



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ & ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΔΟΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΩΝ
ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ

ΕΛΕΝΗΣ-ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ ΙΟΥΡΑΝΙΔΟΥ

ΑΜ:16087

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΡ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Αθήνα 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF HEALTH AND CARE SCIENCES

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL SCIENCES

DIVISION OF DENTAL TECHNOLOGY

3D PRINTING SYSTEMS FOR ORTHODONTICS CASTS
ADVANTAGES-DISADVANTAGES



DISSERTATION OF

IORDANIDOU ELENI VASILIKI

CANDIDATE NUMBER:16087

SUPERVISOR: DR. PANAGIOTIS KONSTANTINOS

Athens, 2023

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

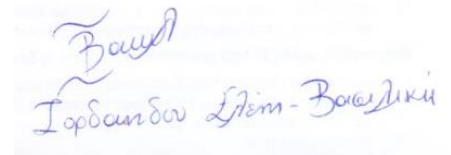
ΜΕΛΟΣ

ΜΕΛΟΣ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογράφουσα Ελένη Βασιλική Ιορδανίδου του Φωκίωνος, με αριθμό μητρώου 16087 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Βιοϊατρικών Επιστημών του Τμήματος Οδοντικής Τεχνολογίας, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



Ελένη Βασιλική
Ιορδανίδου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	3
ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	8
1.ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΗΣ.....	8
1.1ΟΡΙΣΜΟΣ.....	8
1.2 ΣΚΟΠΟΙ ΤΗΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΗΣ	8
1.3 ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΗΣ ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ.....	9
2.ΕΚΜΑΓΕΙΑ	11
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	12
2.3 ΕΙΔΗ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ	12
2.4. ΥΛΙΚΟ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ-ΓΥΨΟΣ	14
2.5.ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ.....	15
2.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ.....	18
2.6.1 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ-ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ.....	18
2.6.2 ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ	19
2.6.3 . ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΕΚΜΑΓΕΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	21
2.7.ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΥΨΙΝΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ.....	21
ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	24
3.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD-CAM.....	24



3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	24
3.2. ΜΕΡΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ CAD/CAM	26
3.3 ΑΦΑΙΡΕΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	28
3.4. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ-ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ.....	31
3.4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	33
3.4.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	34
3.4.3. ΣΤΑΔΙΑ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	37
4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	44
4.1 ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ (SLA).....	45
4.2 ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΩΤΟΣ (DLP)	50
4.3 ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΕ ΟΘΟΝΗ ΥΓΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ (LIQUID CRYSTAL DISPLAY-LCD)	56
4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΛΙΩΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (FUSED DEPOSITION MODELING-FDM).....	61
4.5 ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΠΥΡΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ LASER (SLS) ΚΑΙ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΤΗΞΗ ΜΕ LASER (SLM).....	67
4.6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΣΕ ΦΥΛΛΑ (LAMINATED OBJECT MODELING-LOM).....	74
4.7 ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ (MATERIAL JETTING-MJ ή MULTIJET PRINTING ή POLYJET ή PP).....	79
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	87
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	105
ABSTRACT	106
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	108





ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος «Πτυχιακή εργασία 2020», με θεματική ενότητα τα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης ορθοδοντικών εκμαγείων στο κλάδο Βιοϊατρικών Επιστημών του τμήματος Οδοντικής τεχνολογίας, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των διαφόρων τρισδιάστατων συστημάτων εκτύπωσης, όσον αφορά στη κατασκευή των ορθοδοντικών εκμαγείων και στη συνέχεια τόσο η μεταξύ τους σύγκριση όσο και σε σχέση με την τεχνική κατασκευή εκμαγείων με γύψο. Η εργασία βασίζεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση των προαναφερθέντων, συνδυάζοντας κριτική και σφαιρική πλαισίωση.

Η προέλευση της Οδοντιατρικής, η οποία είναι από τα παλαιότερα γνωστά ιατρικά επαγγέλματα χρονολογείται από το 5.000 π.Χ., όπου η οδοντική φθορά περιγράφεται ως «σκουλήκια δοντιών». Με τα χρόνια και τους αιώνες, η οδοντιατρική έχει εξελιχθεί και αναπτυχθεί, επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό την υγεία και την προσωπική ευεξία, σε λειτουργικό και αισθητικό επίπεδο. Όπως όλες οι επιστήμες έτσι και η Οδοντιατρική ακολουθώντας τη ροή των εξελίξεων και των νέων τεχνολογιών, έκανε την εμφάνιση της στον κόσμο της ψηφιακής τεχνολογίας.

Η εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών επηρέασε δραματικά την κλινική και εργαστηριακή ροή εργασίας σε όλους τους οδοντιατρικούς κλάδους (ορθοδοντική, προσθετική, γναθοπροσωπική, εμφυτευματολογία) με την εισαγωγή σε αυτή της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία διεπιστημονική τεχνολογία που περιλαμβάνει μηχανήματα, υπολογιστικές λειτουργίες, αριθμητικό έλεγχο και τεχνολογία υλικών προς την κατασκευή ενός απτού, τρισδιάστατου αντικειμένου. Συνήθως, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τρία βήματα: πρώτον, τον σχεδιασμό των τρισδιάστατων μοντέλων από υπολογιστή με λογισμικό μοντελοποίησης (CAD)· δεύτερον, τη διαίρεση του τρισδιάστατου μοντέλου σε επίπεδα και τρίτον, τη



μετατροπή σε τρισδιάστατο αντικείμενο δια μέσου εκτύπωσης ανά επίπεδο. Η τεχνολογία αυτή πέρα από τις πολλές εφαρμογές στην οδοντιατρική, χρησιμοποιείται επίσης και στη δημιουργία οδοντικών εκμαγείων.

Τα εκμαγεία αποτελούν τη θετική αναπαράσταση των οδοντικών τόξων της στοματικής κοιλότητας του ασθενούς. Αντιπροσωπεύουν ένα από τα σημαντικότερα εργαστηριακά στάδια στην καθημερινή πράξη και είναι καθοριστικής σημασίας η προσεκτική και ακριβής κατασκευή τους. Για την προετοιμασία και την κατασκευή οποιασδήποτε ακριβούς οδοντοπροσθετικής αποκατάστασης ή μηχανήματος απαραίτητα στάδια κρίνονται: το στάδιο λήψης αποτυπώματος του στόματος του ασθενή από τον οδοντίατρο και το στάδιο κατασκευής εκμαγείου. Αυτό το φυσικό μοντέλο κατασκευάζεται από γύψο και παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη διάγνωση, σχεδίαση-προετοιμασία και θεραπεία του εκάστοτε περιστατικού. Σε αυτές τις πληροφορίες εντάσσονται η σύγκλιση και η σχέση των δοντιών με τους ανταγωνιστές και τα παρακείμενα δόντια, οι κλίσεις και οι διάφορες ιδιαιτερότητες αυτών, τα ανατομικά στοιχεία των οδοντικών τόξων και διαφορές πληροφορίες για τους περιοδοντικούς και οδοντικούς ιστούς π.χ. νωδές περιοχές, άξονες των δοντιών. Έτσι, αποκτώνται τα απαραίτητα δεδομένα για την οργάνωση του κατάλληλου σχεδίου θεραπείας.

Τα εκμαγεία αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη διεξαγωγή μίας επιτυχημένης θεραπείας, για αυτό χρήζει ιδιαίτερης σημασίας η εύρεση της πιστότερης μεθόδου κατασκευής αυτών· είτε αυτά κατασκευάζονται από τρισδιάστατους εκτυπωτές είτε με τη συμβατική μέθοδο. Τα βήματα πρέπει να τηρούνται πιστά για την αποφυγή οποιουδήποτε σφάλματος το οποίο θα μπορούσε να θίξει την πιστότητα τους και να αποφέρει προβλήματα στο ασθενή. Επομένως, το ζητούμενο της παρούσας εργασίας είναι η εξακρίβωση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των διάφορων μεθόδων παραγωγής εκμαγείων, της σύγκρισης αυτών ως προς την ακρίβεια, πιστότητα, κόστος, χρόνος παραγωγής κ.α. και αν αυτά εντάσσονται στα επιτρεπτά όρια ακριβείας που ορίζει η Αμερικανική Οδοντιατρική Ένωση (American Dental Association).



ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Κατά γενική ομολογία, ο άνθρωπος αποτελεί συνώνυμο της έννοιας «εξέλιξη». Αποδεικτικό στοιχείο του ισχυρισμού αυτού αποτελούν τα ποικίλα επιτεύγματα, εφευρέσεις, ανακαλύψεις σε κάθε τομέα του επιστητού. Ανέκαθεν κύριο μέλημα του ανθρώπου υπήρξε η βελτίωση και η πρόοδος της ευεξίας του αφενός στο επίπεδο της διαβίωσης και αφετέρου σε εκείνο της υγείας. Τα νοσήματα, οι τραυματισμοί και εν γένει οι κίνδυνοι που απειλούσαν την ακεραιότητά του, οδήγησαν στη δημιουργία της ανάγκης για πρόληψη και θεραπεία των ανωτέρω, με στόχο την ισορροπία και την αποκατάσταση της υγείας, που δημιούργησαν την επιστήμη της Ιατρικής.

Με ηγεμονική μορφή τον Ιπποκράτη, ο κλάδος της Ιατρικής γνώρισε την πρωτοκαθεδρική ανάπτυξή του· δικαίως αναγνωρίζεται ως ο πατέρας της σύγχρονης Ιατρικής, αφού σημάδεψε το πέρασμα από τη φάση των προκαταλήψεων και των δεισιδαιμονιών και άνοιξε τον δρόμο για την εύρεση της πραγματικής διά-γνώσης και θεραπείας των νοσημάτων. Μεταξύ άλλων, ο ίδιος αναφέρεται ως «ο ιδρυτής της Οδοντιατρικής επιστήμης γιατί είναι ο πρώτος που αναφέρει την θεραπεία νοσημάτων δοντιών και στόματος».¹ Όπως μας παραδίδει η αρχαιολογική έρευνα, σε συγγράμματά του όπως το *Περί διαπλάσεως των δοντιών*, τα *Παιδιατρικά*, *Το Κωακαί προγνώσεις*, *Διαγνωστική* και *Παθολογία*, η έρευνά του επεκτείνεται από τον σχηματισμό των δοντιών ήδη από την εμβρυική φάση, περνάει στην οδοντοφυΐα και τα οδοντιατρικά θέματα και καταλήγει σε στοματικές παθήσεις και τις συνέπειες τους στην υγεία εν συνόλω.

Ανά το πέρασμα των αιώνων με σημαντικούς σταθμούς τους πολιτισμούς των αρχαίων Ρωμαίων και των Αράβων του Μεσαίωνα (8^{ος}-15^{ος} αιώνας), καταλήγουμε στην Γαλλία τού 18^{ου} αιώνα και την άνθηση της σύγχρονης οδοντιατρικής με έξοχο εκπρόσωπο τον Pierre Fauchard. Ήταν εκείνος που με το βιβλίο του *Le chirurgien dentiste ou traité des dents* συγκέντρωσε της βασικές αρχές της οδοντιατρικής. «Εγκαινιάζει την εποχή της συστηματικής μελέτης, της θεωρητικής κατανοήσεως και αναγνωρίσεως της σημασίας της Οδοντιατρικής, καθώς και της ευρείας πρακτικής της εφαρμογής».¹ Επίσης, να σημειωθεί πως ο Fauchard ήταν ο πρωτοπόρος της επιστημονικής Στοματικής και Γναθοπροσωπικής Χειρουργικής.¹

Περνώντας στον 19^ο αιώνα ιδρύεται για πρώτη φορά οδοντιατρική σχολή στις ΗΠΑ το 1939 από τον μαθητή του Fauchard, Joseph Lamaire. Με την ανάπτυξή αυτή καταργείται και ο εμπειρικός χαρακτήρας-με την μεταστροφή του σε βιολογική ειδικότητα² – των



εξηγήσεων σε διάφορα θέματα και σημειώνεται η στροφή προς την «επανάσταση» της σύγχρονης Οδοντιατρικής. Ταυτόχρονα, διαγράφεται η άνθηση της ορθοδοντικής με κύριους πρωτοπόρους της των Norman William Kingsley – πατέρας της Ορθοδοντικής – και ο John Nutting Farrar. Ας μην παραληφθεί ότι στα τέλη του ίδιου αιώνα εμφανίζεται ο Αμερικανός Edward Hartley Angle ως ο Θεμελιωτής της επιστημονικής Ορθοδοντικής.³

Η ώσμωση μεταξύ οδοντιατρικής και νέων υλικών και τεχνολογιών έχει ξεκινήσει εδώ και δεκαετίες. Λίγο μετά την ανακάλυψη του αναισθητικού, εφευρέθηκε το οδοντικό τρυπάνι, το οποίο σήμανε την ευρεία διάδοση και χρήση των υλικών πλήρωσης, όπως πυριτικά και αμαλγάματα.⁴

Στη διάρκεια του 20^{ού} αιώνα, η Ορθοδοντική με τους Sandstedt, Calvin C. Cace και Hawley βρίσκεται μπροστά από την αντιμετώπιση των προβλημάτων της εμπειρικής μεθόδου, στα οποία εντάσσονται «οι μεταβολές των ιστών κατά την διάρκεια της μετατόπισης των δοντιών και ιδιαίτερα οι μεταβολές του οστίτη ιστού, ο τρόπος αντίδρασης, ανάπλασης και αύξησής του».² Σημείο αναφοράς του ίδιου αιώνα υπήρξε «η ανάπτυξη των συστημάτων σχεδιομελέτης και παραγωγής με χρήση H/Y, CAD/CAM (σχεδιασμού με την βοήθεια υπολογιστή/ κατασκευή με την βοήθεια υπολογιστή) στα μέσα της δεκαετίας του '60. Τα μοντέλα αυτά με πεδία εφαρμογής τις αυτοκινητιστικές και αεροδιαστημικές βιομηχανίες, είχαν ως στόχο τη «μοντελοποίηση επιφανειών ελεύθερης μορφής και στην συνέχεια τη κατεργασία τους σε εργαλειομηχανές».⁵

Η πρώτη εφαρμογή CAD σημειώνεται το 1963 από τον Ivan Sutherland στην Αμερική με το σύστημα, το οποίο υποβοηθά «την γραφική επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα με πένα φωτός και οθόνη καθοδικών ακτινών». Έπειτα, τη δεκαετία του '70, διαδίδεται μια νέα μέθοδος για τη συλλογή ιατρικών πληροφοριών που βασίζεται σε ακτίνες Χ, την τομογραφική εξέταση ή την ηλεκτρονική τομογραφία (CT).⁶ Σημαντικός σταθμός της πρωτοπορίας αυτής, υπήρξε η δεκαετία του 1980 από την δυσδιάστατη σχεδίαση περνάμε στην τρισδιάστατη απεικόνιση. Με εξειδικευμένες γνώσεις και εργαλεία λογισμικού και παραγωγής προωθείται η απόδοση της επεξεργασίας του προϊόντος. Κάτω από τη διαχείριση του κύκλου ζωής προϊόντος «ενοποιούνται όλες οι παραπάνω τεχνολογίες και ορίζεται η διαδικασία διαχείρισης όλης της ζωής του προϊόντος από την σύλληψη, τον σχεδιασμό, την παραγωγή, την συντήρηση και την απόσυρση του».⁵

Η τεχνολογία CAD/CAM ξεκίνησε την «οδοντική» της ζωή τη δεκαετία του 1970 με τους πρώτους που διερεύνησαν την εφαρμογή της στην οδοντιατρική να είναι ο Duret και ο Preston.⁷ Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η ανακάλυψη από τον Branemark των



ιδιαίτερων ιδιοτήτων του μετάλλου τιτανίου δεν χρειάστηκαν πολύ χρόνο, για να δημιουργήσουν «έκρηξη» στην οδοντιατρική και ειδικά στην οδοντική εμφυτευματολογία. Ακολούθησε το έργο του Moermann το 1983, το οποίο βασίστηκε στην ιδέα ότι οι πληροφορίες, οι οποίες ανακτώνται μέσω ενδοστοματικών σαρώσεων, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από το CAD για την δημιουργία κεραμικών αποκαταστάσεων. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη του συστήματος CEREC® από την εταιρεία Sirona Dental Systems LLC, Charlotte, Nc.⁵ Με αυτόν τον τρόπο, η οδοντιατρική απέδειξε ότι ηγείται των ιατρικών κλάδων «αγκαλιάζοντας» νέα υλικά και νέες τεχνολογίες.

Οι νέες αυτές τεχνολογίες αποτέλεσαν το εφαλτήριο για την άνθηση μιας εναλλακτικής και εξελιγμένης εργαστηριακής και κλινικής ροής εργασίας. Η πρόοδος αυτή οδήγησε στην εκρηκτική ανάπτυξη εταιρειών⁸ από το 1980· έχοντας ως στόχο την εγκαθίδρυση και απορρόφηση των ψηφιακών τεχνολογιών στην οδοντιατρική πρακτική μέσω της παραγωγής υλικών, συστημάτων και μεθόδων παραγωγής φυσικού μοντέλου.⁹

Οι τεχνολογίες CAD/CAM, έδωσαν την δυνατότητα μετατροπής του συνόλου των ψηφιακών δεδομένων σε φυσικό-απτό μοντέλο (προϊόν), κατασκευάζοντας την απαιτούμενη αποκατάσταση. Για την κατασκευή αυτού του φυσικού πρωτοτύπου στην ιατρική ή/και στη βιομηχανία, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μέθοδοι: η αφαιρετική και προσθετική.¹⁰

Στην αφαιρετική μέθοδο, το υλικό αφαιρείται από ένα αρχικό-προκατασκευασμένο μπλοκ, με σκοπό την διαμόρφωση του επιθυμητού σχήματος με χρήση εργαλείων, όπως διαμάντια. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με συμβατική κατεργασία αριθμητικού ελέγχου (NC), όπως η άλεση.¹⁰ Αυτή βασίζεται στη χρήση προσεκτικά σχεδιασμένων κινήσεων εργαλείων. Η κατεργασία αριθμητικού ελέγχου χρησιμοποιείται συνήθως σε μικρές μηχανές κατασκευής μοντέλων για τις οποίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μεταλλικών ή/και κεραμικών στεφανών στην οδοντιατρική.¹⁰

Κατά την προσθετική τεχνική, το προϊόν κατασκευάζεται σταδιακά και σε στρώματα μέσω της σύνδεσης, τήξης ή «στερεοποίησης-πολυμερισμού» των διαφόρων υλικών, που κυκλοφορούν στην αγορά -μέταλλα , ρητίνες, κεριά κ.α. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως Rapid Prototyping, δηλαδή τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) ή καλύτερα για τα δεδομένα της σημερινής εποχής Κατασκευή Πρόσθετων (Additive Manufacturing), αφού αξιοποιείται για την παρασκευή τελικών προϊόντων και όχι απλώς ρεπλίκων, όπως άλλοτε.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αναπτύχθηκε μέσα από την παραδοσιακή και αποτελεί «γέννημα» της ανάγκης για παραγωγή πολύπλοκων ενιαίων αντικειμένων, χωρίς δηλαδή να



δημιουργούνται μικρότερα σύνολα προς συναρμολόγηση, περιορίζοντας ή/και καταργώντας ταυτόχρονα τη λεπτομερή, χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία εξασφάλισης των λεπτομερειών τους. Γενικότερα, η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιεί τηγμένα υλικά, αποτιθέμενα σε στρώσεις και σε αυτά περιλαμβάνονται πλαστικά, μέταλλα, κεραμικά, σκόνες, υγρά ή ακόμα και ζώντα κύτταρα και τρόφιμα.

