υπάρχει πλήρης έλεγχος του σχεδιασμού, ο οποίος εξαλείφει τον κίνδυνο να διαρρεύσει η ιδέα σε ανταγωνιστές.⁴⁸

5.4 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης



Εικόνα 63 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πηγή: [semanticscholar]

Η τεχνολογία εκτύπωσης 3D έχει εφαρμοστεί σε ποικίλους τομείς. Η Εικόνα παραπάνω δείχνει τις διάφορες χρήσεις της εκτύπωσης 3D, στις οποίες περιλαμβάνεται η έρευνα και η εκπαίδευση, τα καλλιτεχνικά έργα, τα οπτικά βοηθήματα, τα μοντέλα παρουσίασης, τα καλύμματα συσκευών, τα προσαρμοσμένα εξαρτήματα, τα λειτουργικά μοντέλα και πρότυπα, καθώς και η παραγωγή. Παρακάτω θα παρουσιαστούν μερικοί από τους τομείς αυτούς και η συνεισφορά της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

⁴⁸

Aaron Pearson, 3D printing Q&A, Σεπτέμβριος 2020, <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/3d-printing-faq/>

5.4.1 Εκπαίδευση

Λόγω της προσιτής τιμής των μηχανημάτων, τα πανεπιστήμια έχουν πρόσβαση σε τρισδιάστατους εκτυπωτές. Με αυτόν τον τρόπο, οι φοιτητές τους μπορούν να γνωρίσουν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του σχεδιασμού. Σε σχολές μηχανικών, σχεδιασμού, αλλά και όλων των ειδών, η δημιουργία πρωτοτύπων αποτελεί σημαντικό κομμάτι της έρευνας και ανάπτυξης.

5.4.2 Κατασκευή κτιρίων

Στην Κίνα κατάφεραν να κατασκευάσουν 10 μονώροφες κατοικίες σε μία μόνο ημέρα, μια διαδικασία που συνήθως απαιτεί εβδομάδες έως μήνες για να ολοκληρωθεί. Η εκτύπωση 3D παρέχει μια πιο οικονομική, γρηγορότερη και ασφαλέστερη εναλλακτική λύση σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Η εταιρεία WinSun Decoration Design Engineering χρησιμοποίησε τέσσερις γιγάντιους εκτυπωτές 3D για να κατασκευάσει σπίτια στη Σανγκάη, χρησιμοποιώντας ένα μείγμα από τσιμέντο και οικοδομικά απορρίμματα για την κατασκευή των τοίχων στρώμα προς στρώμα. Κάθε σπίτι έχει πλάτος 10 μέτρα και ύψος 6,6 μέτρα. Με κόστος λιγότερο από \$5000 ανά σπίτι, αποδείχθηκε ότι αυτός ο τρόπος κατασκευής είναι ταυτόχρονα και οικονομικά αποδοτικός.

5.4.3 Παραγωγή εργαλείων και εξαρτημάτων τελικής χρήσης

Η δυνατότητα κατασκευής εργαλείων και τελικών εξαρτημάτων μέσω 3D εκτύπωσης γίνεται όλο και πιο λειτουργική με την πάροδο του χρόνου, μετατοπίζοντας τον ρόλο της τεχνολογίας από ένα εργαλείο πρωτοτυποποίησης σε κατασκευασμένα, ανθεκτικά, λειτουργικά αγαθά.

Η εκτύπωση 3D έχει εγκαινιάσει μια εποχή ταχείας κατασκευής. Η φάση της κατασκευής πρωτοτύπων μπορεί τώρα να παρακαμφθεί, και να προχωρήσει κανείς απευθείας στο τελικό προϊόν. Ανταλλακτικά αυτοκινήτων και αεροσκαφών κατασκευάζονται με τη χρήση της τεχνολογίας εκτύπωσης 3D. Η εκτύπωση των εξαρτημάτων γίνεται με γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο, συμβάλλοντας σημαντικά στην αλυσίδα αξίας. Εξατομικευμένα προϊόντα μπορούν να κατασκευαστούν, καθώς οι πελάτες μπορούν να επεξεργαστούν το ψηφιακό αρχείο σχεδίασης και να το στείλουν στον κατασκευαστή για παραγωγή. Η εταιρεία Nokia έχει πρωτοπορήσει σε αυτόν τον τομέα, κυκλοφορώντας αρχεία σχεδίασης 3D για τη θήκη της στους τελικούς χρήστες, ώστε να την προσαρμόσουν στις προδιαγραφές τους και να την εκτυπώσουν με τη χρήση της τεχνολογίας 3D.⁴⁹

⁴⁹ Thabiso Peter Mporfu - Cephas Mawere - Macdonald Mukosera, The Impact and Application of 3D Printing Technology, International Journal of Science and Research (IJSR), 2012, σελ 2150

5.4.4 Στον τομέα της υγείας, της ιατρικής και της έρευνας

Η τεχνολογία εκτύπωσης 3D έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες ιατρικές εφαρμογές:

1. **Ακουστικά:** Έχουν δημιουργηθεί εξατομικευμένα ακουστικά με τη χρήση τεχνολογίας εκτύπωσης 3D.
2. **Βιο-εκτυπωτές:** Εκτυπώθηκαν όργανα και μέρη του σώματος, όπως λεκάνες από τιτάνιο, πλαστικές σφεντόνες τραχήλου, και γνάθοι από τιτάνιο, για εμφυτεύσεις. Οι βιο-εκτυπωτές εξελίσσονται προς το να εκτυπώνουν ανθρώπινα οστά, διευκολύνοντας τις φαρμακευτικές δοκιμές και την ενδεχόμενη δημιουργία ολόκληρων οργάνων και οστών.
3. **Ψηφιακή Οδοντιατρική:** Η τεχνολογία της εκτύπωσης 3D χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δοντιών και οδοντικών εμφυτευμάτων προσαρμοσμένων σε κάθε ασθενή, προσφέροντας έναν πιο γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους.
4. **Προσθετικά Μέλη:** Η εκτύπωση 3D έχει μειώσει σημαντικά το κόστος των προσθετικών μελών, ωφελώντας άτομα που γεννήθηκαν χωρίς άκρα ή έχασαν κάποιο άκρο λόγω ατυχημάτων. Αυτή η τεχνολογία έχει παίξει καθοριστικό ρόλο στην παροχή προσιτών και εξατομικευμένων λύσεων σε αυτούς τους ασθενείς.
5. **Βιονικά:** Ερευνητές από τα πανεπιστήμια Princeton και John Hopkins κατάφεραν να δημιουργήσουν βιονικά αυτιά με τη χρήση εκτύπωσης 3D. Η ακοή πραγματοποιείται με ηλεκτρονικά μέσα. Αυτή η εξέλιξη θα μπορούσε να βοηθήσει κωφούς ανθρώπους να ακούσουν.
6. **Τεχνητά Όργανα:** Η προσθετική κατασκευή βλαστοκυττάρων παρέχει τη δυνατότητα εκτύπωσης τεχνητών οργάνων, αν και κατά το μεγαλύτερο μέρος βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Για παράδειγμα, με τη χρήση της εκτύπωσης 3D, επιστήμονες του πανεπιστημίου Heriot-Watt κατάφεραν να παράγουν συμπλέγματα εμβρυϊκών βλαστοκυττάρων.

5.4.5 Χόμπι και Οικιακή χρήση

Οι εκτυπωτές 3D μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σπίτι για τη δημιουργία μικρών αντικειμένων, όπως διακοσμητικά κοσμήματα, κολιέ και δαχτυλίδια. Επίσης, μικρά πλαστικά παιχνίδια μπορούν να εκτυπωθούν σε οικιακό περιβάλλον. Στο μέλλον, οι άνθρωποι θα μπορούν να εκτυπώνουν τα δικά τους προϊόντα στο σπίτι αντί να τα αγοράζουν από καταστήματα.

5.4.6 Ρουχισμός

Η βιομηχανία της μόδας δεν έχει μείνει ανεπηρέαστη. Δημιουργούνται ρούχα με εκτύπωση 3D. Οι σχεδιαστές μόδας πειραματίζονται με μπικίνι, παπούτσια και φορέματα φτιαγμένα με 3D εκτύπωση. Η Nike κατασκεύασε το παπούτσι ποδοσφαίρου Vapor Laser Talon το 2012 και η New Balance δημιούργησε παπούτσια προσαρμοσμένα στο μέγεθος των αθλητών χρησιμοποιώντας ένα 3D πρωτότυπο. Η παραγωγή έγινε σε εμπορική κλίμακα.⁵⁰

5.4.7 Ψυχαγωγία

Στους τομείς κατασκευής μοντέλων και της ψυχαγωγίας, η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης επιτρέπει στους σχεδιαστές να δημιουργήσουν ρεαλιστικά, λεπτομερή και μοναδικά μοντέλα, όπως φιγούρες, μινιατούρες, φιγούρες δράσης, μοντέλα χαρακτήρων, γλυπτά, αντικείμενα κινηματογράφου, μοντέλα stop-motion, τέχνης και διακόσμησης, όλα αυτά σε βιώσιμο κόστος και με γρήγορη παραγωγή. Επίσης, η 3D εκτύπωση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία ταινιών και σειρών, όπου εξοικονομεί σημαντικό χρόνο στη δημιουργία σκηνικών αντικειμένων (props)⁵¹.

5.4.8 Τρόφιμα

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση τροφίμων. Σήμερα, τα βλαστοκύτταρα χρησιμοποιούνται ήδη για τη δημιουργία κρέατος και λαχανικών σε εργαστήριο. Στο μέλλον, η τρισδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων τροφίμων, όπως φρούτων, λαχανικών και κρέατος, βοηθώντας έτσι στην τροφοδοσία του πληθυσμού του πλανήτη και μειώνοντας τους φυσικούς πόρους που καταναλώνονται μέσω της γεωργίας και της κτηνοτροφίας.

5.5 Βασικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης πλαστικού

Προτού αναλυθούν τα διαφορετικά είδη τρισδιάστατων εκτυπωτών και υλικών που είναι διαθέσιμα, υπάρχουν μερικοί βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον καθορισμό του καταλληλότερου 3D εκτυπωτή για ένα έργο:

Ο πρώτος και πιο σημαντικός είναι ο σκοπός του έργου (proof-of-concept), δηλαδή για ποιον σκοπό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ο εκτυπωτής. Ανάλογα εάν πρόκειται για την κατασκευή ενός καταναλωτικού προϊόντος, ενός βιομηχανικού εξαρτήματος, ενός λειτουργικού πρωτοτύπου ή για την απόδειξη μιας έννοιας ή για ένα εννοιολογικό

50 Thabiso Peter Mporfu - Cephas Mawere - Macdonald Mukosera, The Impact and Application of 3D Printing Technology, International Journal of Science and Research (IJSR), 2012, σελ 2149-2150

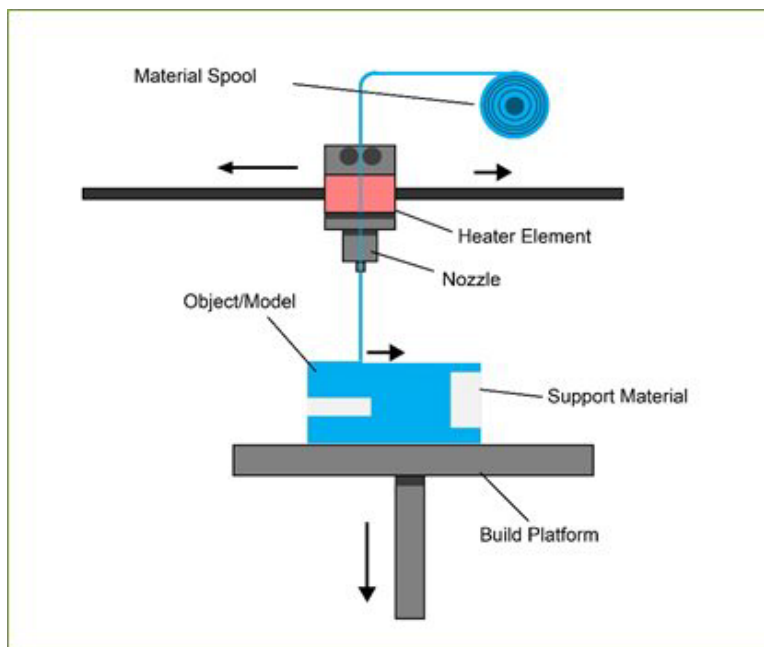
51 Formlabs, 3D Printing Miniatures and Custom Figurines: A Guide to Bringing Digital Models to Life, <https://formlabs.com/eu/blog/3d-printing-miniatures-and-custom-figurines/>

μοντέλο, διαφέρει και ο κατάλληλος εκτυπωτής. Γενικά η απάντηση στην παραπάνω ερώτηση περιορίζει τις επιλογές σε δύο ή τρεις εκτυπωτές.

Το επόμενο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί πριν γίνει η επιλογή του κατάλληλου εκτυπωτή είναι εάν υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις υλικού για το έργο, όπως αντοχή στη θερμότητα, αντοχή στα χημικά, αντοχή στη διάβρωση και βιοσυμβατότητα. Τέλος, οι χρήστες πρέπει να λάβουν υπ' όψιν τις ποσότητες και τα μεγέθη των αντικειμένων που επιθυμούν να εκτυπώνουν, καθώς αποτελούν στοιχεία κρίσιμα για την επιλογή του κατάλληλου εκτυπωτή, ενώ αντίστοιχα επηρεάζουν και το κόστος του εκτυπωτή που θα επιλεγεί.

Παρακάτω περιγράφονται μερικές από τις τεχνολογίες που υπάρχουν σήμερα στην αγορά.

5.5.1 Τεχνολογία Εξώθησης Υλικού (Materials Extrusion) - Σύντηξη με εναπόθεση Υλικού (Fused Deposition Modeling -FDM)



Εικόνα 64 Τεχνολογία Εξώθησης Υλικού (Materials Extrusion) - Σύντηξη με εναπόθεση Υλικού (FDM).
Πηγή: [\[3dpartsunlimited\]](#)

Η τεχνολογία FDM χρησιμοποιεί λεπτές στρώσεις λιωμένου θερμοπλαστικού, το οποίο σκληραίνει καθώς εναποτίθεται, και είναι γνωστή για την αξιοπιστία και τα ανθεκτικά της εξαρτήματα. Χρησιμοποιεί τυπικά, υλικά μηχανικής, και υψηλής απόδοσης θερμοπλαστικά, παράγοντας εξαρτήματα που ξεχωρίζουν σε μηχανική, θερμική και χημική αντοχή.