Εν γένει η τεχνολογία αυτή μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία κατασκευής αντικειμένων μέσω της αξιοποίησης λογισμικού σχεδιασμού με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και υλικού που ανταποκρίνεται στις οδηγίες του λογισμικού. Το 1980 σηματοδοτείται ως η χρονιά εκείνη που εμφανίζονται οι πρώτες τεχνολογίες 3D εκτύπωσης αλλά έχουσες την ονομασία τεχνολογίες Ταχείας Προτυποποίησης (Rapid Prototyping – RP).

Αν και αρκετές φορές λησμονείται, ο Dr Kodama ήταν εκείνος ο οποίος εισήγαγε για πρώτη φορά την ιδέα της τεχνολογίας ΤΠ (Ταχεία Προτυποποίηση). Συγκεκριμένα τον Μάιο του 1980 στην Ιαπωνία κατέθεσε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αλλά δυστυχώς για τον ίδιο η πλήρης περιγραφή δεν κατατέθηκε εντός της επιτρεπτής προθεσμίας. Λίγα χρόνια αργότερα το 1986 ο Charles Hull υπήρξε η μορφή που εισήγαγε την ίδια τεχνολογία σε πραγματικούς όρους με την έκδοση του πρώτου διπλώματος ευρεσιτεχνίας για τη συσκευή στερεολιθογραφίας (Stereo Lithography Apparatus – SLA), έχοντας ως στόχο την εκτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω της χρήσης υπεριώδους ακτινοβολίας. Ο ίδιος επέκτεινε τις δραστηριότητες του με την ίδρυση της 3D Systems Corporation, της εταιρείας που μέχρι σήμερα αποτελεί ηγετική μορφή στον τομέα της 3D εκτύπωσης.

Κατά τη διάρκεια της ίδιας δεκαετίας – στα τέλη του 1980 – το 1988 η εταιρεία του Hull εκδίδει για πρώτη φορά το μηχάνημα SLA-250, ένα μηχάνημα απευθυνόμενο και προσιτό στο κοινό. Έναν χρόνο αργότερα ο Scott Crump κατέθεσε αίτηση διπλώματος για την τεχνολογία FDM. Η σημασία της εν λόγω τεχνολογίας έγκειται στο γεγονός ότι είναι η μοναδική που χρησιμοποιείται από πολλές μηχανές entry-level, με βάση το μοντέλο RepRap ανοιχτού κώδικα.

Σημαντικός σταθμός αποτελεί επίσης η χρονιά του 1996 όταν ο όρος “3D εκτυπωτής” χρησιμοποιείται για πρώτη φορά για μηχανήματα ταχείας προτυποποίησης και το 1999 «παράγεται» το πρώτο τρισδιάστατα εκτυπωμένο όργανο. Λίγα χρόνια αργότερα στη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα και συγκεκριμένα το 2007 υπήρξε η χρονιά που σηματοδότησε το σημείο καμπής για την προσβάσιμη τεχνολογία της 3D εκτύπωσης, όταν το μοντέλο RepRap ριζώσε. Δίχως αμφιβολία μπορούμε να παρατηρήσουμε πως η εκτύπωση 3D έχει



εισβάλλει σε πολυάριθμους τομείς της επιστήμης και της καθημερινής ζωής, καλύπτοντας βασικές ανάγκες του ανθρώπου. Εφαρμόζεται σε πολλές βιομηχανικές μονάδες του κατασκευαστικού και ενεργειακού κλάδου αλλά και των τροφίμων και πρωτοτύπων, στην παραγωγή ανταλλακτικών και τεχνητών άκρων και στην κατασκευή γεφυρών.

Εν ολίγοις, τα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν πλέον γίνει μια αποδεκτή τεχνολογία στα περισσότερα σύγχρονα οδοντιατρικά εργαστήρια και επιχειρηματίες-κλινικούς στην οδοντιατρική και ιατρική πράξη.⁴ «Η εξέλιξη αυτών μέχρι και σήμερα είναι ραγδαία και συμπεριλαμβάνει τις πιο εξελιγμένες τεχνικές, βελτιωμένη εφαρμογή, βελτιωμένο αισθητικό αποτέλεσμα και μια ευρύτερη ποικιλία από επιλογές υλικών κι αποχρώσεων για τον κλινικό ιατρό και τον οδοντικό τεχνολόγο».⁴ Σήμερα κατασκευάζονται αισθητικές και λειτουργικές κατασκευές όπως ένθετα, επένθετα, στεφάνες μερικής και ολικής επικάλυψης, όψεις, γέφυρες, ορθοδοντικά μηχανήματα και γναθοπροσωπικές αποκαταστάσεις.⁴



ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΗΣ

1.1.ΟΡΙΣΜΟΣ

«Η Ορθοδοντική είναι η ειδικότητα της Οδοντιατρικής με αντικείμενο τη μελέτη της αύξησης και διάπλασης του οδοντοφατνιακού και γναθοπροσωπικού συστήματος καθώς και της πρόληψης, καταστολής και θεραπείας τυχόν ανωμαλιών και δυσαρμονίας των συστημάτων αυτών».²

Στόχος της ορθοδοντικής ειδικότητας αποτελεί η αποκατάσταση της σωστής λειτουργίας του στοματογναθικού συστήματος: πρωτίστως των λειτουργιών της μάσησης, φώνησης και αναπνοής και δευτερευόντως της αισθητικής και λειτουργικής εναρμόνισης μεταξύ της οδοντοφατνιακής και γναθοπροσωπικής περιοχής. Ειδικότερα, η προσφορά της ορθοδοντικής βασίζεται στην αναχαίτιση σοβαρών γναθοπροσωπικών ανωμαλιών και στην πρόληψη σοβαρών επιπλοκών, αξιοποιώντας βιολογικές μεθόδους με τις λιγότερες δυνατές ιατρικές επεμβάσεις για την επίτευξη της ταχύτερης και αποτελεσματικότερης θεραπείας.²

1.2 ΣΚΟΠΟΙ ΤΗΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΗΣ

Οι σκοποί της Ορθοδοντικής διακρίνονται σε βασικούς και σε δευτερεύοντες.

Οι βασικοί σκοποί απαρτίζονται από τον αισθητικό, λειτουργικό και ψυχολογικό.²

Στον αισθητικό, ο κλινικός μέσω προληπτικών μεθόδων, κατασταλτικών-θεραπευτικών τεχνολογοβιολογικών μέσων, επιτυγχάνει την εναρμόνιση και φυσιολογική λειτουργία της οδοντοφατνιακής και γναθικής περιοχής με το πρόσωπο και την κεφαλή, αποκαθιστώντας τη φυσιολογική «συνεργασία» των μαλακών ιστών του στόματος, των δοντιών, των μυών και των οστών του προσώπου.²

Στον λειτουργικό, επιδιώκεται η φυσιολογική και ταυτοχρόνως αρμονική σχέση και σύγκλιση των γνάθων μεταξύ τους. Καθώς σε αντίθετη περίπτωση, παρατηρείται επιβάρυνση των περιοδοντικών ιστών, έχοντας άμεσα αποτελέσματα στις μασητικές και λειτουργικές ικανότητες, στην ομιλία, στην κατάποση και γενικότερα στην νευρομυϊκή συμπεριφορά και ισορροπία του στοματογναθικού συστήματος.²



Στον ψυχολογικό, ο ειδικός ορθοδοντικός ενδιαφέρεται για τη ψυχική υγεία του ασθενούς, στην οποία παρατηρείται έντονο αίσθημα ανασφάλειας και κατωτερότητας εξαιτίας των τυχουσών δυσμορφιών του προσώπου. Αυτό έχει σοβαρές επιπτώσεις στην κοινωνική ζωή και συμπεριφορά του ατόμου, επηρεάζοντας όλες τις διαπροσωπικές του σχέσεις σε εργασιακό και προσωπικό επίπεδο.²

Όσον αφορά στους δευτερεύοντες σκοπούς της Ορθοδοντικής, αυτοί συνοψίζονται στη διευκόλυνση και αποκατάσταση της ρινικής αναπνοής και της θέσης της γλώσσας, τη βελτίωση της στοματικής υγιεινής και τέλος τη βελτίωση των συνθηκών για μελλοντικές προσθετικές αποκαταστάσεις.^{1,2}

1.3 ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΗΣ ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ

Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση και θεραπεία των εκάστοτε συγκλεισιακών και σκελετικών ανωμαλιών του κάθε περιστατικού, η σύγχρονη Ορθοδοντική επιλύει τις προκλήσεις αυτές μέσω τριών βαθμίδων θεραπείας. Αυτές συγκροτούνται από την πρόληψη, την καταστολή και την πλήρη εκτεταμένη επανορθωτική θεραπεία.²

Κατά το επίπεδο της πρόληψης διαγιγνώσκονται και απομακρύνονται όλοι εκείνοι οι παράγοντες, οι οποίοι κρίνονται επιβλαβείς για την ομαλή διάπλαση και εξέλιξη της σύγκλεισης του ανθρώπου, όπως είναι οι καταστροφές ή οι πρόωρες απώλειες νεογιλών δοντιών, κληρονομικότητα και διάφορες βλαβερές στοματικές έξεις. Γι' αυτόν τον λόγο ο κλινικός ορθοδοντικός δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στην όλη υγεία του παιδιού, στη νεογιλή και μόνιμη οδοντοφυΐα και στις στοματικές συνήθειες.²

Όταν «μεταφερόμαστε» στο επίπεδο της κατασταλτικής ορθοδοντικής θεραπείας, η αντιμετώπιση εστιάζει στην αναχαίτηση της πλήρους εκδήλωσης και επιδείνωσης της ήδη αναπτυσσόμενης συγκλεισιακής ανωμαλίας. Πλέον αναφερόμαστε σε επέμβαση στο στάδιο είτε της νεογιλής είτε της μικτής οδοντοφυΐας, δηλαδή στην περίοδο κατά την οποία η στοματική κοιλότητα του ατόμου αποτελείται και από νεογιλά και από μόνιμα δόντια. Η κατασταλτική θεραπεία συνήθως απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα εφαρμογής και ταυτόχρονα γίνεται προσαρμογή της νευρομυϊκής συμπεριφοράς.²

Στην περίπτωση εκείνη, στην οποία δεν προσφέρεται η δυνατότητα έγκαιρης πρόληψης ή επέμβασης, απαιτείται πλέον μία πιο επεμβατική μέθοδος: η πλήρης επανορθωτική θεραπεία. Η θεραπεία αυτή στηρίζεται στη διόρθωση, πλέον, των



οδοντογναθικών ανωμαλιών. Για την επίτευξή της γίνονται εκτεταμένες μετακινήσεις δοντιών ή έλεγχος της διεύθυνσης αύξησης των ιστών του προσώπου προς την «επιβολή» της υγιούς στοματογναθικής λειτουργίας.²

Ολοκληρώνοντας με επιτυχία την ορθοδοντική θεραπεία, ο ορθοδοντικός έχει συμβάλει στη ψυχική και σωματική υγεία του ασθενούς: έχοντας επιφέρει ιστική ισορροπία, μέγιστη ικανότητα μάσησης, αισθητική αρμονία και ισορροπία της νερομυϊκής συμπεριφοράς. Οι συγκλεισιακές σχέσεις έχουν αποκατασταθεί, η ανάπτυξη των ιστών έχει προσαρμοστεί και οι μετακινήσεις των δοντιών συμβάλλουν στην αισθητική βελτίωση του ατόμου. Έτσι, ο κλάδος της ορθοδοντικής σε συνεργασία με τους υπόλοιπους κλάδους της οδοντιατρικής συμμετέχουν στην απλοποίηση και βελτίωση των καθημερινών προκλήσεων που αντιμετωπίζουν πολλά άτομα της κοινωνίας μας εξαιτίας στοματογναθικών ανωμαλιών.



2.ΕΚΜΑΓΕΙΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την επίτευξη ενός ολοκληρωμένου και επιτυχημένου σχεδίου θεραπείας – όπως μπορούμε να καταλήξουμε βάσει των προαναφερθέντων – ο ορθοδοντικός κλινικός απαιτείται να γνωρίζει σε βάθος όλους εκείνους τους ανατομικούς και λειτουργικούς μηχανισμούς που συμβάλλουν στη λειτουργία του στοματογναθικού συστήματος, όπως και να κατέχει τις απαραίτητες εκείνες γνώσεις και εμπειρία γύρω από την Οδοντιατρική-Ορθοδοντική επιστήμη. Παράλληλα όμως για τη διάγνωση, τον σχεδιασμό αντιμετώπισης και την κατασκευή-προσαρμογή των ποικίλων εκείνων ορθοδοντικών μηχανημάτων, αναγκαίο κρίνεται ο κλινικός να «συλλέξει» όλες τις δυνατές πληροφορίες γύρω από έναν ασθενή.

Οι πληροφορίες αυτές τις οποίες θα χρειαστεί ο ιατρός απαρτίζονται συνοπτικά: από το ιατρικό ιστορικό, τις διάφορες-πιθανές έξεις, τις στοματικές συνήθειες υγιεινής, τη γενικότερη υγεία του ασθενούς και τα ανατομικά στοιχεία της στοματικής κοιλότητας, όπως οι οδοντικοί φραγμοί της άνω και κάτω γνάθου, οι ιστοί που τις περιβάλλουν οι φατνιακές αποφύσεις, η υπερώα, οι χαλινοί, η ουλοχειλική και ουλοπαρειακή αύλακα. Για τη λήψη αυτών τη σήμερα εποχή χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται η αξονική τομογραφία (CT-Commuted Tomography), οι ενδοστοματικές σαρώσεις, οι ακτινογραφίες και η λήψη αποτυπωμάτων. Αξιοποιώντας τις τεχνικές αυτές οι εργαστηριούχοι και/ή οι ορθοδοντικοί, δημιουργούν ένα αντίγραφο των γνάθων και ιστών του στόματος είτε στον υπολογιστή είτε σε υλική μορφή, πάνω στο οποίο βασίζεται όλη η μετέπειτα θεραπεία.

Στην παρούσα πτυχιακή, οι τεχνικές συλλογής των πληροφοριών ξεφεύγουν του θέματος μας και δεν θα γίνει εκτενής αναφορά αυτών. Αντίθετα, θα εστιάσουμε στην κατασκευή και αξιολόγηση των απτών αυτών αναπαραστάσεων, τα οποία καλούνται «εκμαγεία». Θα αναλύσουμε και θα εξηγήσουμε, όμως, όλα εκείνα τα στάδια για την κατασκευή των συμβατικών εκμαγείων από γύψο, τα οποία αποτελούν τη χρυσή σταθερά για την παρακολούθηση και τεκμηρίωση της εξέλιξης της θεραπείας, που για δεκαετίες χρησιμοποιούνται στην καθημερινή εργαστηριακή πράξη.^{11,12,13} Ακολούθως, θα έρθουμε σε πρώτη επαφή με τα εκτυπωτικά συστήματα και τον τρόπο με τον οποίο φτάνουμε μέσω αυτών στην κατασκευή τυπωμένων εκμαγείων με τρισδιάστατη εκτύπωση.



2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ

Εκμαγείο ονομάζεται η θετική αναπαράσταση ενός αντικειμένου. Στην Οδοντιατρική συγκεκριμένα, αποτελεί τη θετική αναπαράσταση των ανατομικών στοιχείων της στοματικής κοιλότητας, ανεξαρτήτως τού αν αναπαρίστανται νωδές ή ενόδοντες ακρολοφίες.^{14,15,16} Τα εκμαγεία αποτελούν τα ομοιώματα της άνω ή/και της κάτω γνάθου πάνω στα οποία, κατά τα ποικίλα οδοντιατρικά στάδια, κατασκευάζονται οι οδοντικές προσθέσεις και τα ορθοδοντικά μηχανήματα και ταυτοχρόνως εξυπηρετούν στη μελέτη του εκάστοτε περιστατικού.



Εικόνα 1. Εκμαγεία με νωδές-ενόδοντες ακρολοφίες.¹⁴

2.3 ΕΙΔΗ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ

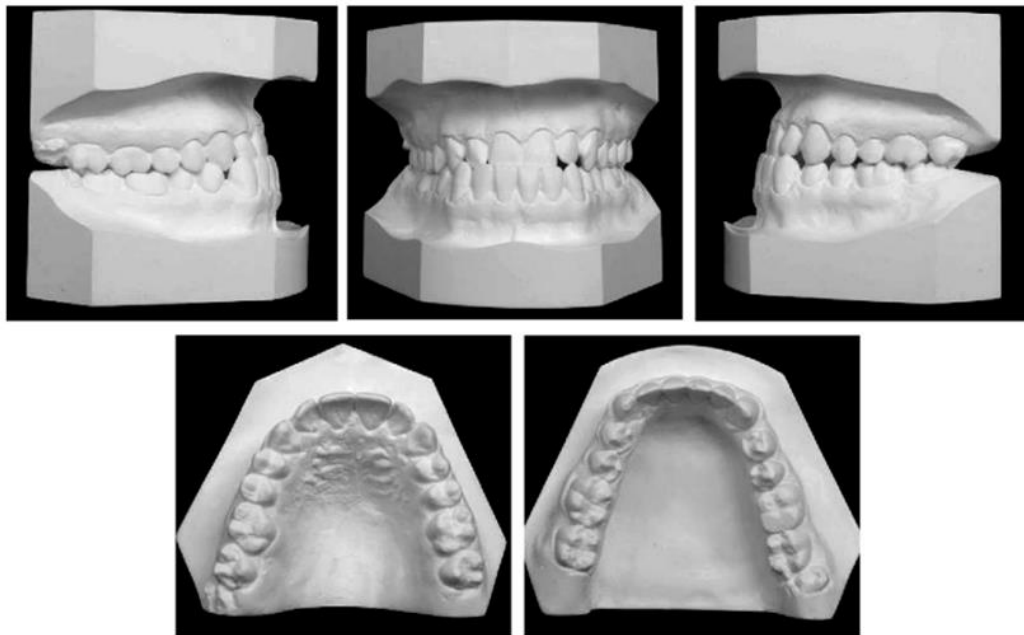
Στην εργαστηριακή ορθοδοντική πράξη, οι οδοντικοί τεχνολόγοι και οι ιατροί χρησιμοποιούν δύο τύπους εκμαγείων: τα εκμαγεία μελέτης και τα εκμαγεία εργασίας.

Τα εκμαγεία μελέτης της άνω και της κάτω γνάθου χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και την ανάλυση του περιστατικού, προκειμένου να αποφασισθεί το είδος της θεραπείας που θα ακολουθήσει ο ορθοδοντικός. Αντίθετα από τα εκμαγεία εργασίας, στα εκμαγεία μελέτης δίνεται μεγάλη βαρύτητα στη σωστή αποτύπωση (ορθή λήψη αποτυπώματος και κέρινου δαγκώματος), υψηλή ακρίβεια και ορθή κατασκευή τους. Βασικός ρόλος αυτών στην ορθοδοντική θεραπεία αποτελεί η διευκόλυνση στο διαγνωστικό και θεραπευτικό στάδιο της κλινικής διαδικασίας.¹⁴ Στα εκμαγεία μελέτης αναπαρίστανται με μεγάλη πιστότητα και ακρίβεια η σχέση των οδοντικών τόξων, το ανατομικό σχήμα και η θέση των δοντιών στο



οδοντικό τόξο, η σχέση των δοντιών με τα παρακείμενα, η κεντρική σχέση και θέση των γνάθων, η θέση της νωδής περιοχής (αν υπάρχει) και το σχήμα της ακρολοφίας, καθώς και οι πρόωρες επαφές και γενικά οι ανωμαλίες της σύγκλεισης.¹⁴

Τα εκμαγεία εργασίας είναι εκείνα πάνω στα οποία θα κατασκευαστούν τα ορθοδοντικά μηχανήματα και συμβάλλουν στη μελέτη του περιστατικού. Ο τρόπος κατασκευής τους είναι ίδιος με τα συνήθη εκμαγεία, τα οποία προορίζονται για οδοντοτεχνικές εργασίες.¹⁶ Αυτά δεν απαιτούν την ακρίβεια που επιζητούμε στα εκμαγεία της προσθετικής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στο στόμα του ασθενούς παρατηρείται μια συνεχής μεταβολή των ιστών τόσο λόγω των ορθοδοντικών εργασιών όσο και λόγω της ηλικιακής μεταβολής· όπως και επίσης, στο γεγονός ότι οι περισσότερες ορθοδοντικές συσκευές δεν επηρεάζονται ούτε έρχονται σε επαφή με τις μασητικές επιφάνειες των δοντιών.



Εικόνα 2. Εκμαγεία μελέτης III τάξης κατά Angle.¹⁷



2.4. ΥΛΙΚΟ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ-ΓΥΨΟΣ



Εικόνα 3. Διαφορετικά είδη οδοντιατρικής γύψου.¹⁸

Στην Ορθοδοντική για τη δημιουργία των ομοιωμάτων των γνάθων χρησιμοποιείται διάφορες μορφές οδοντιατρικών γύψων. Η γύψος είναι ένα ορυκτό με ειδικό βάρος 2.30-2.34 και σκληρότητα 1.5-2.0 της εμπειρικής κλίμακας Mohs.¹⁹ Συνήθως βρίσκεται με μορφές προσμίξεων, οι οποίες φθάνουν μέχρι και 10% σε διάφορα ορυκτά.¹⁷ Για την παρασκευή της οδοντιατρικής γύψου χρησιμοποιούνται συνήθως οι ποικιλίες, όπως ο σεληνίτης κρυσταλλικής μορφής (διαφανής-άχρωμος) και η άμορφη γύψος (λευκή-αδιαφανής). Χημικά η γύψος αποτελείται από διένυδρο θεικό ασβέστιο $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ενώ στη φύση μπορεί να βρεθεί με τη μορφή του ανυδρίτη της CaSO_4 .¹⁹

Στην Οδοντιατρική γενικά χρησιμοποιούνται πέντε είδη γύψου. Αυτά είναι η αποτυπωτική, η κοινή, η οδοντιατρική, η σκληρή και υπέρσκληρη γύψος.¹⁴ Στην κατασκευή εκμαγείων όμως γίνεται η χρήση των τεσσάρων τελευταίων κατηγοριών. Σε αυτές παρατηρείται αύξουσα πορεία βελτίωσης των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων τους, καθώς «προχωράμε» από την κοινή προς την υπέρσκληρη. Αυτή είναι και η αιτία που καθεμία από αυτές τις κατηγορίες χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές εργασίες.

Ειδικότερα, η κοινή γύψος, γύψος εκμαγείων ή γύψος των Παρισίων (τύπου II) δεν είναι κατάλληλη για εκμαγεία και προτιμάται για δευτερεύουσες εργασίες, όπως ανάρτηση εκμαγείων σε αρθρωτήρα.^{14,19} Η σκληρή γύψος (τύπου III) είναι αυτή η οποία επικρατεί κατά κόρον στην Ορθοδοντική και είναι κατ' εξοχήν υλικό εκλογής για όλες τις εργαστηριακές τεχνικές, όπως εκμαγεία μελέτης και βάσεις εκμαγείων εργασίας.¹⁹ Μετά τον τύπο III ακολουθεί ο τύπος IV 'σπανίως εμφανίζεται στην καθημερινή εργαστηριακή



ορθοδοντική πράξη, ενώ αντιθέτως αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στην προσθετολογία. Διαθέτει ικανοποιητική αντοχή και της καλύτερες ιδιότητες έναντι των άλλων τύπων.¹⁴

2.5. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ

Υποχρέωση κάθε Οδοντικού Τεχνολόγου και κάθε Οδοντιάτρου αποτελεί η εμβρίθεια όλων εκείνων των παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν τις ιδιότητες των εκμαγείων. Αυτοί οι παράγοντες συμπίπτουν με τους παράγοντες, που καθορίζουν τις ιδιότητες της γύψου. Γι' αυτόν τον λόγο, θα πρέπει να δίνεται η απαραίτητη προσοχή κατά τον χειρισμό-επεξεργασία και την αποθήκευση αυτής, για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος και την αποφυγή επιπλοκών, οι οποίες θα οδηγήσουν στην υποβάθμισή της πιστότητας των εκμαγείων. Συγκεκριμένα, οι ιδιότητες στις οποίες αναφερόμαστε, απαρτίζονται από τον χρόνο πήξης, την διαστολή πήξης, την υγροσκοπική διαστολή και τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες (επιφανειακή σκληρότητα, αντοχή, πυκνότητα κ.α.).^{14,19}

Αρχικά, όλες οι προαναφερθείσες ιδιότητες ρυθμίζονται πρώτα από το είδος της γύψου. Καθώς, όπως έχει ήδη διατυπωθεί διαφορετικά χαρακτηριστικά παρατηρούνται στην κάθε κατηγορία.¹⁴ Αυτό έγκειται στο διαφορετικό σχήμα και μέγεθος των κόκκων, στο οποίο παρατηρείται αύξουσα ομαλοποίηση από την κοινή προς την υπέρσκληρη γύψο.¹⁴ Στις κατηγορίες, δηλαδή, της σκληρής και της υπέρσκληρης οι κόκκοι παρουσιάζονται πυκνοί, έχοντας κανονικό σχήμα, ενώ στην κοινή παρατηρείται ακανόνιστο σχήμα (εκμαγεία με πορώδη υφή).¹⁴ Αυτός θα μπορούσε να καθοριστεί ως ο πρώτος παράγοντας που εμπλέκεται στην απόδοση των επιθυμητών ιδιοτήτων των εκμαγείων.¹⁴

Η ορθή επιλογή του είδους είναι και αυτή που καθορίζει την αναλογία νερού σκόνης, ενός από τους σημαντικότερους παράγοντες επιρροής των ιδιοτήτων της. Η αλληλένδετη σχέση αυτών επηρεάζει άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες της πηγμένης γύψου. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερη ποσότητα νερού στο μείγμα οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο πήξης, λόγω ύπαρξης λιγότερων πυρήνων κρυστάλλων, μειώνοντας έτσι τον ρυθμό αντίδρασης.¹⁹ Παραλλήλως, περισσότερο νερό συμβάλλει στη δημιουργία μιας λιγότερο πυκνής και συμπαγούς μάζας με αυξημένους πόρους και χαμηλή αντοχή στη θλίψη και συνεπώς χαμηλές μηχανικές ιδιότητες.¹⁹ Αντίστοιχα, ελάττωση της αναλογίας της σκόνης έχει ως αποτέλεσμα, τη δημιουργία λιγότερων πυρήνων κρυσταλλώσεως, άρα μικρότερη διαστολή



πήξης (η διόγκωση κατά τη μετατροπή της ημιένυδρης μορφής της γύψου σε διένυδρη) και υγροσκοπική διαστολή (διαστολή λόγω πήξης εντός του νερού).¹⁹

Ο επόμενος παράγοντας, τον οποίο θα αναλύσουμε, αφορά στον τρόπο χειρισμού του υλικού, δηλαδή τη διαδικασία της ανάδευσης.¹⁴ Ο τρόπος ανάδευσης επιφέρει αλλαγές στον χρόνο πήξης, καθώς και στη διαστολή της γύψου.¹⁴ Η παράταση και η ταχύτητα της ανάδευσης, όσο αυξάνονται, τόσο μειώνουν παραλλήλως και τον χρόνο πήξης. Αυτό συμβαίνει, επειδή μετά την πρώτη επαφή της σκόνης με το νερό, «πυροδοτείται» η αντίδραση με τον σχηματισμό των πρώτων κόκκων. Έτσι, συνεχής ανάδευση προκαλεί διάσπαση των ήδη υπαρχόντων πυρήνων προς δημιουργία μεγαλύτερου αριθμού, συνεπώς και ταχύτερης πήξης.^{14,17} Τέλος, σημειώνεται αύξηση της διαστολής πήξης και απουσία αλλαγών στις μηχανικές ιδιότητες.

Εν συνεχεία, στη λήψη της επιθυμητής σύστασης της γύψου συμβάλλει και η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το νερό, όπως και το περιβάλλον. Αυτή τροποποιεί τις φυσικές ιδιότητες, κυρίως τον χρόνο πήξης. Αύξηση της θερμοκρασίας έως και τους 37°C επιταχύνει τον χρόνο αυτής, ενώ σε θερμοκρασίες άνω των 37°C καταγράφεται μείωση αυτού. Σε βαθμούς πλέον άνω των 100°C γίνεται αναστολή της όλης αντίδρασης.¹⁴

Δεν πρέπει επίσης να παραλειφθεί και η αναφορά στις συνθήκες φύλαξης, οι οποίες αποτελούν έναν εξίσου σημαντικό παράγοντα. Η κακή αποθήκευση θα υπονομεύσει τις ιδιότητες του υλικού, αποφέροντας ανεπανόρθωτες επιπλοκές στη μετέπειτα επεξεργασία του. Εξαιτίας της υδρόφιλης φύσης της γύψου, παραδείγματος χάριν αν αυτό διατηρείται σε περιβάλλον με υγρασία, οι κρύσταλλοι θα την απορροφήσουν και θα ενυδατωθούν, καθιστώντας δύσκολη έως και αδύνατη την επαφή αυτών με το νερό κατά την ανάμιξη τους.^{14,19}

Έπειτα, ο τελευταίος παράγοντας ο οποίος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να δίνεται η απαραίτητη προσοχή, είναι η αποφυγή προσμίξεων ξένων σωμάτων. Ως ξένα σώματα αναφέρονται το αίμα, το σάλιο και υπολείμματα αποτυπωτικού υλικού (άγαρ ή αλγινικό νάτριο). Η επαφή αυτών με την επιφάνεια της γύψου, έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφησή τους εντός των πυρήνων των κρυστάλλων, κάτι το οποίο εμποδίζει τη διάλυση του θειικού ασβεστίου.¹⁹ Κατά συνέπεια, καθυστερούν την πήξη της γύψου¹⁴ και αποδίδουν μια εύθρυπτη και ανώμαλη επιφάνεια στο εκμαγείο.¹⁹ Για να αποφευχθεί αυτό, συνιστάται επισταμένη έκπλυση των αποτυπωμάτων και εν συνεχεία απομάκρυνση του περισσευούμενου νερού, αποφεύγοντας την πλήρη αφυδάτωση αυτών.^{7,11}



Συμπληρωματικά όσων προαναφέρθηκαν, για τον έλεγχο και την προστασία του υλικού σήμερα προστίθενται στη γύψο διάφορες χημικές ουσίες, οι οποίες εκτός της δυνατότητας περιορισμού της διαστολής πήξης (K_2SO_4), ρυθμίζουν και το χρονικό διάστημα αυτής, αυξάνοντας ή ελαττώνοντας τον αριθμό των πυρήνων κρυστάλλωσης. Χάρη σε αυτό, επιταχύνεται ή επιβραδύνεται αντίστοιχα η αντίδραση πήξης. Ως ουσίες οι οποίες επιταχύνουν την αντίδραση παρουσιάζονται το K_2SO_4 , $NaCl$ ή Na_2SO_4 και ανάλογες που επιφέρουν επιβράδυνση οι Na_2CO_3 , K_2CO_3 και ο βόρακας, όπως και σε μεγαλύτερες ποσότητες το $NaCl$ ή Na_2SO_4 .

Ανακεφαλαιώνοντας, η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εκμαγείων, η τήρηση των διαφόρων προδιαγραφών και οδηγιών του κατασκευαστή, όπως και οι προσεκτικοί χειρισμοί του αποτυπώματος και της γύψου αποτελούν τα «θεμέλια» για τον έλεγχο όλων εκείνων των παραγόντων, οι οποίοι θα αποδώσουν ένα πιστό και ακριβές εκμαγείο. Για την απόδοση αυτού, οι βασικές πληροφορίες που δόθηκαν, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

	Χρόνος πήξης	Πυκνότητα	Διαστολή πήξης	Επιφανειακή σκληρότητα
Αύξηση της αναλογίας σκόνης / νερού	Αυξάνει	Αυξάνει	Μειώνεται	Μειώνεται
Αύξηση του χρόνου ανά-δευσης	Μειώνεται	Μειώνεται	Αυξάνει	Δεν επηρεάζεται
Αύξηση της θερμοκρασίας του νερού από 23°C σε 30°C	Μειώνεται	Μειώνεται	Αυξάνει	Δεν επηρεάζεται



2.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ

2.6.1 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ-ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ



Εικόνα 4. Αποτύπωμά άνω γνάθου.²⁰

Το άλφα και το ωμέγα για την κατασκευή κάθε ακριβούς και καλά οριοθετημένου εκμαγείου αποτελεί το αρχικό αποτύπωμα. Το αποτύπωμα είναι η αρνητική αναπαράσταση της στοματικής κοιλότητας· γενικά του στοματογναθικού συστήματος και ειδικά των ιστών του στόματος.¹ Γι' αυτόν τον λόγο, «οι σωστοί χειρισμοί του αποτυπώματος από την λήψη του έως και την κατασκευή του εκμαγείου, η εκλογή των κατάλληλων υλικών, η γνώση των ιδιοτήτων τους και η τήρηση των οδηγιών του κατασκευαστή»¹⁴ είναι από τους βασικούς παράγοντες που πρέπει ένας οδοντικός τεχνολόγος να προσέξει.

Η λήψη του αποτυπώματος γίνεται με τη χρήση δισκαρίου του εμπορίου ή ατομικού δισκαρίου, τα οποία δημιουργούνται για τον συγκεκριμένο ασθενή.¹⁴ Το σύνηθες αποτυπωτικό υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται στον κλάδο της Ορθοδοντικής είναι το υδροκολλοειδές αλγινικό αποτυπωτικό υλικό. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερη αδυναμία διατήρησης των διαστάσεων των ιστών που αποτυπώθηκαν. Αυτά τα υλικά είναι υδρόφιλα και εξαιτίας αυτού αποβάλλεται μεγάλη ποσότητα του νερού τους, αποφέροντας συρρίκνωση και αλλοίωση του αποτυπώματος. Έτσι, σκόπιμο κρίνεται για την προφύλαξη των ανατομικών στοιχείων, η άμεση κατασκευή του εκμαγείου. Σε διαφορετική περίπτωση, αυτό θα πρέπει να διατηρείται σε περιβάλλον 100% υγρασίας για διάστημα μικρότερο της μισής ώρας. Διαφορετικά το υλικό θα προσροφήσει νερό και θα οδηγηθεί σε διογκώσεις και παραμορφώσεις.



Εξίσου βασικό στάδιο, το οποίο παρεμβάλλεται της λήψης του αποτυπώματος και της κατασκευής του εκμαγείου, θεωρείται η απολύμανση. Αρχικά, ξεπλένουμε με άφθονο τρεχούμενο νερό, ώστε να απομακρυνθούν υπολείμματα τροφών, σάλιου και αίματος από το αποτύπωμα. Έπειτα, για την αποφυγή μετάδοσης ασθενειών, όπως Ηπατίτιδας Β, C, του ιού HIV και πολλών άλλων, γίνεται εμβάπτιση των αποτυπωμάτων σε αντισηπτικά διαλύματα, που προορίζονται για το συγκεκριμένο υλικό.¹⁴ Ειδικότερα, για τα υδροκολλοειδή αλγινικά συνιστώνται το υποχλωριώδες νάτριο 1:10 και τα διάφορα ιωδοφόρα 1:213.¹⁴ Τα αντισηπτικά, τέλος, βοηθούν και στη δημιουργία μιας ομοιογενούς επιφάνειας χωρίς να επηρεάζουν την ακρίβεια της αποτύπωσης.