Η τεχνολογία εκτύπωσης 3D βασισμένη στην εξώθηση υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτύπωση πολλών υλικών και για την πραγματοποίηση πολύχρωμων εκτυπώσεων πλαστικού. Η διαδικασία αυτή έχει ευρεία εφαρμογή και το κόστος της είναι ιδιαίτερα χαμηλό. Επιπλέον, επιτρέπει την κατασκευή πλήρως

λειτουργικών εξαρτημάτων. Η FDM είναι το πρώτο παράδειγμα συστήματος εξώθησης υλικού, το οποίο αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και χρησιμοποιεί ως κύριο υλικό πολυμερή. Κατασκευάζει τα εξαρτήματα στρώμα-προς-στρώμα από κάτω προς τα επάνω θερμαίνοντας και εξάγοντας το θερμοπλαστικό νήμα.

Το πρώτο στάδιο για την δημιουργία και την εκτύπωση ενός κομματιού στην FDM είναι να περάσει από τεμαχισμό (slicing). Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω ενός λογισμικού slicer. Αρχικά, θα πρέπει να γίνει εισαγωγή του μοντέλου και στη συνέχεια ο τεμαχισμός του με βάση την ανάλυση (resolution) που θα καθορίσει ο χρήστης και να κοπεί με βάση το πάχος στρώματος (layer thickness). Η κεφαλή εκτύπωσης συνήθως αποτελείται από ένα ή δύο ακροφύσια (nozzles), τα οποία ζεσταίνουν το πλαστικό και το τοποθετούν στο τραπέζι (build tray) σε υγρή μορφή, η οποία στερεοποιείται ακαριαία. Το πρώτο στάδιο είναι η δημιουργία του περιγράμματος (contour) και το επόμενο στάδιο το γέμισμα (raster) του στρώματος με το ακροφύσιο του κυρίως υλικού. Με το δεύτερο ακροφύσιο, εφόσον χρησιμοποιείται διαφορετικό υλικό, ή και με το ίδιο, εφόσον χρησιμοποιείται το ίδιο υλικό, τοποθετείται το υλικό υποστήριξης (support). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε στρώμα, μέχρι να ολοκληρωθεί το μοντέλο.

Πλεονεκτήματα

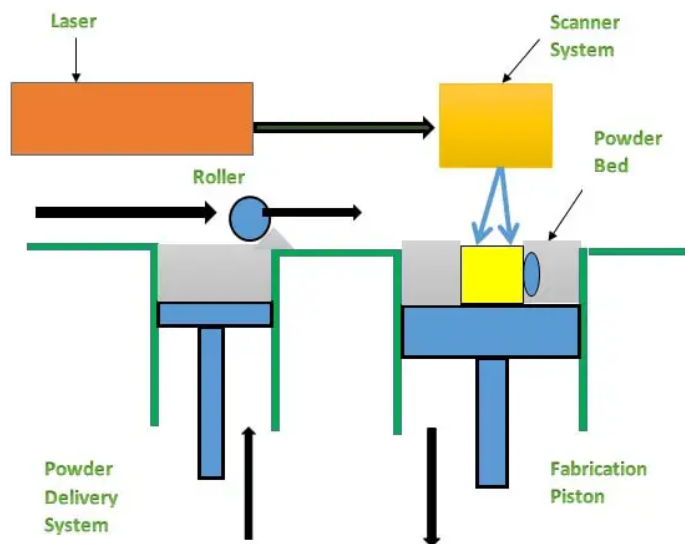
- Χαμηλό κόστος
- Αντικείμενα με καλές ιδιότητες υλικών για χρήση σε μεγάλο εύρος στην βιομηχανία
- Ελαφρά αλλά και δυνατά κομμάτια, με δυνατότητα προσαρμογής του γεμίσματος (infill)

Μειονεκτήματα

- Χαμηλές ανοχές
- Περιορισμοί λόγω πολυπλοκότητας της γεωμετρίας
- Άγριο φινίρισμα
- Πιθανές παραμορφώσεις
- Τα κομμάτια δεν είναι ποτέ 100% στερεά γεμάτα (solid), δηλαδή έχουν το λεγόμενο γέμισμα (infill) το οποίο ακόμα και 100% να είναι το κομμάτι θα έχει μικρούς πόρους⁵²

⁵² Lucas Carolo, What Is FDM 3D Printing? – Simply Explained, Μάιος 2023 <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>

5.5.2 Σύντηξη με σκόνη (Powder bed fusion) - Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση μέσω λέιζερ (Selective Laser Sintering -SLS)



Εικόνα 65 Σύντηξη με σκόνη (Powder bed fusion) – Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση μέσω λέιζερ (SLS). Πηγή: [\[manufactur3dmag\]](#)

Η SLS είναι μια τεχνολογία εκτύπωσης 3D που λειτουργεί με μεγάλη ταχύτητα, έχει υψηλή ακρίβεια και ποικίλη επιφάνεια φινιρίσματος. Μία πλαστική σκόνη απλώνεται ομοιόμορφα στην πλατφόρμα (build platform) του εκτυπωτή. Το υλικό συμπιέζεται από μία ξύστρα ή σβώλο (scraper), ή έναν κύλινδρο (drum) και θερμαίνεται με την χρήση ακτίνας λέιζερ, η οποία και σχεδιάζει το πρώτο στρώμα του αντικειμένου. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το λέιζερ πυροσυσσωματώνει (sintering) τη σκόνη (τη θερμαίνει κοντά στο σημείο τήξης της), επιτρέποντας τη συγκόλλησή της με τους γειτονικούς κόκκους σκόνης. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, το αντικείμενο σταθεροποιείται από τη συμπυκνωμένη σκόνη που δεν έχει πυροσυσσωματωθεί γύρω του, εξαλείφοντας την ανάγκη για κάποια δομή υποστήριξης.

Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το κομμάτι πρέπει να κρυώσει αργά, διαδικασία που διαρκεί κάποιες ώρες ή και περισσότερο. Μετά την ψύξη, το αντικείμενο εξάγεται από τον εκτυπωτή, αφαιρείται από αυτό τυχόν υπερβάλλον υλικό σκόνης, και καθαρίζεται με πίεση αέρος και ψιλής άμμου (sand blasting).

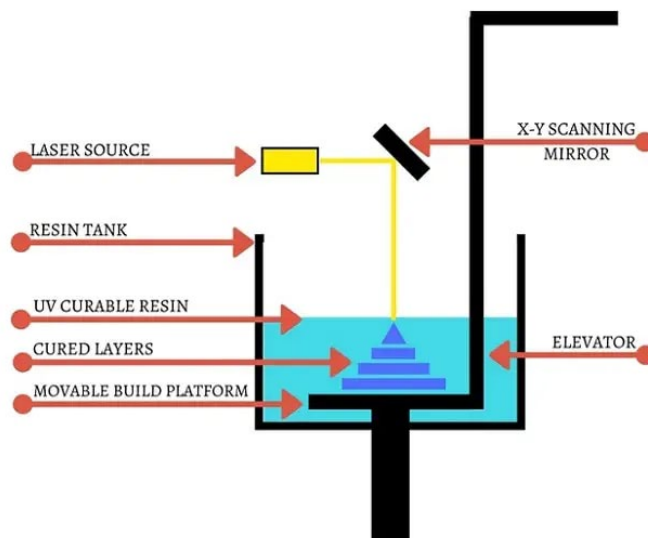
Πλεονεκτήματα

- Δεν χρειάζεται υλικό υποστήριξης
- Δυνατότητα κατασκευής περίπλοκων αντικειμένων
- Τα χαρακτηριστικά των υλικών είναι ιδανικά για χρηστικά και τελικά προϊόντα
- Σύνθετα και κινούμενα κομμάτια μπορούν να τυπωθούν σε ένα κομμάτι

Μειονεκτήματα

- Άγρια επιφάνεια
- Χρονοβόρες εκτυπώσεις ακόμα και για μικρά κομμάτια
- Η ακρίβεια είναι χαμηλότερη σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ρητίνης (MJM, Polyjet, Stereolithography)⁵³

5.5.3 Δέση μέσω ψεκασμού υλικού (Binder Jetting) - Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA)



Εικόνα 66 Δέση μέσω ψεκασμού υλικού (Binder Jetting) - Στερεολιθογραφία (SLA). Πηγή: [\[manufact3dmag\]](https://www.manufact3dmag.com)

Η στερεολιθογραφία, μια διαδικασία προσθετικής κατασκευής, η οποία χρησιμοποιεί μια δεξαμενή υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης και ένα UV λέιζερ για να δημιουργήσει ένα αντικείμενο στρώμα προς στρώμα. Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία φωτοπολυμεροποίησης, το φως προκαλεί τη σύνδεση αλυσιδωτών μορίων, σχηματίζοντας πολυμερή που δημιουργούν το σώμα ενός τρισδιάστατου στερεού. Η βασική αρχή της στερεολιθογραφίας είναι η πολυμεροποίηση ενός φωτοπολυμερούς (ρητίνη) υλικού με τη χρήση UV λέιζερ ή προβολέα. Ένα λεπτό στρώμα υγρής ρητίνης προετοιμάζεται στον χώρο κατασκευής της μηχανής. Το λέιζερ σχεδιάζει ένα πρότυπο πολυμερίζοντας το σχήμα που αντιστοιχεί στο πρώτο στρώμα του μοντέλου. Όταν ολοκληρωθεί ένα στρώμα, θα ακολουθήσει ένα νέο στρώμα ρητίνης (μετακινώντας το

53 Ross Lawless, All3DP, Stereolithography: SLA 3D Printing Simply Explained, Μάιος 2023, <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>

τμήμα προς τα πάνω ή προς τα κάτω του χώρου κατασκευής) και η διαδικασία συνεχίζεται.

Υπάρχουν δύο είδη μηχανημάτων τεχνολογίας SLA, η εκτύπωση μοντέλου προς τα επάνω ('bottom-up'), και η άλλη προς τα κάτω ('top-down'). Επιπλέον, η πηγή UV φωτός μπορεί να είναι είτε ένα λέιζερ είτε ένας προβολέας (δηλαδή DLP). Με ένα σύστημα DLP (Digital Light Processing), το πλήρες πρότυπο του επιπέδου του μοντέλου μπορεί να προβληθεί ταυτόχρονα αντί να σχεδιαστεί το πρότυπο με το λέιζερ. Αυτό σημαίνει ότι οι εκτυπωτές 3D DLP είναι ταχύτεροι και συχνά πιο οικονομικοί σε κόστος, αλλά έχουν περιορισμούς στην ανάλυση, επομένως συνήθως περιορίζονται σε μικρότερους χώρους κατασκευής.

Δεδομένου ότι το αντικείμενο περιβάλλεται από υγρή ρητίνη και στις δύο τεχνολογίες, και οι δύο απαιτούν δομές υποστήριξης για να σταθεροποιηθεί το μοντέλο κατά την εκτύπωση.

Πλεονεκτήματα

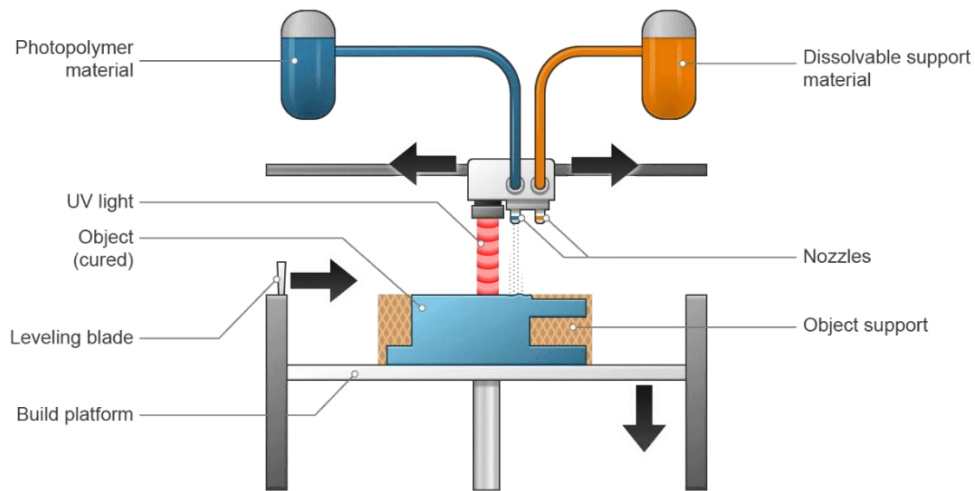
- Μεγάλη ακρίβεια
- Ομαλή, υψηλής ανάλυσης επιφάνεια
- Υψηλή ανάλυση σε μικρές λεπτομέρειες
- Γρήγορες εκτυπώσεις

Μειονεκτήματα

- Περιορισμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες
- Έχει ανάγκη για υποστήριξη το οποίο με βάση την τεχνολογία περιορίζει το κομμάτι, με αποτέλεσμα κάποια κομμάτια να μην μπορούν να χτιστούν καν
- Η επιφάνεια που έχει υποστήριξη είναι άγρια με σημάδια από το υλικό υποστήριξης (μικρές τελείες) ⁵⁴

5.5.4 Τεχνολογία ψεκασμού υλικού - Materials Jetting (MJ)

⁵⁴ Faktur, Stereolithography (SLA), <https://3faktur.com/en/3d-printing-materials-technologies/stereolithography-sla-technology-overview/#1486035768388-4184bc65-d700>



2018 © Dassault Systèmes

Εικόνα 67 Τεχνολογία ψεκασμού υλικού - Materials Jetting (MJ). Πηγή: [3ds]

Η διαδικασία ψεκασμού υλικού είναι μια διαδικασία εκτύπωσης 3D στην οποία σταγόνες υλικού (droplets) εναποτίθενται στο τραπέζι (build tray). Η κεφαλή εκτύπωσης περιέχει αρκετά ακροφύσια (nozzles), καθώς και μια λάμπα UV και ένα κύλινδρο (roller). Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, η κεφαλή κινείται πάνω από την πλατφόρμα, εκτοξεύοντας μικρές σταγόνες ενός πολυμερούς υλικού που πολυμερίζεται με την UV ακτινοβολία σχεδόν αμέσως, ενώ έχει προηγηθεί το ίσιωμα του στρώματος από τον κύλινδρο. Η πλατφόρμα στη συνέχεια υποχωρεί κατά 16-32 μικρόμετρα (ανάλογα με τη μηχανή και τη ρύθμιση) και το επόμενο στρώμα εφαρμόζεται στο ήδη σκληρωμένο προηγούμενο στρώμα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το αντικείμενο να ολοκληρωθεί. Το κομμάτι σταθεροποιείται κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης από υλικό υποστήριξης (έχει την μορφή κεριού), το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί χειροκίνητα μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας MJ είναι ο συνδυασμός των υλικών, ο οποίος προσφέρει διαφορετικές ιδιότητες υλικών, αλλά και διαφορετικό χρώμα στο φινίρισμα του τελικού αντικειμένου.

Πλεονεκτήματα

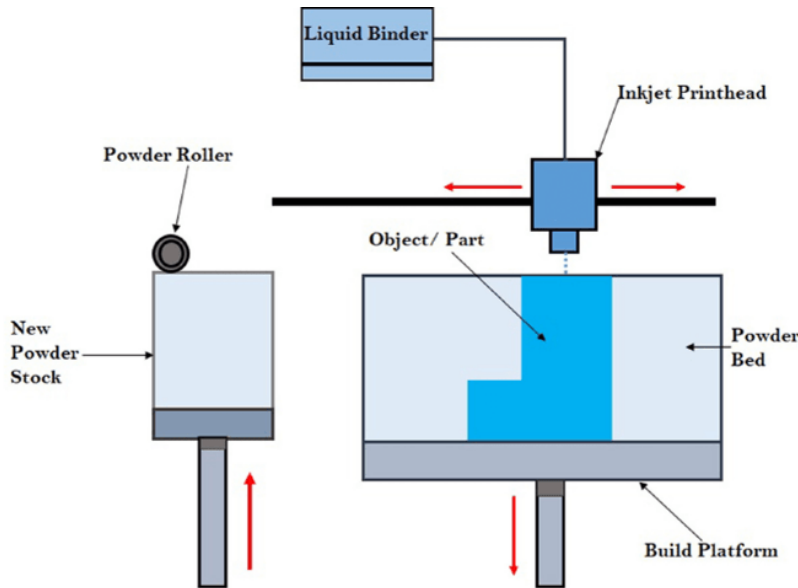
- Πολύ υψηλή ανάλυση και ακρίβεια
- Πολύ ομαλή επιφάνεια
- Συνδυασμός διαφορετικών υλικών και χρωμάτων
- Συμπαγείς διαστάσεις
- Απαιτεί λίγη μετα-επεξεργασία

Μειονεκτήματα

- Το υλικό υποστήριξης επηρεάζει και την ποιότητα της επιφάνειας
 - Glossy : δεν έχει support και η επιφάνεια είναι πιο γυαλιστερή
 - Matte : έχει support και η επιφάνεια είναι πιο άγρια

- Σχετικά ακριβό σαν τεχνολογία και σε υλικό
- Στην PolyJet οι αιχμηρές γωνίες συνήθως είναι ελαφρώς στρογγυλεμένες ⁵⁵

5.5.5 Τεχνολογία ψεκασμού με έγχρωμο υλικό - ColorJet Printing CJP



Εικόνα 68 Τεχνολογία εκροής έγχρωμου υλικού - colorjet printing CJP. Πηγή: [ebrary]

Η 3D εκτύπωση με ψεκασμό έγχρωμου υλικού (CJP) είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής με δύο βασικά στοιχεία: το υλικό πυρήνα (core material) και το υλικό συγκράτησης (binder). Η κεφαλή (print head) εκτύπωσης, παρόμοια με αυτές ενός εκτυπωτή χαρτιού (inkjet), κινείται πάνω από μία πλατφόρμα (bed) με πλαστική λευκή σκόνη και εκτοξεύει υγρό έγχρωμο υλικό (binder) στα σημεία που χρειάζεται για να δημιουργηθεί η στρώση (layer), ακολουθούμενη από τον κύλινδρο στρώσης (roller), που ισιώνει το υλικό. Ένα νέο στρώμα σκόνης απλώνεται πάνω από το προηγούμενο επίπεδο του μοντέλου, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν το μοντέλο είναι ολοκληρωμένο, η σκόνη που χρησιμοποιήθηκε ως υποστήριξη (support) αφαιρείται αυτόματα. Σε αυτό το στάδιο, το κομμάτι είναι ευαίσθητο και εύθραυστο και χρειάζεται να καθαριστεί από την περίσσια σκόνη, συνήθως με πεπιεσμένο αέρα, και να τοποθετηθεί σε κυανοακρυλικό (superglue) για να κολλήσει και να αποκτήσει ανθεκτικότητα.

Πλεονεκτήματα

- Δυνατότητα εκτύπωσης με πολλά χρώματα
- Αρκετά οικονομική τεχνολογία
- Δεν χρειάζεται υλικό υποστήριξης

⁵⁵ Ile Kauppila, What Is Material Jetting? - 3D Printing Basics, Απρίλιος 2022, <https://all3dp.com/1/what-is-material-jetting-3d-printing-basics/>

Μειονεκτήματα

- Εύθραυστα αντικείμενα με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες
- Δεν χρησιμοποιούνται για χρηστικά πρωτότυπα, διότι το κομμάτι μπορεί να σπάσει εύκολα
- Τα αντικείμενα δεν είναι ανθεκτικά στο νερό ⁵⁶

5.6 Τεχνολογίες εκτύπωσης πολλαπλών χρωμάτων



Εικόνα 69 Τεχνολογίες πολύχρωμης εκτύπωσης. Πηγή: [\[all3dp\]](#)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στους εκτυπωτές που παρέχουν δυνατότητα έγχρωμης εκτύπωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές τεχνολογίες που το επιτυγχάνουν αυτό, είτε με την χρήση διαφορετικών υλικών, είτε με συνδυασμό υλικών και χρωμάτων για τη δημιουργία ενός άλλου.

Η πολυπλοκότητα στην εκτύπωση 3D περιλαμβάνει τη χρήση περισσότερων υλικών σε μία εκτύπωση. Είναι μια από τις κύριες δυνατότητες της προσθετικής κατασκευής που μπορεί να αξιοποιήσει τη δυναμική της καλύτερα από άλλες μεθόδους κατασκευής. Εξαλείφει την ανάγκη συναρμολόγησης, μειώνει την ανάγκη επεξεργασίας και προάγει τον αποτελεσματικό σχεδιασμό πολυχρηστικών εξαρτημάτων.

5.7 Εφαρμογές θερμοπλαστικών με πολλαπλά χρώματα

⁵⁶ 3D Systems, What Is ColorJet Printing?, [https://www.3dsystems.com/colorjet-printing#:~:text=ColorJet%20Printing%20\(CJP\)%20is%20an,causing%20the%20core%20to%20solidify](https://www.3dsystems.com/colorjet-printing#:~:text=ColorJet%20Printing%20(CJP)%20is%20an,causing%20the%20core%20to%20solidify)

5.7.1 Εκτύπωση Χρώματος με Χωριστά Υλικά FDM 3D:

Τεχνική: Χρησιμοποιεί πολλαπλά υλικά για τη δημιουργία εξαρτημάτων με πολλά χρώματα.

Η εκτύπωση FDM με χωριστά χρώματα είναι ίσως η πιο απλή μέθοδος πολύχρωμης εκτύπωσης 3D. Σε αυτήν την τεχνική, κάθε χρώμα μιας τρισδιάστατης πολύχρωμης εκτύπωσης, χρησιμοποιεί και ένα ξεχωριστό νήμα. Οι εκτυπωτές με πολλαπλά ακροφύσια (nozzle) και πολλαπλούς εξωθητήρες (extruders), είναι εκτυπωτές πολλαπλών εξόδων (σε αντίθεση με τις μηχανές με ανάμειξη χρωμάτων).

5.7.2 Εκτύπωση Χρώματος με Μίξη υλικών FDM 3D:

Τεχνική: Χρησιμοποιεί λίγα χρώματα για τη δημιουργία πολύχρωμων εξαρτημάτων. Τα χρώματα αναμειγνύονται για να παράγουν ευρύ φάσμα χρωμάτων και αποχρώσεων.

Οι εκτυπωτές FDM με ανάμειξη χρωμάτων ανοίγουν ένα εντελώς διαφορετικό σύνολο πολύχρωμων δυνατοτήτων, ανακατεύοντας νήματα για να πετύχουν νέα χρώματα και αποχρώσεις. Αυτό το στυλ είναι λιγότερο δημοφιλές από την εκτύπωση FDM με χωριστά χρώματα, διότι συνήθως περιορίζει τους χρήστες σε ένα μόνο υλικό με διάφορες αποχρώσεις.

Οι εκτυπωτές FDM με ανάμειξη χρωμάτων χρησιμοποιούν ένα μόνο ακροφύσιο και πολλαπλούς εξωθητήρες. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να εκτυπώσει με πολλά χρώματα ή μείγματα. Η ανάμειξη πραγματοποιείται στη θερμή άκρη του ακροφυσίου εκτύπωσης. Συχνά, αυτές οι μηχανές αναφέρονται ως εκτυπωτές διπλής εξωθητικής (dual extrusion) μονάδας.

5.7.3 Προσθήκη χρώματος πριν την εκτύπωση

Μπορεί να πραγματοποιηθεί εκτύπωση σε διάφορα χρώματα, αναμίξεις και συνδυασμούς με την προσθήκη χρώματος. Το πολύχρωμο νήμα δεν παρέχει έλεγχο επί του χρώματος, αφού έχει τυχαίο χρωματισμό πριν την εκτύπωση.

- Το πολύχρωμο νήμα έρχεται σε όλα τα είδη χρωμάτων και αποχρώσεις.
- Το χρωματικά μεταβαλλόμενο νήμα είναι παρόμοιο με το πολύχρωμο νήμα, με τη διαφορά ότι αντί να έχει πολλά σταθερά χρώματα, το υλικό αντιδρά στη θερμοκρασία και αλλάζει χρώμα ανάλογα.
- Το διχρωματικό νήμα δημιουργείται μέσω της συνεκτύπωσης (co-extrusion), πράγμα που σημαίνει ότι χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά χρώματα. Ωστόσο, αντί να αναμειγνύονται, καθένα αποτελεί μισό του νήματος (για παράδειγμα σαν να είναι μία οδοντόκρεμα με δυόσμο). Ως αποτέλεσμα, το χρώμα της εκτύπωσης θα ποικίλλει ανάλογα με τον προσανατολισμό του σχεδίου κατά την εκτύπωση, κάτι που το καθιστά ιδανικό για κομμάτια ψευδαισθήσης.

- Η βαφή νήματος (nylon) επιτρέπει την εκτύπωση σε ένα χρώμα βαφής. Κατά την εκτύπωση με το νήμα βαφής, η εκτύπωση θα έχει ένα όμορφο αποτέλεσμα tie-dye.⁵⁷

5.8 Εφαρμογές ρητίνης με πολλαπλά χρώματα

Οι εκτυπωτές 3D πλήρους χρώματος μπορούν να παράγουν ρεαλιστικά πρωτότυπα προϊόντων, ακριβή ιατρικά μοντέλα, εντυπωσιακές φιγούρες και ακριβή αντίγραφα έργων τέχνης. Οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις παρέχουν διευκολύνσεις σε πλήθος επαγγελματικών κλάδων, από βιομηχανικούς σχεδιαστές έως ιατρικούς επαγγελματίες, καθώς επιτρέπουν τη δημιουργία πολύχρωμων μοντέλων από ψηφιακά σχέδια σχεδόν με ένα κλικ.

Πλήρες χρώμα σημαίνει χιλιάδες χρώματα από τον εκτυπωτή 3D, συμπεριλαμβανομένων ακόμα και τόνων του δέρματος και αντιστοίχισης χρωμάτων Pantone. Αυτό είναι δυνατό μόνο με μερικές επαγγελματικές μηχανές που αναφέρονται παρακάτω.



Εικόνα 70 Εφαρμογές με χρώμα στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Πηγή: [all3dp](https://all3dp.com/2/multicolor-3d-printer-3d-print-multiple-colors-method/)

Οι διαθέσιμοι 3D εκτυπωτές πλήρους χρώματος είναι: 3D Systems, Stratasys και Mimaki. Η HP διέκοψε τον εκτυπωτή πλήρους χρώματος Jet Fusion 380 το 2022, και η Rize, που παλιότερα πρόσφερε έναν εκτυπωτή πλήρους χρώματος με την ονομασία XRize, διέκοψε τη λειτουργία της το 2021. Υπάρχουν μερικές start-ups που επιδιώκουν να εισέλθουν στον κόσμο των εκτυπωτών πλήρους χρώματος, αλλά είναι μια σύνθετη τεχνολογία που έχει ήδη κατακτηθεί από τρεις ισχυρούς κατασκευαστές.

Η απόκτηση εκτυπωτή 3D πλήρους χρώματος προϋποθέτει συνήθως μια σημαντική επένδυση, καθώς ο πιο προσιτός οικονομικά εκτυπωτής επαγγελματικής χρήσεως κοστίζει πάνω από 30.000 ευρώ. Αμέσως παρακάτω ακολουθεί σύγκριση των 3

⁵⁷ Tobias Hullele, Multicolor 3D Printer: The Main Types & Printing Guide, Οκτώβριος 2023, <https://all3dp.com/2/multicolor-3d-printer-3d-print-multiple-colors-method/>

διαφορετικών τεχνολογιών επαγγελματικής χρήσης που μπορούν να επιτύχουν συνδυασμό χρωμάτων κατά την εκτύπωση.

Brand	Color Technology	Price	Layer Height	Number of Colors	Materials	Build Size
Stratasys J55 Prime	PolyJet	Aprox from \$100,000	18 microns	~500,000, Pantone validated	photopolymers	140 x 200 x 190 mm
3D Systems ProJet CJP 660Pro	ProJet ColorJet Printing (CJP)	Aprox from \$100,000	100 microns	4.8 million	polymer powder	508 x 381 x 229
Mimaki 3DUJ-2207	Mimaki Inkjet	Aprox from \$39,000	~30 microns	10 Million	photopolymers, soluble support material	203 x 203 x 76 mm

5.9 Εκτυπωτές με δυνατότητα πολύχρωμης εκτύπωσης

Συνοπτικά, η εκτύπωση 3D πλήρους χρώματος είναι ακριβώς αυτό που λέει η ονομασία: η δυνατότητα να εκτυπώνονται αντικείμενα 3D σε πολλά χρώματα ταυτόχρονα, ακριβώς όπως εκτυπώνεται μια έγχρωμη φωτογραφία στον εκτυπωτή 2D χαρτιού.

Η εκτύπωση 3D με χρώμα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τα πρωτότυπα προϊόντων, εκτός από την αντιγραφή έργων τέχνης και αγαλμάτων. Διάφοροι κλάδοι ωφελούνται από τη δυνατότητα παραγωγής υψηλής ποιότητας προϊόντων με κοφτερή λεπτομέρεια σε διάφορα και ακριβή χρώματα χωρίς το χρονοβόρο έργο του βαψίματος στο χέρι. Επιπλέον, τα μέρη που μπορεί να υποστούν φθορά θα διατηρήσουν το χρώμα τους επειδή δεν είναι απλά επιφανειακό χρώμα.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες για την επίτευξη αυτού του αποτελέσματος, και θα πρέπει να γίνουν κατανοητές οι διαφορές μεταξύ τους σε περίπτωση που κάποιος αναζητεί έναν εκτυπωτή 3D πλήρους. Κάθε μία λειτουργεί διαφορετικά, επομένως είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η καταλληλότητά τους για τις συγκεκριμένες εφαρμογές, προκειμένου να επιλεγεί ο σωστός εκτυπωτής.