Ένα αποτύπωμα προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στην ορθοδοντική εργασία εκτός από τα δόντια θα πρέπει να έχει αποτυπώσει με μεγάλη ακρίβεια τις φατνιακές αποφύσεις, τα γναθιαία κυρτώματα, την ουλοπαραειακή/ουλοχειλική και ουλογλωσσική αύλακα όπως και τις καταφύσεις των χαλινών του χείλους και των παρειών.^{1,21} Τέλος, αυτά πρέπει να είναι ελεύθερα ατελειών, όπως πόρων, κενών και αποκολλήσεων από τα τοιχώματα του δισκαρίου.³

2.6.2 ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ

Πριν παραθέσουμε τα στάδια της κατασκευής, χρήζει ιδιαίτερης αναφοράς τα τρία επίπεδα προσανατολισμού, τα οποία κατά τη διαμόρφωση των εκμαγείων μελέτης κάθε οδοντικός τεχνολόγος τηρεί. Αυτά είναι:

- Το επίπεδο της μέσης υπερώιας ραφής, το οποίο καθορίζεται από δύο σημεία: το σημείο επαφής μεταξύ δεύτερης και τρίτης υπερώιας πτυχής του βλεννογόνου και το οπισθιότερο διακριτό σημείο στην υπερώια ραφή.²¹
- Το επίπεδο που εφάπτεται στα γναθιαία κυρτώματα της άνω γνάθου και το οποίο φέρεται κάθετα στο επίπεδο της μέσης υπερώιας ραφής.²¹
- Το μασητικό επίπεδο, το οποίο φέρεται κάθετα τόσο στο επίπεδο που εφάπτεται στα γναθιαία κυρτώματα της άνω γνάθου όσο και στο επίπεδο της μέσης υπερώιας ραφής.²¹



Η διαδικασία, η οποία ακολουθείται στην παρασκευή των εκμαγείων είναι η εξής:¹⁶

- Αρχικά προετοιμάζεται ο πολτός της γύψου. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας στο σκεύος ανάδευσης πρώτα την ποσότητα του νερού και μετά αυτή της γύψου. Ανεξαρτήτως τού αν αυτό προορίζεται για χειροκίνητη ανάδευση ή χρήση συσκευής κενού αέρος. Οι αναλογίες θα πρέπει να είναι πάντα σύμφωνες με αυτές που αναφέρει ο κατασκευαστής.
- Έπειτα, το αποτύπωμα τοποθετείται στον δονητή σε χαμηλή ταχύτητα και πραγματοποιείται αργή έγχυση της γύψου· αρχίζοντας από τα πίσω δόντια, συνεχίζουμε στα πρόσθια και ολοκληρώνουμε στα οπίσθια του αντίθετου τεταρτημορίου, έως ότου να γίνει ολική πλήρωση όλων των δοντιών, μέχρι το ύψος της φατνιακής ακρολοφίας (ανατομικό τμήμα). Η τεχνική αυτή επιδιώκει την αποφυγή εγκλεισμού φυσαλίδων στη μάζα της γύψου, ώστε να αποδοθούν με μεγαλύτερη πιστότητα και ακρίβεια οι ανατομικές περιοχές.
- Στη συνέχεια, η γύψος αφήνεται να στερεοποιηθεί μερικώς (αναμονή περίπου 15') και προετοιμάζεται η δεύτερη μάζα της γύψου, η οποία θα αποτελέσει τη βάση του εκμαγείου (τεχνικό τμήμα). Γίνεται χρήση ειδικών ελαστικών μητρών, οι οποίες διαφέρουν για την άνω και κάτω γνάθο, οι οποίες γεμίζονται με τον πολτό, αφήνονται για μερικά λεπτά και ακολούθως εμβυθίζεται το δισκάριο με το αποτύπωμα. Προσέχουμε να υπάρχει επαρκής χώρος γύρω από το εκμαγείο, καθώς και να μη βυθιστεί το δισκάριο.
- Τέλος, διαμορφώνονται και αφαιρούνται οι περίσσιες της γύψου. Έπειτα, αφήνεται να στερεοποιηθεί ολοκληρωτικά, για περίπου μία ώρα. Μετά το πέρας αυτής, απομακρύνονται οι πλαστικές μήτρες και αν δεν παρατηρηθούν ατέλειες, τα εκμαγεία μας είναι έτοιμα για στίλβωση – σε περίπτωση που επιθυμούμε.
- Σε αντίθετη περίπτωση, συμπληρώνουμε τυχόν κενά από φυσαλίδες. Λειαίνουμε τις επίπεδες επιφάνειες με ειδικές φρέζες γυαλίσματος κάτω από τρεχούμενο νερό. Εξομαλύνουμε τις ακμές προσέχοντας να μην καταστρέψουμε τα ανατομικά μέρη των εκμαγείων.¹⁶
- Για τη στίλβωση χρησιμοποιούμε ειδικό διάλυμα γυαλίσματος (σαπούνι και αλισίβα), στο οποίο εμβαπτίζουμε τα εκμαγεία για μισή με μία ώρα περίπου και τα λειαίνουμε με βαμβάκι και ζεστό νερό. Αφήνουμε τα εκμαγεία να στεγνώσουν για 24 ώρες.¹⁶



2.6.3 . ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΕΚΜΑΓΕΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για να θεωρούνται κατάλληλα τα εκμαγεία μελέτης θα πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Να μην παρατηρούνται πόροι, οι οποίοι έχουν ως επακόλουθο μειωμένη αντοχή και δημιουργία ανωμαλιών στην επιφάνεια του.³
2. Να έχουν επιφάνεια σκληρή, λεία χωρίς ατέλειες.¹⁴
3. Να αναπαρίστανται με ακρίβεια και πιστότητα όλες οι λεπτομέρειες του αποτυπώματος, δηλαδή η οδοντοφατνιακή περιοχή, η συνήθης σύγκλειση των οδοντικών φραγμών και η σχέση των φατνιακών και οστικών βάσεων.¹⁴
4. Να μην παρατηρούνται ογκομετρικές μεταβολές και να διατηρούν σταθερές τις διαστάσεις.¹⁴
5. Να διαθέτουν ικανοποιητική αντοχή σε δυνάμεις χάραξης, αποτριβής, διάτμησης και εφελκυσμού.¹⁴
6. Να διατηρούν την άρθρωση και να ισορροπούν χωρίς να αποχωρίζονται το ένα το άλλο, όταν στηρίζονται στις πίσω, πλάγιες και λοξές επιφάνειες.¹⁶
7. Να αποφεύγεται σημείο με πάχος μικρότερου των 1-2 cm, ώστε να διασφαλίζεται η αντοχή του.³
8. Η βάση αυτού θα πρέπει να είναι παράλληλη με τη νοητή εφαπτόμενη γραμμή, που ενώνει τις φατνιακές ακρολοφίες. Η παραλληλότητα αυτή αναφέρεται στο τμήμα της ακρολοφίας μεταξύ κυνόδοντα και πρώτου προγομφίου.³
9. Το περιφερειακό όριο των εκμαγείων χρειάζεται να διατηρεί ένα πάχος 2-3mm γύρω της ουλοχειλικής και ουλοπαρειαικής αύλακας. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η αποφυγή πιθανών θράυσεων.³

2.7.ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΥΨΙΝΩΝ ΕΚΜΑΓΕΙΩΝ

Μέσω της εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης αυτής της εργασίας, συνετό θα ήταν να ειπωθεί ότι η χρήση φυσικών μοντέλων των γνάθων είναι ένα αναπόσπαστο και αναντικατάστατο «εργαλείο» στην καθημερινή οδοντιατρική πράξη.²³ Παρόλο όμως που, τα γύψινα εκμαγεία αποτελούν σε συνδυασμό με φωτογραφίες και τεχνολογίες απεικόνισης,



τη βάση για την παρακολούθηση και την τεκμηρίωση της εξέλιξης της θεραπείας, παρουσιάζουν εκτός των προτερημάτων τους και διάφορα μειονεκτήματα. Σκόπιμο κρίνεται, συνεπώς, η αξιολόγηση και παρουσίαση των λόγων αυτών, για τους οποίους αυτά προτιμώνται στον κλάδο μας από πολλούς εργαστηριούχους και κλινικούς· καθώς και η μελέτη των σημείων υστέρησης αυτών.

Τα πλεονεκτήματα αυτών, λοιπόν, συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. Οι ακριβείς εντυπώσεις οδηγούν σε μοντέλα εργασίας, τα οποία είναι σημαντικά στη διάγνωση, στον σχεδιασμό, στη θεραπεία και την αξιολόγηση των διαφορετικών προσεγγίσεων της θεραπείας.
2. Εξυπηρετούν στην καλύτερη επικοινωνία-συνεννόηση οδοντιάτρου και οδοντικού τεχνολόγου, καθώς και του ιατρού και του ασθενούς. Δίνοντας την ευκαιρία της παρουσίασης του περιστατικού μέσω οπτικο-απτικής εμπειρίας, η οποία εντείνει και διασφαλίζει την εμπιστοσύνη του ασθενούς προς το όλο σχέδιο θεραπείας.
3. Τα γύσινα εκμαγεία χρησιμοποιούνται ως χρυσό πρότυπο¹¹ για τα υπόλοιπα υλικά στον προγραμματισμό της θεραπείας, καθώς παρέχουν αξιόπιστες και ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη στοματική κοιλότητα των ασθενών, όπως τη θέση των δοντιών και τις διαστάσεις τους.¹¹
4. Αυτά παρέχουν πληροφορίες για την επιφάνεια του βλεννογόνου, για τα ανατομικά όρια, τις επαφές των δοντιών, τις διαστάσεις και τη σύγκλειση αυτών.
5. Παρουσιάζουν ικανοποιητική σταθερότητα διαστάσεων μετά τη στερεοποίηση του υλικού.
6. Για την κατασκευή τους δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ούτε υψηλή τεχνογνωσία από τον τεχνίτη.
7. Επίσης, η γύψος ως υλικό και η δημιουργία των εκμαγείων δεν είναι επιβλαβής για την υγεία του ανθρώπου.
8. Τέλος, η προαναφερθείσα αποτελεί ένα βιοδιασπώμενο υλικό, το οποίο μπορεί να είναι φιλικό προς το περιβάλλον και να ανακυκλωθεί.



Όσον αφορά τα μειονεκτήματα μπορούμε να παραθέσουμε τα εξής:

1. Η γύψος αποτελεί ένα εύθρυπτο και με χαμηλή σκληρότητα υλικό, το οποίο δεν χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανθεκτικότητα. Γι' αυτόν το λόγο τα μοντέλα παρουσιάζουν υψηλή πιθανότητα θραύσης και αλλοίωσης των επιφανειακών χαρακτηριστικών τους, με αποτέλεσμα την υποβίβαση της πιστότητας και της ακριβής αναπαράστασης των ανατομικών στοιχείων, με αναπόφευκτες συνέπειες στην μετέπειτα θεραπεία.^{9,11,23,24}
2. Τα μοντέλα είναι μεγάλου βάρους και ενδέχεται να προκαλέσουν ζημιά. Παράλληλα σε περίπτωση καταστροφή τους (θραύση ή υποβίβαση της ποιότητας) η διαδικασία ανάκτησης αυτών δεν είναι εφικτή και απαιτείται, από την αρχή, συνάντηση του οδοντιάτρου με τον ασθενή και επανάληψη λήψης αποτυπώματος, δεσμεύοντας πολύ χρόνο.⁹
3. Λόγω της δομής τους καθίσταται δύσκολη η διαμοίραση των πληροφοριών μεταξύ των επαγγελματιών, καθώς απαιτείται η φυσική παρουσία όλων των ενδιαφερόμενων, που συμμετέχουν στην οδοντιατρική περίθαλψη του ασθενούς.^{9,22}
4. Η κατασκευή των γύψινων εκμαγείων αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία μέχρι την απόκτηση του στερεοποιημένου εκμαγείου και απαιτεί λεπτούς χειρισμούς για την αποφυγή πόρων, ρωγμών κ.α.^{11,22,25}
5. Επιπλέον, τα μοντέλα απαιτούν αυστηρή αρχειοθέτηση. Εξαιτίας, όμως του μεγέθους και του βάρους τους χρειάζονται εκτενείς αποθηκευτικούς χώρους, οδηγώντας σε δέσμευση μεγάλου φυσικού χώρου του εργαστηρίου.
6. Πρόβλημα αποτελεί, επίσης, η διατήρηση-αποθήκευση των εκμαγείων για πολλά χρόνια μετά την περάτωση της θεραπείας, καθώς θεσπίζεται υποχρεωτική από τη νομοθεσία.^{9,11,24-26}
7. Τέλος, τα μοντέλα γύψου δεν είναι πρακτικά μακροπρόθεσμα.



ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD-CAM

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Εικόνα 5. Η ανάπτυξη των CAD/CAM συστημάτων εισάγει νέους τρόπους παραγωγής και νέα υλικά.⁴

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και των ανθρώπινων επιτευγμάτων αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι της γενικής εξέλιξης της κοινωνίας. Ο αντίκτυπος αυτού είναι φανερός και στον κλάδο της οδοντιατρικής, καθώς με αλματώδη βήματα, οι νέες τεχνολογίες κάνουν την είσοδό τους στην καθημερινή οδοντιατρική πράξη. Μια από τις πιο επαναστατικές καινοτομίες οι οποίες εντάχθηκαν -όπως έχουμε ήδη αναφέρει- είναι η οδοντιατρική με υπολογιστή, δηλαδή η ψηφιακή τεχνολογία. Με τις πρώτες μελέτες του Duret το 1971, η εμφάνισή της έγινε αισθητή στον αντίστοιχο κλάδο· ήταν εκείνος που αξιοποίησε τον σχεδιασμό με υπολογιστές προς την δημιουργία οδοντιατρικών κατασκευών, προσδίδοντας στην πορεία της θεραπείας διαφορετική προσέγγιση.⁷ Χάρης αυτών των μελετών, δημιουργήθηκε η ψηφιακή τόσο οδοντιατρική όσο και ορθοδοντική, με την τεχνολογία των συστημάτων CAD/CAM (σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ, παραγωγή με τη βοήθεια Η/Υ) και μετέπειτα την ανάπτυξη της τρισδιάστατης (3D) εκτύπωσης ή γρήγορης πρωτοτυπίας (RP), η οποία εισήχθη την δεκαετία του 1980.

Η ορθοδοντική διάγνωση, ο σχεδιασμός θεραπείας και η αξιολόγηση του κάθε περιστατικού ακολούθησε με αυτό τον τρόπο, ένα νέο μονοπάτι, αξιοποιώντας τη ψηφιακή τεχνολογία για τη ψηφιοποίηση και κατασκευή ορθοδοντικών εκμαγείων και μηχανημάτων.



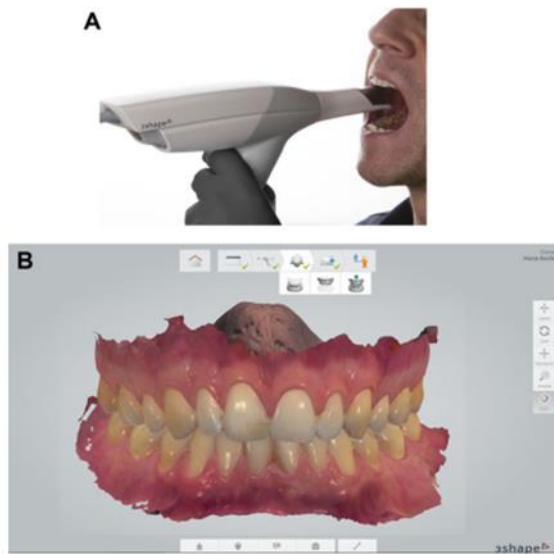
Με αυτό τον τρόπο, η θεραπεία, η οποία βασιζόταν αποκλειστικά σε γύψινα εκμαγεία, μπορεί πλέον να πραγματοποιηθεί με ψηφιακά μοντέλα στον υπολογιστή.¹¹ Η απόκτηση-ψηφιοποίηση των πληροφοριών πραγματοποιείται μέσω της σάρωσης των γύψινων εκμαγείων με σαρωτές επαφής ή μη, με φωτοοπτικούς σαρωτές ψηφιοποίησης (π.χ. στερεοφωτομετρία), τομογραφικές μεθόδους μέσω υπολογιστή ή με μεθόδους λέιζερ-οπτικής.¹¹ Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται είτε σε γύψινα μοντέλα, είτε σε αποτυπώματα των γνάθων ή ακόμα και με απευθείας σάρωση της στοματικής κοιλότητας των ασθενών με ενδοστοματικούς σαρωτές.⁹ Έπειτα, πραγματοποιείται η αποθήκευση των αρχείων αυτών σε ειδικές ψηφιακές μορφές και τέλος δίνεται η δυνατότητα επεξεργασίας των με διάφορα λογισμικά προγράμματα.

Εντούτοις, η ανάγκη για ένα φυσικό μοντέλο παραμένει πολύτιμη. Έτσι, για την παραγωγή αυτού, χρησιμοποιούνται δυο κύριες μέθοδοι κατασκευής-παραγωγής. Αυτές τις μεθόδους μπορούμε να τις χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες: την αφαιρετική και την προσθετική.^{27,28,30}

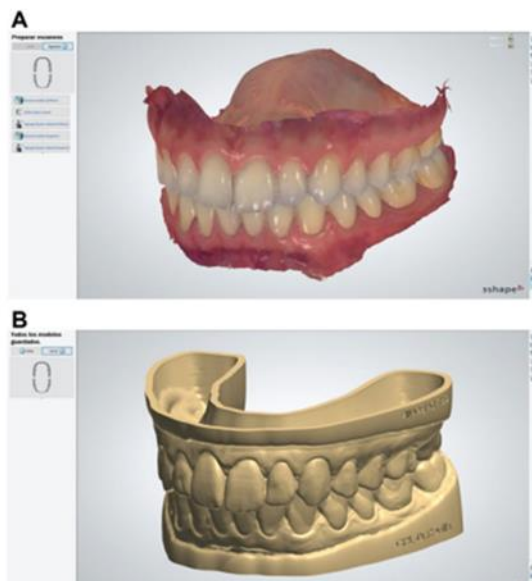
Η προσθετική μέθοδος – δηλαδή η τρισδιάστατη εκτύπωση – αποτελεί και το κύριο θέμα, το οποίο θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία. Ειδικότερα, θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τα στάδια διαδικασίας του συστήματος CAD για την απόκτηση της πληροφορίας και την επεξεργασία αυτής. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν διάφοροι τύποι τρισδιάστατων εκτυπωτών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην ορθοδοντική για την παρασκευή των εκμαγείων, η δομή και η λειτουργία τους. Επιπροσθέτως, θα παρουσιάσουμε τις ιδιαιτερότητες αυτών, τον τρόπο λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους, τα εκτυπωτικά υλικά, καθώς και τις διάφορες εφαρμογές αυτών. Με αυτόν τον τρόπο, θα έχουμε καταφέρει να συλλέξουμε τις αναγκαίες εκείνες πληροφορίες για τη σύγκριση των συμβατικών και των τρισδιάστατων εκτυπωμένων εκμαγείων και για την αξιολόγηση της πιστότητας των τελευταίων, με στόχο τη διαπίστωση της δυνατότητας ή όχι αντικατάστασης της συμβατικής μεθόδου με τις νέες τεχνολογίες.^{27,28,30}



3.2. ΜΕΡΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ CAD/CAM



Εικόνα 6. **A.** Απόκτηση δεδομένων με συσκευή ενδοστοματικού σαρωτή. **B.** Ψηφιακή αποτύπωση της άνω και κάτω γνάθου.³¹



Εικόνα 7. **A, B** Παράδειγμα επεξεργασίας δεδομένων με ενδοστοματικό σαρωτή έως τον εικονικό σχεδιασμό των διαγνωστικών μοντέλων.³¹

Οι πρώτες προσπάθειες για την αυτοματοποίηση της παραγωγής οδοντιατρικών αποκαταστάσεων ξεκίνησαν πριν από 20 χρόνια ή και παραπάνω.¹⁰ Ακολούθως, οι τεχνολογίες σχεδίασης/κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD/CAM) εισήχθησαν στην οδοντιατρική κοινότητα στις αρχές της δεκαετίας του 1980.¹⁰ Με την πάροδο του



χρόνου, τα συστήματα CAD/CAM κατάφεραν να ενσωματωθούν πλήρως σε όλα σχεδόν τα σύγχρονα οδοντοτεχνικά εργαστήρια και ταυτοχρόνως και σε αρκετά οδοντιατρεία.¹⁰

Όλα ξεκινούν με ένα τρισδιάστατο μοντέλο της ανατομικής περιοχής (αρχείο) σχεδιασμένο με τη βοήθεια λογισμικού σχεδίασης (CAD) ή με ένα προϊόν αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering equipment) όπως η σάρωση, αντλημένο από δεδομένα αξονικής τομογραφίας ή μαγνητικής τομογραφίας.³¹ Στη συνέχεια, γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων μέσω ειδικών λογισμικών, τα οποία με τη σειρά τους θα αποστείλουν τις επεξεργασμένες πληροφορίες σε μια συσκευή παραγωγής, υπεύθυνη για τη δημιουργία του τρισδιάστατου αντικειμένου.³¹

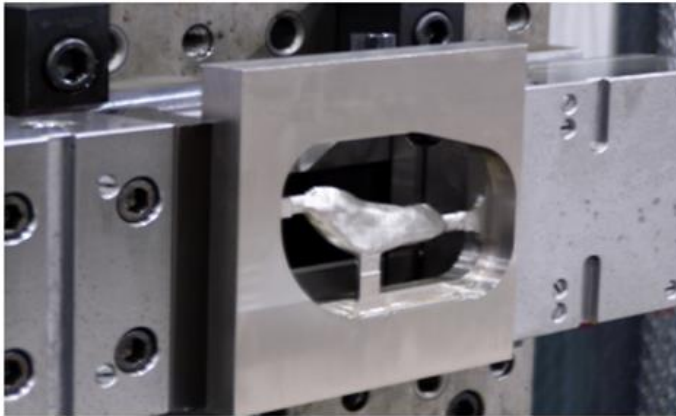
Ειδικότερα, όλα τα συστήματα CAD/CAM έχουν τρία λειτουργικά στοιχεία:^{10,31}

1. Ένα εργαλείο/σαρωτή ψηφιοποίησης, το οποίο μετατρέπει τη γεωμετρία του αντικείμενου σε ψηφιακά δεδομένα, που μπορούν να επεξεργαστούν από έναν υπολογιστή (απόκτηση δεδομένων).
2. Το λογισμικό επεξεργασίας και παραγωγής δεδομένων υπεύθυνο για τη σάρωση ενός συνόλου δεδομένων που «διαβάζεται» από μια μηχανή κατασκευής (επεξεργασία δεδομένων).
3. Μία τεχνολογία κατασκευής, η οποία λαμβάνει το σύνολο των δεδομένων και το μετατρέπει στο επιθυμητό προϊόν, κατασκευάζοντας την αποκατάσταση (κατασκευή μοντέλου).

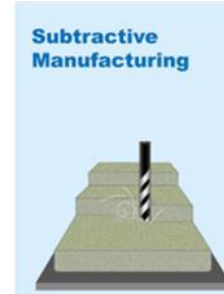
Αναφερόμενοι, λοιπόν, στις τεχνολογίες αυτές, για την κατασκευή ενός φυσικού πρωτοτύπου στην ιατρική αλλά και στη βιομηχανία, υπάρχουν δύο διαφορετικές αλλά και κυρίαρχες μέθοδοι.¹⁰ Αυτές απαρτίζονται από την αφαιρετική και προσθετική μέθοδο.¹⁰



3.3 ΑΦΑΙΡΕΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ



Εικόνα 8. Αφαιρετική μέθοδος.⁴



Εικόνα 9. Αφαιρετική μέθοδος.³

Τα πρώιμα συστήματα CAD/CAM βασίστηκαν σχεδόν αποκλειστικά στην αφαιρετική μέθοδο: στην αποκοπή-αφαίρεση υλικού με ελεγχόμενα βήματα από έναν υπολογιστή, προς τον σχηματισμό μιας αποκατάστασης/εργασίας με την επιθυμητή γεωμετρία, από ένα προκατασκευασμένο μπλοκ.^{4,10} Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτροκινητικών εργαλειομηχανών, όπως διαμαντιών, φρεζών, τόνων, πρεσών τρυπανιών με αιχμηρό εργαλείο κοπής ή δίσκων με διαμάντια.⁴ Η περάτωση αυτού γίνεται με συμβατική κατεργασία αριθμητικού ελέγχου (Numerical Control-NC): συνηθέστερα περιγράφεται ως «άλεση».⁴ Η αφαιρετική διαδικασία μέσω προσεκτικά σχεδιασμένων κινήσεων ακριβείας των ποικίλων εργαλείων κόβει και μορφοποιεί το υλικό για την επίτευξη του επιθυμητού σχήματος. Η κατεργασία NC χρησιμοποιείται συνήθως σε μικρής έκτασης εργασίες, όπως για την κατασκευή μεταλλικών ή/και κεραμικών στεφάνων στην οδοντιατρική, αποδίδοντας υψηλά επίπεδα ακρίβειας, όπως και στην περίπτωση κατασκευής εκμαγείων, χρησιμοποιώντας μπλοκ πολυουρεθάνης ή άλλων αναλογών ειδών.^{4,10,34}

Τα τελευταία χρόνια η εκμετάλλευση της τεχνολογίας αυτής απλοποιεί τη χρήση και επεξεργασία υλικών.^{4,25,34} Υπό την απουσία αυτής οδηγούμαστε σε επίπονη και χρονοβόρα εργαστηριακή πράξη. Ταυτοχρόνως, διευκολύνει και την συνεργασία μεταξύ των ειδικών, καθώς η ανταλλαγή πληροφοριών και η επικοινωνία καθίσταται ευέλικτη και γρήγορη.^{4,23,33} Παράλληλα, εξαλείφει την εντατική εργαστηριακή παραγωγή απλοποιώντας και μειώνοντας τις τεχνικές, επιτρέποντας στον οδοντοτεχνίτη να επικεντρώσει τις



χειρωνακτικές του ικανότητες σε άλλες πιο δημιουργικές πτυχές της διαδικασίας παραγωγής, όπως στην αισθητική στρώση πορσελάνης.³⁴

Επιπροσθέτως, η αφαιρετική τεχνική, πέρα του γεγονότος ότι έχει διευκολύνει την διαδικασία κατασκευής, παρουσιάζει βελτιωμένη ακρίβεια σε σχέση με την συμβατική τεχνική. Είναι γεγονός ότι μειώνει σημαντικά τον συνολικό χρόνο παραγωγής και παράγει σύνθετα μοντέλα, τα οποία είναι δύσκολο ή και αδύνατο να γίνουν με τις συμβατικές οδοντιατρικές διαδικασίες με μεγάλη ευκολία.^{10,35} Αυτή η μέθοδος έχει επιτύχει αυτόν τον υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας με τεχνολογίες, όπως η κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης, η ηλεκτροχημική κατεργασία, η κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων, η κατεργασία με φωτοχημικά και η κατεργασία με υπερήχους.⁴

Η αφαιρετική τεχνική αποδίδει ένα ολοκληρωμένο και αποτελεσματικό προϊόν. Χαρακτηρίζεται από ιδιότητες μηχανικής επίδοσης συγκρίσιμες με την συμβατική, ικανοποιητική αντοχή και κλινική εφαρμογή, καθώς και αποδεκτές ιδιότητες στις στοματικές συνθήκες με βιολογικά σωστούς δεσμούς και ακρίβεια. Ωστόσο, μεγάλο μέρος του υλικού καταλήγει αναξιοποίητο (περίπου το 90% του αρχικού υλικού), γεγονός, το οποίο δεν αντισταθμίζει το χαμηλό κόστος του.³²

Εκτός του συγκεκριμένου προβλήματος, προκύπτουν και άλλα σημεία υστέρησης αυτής της τεχνικής- συγκριτικά με την συμβατική και την προσθετική τεχνική. Συνοψίζοντας αυτά, λοιπόν, παρουσιάζονται τα εξής:^{10,34}

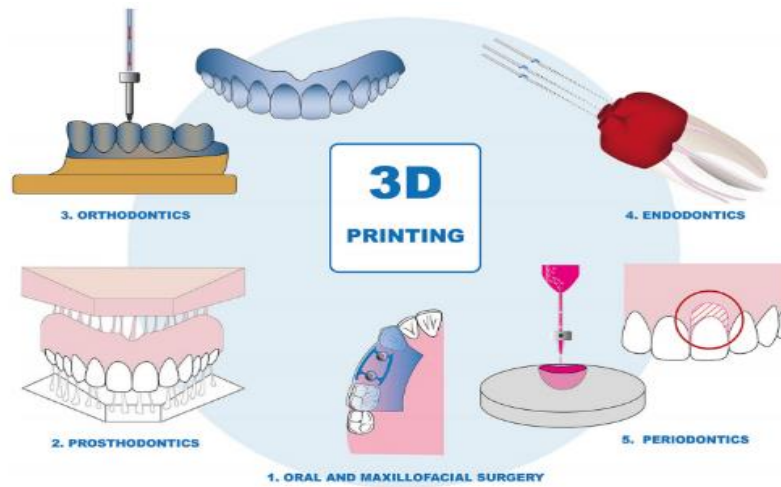
1. Η δυνατότητα απόδοσης της μέγιστης ακριβείας του εσωτερικού περιγράμματος της αποκατάστασης εξαρτάται από το μέγεθος του μικρότερου χρησιμοποιήσιμου εργαλείου για κάθε υλικό. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή το εργαλείο κοπής είναι μεγαλύτερο σε διάμετρο από ορισμένα μέρη του επιθυμητού παρασκευάσματος, θα έχει ως αποτέλεσμα την ανακριβή αποτύπωση της πληροφορίας (μη απόδοση του δεδομένου σχήματος) οδηγώντας σε ατελή ομοιώματα.^{10,34}
2. Εκτός αυτού, η αναπαραγωγή πολύπλοκων-σύνθετων σχημάτων και λεπτομερειών, πολύ μικρών γεωμετριών και υποσκαφών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, ως αίτιο της περιορισμένης ευελιξίας των αξόνων φρεζαρίσματος.^{32,34,35}



3. Σημαντική ποσότητα πρώτων υλών απορρίπτεται, επειδή τα αχρησιμοποίητα τμήματα των υλικών πρέπει να αφαιρούνται μετά από άλεση και ανακύκλωση, χωρίς η τελευταία να είναι εφικτή για όλα τα υλικά.^{10,24,34}
4. Τα εργαλεία άλεσης εκτίθενται σε έντονη τριβή και φθορά, με αποτέλεσμα τον περιορισμένο κύκλο ζωής αυτών.^{10,32,34}
5. Παρατηρείται περιορισμένη ποικιλία υλικών, έχοντας αυστηρό κριτήριο επιλογής την αυξημένη σκληρότητα, ανθεκτικότητα και να είναι αποστειρωμένα. Αυτό δημιουργεί επιπλοκές στην επιλογή και λειτουργία των κοπτικών εργαλείων.^{10,34}
6. Τέλος, δεν αποτελεί οικονομική και εύχρηστη επιλογή για μεγάλες ή πολλαπλές κατασκευές (δυνατότητα παραγωγής μιας μονάδας την φορά).^{10,34,35}



3.4. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ-ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ



Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση πιθανών εφαρμογών τρισδιάστατης εκτύπωσης στην οδοντιατρική.³²

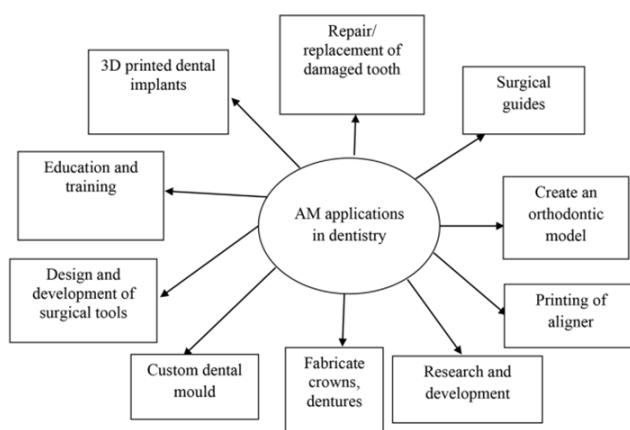
Η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο από τη δεκαετία του 1980.^{4,37} Το 1983 ο Τσαρλς Χαλ εκτύπωσε το πρώτο τρισδιάστατο αντικείμενο. Έπειτα, δημιούργησε και τον πρώτο 3D εκτυπωτή, που χρησιμοποίησε την τεχνική της στερεολιθογραφίας (SLA) (θα αναλυθεί παρακάτω), όπως και το πρώτο πρόγραμμα εικονοποίησης.³⁷ Η αρχική πολυεπίπεδη προσέγγιση οικοδόμησης υλικών (προσθετική μέθοδος) βασίστηκε στον φωτοπολυμερισμό και η εμπορική έναρξη της τεχνολογίας αυτής πραγματοποιήθηκε το 1986.³⁷

Η τρισδιάστατη εκτύπωση λογίστηκε ως μια ανατρεπτική τεχνολογία, που θα άλλαζε τον τρόπο της παραγωγής και κατασκευής, και θα μπορούσαμε να θεωρηθεί μια από τις μελλοντικά καθοριστικές τεχνολογίες κατασκευής,³⁸ οι οποίες έχουν την δυνατότητα να συμβάλλουν σημαντικά στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση.^{34,37,38} Έχει λάβει αυξημένη προσοχή στους τομείς της αεροδιαστημικής, λόγω της ευκολίας κατασκευής διαφόρων μικρών εξαρτημάτων, που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή διαστημικών σκαφών· όπως και στους τομείς της άμυνας, της τέχνης,^{4,34,36,37} της αρχιτεκτονικής, λόγω του αυξημένου δυναμικού στην ευθεία κατασκευή εξαρτημάτων, του σχεδιασμού και των τηλεπικοινωνιών. Ειδικότερα, διευκολύνει τη δημιουργία προσαρμοσμένων προϊόντων με επιθυμητά σχέδια, σχήματα και μεγέθη για διάφορες εφαρμογές, όπως μηχανήματα, κοσμήματα, αυτοκίνητα,

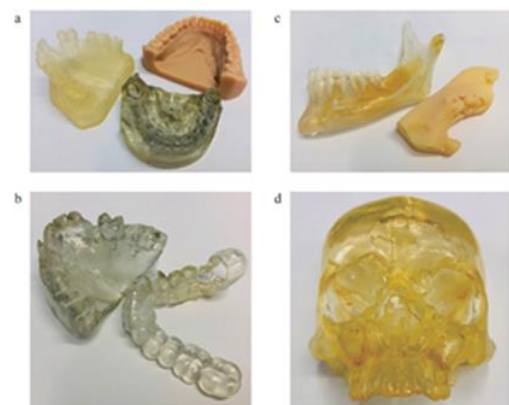


οδοντιατρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα, ιατρικά προϊόντα, μηχανική ιστών, υλικά κατασκευής, και ούτω καθεξής.^{36,38}

Οι Βιοϊατρικές επιστήμες στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένας από τους σημερινούς ηγέτες μιας τεχνολογίας, η οποία αναπτύσσεται ραγδαία.³⁴ Έχουμε ήδη αρχίσει να βιώνουμε την ενσωμάτωση της 3D-εκτύπωσης σε οδοντιατρεία και εργαστήρια. Η τρισδιάστατη εκτύπωση γίνεται επίσης αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος για τη χειρουργική.³⁷ Αυτό έγκειται στο γεγονός, ότι τα συστήματα αυτά αποδίδουν υψηλή χιλιοστομετρική ακρίβεια, η οποία έχει τραβήξει την προσοχή όλων των ειδικοτήτων της ιατρικής. Η πρώτη δραστηριότητα σε αυτόν τον κλάδο σημειώνεται τη δεκαετία του 1990. Η τεχνολογία αυτή έχει ιδιαίτερη απήχηση στην οδοντιατρική, ειδικά με την πρόοδο των τεχνολογιών τρισδιάστατης απεικόνισης και μοντελοποίησης, όπως η αξονική τομογραφία και η ενδοστοματική σάρωση.³⁷ Σε αυτό συνέβαλλε ταυτοχρόνως, η αξιοποίηση των γνώσεων, που έχουν αποκτηθεί μέσω της ιστορίας και της πρακτικής των τεχνολογιών CAD-CAM στην οδοντιατρική.³⁷ Οι χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνουν την παραγωγή χειρουργικών οδηγών για οδοντικά εμφυτεύματα, την παραγωγή φυσικών μοντέλων και αποκαταστάσεων για την προσθετική, την ορθοδοντική και την χειρουργική, κατασκευή οδοντικών, κρανιοπροσωπικών και ορθοπαιδικών εμφυτευμάτων.³⁷



Εικόνα 12. Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην οδοντιατρική.³⁹



Εικόνα 11. Εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης από πολυμερή. α) εκμαγεία β) χειρουργικοί οδηγοί εμφυτευμάτων, γ) μοντέλα προσομοίωσης στη χειρουργική.⁴⁰

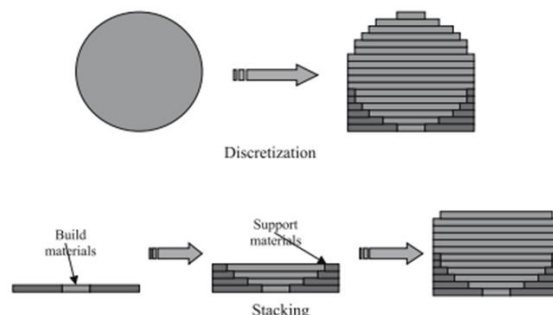


3.4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Προσθετική κατασκευή, η οποία αναφέρεται συγχρόνως ως τρισδιάστατη εκτύπωση, αποτελεί μια καινοτόμο και εξαιρετικά ευέλικτη τεχνική παραγωγής, η οποία, όπως υποδηλώνει το όνομα της, βασίζεται σε μια διαδικασία προσθήκης.^{37,41} Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι μια διεπιστημονική τεχνολογία που περιλαμβάνει μηχανήματα, τεχνική υπολογιστών, αριθμητικό έλεγχο και τεχνολογία υλικών. Συνήθως, η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνει τρία βήματα: πρώτον, τον σχεδιασμό των τρισδιάστατων μοντέλων μέσω υπολογιστή με λογισμικό μοντελοποίησης· δεύτερον, τη κοπή σε επίπεδα-φέτες του τρισδιάστατου μοντέλου· τρίτον την εκτύπωση του μοντέλου σε στρώσεις.⁴² Προς τούτοις, δίνει την δυνατότητα εφαρμογής σε πλαστικό, μέταλλο, κεραμικό, σκυρόδεμα και άλλα δομικά υλικά.⁴²

Η τρισδιάστατη εκτύπωση στοχεύει κυρίως στην παραγωγή πολυμερών αντικειμένων και μοντέλων, αξιοποιώντας την τεράστια ευελιξία, που σχετίζεται με τον επιτόπιο φωτοπολυμερισμό, καθώς και τη δυνατότητα επιλογής από μια ποικιλία προσχηματισμένων επεξεργάσιμων πολυμερών.³⁷ Η προσβασιμότητα των τρισδιάστατων εκτυπωτών, τόσο για βιομηχανική όσο και για γενική δημόσια χρήση έχει αυξηθεί δραματικά την τελευταία δεκαετία, ανοίγοντας τον δρόμο στην οδοντιατρική αγορά για πρωταρχική και εκρηκτική μελλοντική επικράτηση στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης.³⁷