Εικόνα 71 Πολύχρωμες εφαρμογές με τεχνολογία ρητίνης. Πηγή: [\[all3dp\]](#)

5.10 Πως δουλεύει η πολύχρωμη εκτύπωση ανά τεχνολογία

Η πολύχρωμη εκτύπωση 3D μπορεί να λειτουργήσει με διάφορους τρόπους. Ορισμένοι εκτυπωτές χρησιμοποιούν μελάνια ή βαφές που εφαρμόζονται για να χρωματίσουν το υλικό εκτύπωσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. Άλλοι αναμειγνύουν ήδη χρωματισμένα υλικά (CMYK) στις κατάλληλες αναλογίες για να δημιουργήσουν χρώματα. Οι τρεις βασικές τεχνολογίες για την πολύχρωμη εκτύπωση 3D που θα αναλυθούν είναι:

- **ColorJet Printing (CJP):** Χρησιμοποιείται από την 3D Systems και περιλαμβάνει το ψεκασμό χρωματισμένου υγρού συνδέσμου σε ένα κρεβάτι σκόνης υλικού στρώμα προς στρώμα. Αφού κάθε στρώμα εκτυπωθεί, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνεται, και ένα νέο στρώμα σκόνης διασπείρεται, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία.
 - **ColorJet Full-Color 3D Printers:**
 - ProJet CJP 660Pro – full-color product prototypes & art
 - ProJet CJP 860Pro – full-color product prototypes & art
- **PolyJet:** Χρησιμοποιείται από την Stratasys, η εκτύπωση PolyJet 3D λειτουργεί με το ψέκασμα στρωμάτων υγρού φωτοπολυμερούς υλικού σε ένα τραπέζι κατασκευής και την άμεση πολυμεροποίησή του με UV φως. Μπορεί να αναμειγνύει διάφορα υλικά και χρώματα σε ένα μόνο στρώμα. Η διαδικασία PolyJet χρησιμοποιεί υγρή ρητίνη που εναποτίθεται μέσω ψεκασμού μελάνης από κεφαλές με πολλά μικρά ακροφύσια. Υλικό φωτοπολυμερούς σε χρώματα CMYK προστίθεται στο κρεβάτι εκτύπωσης στρώμα προς στρώμα.

- Stratasys Full-Color 3D Printers:
 - J55 Prime – full-color product prototypes & art
 - J850 Prime – full-color product prototypes & art
 - J826 Prime – full-color product prototypes & art
 - J5 DentaJet – full-color dental models
 - J720 DentaJet – full-color dental models
 - J850 Digital Anatomy – full-color medical models
 - J5 MediJet – full-color medical models
 - J850 TechStyle – full-color printing on textiles

- **Inkjet Printing:** Χρησιμοποιείται από την Mimaki, αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με το παραδοσιακό εκτυπωτή με μελάνι 2D. Χρησιμοποιεί μία κεφαλή εκτύπωσης μελανιού για να καταθέτει μικρές σταγόνες χρωματισμένου υλικού στην πλατφόρμα κατασκευής, δημιουργώντας στρώματα για να δημιουργήσει ένα 3D πολύχρωμο αντικείμενο.
 - Mimaki Full-Color 3D Printers:
 - 3DUJ-2207 – full-color product prototypes & art
 - 3DUJ-553 – full-color product prototypes & art ⁵⁸

5.11 Τεχνολογία Polyjet – Τρισδιάστατος εκτυπωτής J55 της Stratasys

Η τεχνολογία PolyJet μπορεί να πραγματοποιήσει συνδυασμό διαφόρων υλικών ρητίνης με σκοπό την δημιουργία ενός άλλου, το οποίο μπορεί να έχει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες αλλά και χρώμα. Βασική προϋπόθεση ο 3D εκτυπωτής να υποστηρίζει πάνω από ένα υλικό.

Η PolyJet είναι μια επαναστατική τεχνολογία εκτύπωσης 3D πολλαπλών υλικών που φέρνει μία ιδέα στη ζωή με εξαιρετική ακρίβεια και ευελιξία. Από την πρωτοτυπία έως την παραγωγή, η PolyJet προσφέρει μια ευρεία γκάμα δυνατοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας πολύπλοκων γεωμετριών, λεπτομερειών, πολύχρωμων συνδυασμών, διαφανειών και ευέλικτων μερών, όλα σε ένα μόνο μοντέλο.

Οι εκτυπωτές PolyJet διαθέτουν πολλαπλές ανεξάρτητες κεφαλές εκτύπωσης, οι οποίες τους επιτρέπουν να εκτυπώνουν εξαρτήματα πολλαπλών χρωμάτων και υλικών. Μετά την εκτύπωση των σταγονιδίων στην πλατφόρμα κατασκευής, μια πηγή UV φωτός περνάει πάνω από το στρώμα για να το σκληρύνει. Η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται προς τα κάτω κατά ένα στρώμα, και το επόμενο στρώμα κατατίθεται πάνω από το προηγούμενο. Με στρώματα λεπτά όσο 14 μικρά και ακρίβεια έως 0,1 χιλιοστό, είναι γνωστό για τις λείες και λεπτομερείς επιφάνειές της, ιδανικές για λεπτά τοιχώματα

⁵⁸ Ile, Kauppila, Full-Color 3D Printing – The Ultimate Guide, Ιανουάριος 2024, <https://all3dp.com/1/full-color-3d-printing-multicolor/>

και πολύπλοκες γεωμετρίες. Οι εκτυπωτές PolyJet μπορούν να αναμείξουν δύο έως επτά υλικά μοντέλου για να αποκτήσουν μια σειρά χαρακτηριστικών σε μια εκτύπωση και να παράγουν όχι μόνο διαφορετικά χρώματα, αλλά και διάφορες υφές.⁵⁹

5.12 Τρισδιάστατος εκτυπωτής J55 της Stratasys



Εικόνα 72 Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής J55 της Stratasys. Πηγή: [Stratasys]

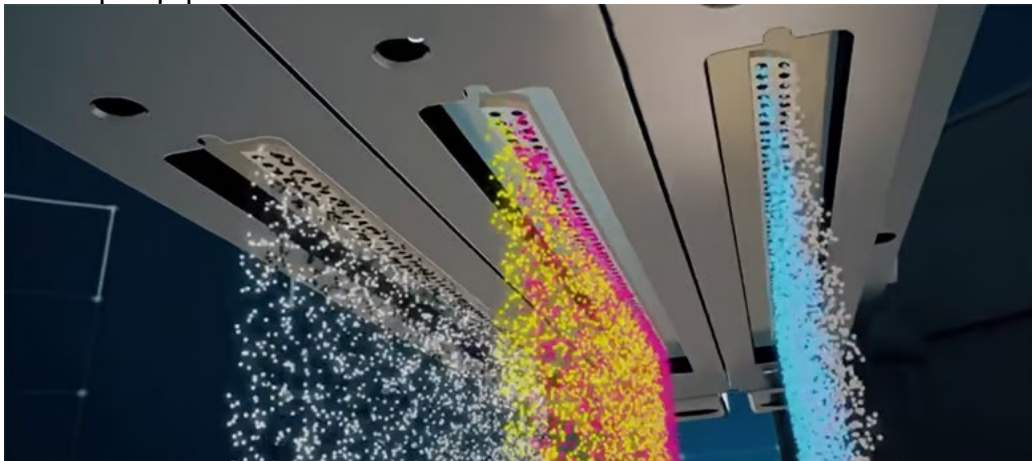
Ο εκτυπωτής J55, της Stratasys, είναι αρκετά συμπαγής για να χωρά σχεδόν σε οποιοδήποτε γραφείο (ο μικρότερος σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν) και φέρνει μερικά μοναδικά χαρακτηριστικά στη γκάμα προϊόντων. Η Stratasys αναφέρει ότι η περιστρεφόμενη πλατφόρμα εκτύπωσης στη J55, με στατική κεφαλή εκτύπωσης, παρέχει συνεπή εκτύπωση υλικού και γρήγορους χρόνους εκτύπωσης [Εικόνα 73], και μπορεί να παράγει εντυπωσιακές λεπτομέρειες στα 18 μικρόμετρα. Διαθέτει επίσης εκτύπωση πολλαπλών υλικών, επιτρέποντάς στον χρήστη να ενσωματώσει έως και πέντε διαφορετικά υλικά σε έναν μόνο κύκλο εκτύπωσης.

⁵⁹ Stratasys, PolyJet™ Technology, <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/>



Εικόνα 73 Περιστρεφόμενη πλατφόρμα εκτύπωσης, με στατική κεφαλή εκτύπωσης, παρέχει συνεπή εκτύπωση υλικού και γρήγορους χρόνους εκτύπωσης. Πηγή: [\[all3dp\]](#)

Η J55 προσφέρει πρόσβαση σε μια παλέτα χρωμάτων, υφών και gradients στα ίδια τα εκτυπωμένα κομμάτια. Ο χρήστης θα έχει την δυνατότητα να μιμηθεί μια ποικιλία υφών, όπως ξύλο, ύφασμα κ.α. Μπορεί επίσης να παράγει 500.000 χρώματα και 2.000 Pantones, και μπορεί ακόμη να εκτυπώσει διαφανή αντικείμενα για να προσομοιώσει γυαλί και πλαστικό. Ο εκτυπωτής μπορεί επίσης να εκτυπώσει με το υλικό VeroUltraClearS, που είναι ένα από τα πιο διαυγή προσομοιώματα γυαλιού και πλαστικού στην αγορά.



Εικόνα 74 Αναπαράσταση πως η μηχανή J55 διανέμει το υλικό. Πηγή: [\[all3dp\]](#)

Ο σχεδιασμός με CMF (Color, Materials, Finish), μπορεί να εισαχθεί πολύ νωρίτερα από ό,τι επιτρέπουν οι παραδοσιακές μέθοδοι, συμπεριλαμβανομένων τμημάτων που εκτυπώνονται με πολλά χρώματα και υφές χάρη στις δυνατότητες πολλαπλών υλικών και σε μια απλή ροή εργασίας λογισμικού. Τα τμήματα που εκτυπώνονται στην J55 απαιτούν ελάχιστη ή καθόλου μετεπεξεργασία, μειώνοντας την εργασία και καθιστώντας τη διαδικασία σχεδίασης πιο ομαλή. Επιπλέον προσφέρει την επιλογή υλικών υψηλής ποιότητας πλήρους χρώματος και ρεαλιστικό φινίρισμα επιφάνειας, η J55 επιτρέπει στον


σχεδιαστή να δημιουργήσει τμήματα που μοιάζουν και έχουν την αίσθηση σαν το πραγματικό προϊόν.⁶⁰



Εικόνα 75 Έγχρωμες εκτοπίσεις πολλαπλών υλικών. Πηγή: [all3dp]

60 Stratasys, Stratasys J55 3D Printer, https://www.stratasys.com/siteassets/press-kit/j55/br_pj_j55_0420a.pdf?v=48faf3

5.12.1 Προδιαγραφές εκτοπωτή J55

Product Specifications	
Model Materials	<input checked="" type="checkbox"/> VeroCyanV™ <input checked="" type="checkbox"/> VeroMagentaV™ <input checked="" type="checkbox"/> VeroYellowV™ <input type="checkbox"/> VeroPureWhite™ <input checked="" type="checkbox"/> VeroBlackPlus™ <input type="checkbox"/> VeroClear™ <input type="checkbox"/> VeroUltra™ClearS <input checked="" type="checkbox"/> DraftGrey™ <input type="checkbox"/> VeroUltra™ WhiteS <input checked="" type="checkbox"/> VeroUltra™ BlackS
Support Materials	SUP710™ 
Build Size/Printing Area	140 x 200 x 190mm (5.51 x 7.87 x 7.48 in.) Up to 1,174cm ²
Layer Thickness	Horizontal build layers down to 18 microns (0.0007 in.)
Network Connectivity	LAN - TCP/IP
System Size and Weight	651 x 661 x 1511mm (25.63 x 26.02 x 59.49 in.); 228 kg (503 lbs.)
Operating Conditions	Temperature 18 – 25 °C (64 – 77 °F); relative humidity 30-70% (non-condensing)
Power Requirements	100-240 VAC, 50-60 Hz, 10A, 1 phase
Regulatory Compliance	CE, FCC, EAC
Software	GrabCAD Print
Build Modes	High Quality Speed (HQS) – 18.75μm
Accuracy	Deviation from STL dimensions, for 1 Sigma (67%) of models printed with rigid materials, based on size: under 100 mm – ±150μ; above 100 mm – ±0.15% of part length.** Deviation from STL dimensions, for 2 Sigma (95%) of models printed with rigid materials, based on size: under 100 mm – ±180μ; above 100 mm – ±0.2% of part length.**

**Measured when ambient temperature is 23 °C and relative humidity is 50%.

5.13 Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης

Υπάρχουν πολλά υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία 3d εκτύπωσης όπως Κεραμικά, Πολυμερή, Μετάλλου, Συνθετικά και άλλα, όπου το καθένα έχει τον δικό του τρόπο παρασκευής, μηχανικές ιδιότητες και φινιρίσμα. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει ανάλυση των πλαστικών υλικών και συγκεκριμένα σε δύο κατηγορίες των θερμοπλαστικών (thermoplastics) και των θερμοσκληρυνόμενων (thermosets).

Θερμοπλαστικά: Τα θερμοπλαστικά είναι ο τύπος πλαστικού που χρησιμοποιείται περισσότερο. Η κύρια χαρακτηριστική διαφορά από τα θερμοσκληρυνόμενα είναι η ικανότητά τους να περνούν από πολλούς κύκλους τήξης και στερέωσης . Τα θερμοπλαστικά μπορούν να θερμανθούν και να διαμορφωθούν στο επιθυμητό σχήμα. Η διαδικασία είναι αναστρέψιμη, καθώς δεν συμμετέχει στην στερέωση κάποια χημική ένωση, η οποία καθιστά εφικτό τον ανακύκλωση ή την τήξη και την επαναχρησιμοποίηση των θερμοπλαστικών. Με κάθε κύκλο τήξης, οι ιδιότητες αλλάζουν ελαφρώς.