Η προσθετική μέθοδος ορίζεται από την Αμερικανική Εταιρεία για Δοκιμές και Υλικά (ASTM) ως:⁴ «Η διαδικασία σύνδεσης υλικών για την κατασκευή αντικειμένων από 3D δεδομένα μοντέλου, συνήθως στρώμα προς στρώμα, σε αντίθεση με τις μεθόδους αφαιρετικής παρασκευής».²⁴ Ειδικότερα, μετατρέπει τα σχεδιασμένα ψηφιακά μοντέλα CAD σε στρώματα δεδομένων συγκεκριμένου πάχους και στην συνέχεια προετοιμάζει το φυσικό μοντέλο στρώμα προς στρώμα στο επιδιωκόμενο σχήμα.^{31,43}



Εικόνα 13. Αρχές της τρισδιάστατης εκτύπωσης.³²



3.4.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Τη σήμερον εποχή, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει κατακλίσει τον οδοντιατρικό κλάδο και παράλληλα έχει ξεπεράσει την αφαιρετική μέθοδο, όπως και τις συμβατικές τεχνικές.^{44,45} Αυτό οφείλεται στην βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της ακρίβειας της παραγωγής σε σύγκριση με τον παραδοσιακό σχεδιασμό με τη βοήθεια υπολογιστή και τις τεχνολογίες κατασκευής (CAD/CAM). Η ταχεία πρωτοτυποποίηση αντιπροσωπεύει εν ολίγοις, την τεχνολογία με το χαμηλό κόστος, την υψηλή απόδοση και την υψηλή ακρίβεια (16-100 mm).^{44,45}

Τα κύρια πλεονεκτήματα, τα οποία διακρίνονται είναι:

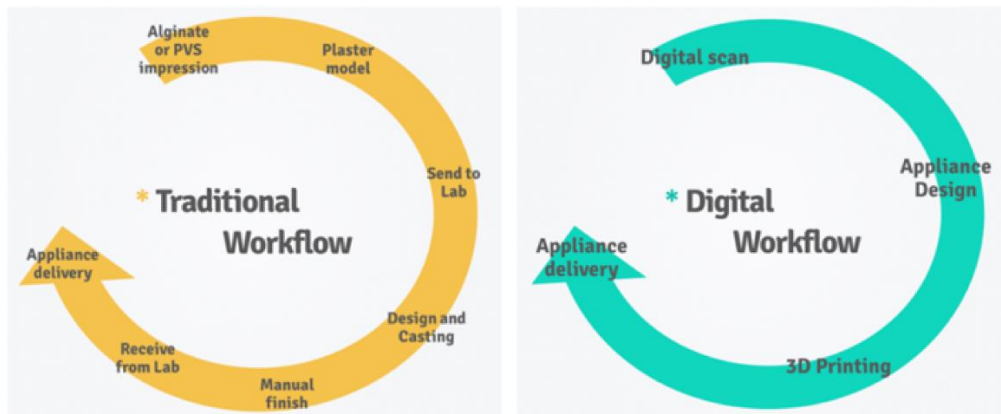
1. Επιτυχής σχηματισμός ποικίλων πολύπλοκων γεωμετρικών δομών: για παράδειγμα, περικοπές, κοίλες επιφάνειες, κενά, σύνθετες εσωτερικές γεωμετρικές λεπτομέρειες, σύνθετες πορώδεις μικροδομές διαφόρων γεωμετρικών κομματιών χρησιμοποιώντας πολλαπλά υλικά με τη μορφή σκόνης και συνδετικού υλικού.^{10,12,25,32,36,44,46,47} Επίσης, δίνεται η δυνατότητα παραγωγής περίπλοκων σχημάτων, που ομοιάζουν με την ανθρώπινη ανατομία καθώς και κατασκευής σύνθετων πορωδών μικροδομών ανατομικών ιατρικών μοντέλων, όπως νευραγγειακά κανάλια κ.α.^{10,31} Τα αντικείμενα μπορούν να παραχθούν με διαφορετική γεωμετρική πολυπλοκότητα χωρίς να περιλαμβάνουν τη ρύθμιση της τελικής συναρμολόγησης των μερών (αλληλένδετα μέρη που δεν απαιτούν συναρμολόγηση).^{10,31}
2. Κατασκευή εξατομικευμένων μοντέλων: η παραγωγή προσθέτων έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως αποτελεσματική μέθοδος για γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων, όταν απαιτούνται ιδιαίτερα προσαρμοσμένα μοντέλα, καθιστώντας το έτσι κατάλληλο για τις εξαιρετικά εξατομικευμένες προθέσεις που απαιτούνται στην οδοντιατρική.^{33,48} Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία κατασκευής πρόσθετων ουσιών είναι στην πραγματικότητα ιδανική για την οδοντιατρική, η οποία έχει παράδοση της παραγωγής εξατομικευμένων εξαρτημάτων κατασκευασμένων για να ταιριάζει στον ασθενή και όχι το αντίστροφο.^{4,33,48}
3. Η ελάχιστη ποσότητα απορριφθέντος υλικού-μέθοδος φιλική προς το περιβάλλον- τα σχεδιασμένα αρχεία CAD μετατρέπονται σε «φέτες» και χτίζονται στρώμα προς



στρώμα δημιουργώντας το επιθυμητό σχήμα, έχοντας ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του χαμένου υλικού και των αναγκαίων πρώτων υλών.^{24,33,46,49,50}

4. Μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων υλικών: ποικιλία, η οποία αποτελείται από πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά.⁴ Τα περισσότερα από αυτά τα υλικά επιτρέπουν πολλές επιλογές φινιρίσματος, επιτρέποντας έτσι την επίτευξη ενός ακριβούς σχεδιασμού.⁴¹
5. Χρήση διαφορετικών υλικών στην ίδια κατασκευή: τα αντικείμενα μπορούν να παραχθούν από διαφορετικούς τύπους υλικών.¹⁰ Επιπλέον, με ελεγχόμενη αγωγιμότητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά υλικά σε διαφορετικά σημεία.¹⁰
6. Παραμετροποίηση. Δυνατότητα λεπτομερούς ελέγχου και επιλογής των παραμέτρων της εκτύπωσης. Επιλέγεται το υλικό, το πάχος ανά στρώση και η σύνθεσή του παραγόμενου προϊόντος.¹⁰
7. Κατάργηση ανάγκης μεγάλων αποθηκευτικών χώρων. Με αυτή την τεχνολογία απαιτείται μόνο αναζήτηση του προϊόντος στην ψηφιακή βιβλιοθήκη και τρισδιάστατη εκτύπωση.⁵¹
8. Τα μοντέλα παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια: ακριβείς λεπτομέρειες και αναπαραγωγή του υπάρχοντος σαρωμένου αρχείου, καλή ποιότητα εργασίας και σταθερά αποτελέσματα.^{33,49}
9. Δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής πολλών διαφορετικών προϊόντων. Αύξησή της ταχύτητας παραγωγής με συνακόλουθη μείωση κόστους και χρόνου.^{25,49}
10. Ταχεία παραγωγή μείωση των χρονοβόρων σταδίων κατασκευής με αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού χρόνου.^{33,42}
11. Βολική και απλή μέθοδος η κατασκευή σύνθετων αντικειμένων μπορεί να είναι γρήγορη και ακριβής με άμεσο τρόπο.^{10,46}
12. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να κατασκευάσει τρισδιάστατα αντικείμενα (3D) συνδέοντας στρώματα υλικών και μπορεί να εφαρμοστεί για τη μετατροπή απορριμμάτων και παραπροϊόντων σε νέα υλικά.⁵³
13. Δημιουργία πρωτοτύπου και πραγματοποίηση ελέγχου, δοκίμων, εύρεση πιθανών λαθών και αστοχιών πριν την μαζική παράγωγή, όπως και εύκολη αντιγραφή ενός αντικειμένου.⁵¹
14. Μειωμένο κόστος παραγωγής συγκριτικά με άλλες μεθόδους.¹⁰
15. Διευκολύνει την επικοινωνία των συντελεστών.⁵²





Εικόνα 14. Συμβατική και ψηφιακή ροή εργασίας στην ορθοδοντική καθημερινή πράξη.⁵⁴

Μειονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης:

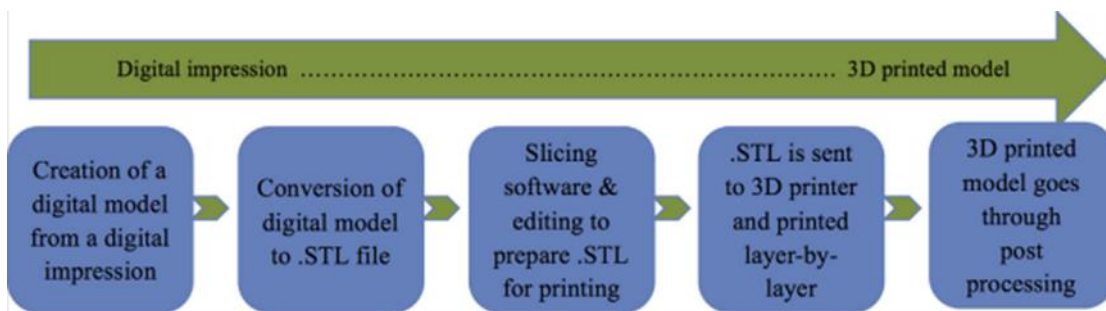
1. Ένας ακόμα πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε με την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η επιφανειακή ποιότητα του τελικού προϊόντος. Λόγω του τρόπου με τον οποίο εναποτίθεται κάθε διαδοχικό στρώμα πάνω στο άλλο παρουσιάζεται μια τραχεία επιφάνεια εξαιτίας των «σκαλοπατιών» που δημιουργούνται. Αυτό αποτελεί μια εγγενής αδυναμία, η οποία είναι κυριολεκτικά ενσωματωμένη στο σχέδιο.^{32,33,48}
2. Ανάλογα με το υλικό, μπορεί να χρειαστεί επιπλέον πολυμερισμός-επεξεργασία για να αποκτήσει το επιθυμητό αποτέλεσμα μηχανικών ιδιοτήτων. Με αποτέλεσμα το φινίρισμα του τελικού προϊόντος να είναι χρονοβόρο και να απαιτεί εξειδικευμένη ικανότητα σε πολλές από τις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για παράδειγμα, η ζirkονία και τα μπλοκ E-max, που χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες αποκατάστασης απαιτούν περαιτέρω σύντηξη για επίτευξη υψηλής αντοχής μετά την διαδικασία της άλεσης.^{32,33}
3. Η παραβίαση των πνευματικών δικαιωμάτων. Η τρισδιάστατη εκτύπωση παρά την θετική συμβολή της στην εξέλιξη της τεχνολογίας, έχει ανοίξει τον δρόμο στην εύκολη αντιγραφή και κλοπή ιδεών, πρωτοτύπων, μηχανισμών και προϊόντων σε όλο τον κόσμο. Η μεγάλη ευκολία παραγωγής ενός ήδη υπάρχοντος προϊόντος έχει οδηγήσει στην εύκολη αντιγραφή αντικειμένων υποκλέβοντας ιδέες και προϊόντα.⁵¹
4. Ανθυγιεινές συνθήκες. Οι ρητίνες, που χρησιμοποιούνται, όπως και τα διαφορά ρινίσματα και οι εκπομπές κατά την παραγωγή, ειδικά όταν το προϊόν αγοράζετε



χύμα, μπορεί να προκαλέσουν φλεγμονή και ερεθισμό κατά την επαφή και την εισπνοή.⁵¹

5. Οι εκτυπωτές, που χρησιμοποιούν ρητίνες, δεν μπορούν να παράγουν αποστειρωμένα προϊόντα (π.χ. με θερμότητα).³³
6. Χρήση για εγκληματικούς σκοπούς, χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού η παραγωγή πλήρως λειτουργικών οπλών χωρίς άδεια.⁵¹
7. Υψηλού κόστους τεχνολογίες.^{32,54}

3.4.3. ΣΤΑΔΙΑ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ



Εικόνα 15. Στάδια ροής εργασίας κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση.⁵⁵

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των υπολογιστών και στις εφαρμογές των λογισμικών αποτέλεσαν τον λόγο που οδήγησε την τρισδιάστατη εκτύπωση στο σημείο, που βρίσκεται σήμερα. Αυτά τα ισχυρά τεχνολογικά εργαλεία είναι στη διάθεση μιας κατηγορίας ατόμων – οδοντιάτρων και οδοντοτεχνικών – που είναι συχνά πολυμαθείς, με έντονη την αίσθηση της δημιουργικότητας και της κατανόησης των τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των προαπαιτούμενων δεξιοτήτων μηχανικής και υλικών. Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερη τεχνογνωσία, η οποία χρήζει γνώσης και κατάκτησης με σκοπό τον χειρισμό των περίπλοκων συστημάτων εκτύπωσης, την σωστή επεξεργασία των δεδομένων και τον έλεγχο των ποικίλων σταδίων αυτών για την επίτευξη ενός ολοκληρωμένου, ακριβούς και ακέραιου προϊόντος.³⁴

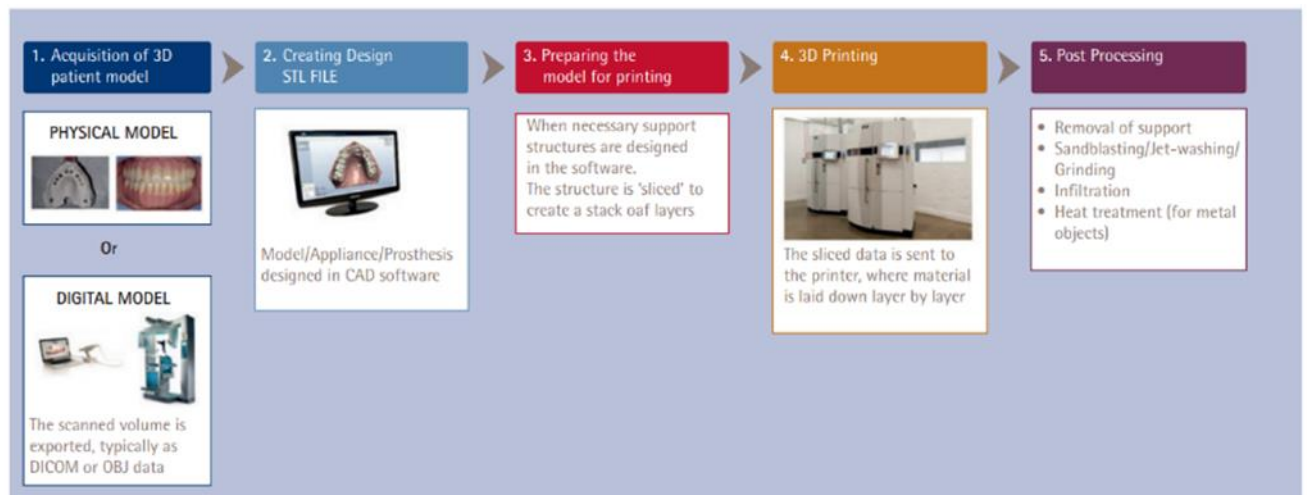
Εν τούτοις, από μηχανικής άποψης, οι τρισδιάστατες εκτυπωτές είναι συχνά αρκετά απλές ρομποτικές συσκευές.³⁴ Για να έχει αξία η τρισδιάστατη εκτύπωση, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη του ανάλογου λογισμικού, το οποίο θα συμβάλλει στην δημιουργία των προορισμένων για εκτύπωση αντικειμένων. Η συσκευή, δηλαδή, βασίζεται στο



λογισμικό σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), το οποίο επιτρέπει στα αντικείμενα να σχεδιάζονται σε ένα εικονικό περιβάλλον από την αρχή. Ωστόσο, αυτό στην οδοντιατρική και χειρουργική επιτυγχάνεται με την ενδοστοματική ή εργαστηριακή οπτική επιφάνεια σάρωσης δεδομένων και με την πρόσβαση αφενός σε ογκομετρικά δεδομένα υπολογιστικής τομογραφίας (CT) και αφετέρου σε δεδομένα υπολογιστικής τομογραφίας και δέσμης κώνου (CBCT).³⁴

Για την κατασκευή των οδοντιατρικών μοντέλων με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, η διαδικασία η οποία ακολουθείται, αποτελείται από τα παρακάτω στάδια:²⁸

- ❖ Τρισδιάστατη ψηφιακή εικόνα
- ❖ Μεταφορά, επεξεργασία και τμηματοποίηση δεδομένων
- ❖ Αξιολόγηση του σχεδιασμού
- ❖ Παραγωγή ιατρικού τρισδιάστατου μοντέλου
- ❖ Επικύρωση ιατρικού τρισδιάστατου μοντέλου.



Εικόνα 16. Στάδια ροής εργασίας κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση.³⁴

Τρισδιάστατη ψηφιακή εικόνα

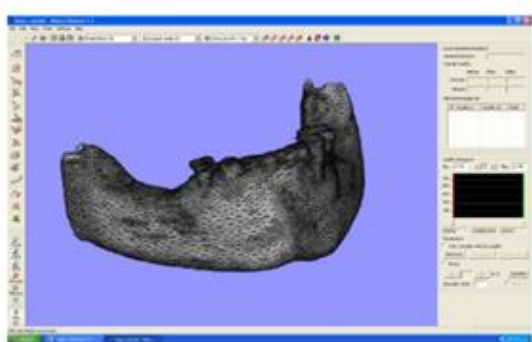
Τα ενδοστοματικά τρισδιάστατα δεδομένα (3D) μπορούν να συλλεχθούν με πολλούς τρόπους⁵⁶ ανάλογα με τις απαιτήσεις επιλέγεται και ο κατάλληλος τρόπος.³² Για παράδειγμα, οι περισσότερες χειρουργικές οδοντιατρικές επεμβάσεις απαιτούν υπολογιστική τομογραφία κωνικής δέσμης για να συλλέξουν τα δεδομένα και να επιτρέψουν την εκτύπωση των επιθυμητών πληροφοριών.⁴⁰ Ωστόσο, οι μικρές αποκαταστάσεις και η



κινητή προσθετική απαιτούν αποκλειστικά την τρισδιάστατη σάρωση του στόματος για να επιτευχθεί η εκτύπωση των επιθυμητών μοντέλων, αποκαταστάσεων κλπ.⁴¹ Για την λεπτομερή αναπαράσταση ανατομικών πληροφοριών, οι πιο συνηθισμένες τεχνικές είναι η υπολογιστική τομογραφία, η μαγνητική τομογραφία και η ψηφιοποίηση με λέιζερ.^{32,56} Επίσης, η στοματική κοιλότητα, οι εντυώσεις ή τα εκμαγεία των ασθενών μπορούν να σαρωθούν με ενδοστοματικούς ή εξωστοματικούς σαρωτές και να παραχθούν τα ψηφιακά μοντέλα μελέτης, που θα χρησιμοποιηθούν για διαγνωστικούς σκοπούς ή για την παραγωγή ορθοδοντικών συσκευών και εκμαγείων.^{32,56}

Μετά την απόκτηση αυτών, η αποθήκευση των πληροφοριών αποτελεί το επόμενο βήμα. Τα δεδομένα πρέπει να αποθηκευτούν με την μορφή ειδικών αρχείων, τα οποία παρέχουν την δυνατότητα επεξεργασίας και περαιτέρω σχεδιασμού τους από συστήματα CAD. Ειδικότερα, τα σαρωμένα δεδομένα μετατρέπονται σε STL αρχεία-Standard Tessellation Language or STereoLithography.³⁴

Αυτή η μορφή αρχείου υποστηρίζεται από πολλά άλλα συστήματα λογισμικού, χρησιμοποιείται ευρέως για γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων, για τρισδιάστατη εκτύπωση και για κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή. Τα αρχεία STL περιγράφουν μόνο τη γεωμετρία της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου χωρίς καμία αναπαράσταση χρώματος, υφής ή άλλων κοινών χαρακτηριστικών μοντέλου CAD. Ένα αρχείο STL περιγράφει μια ακατέργαστη, αδόμητη τριγωνική επιφάνεια με κανονικό σχήμα και κορυφές τριγώνων (που διατάσσονται με τον κανόνα του δεξιού χεριού) χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.³⁴



Εικόνα 17. Μοντέλου κάτω γνάθου κατά την επεξεργασία του στο software.²⁷



Μεταφορά δεδομένων, επεξεργασία και τμηματοποίηση

Αυτό το στάδιο αποτελεί κρίσιμο σημείο για την πορεία της εργασίας, καθώς από την επεξεργασία εξαρτάται η ποιότητα του τελικού ιατρικού μοντέλου και τα ειδικά λογισμικά CAD αποτελούν το απαραίτητο εργαλείο για την ασφαλή εξέλιξή της.²⁷ Έργο τους η αποστολή των επεξεργασμένων αρχείων στις τρισδιάστατες εκτυπωτικές μονάδες για την κατασκευή της επιθυμητής δομής.²⁷ Τα λογισμικά CAD είναι συνήθη στον βιομηχανικό σχεδιασμό, στην μηχανική και σε κατασκευαστικές συνθήκες.³⁴ Επίσης, παρατηρείται συχνά σε οδοντιατρικά εργαστήρια αλλά και ως χαρακτηριστικό πολλών οδοντιατρικών επεμβάσεων.³⁴ Πολλά πακέτα CAD διαθέσιμα στην αγορά μπορούν να εκτελέσουν την εργασία επεξεργασίας.²⁷ Τα πιο γνωστά είναι το Pro-E, το Unigraphics, το DUCT και το Solidworks. Όλα τα συστήματα CAD παρουσιάζουν προτερήματα και αδυναμίες. Ορισμένα υπερτερούν στη λειτουργία του λογισμικού τους, ενώ άλλα είναι καταλληλότερα για την εκτέλεση λειτουργιών, όπως η επεξεργασία δεδομένων σημείων.³²

Ακολούθως, με την χρήση των διαφόρων λογισμικών «το τρισδιάστατο αρχείο τεμαχίζεται σε πολλαπλά στρώματα κατά μήκος μιας κατεύθυνσης (συνήθως κατεύθυνσης Z) με ένα προκαθορισμένο πάχος στρώματος (συνήθως από 5 έως 20 στρώματα ανά χιλιοστό). Η ανάλυση του ενσωματωμένου στοιχείου είναι υψηλότερη όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα επίπεδα και ο αριθμός τους μπορεί να κυμαίνεται από 5 έως 20 ανά χιλιοστόμετρο.^{5,54} Ισχύει ότι όσο περισσότερα είναι τα στρώματα τόσο καλύτερη θα είναι και η ανάλυση. Τα στρώματα δύνανται να ποικίλλουν όσον αφορά στο πάχος και διαθέτουν τις ανατομικές πληροφορίες εσωτερικά και εξωτερικά της επιφάνειας του μοντέλου σε αυτό το ύψος, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο τρισδιάστατη απόδοση υψηλής ανάλυσης των τεμαχισμένων τμημάτων σε μικρές διαστάσεις pixel.³¹ Κατά την επεξεργασία, επίσης, επιλέγεται το σημείο ή η επιφάνεια ενδιαφέροντος: προσανατολίζονται τα σημεία του μοντέλου· απομακρύνονται ανώμαλες δομές και ασυνέχειες· εντοπίζονται και προλαμβάνονται πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν.³²

Τα μοντέλα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την περιοχή ενδιαφέροντος και των γειτονικών ιστών. Λόγω αυτού, η σωστή τμηματοποίηση τους είναι απαραίτητη για την μεταφορά αυτών των αρχείων στους τρισδιάστατους εκτυπωτές, οι οποίοι θα κτίσουν το μοντέλο στρώμα προς στρώμα.³²

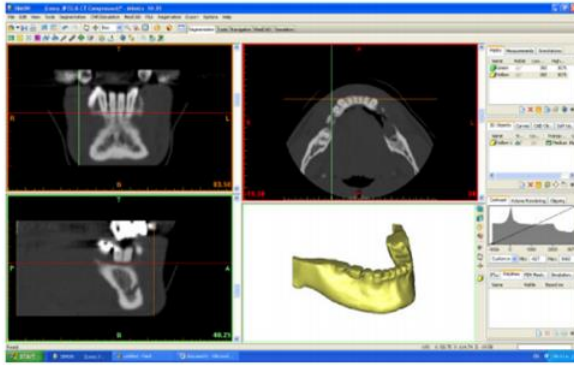


Ένα εξίσου σημαντικό στάδιο πριν την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των μοντέλων, αποτελεί η «Παρεμβολή». Μόλις ολοκληρωθεί η τμηματοποίηση, πραγματοποιείται ανάλυση του περιγράμματος και εν συνεχεία ενίσχυση αυτού. Αφενός πρέπει να πραγματοποιηθούν προσαρμογές μεταξύ των ενδιάμεσων στρωμάτων – δεδομένου ότι το πάχος του συστήματος συλλογής δεδομένων και του συστήματος κατασκευής είναι σημαντικά διαφορετικά – αφετέρου πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην προσαρμογή του ίδιου του στρώματος. Η τεχνική παρεμβολής χρησιμοποιείται συνήθως για την αύξηση της ποιότητας ανάλυσης του περιγράμματος· διαφορετικά, θα παρατηρείται στα όρια εφέ, το οποίο προσομοιάζει σε σκάλα· γεγονός που επιβαρύνει δυσμενώς το φινίρισμα της επιφάνειας λόγω της τραχύτητας των στρωμάτων, που θα δημιουργηθούν από τον εκτυπωτή.³²

Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, χρησιμοποιούνται ποικίλα συστήματα με μαθηματικούς αλγορίθμους κατάλληλους για παρεμβολή σε ιατρικά δεδομένα-μοντέλα. Η επίτευξη αυτού ολοκληρώνεται μέσω δημιουργίας κορυφών και τριγωνικών πλεγμάτων σε κάθε στρώμα του τρισδιάστατου μοντέλου. Σε γενικές γραμμές, δύο τεχνικές χρησιμοποιούνται για την αύξηση της ανάλυσης του περιγράμματος: δίσταμη παρεμβολή και C-spline συνέλιξη. Με αυτές τις τεχνικές δίνεται η δυνατότητα παραγωγής υψηλής ακριβείας και πιστότερης αναπαραγωγής της επιφάνειας των μοντέλων.^{32,36}

Μπορούν να εξαχθούν τυπικές μορφές τρισδιάστατων αρχείων και εκτός των STL όπως VRML. Η μορφή STL μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άμεση σύνδεση με διάφορα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μέσω του CTM επιτυγχάνεται η βέλτιστη ακρίβεια σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα με άμεση μετατροπή των εικόνων σε διάφορες τεμαχισμένες μορφές αρχείων μηχανής: SLI και SLC για στερεολιθογραφία (ALS), SSL για μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης (FDM) κ.ο.κ. Επιπλέον, το CTM υποστηρίζει έγχρωμη στερεολιθογραφία, επειδή επισημαίνονται δόντια, ρίζες δοντιών και νευρικά κανάλια σε τρισδιάστατα μοντέλα.^{32,36}





Εικόνα 18. Απεικόνιση του software -τμηματοποίησης του μοντέλου.³⁶

Αξιολόγηση του σχεδιασμού

Το στάδιο αυτό εξαρτάται από την εκάστοτε περίπτωση. Μερικές φορές το ολοκληρωμένο μοντέλο χρησιμοποιείται και αποστέλλεται απευθείας στη συσκευή τρισδιάστατης εκτύπωσης (βιομοντέλα).²⁸ Σε διαφορετικούς τομείς της ιατρικής, το εικονικό μοντέλο υποβάλλεται σε επεξεργασία με την βοήθεια κάποιου συστήματος CAD (λογισμικού) είτε σε αρχική μορφή ανταλλαγής γραφικών είτε σε μορφή STL αρχείου.²⁸

Η αξιολόγηση και η επικύρωση του σχεδιασμένου μοντέλου αποτελεί προαπαιτούμενο για την αποτίμηση του σχεδιασμού και της ποιότητας του κατασκευασμένου μοντέλου. Επιπλέον, πραγματοποιείται έλεγχος πιθανών σφαλμάτων ή άλλων σημαντικών βημάτων, τα οποία προκύπτουν αναλογικά με το κάθε περιστατικό.²⁸

Ο οδοντικός τεχνολόγος σε συνεργασία με τον ορθοδοντικό και κάθε άλλο εμπλεκόμενο επιστήμονα, αξιολογούν από κοινού το εικονικό ομοίωμα, εντοπίζουν και προλαμβάνουν πιθανά σφάλματα και επιπλοκές είτε αυτά προέκυψαν από το ίδιο το λογισμικό, είτε από το χρήστη. Τέλος, μετά την περάτωση της αξιολόγησης του εικονικού μοντέλου, μπορούμε να προβούμε στην παραγωγή του τρισδιάστατου αντικειμένου.²⁸

Παραγωγή ιατρικού μοντέλου RP

Αυτό το βήμα περιλαμβάνει την επιλογή της σωστής τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης σύμφωνα με τον σκοπό του ίδιου μοντέλου, την επιδιωκόμενη ακρίβεια, το



φινίρισμα-τελείωμα επιφάνειας, την εμφάνιση της εσωτερικής δομής, τον αριθμό των επιθυμητών χρωμάτων στο μοντέλο, την αντοχή, το υλικό, τις μηχανικές ιδιότητες κλπ.²⁸

Τέλος, το τρισδιάστατο εικονικό μοντέλο σε μορφή STL θα πρέπει να εισαχθεί στο επιλεγθέν λογισμικό για την παραγωγή του φυσικού μοντέλου. Ουσιαστικά, οι πληροφορίες πλέον, οι οποίες υπάρχουν στο κάθε στρώμα, αξιοποιούνται για τον σχηματισμό κωδικών ελέγχου της συσκευής και αποστέλλονται στα συστήματα ταχείας πρωτοτυποποίησης, ώστε να κατευθύνουν, αναλόγως τον εκτυπωτή, δηλαδή τον μηχανισμό παραγωγής (ακροφύσιο ή δέσμη λέιζερ).⁵ Η ποιότητα του φυσικού μοντέλου επηρεάζεται, όχι μόνο από την ποιότητα του αρχείου STL, που εισάχθηκε, αλλά ταυτόχρονα και από τον προσανατολισμό του μοντέλου στη μηχανή εκτύπωσης και από την σωστή επιλογή των παραμέτρων κατασκευής του ομοιώματος.²⁸

Επικύρωση ιατρικού μοντέλου RP

Πραγματοποιείται η επισκόπηση και ο έλεγχος του παραγόμενου φυσικού μοντέλου από τους ειδικούς. Σε περίπτωση απουσίας σφαλμάτων, το φυσικό μοντέλο είναι έτοιμο για χρήση.²⁷



4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Επί του παρόντος, την αγορά έχει κατακλίσει μεγάλη ποικιλία μηχανημάτων, τα οποία βασίζονται στην προσθετική μέθοδο.⁴⁴ Η ταχύτατη ανάπτυξη αυτών εδραίωσε τον υψηλό ανταγωνισμό στις κατασκευαστικές εταιρείες με αποτέλεσμα την μεγάλη διαφοροποίηση αυτών όσον αφορά στην τιμή, την ταχύτητα, την αξιοπιστία, το κόστος χρήσης κ.α.^{4,34}

Ανεξαρτήτως όμως των προαναφερθέντων διακρίσεων, κάθε συσκευή - κάθε είδος εκτυπωτικού μοντέλου - διαφέρει και ως προς τα χαρακτηριστικά του. Ειδικότερα, διαθέτει συγκεκριμένες ικανότητες και έχει διαφορετικές προϋποθέσεις για την σωστή λειτουργία του. Οι προϋποθέσεις αυτές απαρτίζονται από το υλικό, τις συνθήκες περιβάλλοντος, τη θερμοκρασία της διαδικασίας, το στάδιο αυτής και τη προετοιμασία που απαιτείται για την παραλαβή του τελικού προϊόντος.⁴⁴

Λόγω της ποικιλίας των ιδιοτήτων και των ικανοτήτων των τρισδιάστατων εκτυπωτών, πολλές διαφορετικές τεχνολογίες έχουν επικρατήσει και συνεχίζουν να εξελίσσονται στον τομέα της οδοντιατρικής. Παράλληλα με αυτές τις εξελίξεις, ο αριθμός των υλικών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναπτύσσεται συνεχώς.⁴ Τα υλικά όπως κεραμικά, πλαστικά, μέταλλα, κεριά και ρητίνες απαιτούν διαφορετικές συνθήκες εκτύπωσης και άρα διαφορετικά συστήματα παραγωγής.⁵⁷ Εξαιτίας αυτών και του γεγονότος ότι πολλοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν διαφορετικές ονομασίες για τις ίδιες τεχνικές η κατηγοριοποίηση τους καθίσταται δύσκολή και χρονοβόρα.⁵⁷

Την λύση σε αυτό έδωσε ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) σε συνεργασία με την Αμερικάνικη Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (ASTM). Συγκεκριμένα, ανέπτυξαν με εθελοντική συναίνεση τις τεχνικές προϋποθέσεις για ένα ευρύ φάσμα υλικών, προϊόντων, συστημάτων και υπηρεσιών. Έτσι, τον Δεκέμβριο του 2015 προτάθηκε το πρότυπο ISO/ASTM 52900 από την επιτροπή F42 για τις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, το οποίο ορίζει τις επτά κύριες κατηγορίες:³¹

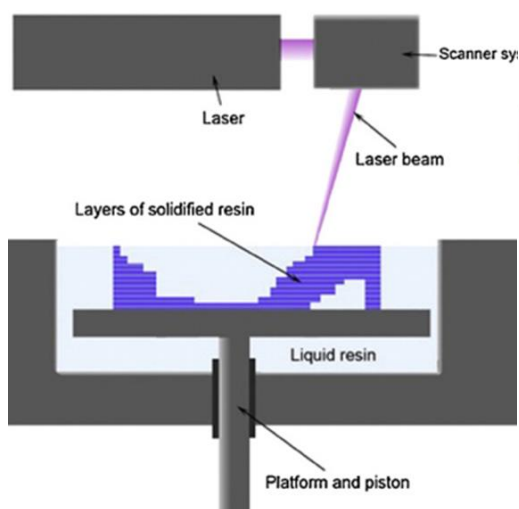
- ❖ στερεολιθογραφία (SLA)
- ❖ εκτόξευση υλικών (MJ)
- ❖ εξώθηση υλικού (ME) ή μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης (FDM)
- ❖ εκτόξευση συνδετικού υλικού (BJ)
- ❖ σύντηξη κλίνης σκόνης (PBF)



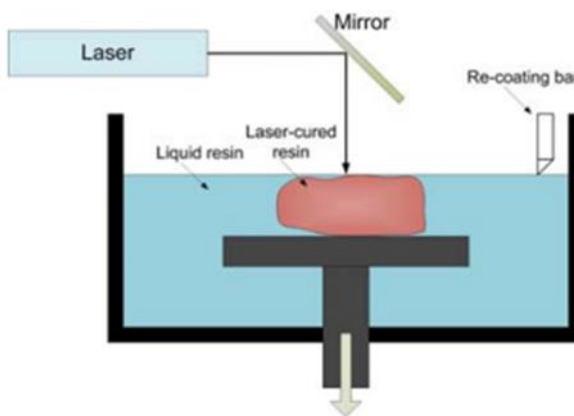
- ❖ πλαστικοποίηση φύλλων(LOM)
- ❖ άμεση εναπόθεση ενέργειας(DED)

Οι κύριες τεχνικές, όμως, για την εκτύπωση πολυμερών υλικών προς την κατασκευή ορθοδοντικών εκμαγείων είναι: η στερεολιθογραφία (SLA), η μοντελοποίηση με απόθεση λιωμένου υλικού (FDM), η ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP) και η εκτύπωση με οθόνη υγρων κρυστάλλων (LCD).