Θερμοσκληρυνόμενα: Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά παραμένουν σε μόνιμη στερεά κατάσταση μετά την πολυμεροποίησή. Οι πολυμερείς υλικές ουσίες στα θερμοσκληρυνόμενα υλικά σχηματίζουν συνδέσεις μεταξύ τους κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας πολυμεροποίησης που προκαλείται από θερμότητα, φως ή κατάλληλη ακτινοβολία. Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά αποσυντίθενται όταν θερμαίνονται αντί να λιώνουν και δεν επανασχηματίζονται κατά την ψύξη. Η ανακύκλωση των θερμοσκληρυνόμενων ή η επιστροφή του υλικού στα βασικά του συστατικά δεν είναι δυνατή.⁶¹

5.13.1 Θερμοπλαστικά υλικά FDM



Εικόνα 76 Θερμοπλαστικά υλικά FDM. Πηγή [\[formlabs\]](https://formlabs.com)

Οι μοναδικές ιδιότητες υλικών όπως η αποστείρωση, η βιοσυμβατότητα, η αντοχή FST (φλόγα, καπνός και τοξικότητα), η χημική αντοχή, η αντοχή σε σύνθετες δυνάμεις και η στιβαρότητα κ.ά., καθιστούν τα προϊόντα κατάλληλα για διάφορες χρήσεις όπως, αντικείμενα καθημερινότητας, στην βιομηχανία, τα ηλεκτρονικά, στην ιατρική, στην

⁶¹ Formlabs, Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties, <https://formlabs.com/eu/blog/3d-printing-materials/>

αυτοκινητοβιομηχανία, στη αεροναυπηγική-στρατιωτική βιομηχανία και πολλά άλλα. Τα εξαρτήματα FDM είναι ανάμεσα στα ανθεκτικότερα στη βιομηχανία της εκτύπωσης 3D. Χρησιμοποιώντας υλικά με προηγμένες μηχανικές ιδιότητες, τα εξαρτήματα FDM μπορούν να αντέξουν στα πιο απαιτητικά περιβάλλοντα, εκτίθοντας τα σε έντονη κρούση, συμπίεση, ένταση και ροπή, επιτρέποντάς στον σχεδιαστή πλήρως τη μορφή, την προσαρμογή και τη λειτουργικότητα του σχεδίου. Η γεωμετρία και οι μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων FDM είναι σταθερές και δεν μεταβάλλονται εύκολα έως καθόλου στα πιο απαιτητικά και αυστηρά περιβάλλοντα (όπως υψηλές θερμοκρασίες με βαθμούς πάνω από 200°C), έκθεση στη υπεριώδους ακτινοβολίας, υγρασία και χημικά.⁶²

Το πλαστικό είναι το πιο κοινό υλικό για την εκτύπωση με FDM τεχνολογία. Διάφορα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, συμπεριλαμβανομένων του ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), πολυγαλακτικό οξύ (PLA), του πολυανθρακικού (PC), του πολυγλυκολικού οξέος (PLA), της υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE), του PC/ABS, την πολυαιθερική κετόνη (PEEK), του πολυαιθυλενικού τερεφθαλικού γλυκολικού (PETG), της πολυφαινυλσουλφόνης (PPSU) και της υψηλής αντίδρασης πολυστυρενίου (HIPS).

Κατά κανόνα, το πολυμερές υλικό είναι σε μορφή νήματος που παράγεται από πρώτες ύλες και υπάρχει και η δυνατότητα και για ανακυκλωμένο υλικό.⁶³

5.13.2 Θερμοπλαστικά υλικά SLS

Η ποιότητα των εκτοπωμένων κομματιών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων της σκόνης όπως το μέγεθος και η μορφή των σωματιδίων, η πυκνότητα, η τραχύτητα και πόσο πορώδες είναι. Επιπλέον, η διανομή των σωματιδίων και οι θερμικές τους ιδιότητες επηρεάζουν σημαντικά τη ρευστότητα της σκόνης.

Τα εμπορικά διαθέσιμα υλικά που χρησιμοποιούνται στην SLS παρουσιάζονται σε μορφή σκόνης και περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, polyamides (PA), polystyrenes (PS), thermoplastic elastomers (TPE), και polyaryletherketones (PAEK) Οι πολυαμίδες (polyamides) είναι τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στην SLS λόγω της ιδανικής επικράτησής τους ως ημι-κρυσταλλικά θερμοπλαστικά, με αποτέλεσμα την παραγωγή εξαρτημάτων με επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες.⁶⁴

5.13.3 Θερμοσκληρυνόμενα Υλικά SLA

Τα υγρά υλικά που χρησιμοποιούνται για την τεχνολογία SLA είναι γνωστά ως "ρητίνες" και είναι θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία εμπορικά διαθέσιμων ρητινών και είναι επίσης δυνατή η χρήση προσαρμοσμένων (custom) ρητινών για τον έλεγχο διαφορετικών συνθέσεων, για παράδειγμα. Οι ιδιότητες των

⁶² Stratasys, FDM Printers and Materials, <https://www.stratasys.com/siteassets/fdm-system/fdm-3d-printers-materials-spec-sheet.pdf>

⁶³ Wikipedia, Fused filament fabrication, https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication

⁶⁴ Wikipedia, Selective laser sintering, https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering

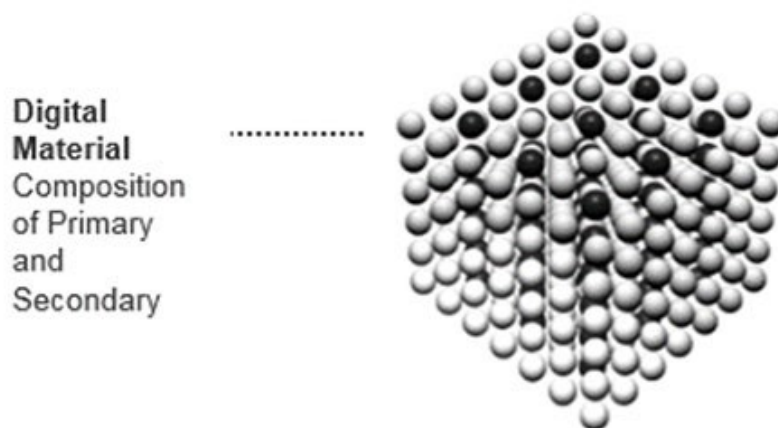
υλικών ποικίλουν ανάλογα με τις διαμορφώσεις της σύνθεσης: "τα υλικά μπορούν να είναι μαλακά ή σκληρά, μπορούν να είναι γεμάτα με δευτερεύοντα υλικά όπως γυαλί και κεραμικά, ή να έχουν μηχανικές ιδιότητες όπως υψηλή θερμική αντοχή ή αντοχή στην κρούση". Πρόσφατα, μελέτες έχουν δοκιμάσει τη δυνατότητα χρήσης "πράσινων" ή επαναχρησιμοποιήσιμων υλικών για την παραγωγή "βιώσιμων" ρητινών. Μπορούν να ταξινομηθούν οι ρητίνες στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κανονικές ρητίνες, για γενική πρωτότυπη χρήση
- Μηχανικές ρητίνες, για συγκεκριμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες
- Οδοντιατρικές και ιατρικές ρητίνες, για πιστοποιήσεις βιοσυμβατότητας
- Ρητίνες για χυτήρια
- Βιολογικά υλικά ρητίνης, διαμορφωμένες ως ακίδες από συνθετικά πολυμερή όπως πολυαιθυλενογλυκόλη (polyethylene glycol), ή βιολογικά πολυμερή όπως ζελατίνη (gelatin), ντεξτράνη (dextran), ή υαλουρονικό οξύ.⁶⁵

5.13.4 Θερμοσκληρυνόμενα Υλικά Polyjet

Τα υλικά PolyJet προσφέρουν μια εκπληκτική ποικιλία επιλογών υλικού και μπορούν ακόμη να συνδυάσουν πολλά υλικά σε ένα 3D εκτυπωμένο μοντέλο. Τα υλικά PolyJet είναι φωτοπολυμερή που ψεκάζονται στην υγρή τους μορφή και μέσω της υπεριώδους ακτινοβολίας στερεοποιούνται μέσω της διαδικασίας εκτύπωσης, χωρίς να απαιτούνται επιπλέον μετα-επεξεργασίες.

Τα φωτοπολυμερή υλικά είναι θερμοσκληρυνόμενα, πράγμα που σημαίνει ότι δεν λιώνουν όταν θερμαίνονται. Το υλικό υποστήριξης που ψεκάζεται ταυτόχρονα με το υλικό κατασκευής είναι επίσης φωτοπολυμερές, αλλά αφαιρείται εύκολα με το χέρι ή με νερό.



Εικόνα 77 Πρωτεύων και Δευτερέων υλικό για το συνδυασμό υλικών. Πηγή: [\[protolabs\]](#)

⁶⁵ Wikipedia, Stereolithography, <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>

Συνδυάζοντας δύο και παραπάνω ρητίνες, μπορούν να δημιουργηθούν πάνω από 300.000 ψηφιακά υλικά (Digital Materials) [Εικόνα 77]. Από το άκαμπτο (Rigid) στο ελαστικό (Flexible), από το αδιαφανές (opaque) στο διάφανο (transparent), από το προσομοιωμένο Πολυπροπυλένιο (Simulated-Polypropylene) έως το Ψηφιακό ABS (Digital ABS). Αυτοί είναι μερικοί συνδυασμοί των υλικών που προσφέρει η τεχνολογία Polyjet. Τα ψηφιακά υλικά παρέχουν μια τεράστια γκάμα από αποχρώσεις, διαύγειες, δείκτη σκληρότητας (Shore A) και άλλες ιδιότητες, προσφέροντας εξαιρετική ρεαλιστικότητα στα πρωτότυπα.



Εικόνα 78 Pantone χρώματα PolyJet Πηγή: [\[Stratasys\]](#)

5.13.4.1 Οι οικογένειες Vero

Οι οικογένειες Vero περιλαμβάνουν το VeroVivid που προσφέρει έντονο χρώμα, το VeroOpaque που προσφέρει υψηλής ποιότητας χρώμα, και πολλά άλλα υλικά όπως το VeroPure, το VeroPlus, το Transparent (διάφανο), το Flexible (ελαστικό) και το Draft (προσχέδιο υλικό, χαμηλού κόστους και ιδιοτήτων) .

Η οικογένεια VeroVivid προσθέτει εντυπωσιακό χρώμα σε όλα τα εξαρτήματα και τα πρωτότυπα. Η δυνατότητα προσομοίωσης πάνω από 500.000 χρώματα και απεριόριστων αποχρώσεων παρέχει μοναδικές δυνατότητες πλήρους χρώματος σε πρωτότυπα όλων των ειδών.

Πρόσθετα υλικά Vero περιλαμβάνουν τα VeroPure (Vero PureWhite), VeroPlus (ABS Plus), Διαφανή , (VeroClear, VeroUltraClear & VeroUltraClearS), Εύκαμπτα (Tango, VeroFlex, Flex Vivid, Agilus & Elastico) και υλικό χαμηλού κόστους για προσχέδια και γρήγορο αποτέλεσμα (DraftGrey).

5.13.4.2 Η οικογένεια Vero Opaque

Τα αδιαφανή υλικά διευκολύνουν την εκτύπωση λεπτών τμημάτων, παρέχοντας πλούσια χρώματα με πιο έντονες υφές και κείμενα. Όταν συνδυάζονται ως ψηφιακά υλικά με άλλα υλικά PolyJet όπως τα VeroWhite, VeroUltraClear ή με την οικογένεια υλικών Agilus30, παρέχουν επίπεδο εμφάνισης πλαστικών που έχουν παρασκευαστεί με την παραδοσιακή μέθοδο της χύτευσης, και μαζί με τα χρώματα VeroVivid παρέχουν ποιότητα χρώματος σε επίπεδο εκτύπωσης 2D.

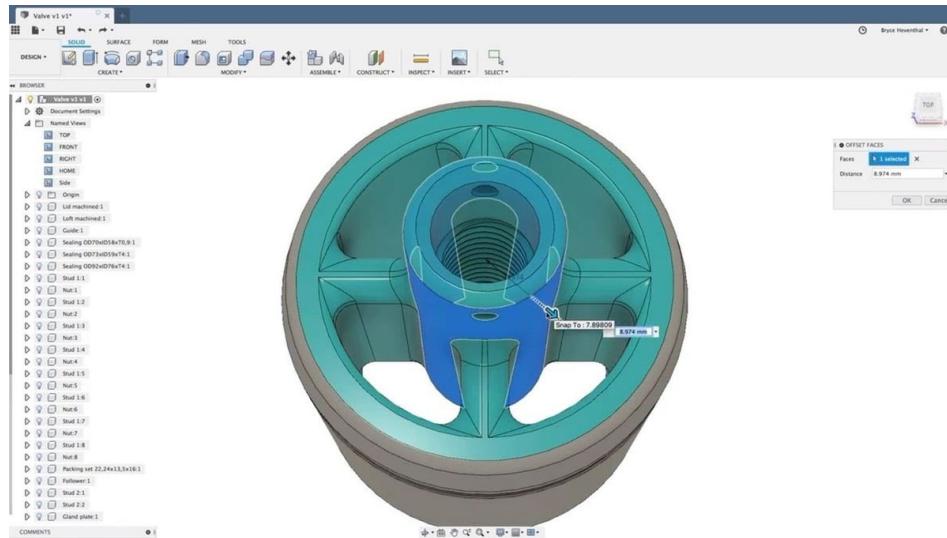
Τέλος, τα ειδικά υλικά για ιατρικές και οδοντιατρικές εφαρμογές παρέχουν την ίδια λεπτομέρεια και ακρίβεια, συν τις εξειδικευμένες ιδιότητες όπως η βιοσυμβατότητα και την πιστοποίηση για χρήση σε αυτές τις εφαρμογές.⁶⁶

5.14 Η εφαρμογή του Slicer στην τρισδιάστατη εκτύπωση

5.14.1 Πρόγραμμα τεμαχισμού (slicer)

Ένα πρόγραμμα τεμαχισμού (slicer) είναι λογισμικό δημιουργίας διαδρομής (toolpath generation) που χρησιμοποιείται στον κόσμο της εκτύπωσης 3D. Βοηθά στη μετατροπή ενός μοντέλου 3D σε «συγκεκριμένες οδηγίες» για τον εκτυπωτή. Ο slicer μετατρέπει ένα μοντέλο σε μορφή STL (Stereolithography) σε εντολές εκτυπωτή της μορφής G-code (κώδικας που αντιλαμβάνεται ο εκτυπωτής). Ένας slicer είναι ένα πρόγραμμα που μετατρέπει ψηφιακά μοντέλα 3D σε οδηγίες εκτύπωσης για έναν συγκεκριμένο εκτυπωτή 3D για την κατασκευή ενός αντικειμένου. Εκτός από το ίδιο το μοντέλο, οι οδηγίες περιλαμβάνουν παραμέτρους εκτύπωσης 3D που έχει εισάγει ο χρήστης, όπως ύψος στρώματος, ταχύτητα και ρυθμίσεις δομής υποστήριξης. Κάθε τεχνολογία εκτύπωσης 3D δημιουργεί αντικείμενα 3D προσθέτοντας υλικό στρώμα προς στρώμα. Το λογισμικό slicer έχει επομένως κατάλληλη ονομασία, καθώς ουσιαστικά "κόβει" τα 3D μοντέλα σε πολλά οριζόντια 2D στρώματα που θα εκτυπωθούν σταδιακά, ένα κάθε φορά.

⁶⁶All3DP, PolyJet 3D Printing – The Ultimate Guide, Μάρτιος 2023 <https://all3dp.com/2/polyjet-3d-printing-technologies-simply-explained/>



Εικόνα 79 Παρόλο που συνήθως δεν συσχετίζονται με το λογισμικό slicer, το CAM βοηθά στην κατανόηση του ρόλου του slicer.
 Πηγή: [Autodesk]

Παρόλο που συνήθως δεν συσχετίζονται με το λογισμικό slicer, το CAM βοηθά στην κατανόηση του ρόλου του slicer [Εικόνα 79]. Το CAM είναι λογισμικό που υποστηρίζει, διευκολύνει ή αυτοματοποιεί τις διαδικασίες κατασκευής. Στην πράξη, λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ ψηφιακών μοντέλων 3D (παραγμένων μέσω σχεδίασης υπολογιστή, ή CAD) και συστημάτων κατασκευής, μεταφράζοντας τα σχέδια σε οδηγίες για τη μηχανή να εκτελέσει. Αυτές οι οδηγίες μεταδίδονται σε μορφή γραμμών εντολών, συνήθως για μηχανή CNC (Computer numerical control). Όπως υποδηλώνει το όνομά της, οι εντολές ελέγχου ελέγχουν όλες τις πτυχές της μηχανής, συμπεριλαμβανομένων των ταχυτήτων κίνησης, θερμοκρασιών και ψύξης. Ενώ υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι για "επικοινωνία" με αυτές τις μηχανές, η κυρίαρχη γλώσσα είναι η G-code, η οποία χρησιμοποιείται σε διάφορα είδη συστημάτων κατασκευής. Παρόλο που οι 3D slicers δεν κατηγοριοποιούνται αυστηρά ως λογισμικό CAM, εκτελούν την ίδια λειτουργία στη διαδικασία της εκτύπωσης 3D, καθώς παράγουν ψηφιακά αρχεία που περιέχουν λεπτομερείς οδηγίες για τον εκτυπωτή να εκτελέσει.



Εικόνα 80 Οποιοδήποτε slicer απαιτεί να εισαχθούν δύο σημαντικές πληροφορίες. Πηγή: [MakerBot]

Προκειμένου να προετοιμαστεί επιτυχώς ένα μοντέλο για εκτύπωση 3D, ο slicer απαιτεί να εισαχθούν δύο σημαντικές πληροφορίες : το 3D μοντέλο το ίδιο και τη σειρά παραμέτρων εκτύπωσης που λένε στη μηχανή πώς πρέπει να γίνει η πραγματική εκτύπωση [Εικόνα 80].

5.14.2 3D Μοντέλα

Τα ψηφιακά 3D μοντέλα δημιουργούνται χρησιμοποιώντας λογισμικά σχεδιασμού, από το ανοικτού κώδικα και καλλιτεχνικό Blender έως τα επαγγελματικά και υψηλής τεχνικής SolidWorks, Creo Parametric κλπ. Το πρόβλημα είναι ότι οποιοδήποτε ψηφιακό αρχείο που δημιουργείται με ένα συγκεκριμένο εργαλείο CAD έχει ένα συγκεκριμένο μορφότυπο, όπως το "Blend" (.blend) για το Blender και τα "part" και "assembly" (.sldprt και .sldasm) για το SolidWorks. Εάν οι 3D slicers έπρεπε να επεξεργάζονταν όλες αυτές τις διαφορετικές μορφές, θα χρειαζόνταν έναν τεράστιο βασικό υποστηρικτικό κώδικα, και ακόμη και έτσι, σίγουρα δεν θα μπορούσαν να καλύψουν όλα τα προγράμματα μοντελοποίησης που υπάρχουν. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται μια κοινή μορφή αρχείου. Ο πιο κοινός που σχετίζεται με την εκτύπωση 3D είναι το STL (.stl), το οποίο εξάγεται από τα περισσότερα προγράμματα λογισμικού μοντελοποίησης 3D. Βέβαια τα τελευταία χρόνια κάποιος slicer, όπως το GrabCAD, έχουν την δυνατότητα να εισάγουν και άλλων ειδών αρχεία εκτός από .stl. Για παράδειγμα τα .sldprt ή ακόμα και assemblies .sldasm είναι κάποια από αυτά.

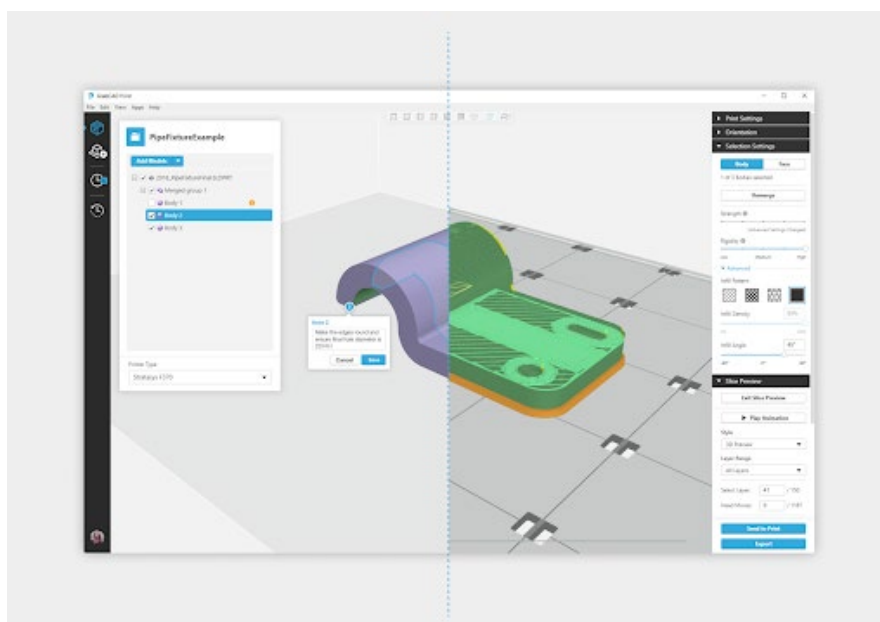
5.14.3 Παράμετροι Εκτύπωσης 3D

Με ένα 3D μοντέλο σε μορφή που μπορεί να κατανοήσει ο slicer, το επόμενο βήμα είναι να δοθούν λεπτομέρειες εκτύπωσης, όπως ύψος στρώσης, ταχύτητα, θέση του τμήματος και πολλές άλλες ρυθμίσεις που σχετίζονται με την κατασκευή. Αυτές οι τιμές που εισάγει ο χρήστης καθορίζονται πριν από την εκτύπωση. Το 3D μοντέλο μπορεί

επίσης να τροποποιηθεί μερικώς κατά τη διάρκεια αυτού του βήματος. Μπορεί να γίνει αλλαγή στις διαστάσεις, να αλλάξει το γέμισμα (infill) και οι τιμές πάχους του τοίχου (wall thickness). Σε αυτό το βήμα συμπεριλαμβάνεται επίσης η ενεργοποίηση της υποστήριξης (support), που είναι μια από τις πιο πρακτικές λειτουργίες ενός 3D slicer. Οι παράμετροι εκτύπωσης 3D θα διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας (fdm, ρητίνη κ.α) καθώς και με τον τύπο του υλικού.⁶⁷

5.14.4 Χαρακτηριστικά του slicer GrabCAD Print

Λογισμικό slicer από τη Stratasys, βασισμένο στο cloud, σχεδιασμένο για την απλοποίηση της διαδικασίας 3D εκτύπωσης και την παροχή μιας ομαλής ροής εργασίας από τον σχεδιασμό έως την 3D εκτύπωση. Το λογισμικό GrabCAD Print είναι διαθέσιμο για την πλειονότητα της σειράς εκτυπωτών 3D της Stratasys.



Εικόνα 81 Λογισμικό slicer από τη Stratasys, βασισμένο στο cloud, σχεδιασμένο για την απλοποίηση της διαδικασίας 3D εκτύπωσης και την παροχή μιας ομαλής ροής εργασίας από τον σχεδιασμό έως την 3D εκτύπωση. Πηγή: [\[GrabCAD\]](#)

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του GrabCAD Print είναι η φιλική προς τον χρήστη διεπαφή του. Το λογισμικό είναι εύκολο στην πλοήγηση, ακόμα και για αρχάριους, και παρέχει μια απλοποιημένη ροή εργασίας που επιτρέπει στους σχεδιαστές να δημιουργούν και να τροποποιούν γρήγορα 3D μοντέλα για εκτύπωση.

Το GrabCAD Print υποστηρίζει διάφορα μορφό αρχείων, συμπεριλαμβανομένων των STL, OBJ, και STEP, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να εργάζονται με μια ευρεία γκάμα λογισμικού 3D μοντελοποίησης. Επιπλέον, το λογισμικό είναι βασισμένο στο

⁶⁷ Lucas Carolo, What Is a 3D Slicer? - Simply Explained, Φεβρουάριος 2024, <https://all3dp.com/2/what-is-a-3d-slicer-simply-explained/>

cloud, πράγμα που σημαίνει ότι τα σχέδια μπορούν να προσπελαστούν από οπουδήποτε και σε οποιαδήποτε συσκευή με σύνδεση στο internet.

Επιπλέον παρέχει μια ποικιλία επιλογών υλικού, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να επιλέξουν το κατάλληλο υλικό για το έργο τους. Ένα από τα καλύτερα πλεονεκτήματα της χρήσης του GrabCAD Print είναι ότι το λογισμικό δημιουργεί αυτόματα δομές υποστήριξης για τα 3D μοντέλα. Το GrabCAD Print παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής απευθείας από τα επαγγελματικά φορμά CAD, εξοικονομώντας ώρες που συνήθως ξοδεύονται για μετατροπή και επιδιόρθωση αρχείων STL.⁶⁸

5.15 Μετα-επεξεργασία του μοντέλου μετά την εκτύπωση (Post Processing)

Σχεδόν κάθε εκτύπωση 3D απαιτεί κάποια μετα-επεξεργασία μετά την εκτύπωσή της. Η μετα-επεξεργασία μπορεί να βελτιώσει την αισθητική ενός εκτυπωμένου μοντέλου, αλλά μπορεί επίσης να ενισχύσει τη δύναμή του και άλλες ιδιότητές του.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές για την μετα-επεξεργασία ενός μοντέλου οι οποίες θα χωριστούν σε δύο κατηγορίες: "καθαρισμός και προετοιμασία" και "τελείωμα - φινιρίσμα".

5.15.1 Καθαρισμός και προετοιμασία

Ο καθαρισμός είναι ένα βασικό στάδιο μετα-επεξεργασίας ενός κομματιού. Είναι το στάδιο στο οποίο το εκτυπωμένο κομμάτι θα πρέπει να καθαριστεί από υλικό μοντέλο ή υλικού υποστήριξης που δεν είναι κομμάτι του τελικού μοντέλου, η λείανση του και να συγκολληθεί αν το μοντέλο αποτελείται από πολλά κομμάτια.

5.15.1.1 Καθαρισμός και προετοιμασία - Αφαίρεση υλικού υποστήριξης



Εικόνα 82 Αφαίρεση υλικού υποστήριξης. Πηγή: [GrabCAD]

⁶⁸ GrabCAD, Take a quick tour, <https://help.grabcad.com/article/199-take-a-quick-tour>

Η αφαίρεση του υλικού υποστήριξης είναι η πιο βασική μορφή μετα-επεξεργασίας. Συνήθως, δεν απαιτεί πολύ κόπο εκτός αν υπάρχουν υποστηρίξεις σε στενές γωνίες ή άλλα δύσκολα προσβάσιμα μέρη. Ανάλογα με το υλικό, η υποστήριξη μπορεί να είναι αδιάλυτη ή διαλυτή, δηλαδή θα διαλυθούν σε νερό ή άλλα υγρά που αφαιρούν το υλικό υποστήριξης.

5.15.1.2 Καθαρισμός και προετοιμασία - Λείανση



Εικόνα 83 Η λείανση είναι η πιο συνηθισμένη μορφή μετα-επεξεργασίας. Πηγή: [\[formlabs\]](#)

Εκτός από την αφαίρεση του υλικού υποστήριξης, η λείανση είναι η πιο συνηθισμένη μορφή μετα-επεξεργασίας. Γενικά, τα μοντέλα που εκτυπώνονται από τρισδιάστατη εκτύπωση έχουν ελαφρώς άγρια επιφάνεια, ενώ συνήθως φαίνονται και τα στρώματα εκτύπωσης, και η λείανση είναι ο ευκολότερος τρόπος για να τις εξομαλύνετε.

Μετά την εκτύπωση, ένα μέρος μπορεί να έχουν μείνει μερικά σταγονίδια (σε εκτυπώσεις με ρητίνη) στην επιφάνειά του ή κάποια άσχημα σημάδια που παραμένουν μετά την αφαίρεση της υποστήριξης. Ο ιδανικός τρόπος να αφαιρεθούν τέτοιες ατέλειες είναι με τη χρήση γυαλόχαρτου. Είναι πάντα καλύτερο η χρήση γυαλόχαρτου με μεγάλη τραχύτητα (150-400) και στην συνέχεια να μειώνεται η τραχύτητα (έως και 2.000) σε μερικά στάδια λείανσης. Αυτό γίνεται διότι τα γυαλόχαρτα με μεγάλη τραχύτητα θα αφαιρέσουν την άγρια με εξογκώματα επιφάνεια πιο εύκολα, αλλά θα γρατσουνίσουν πιο εύκολα την επιφάνεια αυτή, για αυτό η χρήση γυαλόχαρτου με λιγότερη τραχύτητα σταδιακά συνιστάται ώστε να λειανθεί και να ομαλοποιηθεί η επιφάνεια.

5.15.1.3 Καθαρισμός και προετοιμασία - Συγκόλληση



Εικόνα 84 Εφαρμογή συγκόλλησης δύο κομματιών. Πηγή: [\[hubs\]](#)

Σε πολλές περιπτώσεις τα κομμάτια που πρέπει να εκτυπωθούν δεν χωράνε σε μία εκτύπωση διότι ο χώρος κατασκευής του 3D εκτυπωτή είναι πολύ μικρός, με αποτέλεσμα να χρειαστεί να διαιρεθεί το μοντέλο στην εκτύπωση, και στη συνέχεια να συναρμολογηθούν τα κομμάτια μετά την εκτύπωσή τους.

Υπάρχουν πολλές επιλογές για τη συγκόλληση εκτυπωμένων τμημάτων. Η χρήση κόλλας είναι ο ευκολότερος τρόπος, και μπορεί να γίνει χρήση διαφόρων ειδών, όπως superglue κλπ.

Η χημική συγκόλληση ή "κρύα συγκόλληση" είναι μια άλλη επιλογή σύνδεσης, αλλά μόνο για υλικά εκτύπωσης 3D που διαλύονται σε διαλύτη. Για παράδειγμα, το ABS και το ASA αντιδρούν στο ασετόν. Είναι δυνατό να εφαρμοστεί λίγο ασετόν σε εκτυπώσεις ABS ή ASA, η οποία θα λιώσει ελαφρώς το πλαστικό. Τη στιγμή εκείνη, το άλλο μέρος μπορεί να συνδεθεί με τη λιωμένη άκρη για να συγκολληθούν ασφαλώς. Για υλικά που δεν αντιδρούν στο ασετόν, μπορείτε να συγκολλήσετε τα μέρη με ένα συγκόλληση (soldering).

5.15.2 Τελικό Φινίρισμα

Το φινίρισμα είναι ένα από τα τελευταία βήματα στη μετά-επεξεργασία των τρισδιάστατων εκτυπώσεων. Εφαρμόζοντας αυτές τις τεχνικές, δίνεται η δυνατότητα

εξάλειψης των ορατών γραμμών των στρωμάτων, για να δημιουργηθεί μία ομαλότερη επιφάνεια και να βελτιωθεί ακόμα και η εμφάνιση του μοντέλου.

5.15.2.1 Τελικό Φινίρισμα - Αστάρωμα & Βαφή



Εικόνα 85 Βαφή κομματιού. Πηγή: [\[howto3dprint\]](https://www.youtube.com/watch?v=howto3dprint)

Το αστάρωμα είναι μια τεχνική μετά-επεξεργασίας που προετοιμάζει μια επιφάνεια για βαφή. Είναι η επικάλυψη του κομματιού με είτε χρώμα βάσης, είτε ψεκασμένη βάση, η οποία λειτουργεί ως βάση για την απόχρωση που θα εφαρμόσετε αργότερα.

Πριν εφαρμοστεί το αστάρι είναι καλό να έχει προηγηθεί η λείανση και όποια άλλη τεχνική ώστε να ομαλύνει την επιφάνεια του μοντέλου. Αφού στεγνώσει, μπορεί να αρχίσει η βαφή του μοντέλου με πινέλο ή ψεκασμό.

5.15.2.2 Τελικό Φινίρισμα - Εξομάλυνση Επιφάνειας



Εικόνα 86 Αριστερά πριν την εξομάλυνση επιφάνειας και δεξιά το μετά. Πηγή: [\[all3d\]](#)

Η εξομάλυνση είναι μια δημοφιλής τεχνική μετεπεξεργασίας, ιδιαίτερα για εκτυπώσεις ABS. Το ασετόν μπορεί να λιώσει το ABS και, επομένως, να εξομαλύνει τις γραμμές στρώσεων που είναι ορατές στην επιφάνεια ενός κομματιού. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται τοποθετώντας το μοντέλο (για 10 με 20 λεπτά) σε ένα κλειστό δοχείο, με λίγες τρύπες για εξαέρωση, με ασετόν χωρίς να έχουν επαφή και με οι αναθυμιάσεις (ατμοί) θα αρχίσουν να λιώνουν σιγά σιγά την εξωτερική στρώση του κομματιού.

5.15.2.3 Τελικό Φινίρισμα - Στίλβωμα - Γυάλισμα (polishing)



Εικόνα 87 Γυάλισμα. Πηγή: [\[Stratasys\]](#)

Αυτή η τεχνική μετεπεξεργασίας εκτυπωμένου μοντέλου χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η πιο ομαλή δυνατή επιφάνεια με διάφορες τεχνικές γυαλισματος.

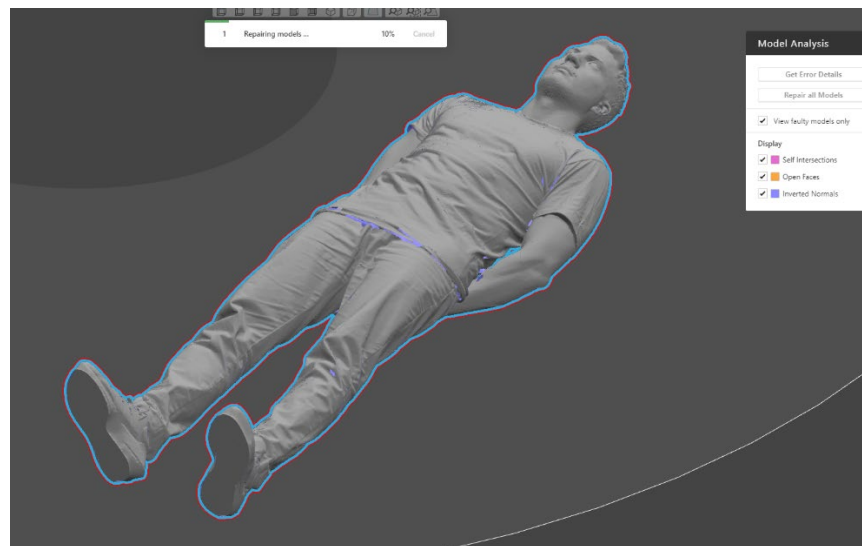
Για να επιτευχθεί σωστά το γυάλισμα στο μοντέλο θα χρειαστεί να έχει λειανθεί το μοντέλο και να έχει εφαρμοστεί η κατάλληλα, για κάθε υλικό, μετά-επεξεργασία από πριν. Μία πετσέτα με μικροϊνες ή ένα Dremel είναι κάποια από τα εργαλεία που μπορούν να αξιοποιηθούν για να επιτευχθεί ένα ομαλό γυάλισμα της επιφάνειας, σε συνδυασμό με κάποια πάστα ή εφαρμογή πλαστικού υλικού.⁶⁹

⁶⁹ Leo Gregurić, Content Academy Team, 3D Printing Post-Processing: PLA, PETG, ABS & More, Οκτώβριος 2023, <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>

6. Εισαγωγή του μοντέλου στον Slicer και εκτύπωση του πρωτοτύπου

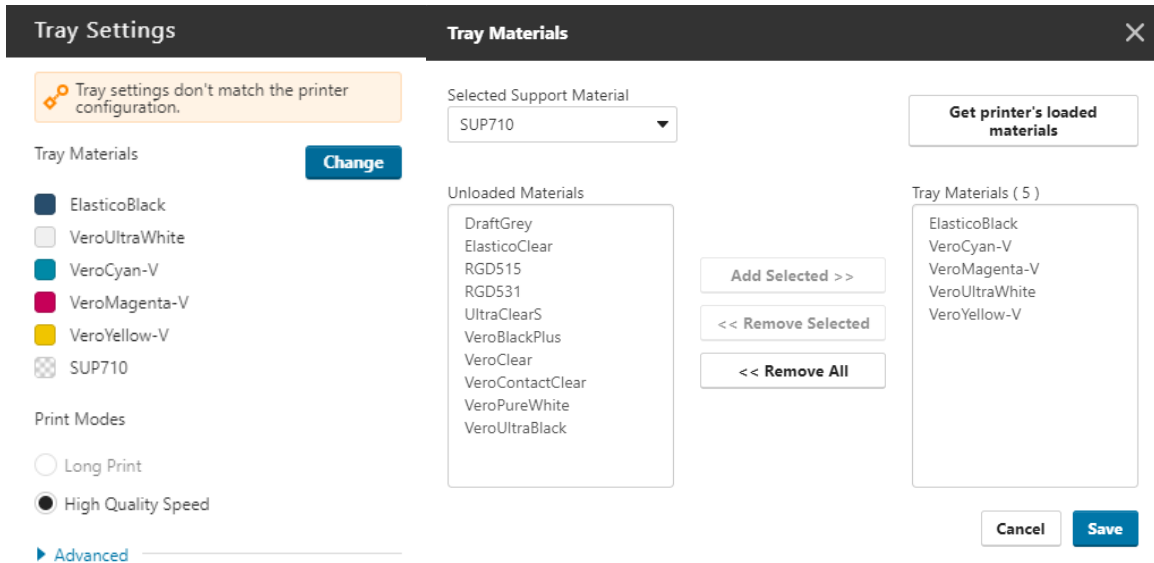
6.1 Προετοιμασία του μοντέλου για εκτύπωση

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε πώς το μοντέλο σαρώνεται και πώς πραγματοποιείται η επεξεργασία της γεωμετρίας και της υφής του, προκειμένου να ακολουθήσει η εκτύπωσή του. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η εισαγωγή του μοντέλου στο λογισμικό slicer και η προετοιμασία του για εκτύπωση. Είναι σημαντικό κατά την εισαγωγή του αρχείου στον Slicer, να μην έχει αλλάξει η ονομασία του αρχείου .bmr της υφής, καθώς σε αντίθετη περίπτωση δεν θα «φορτώσουν» οι πληροφορίες υφής.



Το μοντέλο θα χρειαστεί να «επισκευαστεί» από το λογισμικό, διότι υπάρχουν λάθη στην γεωμετρία. Αυτά τα λάθη προκύπτουν είτε κατά την εξαγωγή του μοντέλου από το λογισμικό αντίστροφης μηχανικής είτε υπήρχαν ήδη κατά την επεξεργασία του από αυτό. Παρόλα αυτά ο αλγόριθμος του slicer θα προσπαθήσει να διορθώσει τυχόν σφάλματα, ώστε να μην υπάρξουν λάθη κατά την μεταφορά στο εκτυπωτή για εκτύπωση.

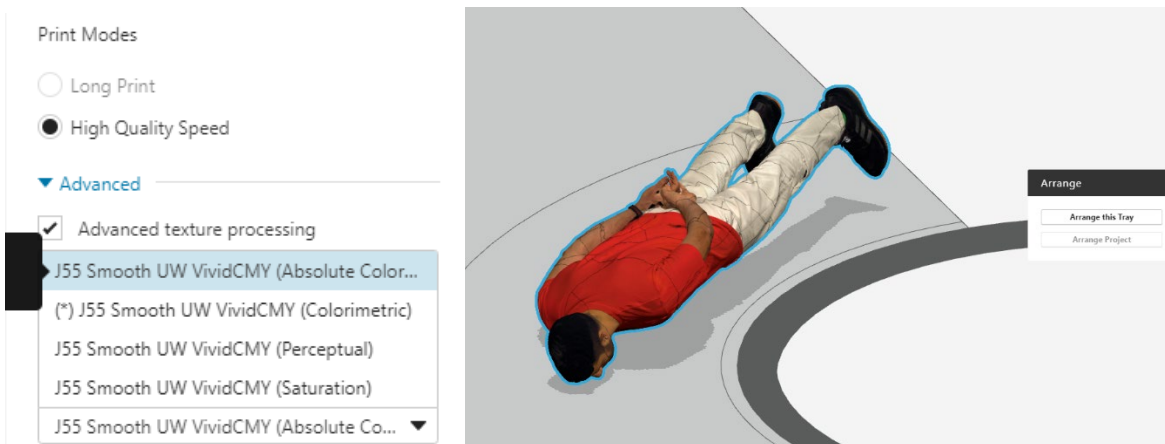
Το επόμενο βήμα είναι να ελεγχθούν τα υλικά που είναι φορτωμένα στον εκτυπωτή και αν συμβαδίζουν με το λογισμικό. Όταν είναι συνδεδεμένος ο εκτυπωτής στο δίκτυο παρέχει την δυνατότητα σε κάποιον να δει τι υλικά έχει και να τα συγχρονίσει.



Όταν τα υλικά έχουν πια συγχρονιστεί, θα χρειαστεί γίνει η βέλτιστη τοποθέτηση του μοντέλου στο τραπέζι, έτσι ώστε να μειωθεί η κατανάλωση του υλικού υποστήριξης, αλλά και ο χρόνος εκτύπωσης. Επιπλέον, συστήνεται η εκτύπωση του μοντέλου σε Matte επιφάνεια, ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στο φινιρίσμά του, και να επλεχθεί το αντίστοιχο προφίλ (Absolute Color), ώστε να συμβαδίζει με αυτό που είχε γίνει από το Photoshop.



Στην φωτογραφία παραπάνω φαίνεται η διαφορά του χρώματος πάνω στο μοντέλο. Παρατηρείται, όπως φαίνεται στον ώμο των μοντέλων, ότι υπάρχει μία διαφορά στην απόχρωση. Το αριστερό μοντέλο έχει δεχθεί επεξεργασία της υψής του, οπότε ήταν και το αναμενόμενο χρώμα πριν την εισαγωγή του στο λογισμικό slicer, ενώ στο δεξί φαίνεται η υφή να τείνει προς το πορτοκαλί, όπου το λογισμικό το παρήγαγε με βάση τις επιλογές και τις παραμέτρους που έχει.



Το τελευταίο βήμα στον slicer είναι να γίνει ο τεμαχισμός του μοντέλου, πατώντας αποστολή, και να σταλεί στον εκτυπωτή για να ξεκινήσει η εκτύπωση. Επιπλέον όταν έχει τεμαχιστεί το κομμάτι, δίνεται μία προεπισκόπηση από το λογισμικό που παρουσιάζει κατά προσέγγιση την ποσότητα του υλικού που θα χρειαστεί (σε γραμμάρια) και τον χρόνο εκτύπωσης.

Tray Estimations	
leo scan final	High Quality Speed
Print Time	1h 52m
Total Materials (g)	55
Total Support (g)	38
ElasticoBlack	6
VeroUltraWhite	20
VeroCyan-V	10
VeroMagenta-V	10
VeroYellow-V	9
SUP710	38

6.2 Προετοιμασία εκτυπωτή και εκτύπωση του μοντέλου

Τέλος, αναδείχθηκε η σημασία των ενεργειών που προηγούνται της αποστολής του μοντέλου στον εκτυπωτή και της έναρξης της εκτύπωσης. Τέτοιες ενέργειες είναι η βαθμονόμηση του εκτυπωτή, ο καθαρισμός των κεφαλών, του τραπεζιού και των λαμπών, οι οποίες αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της μηχανής. Ο έλεγχος των υλικών, ο οποίος γίνεται και από το λογισμικό slicer, είναι εξίσου σημαντικός, ώστε να βεβαιωθεί ο χειριστής του εκτυπωτή ότι η διαθέσιμη ποσότητα υλικών επαρκεί για την ολοκλήρωση της εκτύπωσης. Μετά την ολοκλήρωσή της το μοντέλο πρέπει να αφαιρεθεί από τον εκτυπωτή και να καθαριστεί. Ο καθαρισμός του γίνεται σε μηχάνημα waterjet, το οποίο

αφαιρεί το υλικό υποστήριξης από το μοντέλο με πίεση νερού. Όλες οι παραπάνω ενέργειες απαιτούνται για ένα άρτιο αισθητικά και λειτουργικά αποτέλεσμα.

Παρακάτω φαίνεται η εξέλιξη του μοντέλου από την σάρωση (αριστερά), ψηφιακή επεξεργασία (κέντρο) και δεξιά η τελική μορφή εκτύπωσης (δεξιά).



Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν μερικές από τις σύγχρονες τεχνολογίες τρισδιάστατων σαρωτών και εκτυπωτών. Οι τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογής. Διαφορετικά είδη σαρωτών και εκτυπωτών καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις. Εν προκειμένω, δόθηκε έμφαση κυρίως στις τεχνολογίες που αξιοποιούν την σάρωση υφής για την αποτύπωσή της σε ψηφιακή μορφή, καθώς και στις τεχνολογίες που έχουν δυνατότητα έγχρωμης εκτύπωσης για την απόδοση της υφής και του χρώματος απευθείας στο εκτυπωμένο μοντέλο.

Μέσα από την μελέτη και την εφαρμογή της σάρωσης με δομημένο φωτισμό, προέκυψε ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία επιτρέπει τη σύλληψη της γεωμετρίας και της υφής του υπό σάρωση αντικειμένου με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι η σύλληψη της πληροφορίας, δηλαδή η σάρωση, χωρίς τη χρήση ανακλαστικών στόχων, αλλά με την αξιοποίηση αποκλειστικά της γεωμετρίας και της υφής του αντικειμένου δεν απέκλεισε ορισμένες αστοχίες ως προς τη σύλληψη της πληροφορίας του μοντέλου (διπλοτυπία). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι όταν το μοντέλο δεν είναι σταθερό, όπως στην προκειμένη περίπτωση που το μοντέλο ήταν άνθρωπος, η σάρωση πρέπει να ολοκληρώνεται στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Και αυτό, διότι το μοντέλο δεν μπορεί να παραμείνει για μεγάλο διάστημα απολύτως ακίνητο, τυχόν δε κίνηση του μοντέλου, μπορεί να προκαλέσει αστοχίες κατά τη σάρωση. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι ήταν εξαιρετικά δυσχερής η ακριβής σάρωση των ματιών του μοντέλου, καθώς ακόμα και η παραμικρή κίνηση (π.χ. το άνοιγμα και το κλείσιμο των ματιών) επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Για τον ίδιο λόγο, περιορίζονται και οι στάσεις και οι θέσεις που μπορούν να λάβουν τα ζωντανά μοντέλα κατά τη σάρωση.

Παρουσιάστηκαν, επίσης, ορισμένες σχεδιαστικές εφαρμογές για την αξιοποίηση και επεξεργασία της υφής και του χρώματος των ψηφιακών μοντέλων. Από τη μελέτη τους προέκυψε καταρχάς ότι είναι σημαντική η μετάδοση της πληροφορίας, χωρίς αλλοιώσεις, από τον χρήστη του σαρωτή, μέχρι τον σχεδιαστή και τον χειριστή του εκτυπωτή, η οποία δεν είναι πάντα εύκολη. Και αυτό, διότι επηρεάζεται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες, όπως ενδεικτικά την ποιότητα της σάρωσης, την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου, την απόδοση και την τυχόν ανάγκη μετατροπής των χρωμάτων, την επιλογή των υλικών που θα χρειαστούν για την τρισδιάστατη εκτύπωση, και τον ανθρώπινο παράγοντα, δηλαδή τις ικανότητες κάθε χειριστή και σχεδιαστή.

Επιπλέον, η διαδικασία σχεδιασμού και επεξεργασίας διαφέρει ανάλογα με το αντικείμενο που πρόκειται να εκτυπωθεί από τρισδιάστατο εκτυπωτή σχεδιάστηκε εξ ολοκλήρου ψηφιακά μέσω σχεδιαστικού προγράμματος ή προέκυψε κατόπιν σάρωσης φυσικού μοντέλου με τη χρήση τρισδιάστατου σαρωτή. Η βασική τους διαφορά είναι ότι στην πρώτη περίπτωση το μοντέλο σχεδιάζεται εξ αρχής, ενώ στην δεύτερη περίπτωση λαμβάνεται έτοιμη η πληροφορία μέσω της αντίστροφης μηχανικής. Όσον αφορά τις τεχνολογίες έγχρωμης τρισδιάστατης εκτύπωσης, δόθηκε έμφαση στο πως μπορούν να αποδώσουν, η κάθε μία διαφορετικά, το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το μοντέλο που

τυπώθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, έχει υψηλή ανάλυση και πιστότητα ως προς την απόδοση της υφής και του χρώματος.

Περαιτέρω έρευνα και μελέτη

Μέσα από την παρούσα εργασία προέκυψαν ορισμένες ιδέες για περαιτέρω έρευνα και μελέτη της τρισδιάστατης σάρωσης, του σχεδιασμού και της τρισδιάστατης εκτύπωσης, με έμφαση στην υφή και στο χρώμα. Με βάση την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε θα είχε ενδιαφέρον ο σχεδιασμός μοντέλου εξολοκλήρου σε σχεδιαστικό πρόγραμμα, ώστε να αποτυπωθούν μέσω αυτού τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υφής του, και στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί έγχρωμη τρισδιάστατη εκτύπωσή του. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η μελέτη των λοιπών τεχνολογιών σάρωσης που μπορούν να αποδώσουν την υφή και το χρώμα ενός ζωντανού μοντέλου, καθώς και οι λοιπές μεθοδολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την αποτύπωση του χρώματος στο τυπωμένο μοντέλο και ο τρόπος εφαρμογής τους.

Τέλος, επειδή οι τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος, θα είχε ενδιαφέρον η μελέτη πιο οικονομικών τεχνολογιών που υπάρχουν σήμερα στην αγορά και παρέχουν τη δυνατότητα τρισδιάστατης σάρωσης και εκτύπωσης.

Βιβλιογραφία

Δημοσιεύσεις

- 1) Gabriel Taubin, Daniel Moreno, Douglas Lanman, “3D Scanning for Personal 3D Printing: Build Your Own Desktop 3D Scanner”, Συνεδριακό Κέντρο Βανκούβερ (Vancouver Convention Center), 2014
- 2) Jagjit Singh Randhawa, Sepaldeep Singh Dhaliwal, Manarshhjet Singh, 3-D Scanning and 3-D Printing in Archeology, Ιανουάριος 2017
- 3) Joan Horvath, Rich Cameron, Mastering 3D Printing A Guide to Modeling, Printing, and Prototyping, Έκδοση 2^η
- 4) Lucía Rodríguez-Pombo, Xiaoyan Xu , Alejandro Seijo-Rabina, Jun Jie Ong, Carmen Alvarez-Lorenzo, Carlos Rial, Daniel Nieto, Simon Gaisford, Abdul W. Basit, Alvaro Goyanes, Volumetric 3D printing for rapid production of medicines, Απρίλιος 2022, Additive Manufacturing Volume 52
- 5) Thabiso Peter Mporfu - Cephas Mawere - Macdonald Mukosera, The Impact and Application of 3D Printing Technology, International Journal of Science and Research (IJSR)

Εγχειρίδια Χρήσης

- 6) Creafom Inc, REVERSE ENGINEERING OF PHYSICAL OBJECTS - TEACHING MANUAL, Έκδοση 1η, Μάρτιος 2014
- 7) Creafom, Go!SCAN 3D User Manual, Αύγουστος 2023
- 8) Stratasy, Get tips for perfect product design with a full color 3D printer and rapid CMF modeling iterations, <https://www.stratasy.com/en/resources/resource-guides/cmf-ebook/>
- 9) Stratasy, Designing in KeyShot for PolyJet 3D Printing, σ
- 10) ALEXA NAHUM, 3D Printing in Full Color: An Introduction, Οκτώβριος 2018, <https://blog.grabcad.com/blog/2018/10/31/3d-printing-in-full-color-an-introduction/>
- 11) Naftali Eder, Part 1: A Look at Color Proofing, Ιανουάριος 2019, <https://grabcad.com/tutorials/part-1-a-look-at-color-proofing>
- 12) Stratasy, Stratasy J55 3D Printer, https://www.stratasy.com/siteassets/press-kit/j55/br_pj_j55_0420a.pdf?v=48faf3
- 13) Stratasy, FDM Printers and Materials, <https://www.stratasy.com/siteassets/fdm-system/fdm-3d-printers-materials-spec-sheet.pdf>
- 14) GrabCAD, Take a quick tour, <https://help.grabcad.com/article/199-take-a-quick-tour>

Άρθρα

- 15) Matthew McMillion, What is a CMM machine?, Απρίλιος 2021, <https://www.artec3d.com/learning-center/what-is-cmm-machine>

- 16) Jagjit Singh Randhawa, Sepaldeep Singh Dhaliwal, Manarshhjet Singh, 3-D Scanning and 3-D Printing in Archeology, Ιανουάριος 2017, <https://www.researchgate.net/publication/348705294>
- 17) Terry Hermary, Principles of Laser Triangulation, Laser triangulation, <https://hermary.com/learning/principles-of-laser-triangulation/>
- 18) Sam Cheney, Choosing a 3D Scanner: Light vs Lasers, Applications, & Considerations, Μάρτιος 2023, <https://www.goengineer.com/blog/choosing-a-3d-scanner>
- 19) Iain Caville, LONDON'S NATURAL HISTORY MUSEUM: A BLUE WHALE 3D SCANNING PROJECT, Οκτώβριος 2017, <https://www.creaform3d.com/blog/londons-natural-history-museum-a-blue-whale-3d-scanning-project/>
- 20) All3DP, How Does the STL File Format Store a Model?, Μάιος 2023, <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/>
- 21) Aaron Pearson, 3D printing Q&A, Σεπτέμβριος 2020, <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/3d-printing-faq/>
- 22) Lucas Carolo, What Is FDM 3D Printing? - Simply Explained, Μάιος 2023 <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- 23) Ross Lawless, All3DP, Stereolithography: SLA 3D Printing Simply Explained, Μάιος 2023, <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
- 24) Ile Kauppila, What Is Material Jetting? - 3D Printing Basics, Απρίλιος 2022, <https://all3dp.com/1/what-is-material-jetting-3d-printing-basics/>
- 25) Tobias Hullete, Multicolor 3D Printer: The Main Types & Printing Guide, Οκτώβριος 2023, <https://all3dp.com/2/multicolor-3d-printer-3d-print-multiple-colors-method/>
- 26) Ile, Kauppila, Full-Color 3D Printing - The Ultimate Guide, Ιανουάριος 2024, <https://all3dp.com/1/full-color-3d-printing-multicolor/>
- 27) All3DP, PolyJet 3D Printing - The Ultimate Guide, Μάρτιος 2023 <https://all3dp.com/2/polyjet-3d-printing-technologies-simply-explained/>
- 28) Lucas Carolo, What Is a 3D Slicer? - Simply Explained, Φεβρουάριος 2024, <https://all3dp.com/2/what-is-a-3d-slicer-simply-explained/>
- 29) Leo Gregurić, Content Academy Team, 3D Printing Post-Processing: PLA, PETG, ABS & More, Οκτώβριος 2023, <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>

Ιστοσελίδες

- 30) Capture3D, What is 3D Metrology? And Other Things You Should Know if You're New to 3D Scanning, <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/what-is-3d-metrology-and-other-things-you-should-know-if-you-re-new-to-3d-scanning>
- 31) EDM Intelligent Solutions, 3D SCANNING METROLOGY VS. TRADITIONAL METHODS: A COMPARATIVE ANALYSIS <https://www.edmdept.com/3d-scanning-metrology/>
- 32) Creaform, WHAT IS THE BEST 3D SCANNER?, Απρίλιος 2023, https://www.creaform3d.com/blog/what-is-the-best-3d-scanner/#What_Are_the_Different_Types_of_Handheld_3D_Scanners

- 33) Capture3D, Best Uses of 3D Scanning and Its Applications, <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/best-uses-of-3d-scanning-software>
- 34) Surphaser, 3D Scanning Applications, <https://surphaser.com/blog/3d-scanning-applications/>
- 35) Ireal3dscan, High-precision Color 3D Modeling Solutions, Which is the Most Suitable One for You?, Δεκέμβριος 2022 <https://www.ireal3dscan.com/news/color-3d-modeling-solutions-comparison/>
- 36) 3d-scantech, What Is Photogrammetry and How Can It Help in 3D Scanning?, Οκτώβριος 2021, <https://www.3d-scantech.com/what-is-photogrammetry-and-how-can-it-help-in-3d-scanning>
- 37) Polyga, When is it important to get color scans?, <https://www.polyga.com/3d-scanning-101/when-is-it-important-to-get-color-scans/>
- 38) Creiform3d, Go!SCAN 3D TECHNICAL SPECIFICATIONS, <https://www.creiform3d.com/en/handheld-portable-3d-scanner-goscan-3d/technical-specifications>
- 39) Creiform, 3D measurement software platform and application suite, <https://www.creiform3d.com/en/metrology-solutions/3d-applications-software-platforms>
- 40) Stratasy, Product Development Life Cycle, <https://www.stratasy.com/en/stratasydirect/resources/resource-guides/product-development-life-cycle/>
- 41) Creiform, VXmodel: SCAN-TO-CAD SOFTWARE MODULE, <https://www.creiform3d.com/en/metrology-solutions/3d-applications-software-platforms/vxmodel-scan-cad-software-module>
- 42) Formlabs, 3D Printing Miniatures and Custom Figurines: A Guide to Bringing Digital Models to Life, <https://formlabs.com/eu/blog/3d-printing-miniatures-and-custom-figurines/>
- 43) Faktur, Stereolithography (SLA), <https://3faktor.com/en/3d-printing-materials-technologies/stereolithography-sla-technology-overview/#1486035768388-4184bc65-d700>
- 44) 3D Systems, What Is ColorJet Printing?, [https://www.3dsystems.com/colorjet-printing#:~:text=ColorJet%20Printing%20\(CJP\)%20is%20an,causing%20the%20core%20to%20solidify](https://www.3dsystems.com/colorjet-printing#:~:text=ColorJet%20Printing%20(CJP)%20is%20an,causing%20the%20core%20to%20solidify)
- 45) Stratasy, PolyJet™ Technology, <https://www.stratasy.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/>
- 46) Formlabs, Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties, <https://formlabs.com/eu/blog/3d-printing-materials/>
- 47) Wikipedia, Fused filament fabrication, https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication
- 48) Wikipedia, Selective laser sintering, https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering
- 49) Wikipedia, Stereolithography, <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>