4.1 ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ (SLA)



Εικόνα 19. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός εκτυπωτή SLA.⁴



Εικόνα 19. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός εκτυπωτή SLA.¹⁰

Ως η προτιμότερη τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η τεχνική SLA χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία. Η τεχνική σχεδιάστηκε και παρουσιάστηκε πρώτη φορά με τον όρο «στερεολιθογραφία» το 1986 από τον Chuck W. Hull, συνιδρυτή της 3D Systems, Inc. στη Valencia της Καλιφόρνιας (ΗΠΑ) και ηγέτη στον κλάδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ως τεχνική για την παραγωγή στερεών αντικειμένων με διαδοχική εκτύπωση λεπτών στρωμάτων ενός υλικού, το οποίο στερεοποιείται με υπεριώδες φως λέιζερ.^{4,31,42}



Επισκόπηση λειτουργίας

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει ένα φωτοευαίσθητο λουτρό υγρής ρητίνης, μια πλατφόρμα κατασκευής μοντέλων και ένα υπεριώδες λέιζερ (UV) για τη στερεοποίηση και τον πολυμερισμό αυτής.^{4,10,42,58} Η αρχή βασίζεται σε μια φωτοευαίσθητη μονομερή ρητίνη, η οποία σχηματίζει ένα πολυμερές και στερεοποιείται, όταν εκτίθεται σε υπεριώδες φως (UV).^{4,10,27,36} Η αντίδραση, που προκαλείται από το υπεριώδες φως λαμβάνει χώρα μόνο στην επιφάνεια του υλικού και έτσι τα στρώματα πολυμερίζονται και συγκολλούνται διαδοχικά για να σχηματιστεί το τρισδιάστατο αντικείμενο.^{10,27,36}

Συνήθως, το μήκος κύματος της λάμπας που χρησιμοποιείται από τη μηχανή SLA είναι 355 nm ακτίνας λέιζερ, η δέσμη λέιζερ βρίσκεται πάνω από την δεξαμενή της ρητίνης και η έκθεση της ακτίνας λέιζερ γίνεται από την κορυφή.^{10,31} Το λέιζερ εστιάζεται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο φακών και στη συνέχεια αντανακλάται από δύο μηχανοκίνητους καθρέφτες σάρωσης (γαλβανόμετρο).³¹ Οι καθρέφτες σάρωσης κατευθύνουν με ακρίβεια την ακτίνα στη δεξαμενή με τη ρητίνη, η οποία διοχετεύεται κατά μήκος του τυπωμένου στρώματος, αλλάζοντας τη θέση και τη γωνία των οπτικών στοιχείων, δηλαδή των φακών και καθρεφτών.³¹ Το βάθος του πολυμερισμού ουσιαστικά καθορίζεται από την ανάλυση του άξονα z και ελέγχεται από το φωτοεκκινητή και τις συνθήκες της εκτιθέμενης ακτινοβολίας (το μήκος κύματος, η ισχύς και η έκθεση χρόνο/ταχύτητα) καθώς και τυχόν χρωστικές ή άλλες προστιθέμενες ουσίες (φωτοεκκινητές, καταλύτες κ.α).^{35,38} Γενικά, στη διαδικασία SLA, το πάχος του στρώματος εξαρτάται από τα πρότυπα του μοντέλου του εκτυπωτή, τα οποία μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ έως 150 μm με επιφανειακή τραχύτητα περίπου 35 έως 40 μm Ra.³¹

Η υγρή ρητίνη στερεοποιείται, όταν εκτίθεται στην ακτίνα λέιζερ με αποτέλεσμα τον πολυμερισμό του υλικού. Όταν ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός του πρώτου στρώματος, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει εντός της δεξαμενής. Η επιφάνεια της με αυτόν τον τρόπο υποχωρεί κατά απόσταση ίση με ένα πάχος στρώματος κάτω από την επιφάνεια της ρητίνης, επιτρέποντας στη μη πολυμερισμένη ρητίνη να καλύψει το προηγούμενο στρώμα. Έπειτα, το λέιζερ σχεδιάζει εντοπίζοντας την επόμενη διατομή του αντικειμένου, ώστε να σχηματιστεί το επόμενο στρώμα του εκμαγείου.^{31,35} Ουσιαστικά, ο σχηματισμός του κάθε στρώματος ελέγχεται από την κίνηση της δέσμης λέιζερ. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές μέχρι την πλήρη κατασκευή του αντικειμένου.



Στην περίπτωση, που υπάρχουν αντικείμενα με προεξοχές, εσοχές ή κενά, αυτά πρέπει να υποστηρίζονται κατά τη διαδικασία της κατασκευής από «δομές στήριξης».^{32,34} Αυτό επιτυγχάνεται είτε χειροκίνητα, δηλαδή κατά το σχεδιαστικό κομμάτι ο ειδικός ορίζει τα στηρίγματα, είτε αυτόματα από το λογισμικό CAD και κατασκευάζεται παράλληλα με το αντικείμενο. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής, το αντικείμενο ανυψώνεται από τη δεξαμενή και τα στηρίγματα κόβονται.^{32,34}

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής, τα αντικείμενα βυθίζονται σε ένα λουτρό διαλύτη για την απομάκρυνση της περίσσειας/μη πολυμερισμένης ρητίνης και στην συνέχεια τοποθετούνται σε φούρνο UV για να ολοκληρωθεί η διαδικασία πολυμερισμού. Με βάση την πολυπλοκότητα και το μέγεθος του αντικειμένου, η στερεολιθογραφία μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως περισσότερο από 24 ώρες για τη δημιουργία ενός συγκεκριμένου προϊόντος.^{4,34,54}

Επισκόπηση υλικών

Υλικά: ελαφρώς πολυμερισμένες ρητίνες (εποξειδικά φωτοπολυμερή, ακρυλικά ουρεθάνης, ακρυλικά αμινών), κερί, κεραμικές ρητίνες.⁴²

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση με φωτοπολυμερισμό αποκαλούνται φωτοευαίσθητες ρητίνες. Ο μηχανισμός φωτοσύνθεσης επιλέγεται ανάλογα με το μήκος κύματος της λάμπας και την τεχνολογία εκτύπωσης. Γενικά, η φωτοευαίσθητη ρητίνη που χρησιμοποιείται στην τεχνική SLA βασίζεται στον μηχανισμό του κατιονικού ή υβριδικού φωτοπολυμερισμού.⁴²

Υπάρχουν τρεις λόγοι για την επιλογή ενός τέτοιου μηχανισμού. Πρώτον, το μήκος κύματος της δέσμης λέιζερ του SLA είναι 355 nm. Σε αυτό το μήκος κύματος, θα μπορούσε να εφαρμοστεί τόσο ο ριζικός όσο και ο κατιονικός φωτοπολυμερισμός. Δεύτερον, η συρρίκνωση των διαστάσεων αυτών των υλικών χαρακτηρίζεται ως το ψεγάδι του φωτοπολυμερισμού. Η συρρίκνωση έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία εσωτερικών τάσεων, οι οποίες αναπόφευκτα οδηγούν σε στρεβλώσεις του υλικού και τελικά σε πιθανές αποσπάσεις αυτού. Διαφορετικά, η συρρίκνωση του όγκου συνεπάγεται τη μείωση της ακρίβειας του τρισδιάστατου αντικειμένου. Έτσι, η συρρίκνωση αποτελεί ένα βασικό μειονέκτημα για την τρισδιάστατη εκτύπωση με φωτοπολυμερισμό. Γνωστό στην επιστημονική κοινότητα αποτελεί, ότι ο κατιονικός φωτοπολυμερισμός παρουσιάζει μικρή



έως και μηδενική συρρίκνωση. Επομένως, εάν η πηγή φωτός ταιριάζει με την απορρόφηση του κατιονικού φωτοεκκινητή, η κατιονική φωτοευαίσθητη ρητίνη είναι η καλύτερη δυνατή επιλογή. Τρίτον, οι ρητίνες για κατιονικό φωτοπολυμερισμό είναι λιγότερες και η τιμή του εκκινητή είναι υψηλή. Αντίθετα, η επαγωγική περίοδος φωτοπολυμερισμού είναι μεγάλη, επομένως, οι υβριδικές φωτοευαίσθητες ρητίνες, προτιμώνται ως μίγμα ριζικών και κατιονικών φωτοευαίσθητων ρητινών. Οι υβριδικές ρητίνες θα μπορούσαν να προσαρμόσουν την απόδοση, το ρυθμό εκτύπωσης και το κόστος των εκτυπωμένων μοντέλων.⁴²

Εφαρμογές

Προσαρμοσμένα εμφυτεύματα, σχεδιασμό κρανιακών, γναθοπροσωπικών και νευροχειρουργικών επεμβάσεων, ακριβή αντίγραφα της ανθρώπινης ανατομίας, ένθετα, γναθοπροσωπική, χειρουργικοί οδηγοί, προσωρινές στεφάνες-γέφυρες, μοντέλα ρητίνης για χύτευση, ορθοδοντικές συσκευές (διαφανείς ορθοδοντικοί νάρθηκες ενεργοί και συγκρατητικοί),^{33,40,41} χυτές κατασκευές, ολικές οδοντοστοιχίες, εκμαγεία, υποστρώματα κυτταρικών καλλιεργειών (πολυκαπρολακτόνη), αισθητικά διαγνωστικά πρότυπα, ατομικά δισκάρια.^{4,40,54,59}



Εικόνα 20. Εκμαγεία εκτυπωμένα με SLA εκτύπωση.⁵⁷

Πλεονεκτήματα

- ✚ Δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων και λεπτών σχημάτων (με υψηλή ανάλυση χαρακτηριστικών-ακρίβεια $\pm 0.5\%$).^{9,34,42}



- ✚ Η SLA αποτελεί το πεδίο στο οποίο διαθέτουμε τις περισσότερες γνώσεις και εφαρμογές.^{9,34,42}
- ✚ Λείες επιφάνειες, οι οποίες συνήθως δεν απαιτούν διαδικασία φινιρίσματος.^{9,34}
- ✚ Υλικά χαμηλότερου κόστους για χύμα προϊόντα και όχι συσκευασμένα.^{9,34}
- ✚ Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της περισσευούμενης ρητίνης.^{9,34,37}
- ✚ Καλή δύναμη άξονα z λόγω χημικού δεσμού μεταξύ επιπέδων.^{9,34,37}
- ✚ Δυνατότητα δημιουργίας μεγάλου μεγέθους αντικειμένων.^{9,42}
- ✚ Μεγάλη ποικιλία μονομερών και συστημάτων ρητίνης.^{33,34,37}
- ✚ Πολυάριθμοι προμηθευτές εκτυπωτών.⁴²
- ✚ Σχετικά γρήγορη κατασκευή.⁴²
- ✚ Υψηλή μηχανική αντοχή.^{9,32}
- ✚ Θερμική αντίσταση.^{32,42}

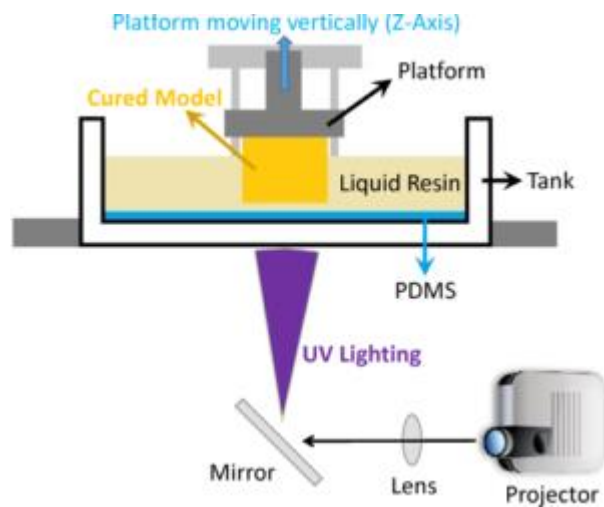
Μειονεκτήματα

- ✚ Έχει χαμηλό ρυθμό εκτύπωσης λόγω της ταχύτητας πολυμερισμού (ανάλογα με την κίνηση της δέσμης λέιζερ). Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του αντικειμένου και ο αριθμός αυτών, τόσο πιο αργός είναι ο ρυθμός εκτύπωσης (π.χ. ~1-2 λεπτά/ στρώμα).^{4,9,34,42}
- ✚ Ανάγκη για δομές στήριξης, οι οποίες μετά το πέρας της εκτύπωσης πρέπει να αφαιρεθούν με συνέπεια να αυξάνεται ο χρόνος παραγωγής και μετεπεξεργασίας, καταναλώνοντας περισσότερο υλικό.^{9,31,34,42}
- ✚ Οι ρητίνες αποτελούν εύφλεκτα υλικά και μπορεί να προκαλέσουν ερεθισμούς στο δέρμα και στους βλεννογόνους. Έχουν έντονη οσμή και προκαλούν προβλήματα στο αναπνευστικό.^{9,34}
- ✚ Η ανάλυση εκτύπωσης εξαρτάται από το μέγεθος της δέσμης λέιζερ, επομένως, σε σύγκριση με άλλες τεχνικές φωτοπολυμερισμού, η SLA έχει χαμηλή ανάλυση.^{9,34}
- ✚ Απαραίτητη η μετεπεξεργασία για επίτευξη σταθερότητας των υλικών, αφού με την πάροδο του χρόνου μπορεί να γίνουν πιο εύθραυστα.^{9,34}
- ✚ Απαιτεί χρήση ειδικού εξοπλισμού και βασίζεται σε μια πολύπλοκη διαδικασία.^{9,34,60}



- ✚ Περιορισμένη διάρκεια ζωής υλικών τόσο σε συνθήκες περιβάλλοντος, όσο και στο στοματικό περιβάλλον.^{9,34}
- ✚ Διατίθεται μόνο για υγρά πολυμερή, τα οποία πολυμερίζονται ελαφρώς.^{9,34}
- ✚ Περιορισμένος αριθμός ρητινών για κατιονικό φωτοπολυμερισμό.^{9,34}
- ✚ Τεχνολογία υψηλού κόστους (αναλώσιμα και εξοπλισμός).^{9,34}
- ✚ Δεν μπορεί να αποστειρωθεί με θερμότητα.^{9,34}

4.2 ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΩΤΟΣ (DLP)



Εικόνα 21. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός DLP εκτυπωτή.⁶⁰

Η πρώτη εμφάνιση της τεχνολογίας DLP έγινε πριν 24 χρόνια. Το βασικό μέρος της τεχνολογίας DLP είναι ένας οπτικός ημιαγωγός ή αλλιώς μια συσκευή ψηφιακού μικροσκοπίου ή ένα τσιπ DLP, το οποίο εφευρέθηκε από τον Δρ Larry Hornback το 1977 και εμπορευματοποιήθηκε από την Texas instruments το 1996.^{31,40,42}

Το τσιπ DLP είναι ίσως η πιο προηγμένη οπτική μεταγωγική συσκευή στον κόσμο μέχρι σήμερα. Περιέχει δύο εκατομμύρια κανονικούς πίνακες σπιθαμιαίων μικροσκοπίων τα οποία εξαρτώνται το ένα από το άλλο. Κάθε μικροσκόπιο είναι περίπου το ένα πέμπτο του μεγέθους μιας ανθρώπινης τρίχας.⁴² Κατά τον συντονισμό του DLP τσιπ με ψηφιακά σήματα βίντεο ή εικόνας, οι πηγές φωτός και οι φακοί-προβολείς του μικροσκοπίου μπορούν να προβάλουν μια πλήρη ψηφιακή εικόνα σε μια οθόνη ή σε κάποια άλλη επιφάνεια. Η προηγμένη ηλεκτρονική συσκευή του DLP και τα υπόλοιπα εξαρτήματα της είναι γνωστή ως τεχνολογία Digital Light Proccession (οπτική επεξεργασία δεδομένων). Οι



απειροελάχιστοι χρόνοι αλλαγής των τσιπ DLP μπορούν να αναπτύξουν μεγάλη απόδοση της τάξης των χιλιάδων αλλαγών ανά δευτερόλεπτο, αντανακλώντας τις γκρίζες σκιές των 1024 εικονοστοιχείων, μετατρέποντας τα σήματα του βίντεο ή της εικόνας, τα οποία εισάγονται από τσιπ DLP, σε πλούσιες εικόνες της κλίμακας του γκρι.⁴²

Επισκόπηση λειτουργίας

Η ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP) είναι ένας τύπος νανοτεχνολογίας που χρησιμοποιεί ψηφιακή συσκευή με μικροκαθρέφτες.^{54,62} Η πηγή ενέργειας αυτής αποτελεί μια συμβατική πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας, για τον πολυμερισμό της υγρής ρητίνης προς στερεά τρισδιάστατα αντικείμενα. Ουσιαστικά χρησιμοποιεί έναν προβολέα, όπως αυτόν που χρησιμοποιείται για παρουσιάσεις γραφείου και προβάλλει την εικόνα του στρώματος του επιθυμητού αντικείμενου στην υγρή ρητίνη.^{42,63}

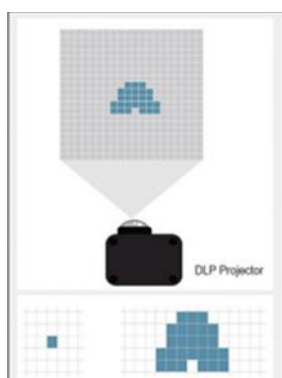
Η τεχνολογία DLP παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την στερεολιθογραφία, καθώς ως μέθοδος χρησιμοποιεί επίσης πολυμερισμό με φως. Αυτή είναι η αίτια, που από την ASTM θεωρείται ότι ανήκει στην ίδια κατηγορία προσθετικών μεθόδων (AM).^{31,54} Παρά των ομοιοτήτων τους, όμως, σημειώνονται και αρκετές διαφορές. Η κύρια διαφορά μεταξύ SLA και DLP αποτελεί η φωτεινή πηγή. Η εικόνα κάθε στρώματος δημιουργείται από ένα λαμπτήρα τόξου ή από οθόνη υγρών κρυστάλλων ή από μικροσκοπικούς καθρέφτες τοποθετημένους σε μια μήτρα με έναν τσιπ ημιαγωγό, γνωστό ως ψηφιακή συσκευή μικροκαθρέφτων (DMD) και προβάλλεται ταυτόχρονα σε ολόκληρη την πλατφόρμα μέσω ενός διαφανούς υπεριώδους γυαλιού.^{24,31,55} Δηλαδή, πολυμερίζει την ίδια στιγμή ολόκληρο το στρώμα ρητίνης στους άξονες x-y. Κάθε καθρέφτης αντιπροσωπεύει ένα ή περισσότερα εικονοστοιχεία (pixel) στην προβαλλόμενη εικόνα. Ο αριθμός των κατόπτρων αντιστοιχεί στην ανάλυση του προβαλλόμενου στρώματος.^{37,42,55,64}

Ως επιπρόσθετη διαφορά σημειώνεται, ότι το αντικείμενο κατασκευάζεται ανάποδα σε μια πλατφόρμα, η οποία ανυψώνεται. Κάτω από την πλατφόρμα κατασκευής (γυάλινη πλάκα) βρίσκεται ο προβολέας, ο οποίος αναπαράγει την εικόνα του στρώματος στην δεξαμενή υγρής ρητίνης προκαλώντας τον πολυμερισμό μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας.^{31,40} Στην συνέχεια, η κατασκευαστική πλατφόρμα βυθίζεται προς τα κάτω εντός του υγρού μονομερούς.⁵⁴ Το βάθος διείσδυσης και η προκύπτουσα απόσταση από την γυάλινη πλακά του θαλάμου κατασκευής αντιστοιχούν στο πάχος του στρώματος, Έτσι,



αφού στερεοποιηθεί η ρητίνη, η πλατφόρμα ανυψώνεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Τέλος, το αντικείμενο αναδύεται από την ρητίνη και η περίσσεια αποστραγγίζεται.³⁶ Η επεξεργασία μετά την εκτύπωση περιλαμβάνει έκπλυση της υπόλοιπης ρητίνης και αφαίρεση των στηριγμάτων με σπάσιμο ή κοπή.⁵⁴

Άλλη διαφορά είναι ότι η DLP δημιουργεί ένα ολόκληρο στρώμα ως μία ψηφιακή εικόνα σε μικροσκοπικά ογκομετρικά pixel σε αντίθεση με το λέιζερ της SLA, στην οποία η ακτίνα λέιζερ πρέπει να σαρώσει στη δεξαμενή όλα τα επιθυμητά σημεία. Εξ ου και ο λόγος που η εκτύπωση DLP είναι ταχύτερη και μπορεί να δημιουργήσει αντικείμενα με υψηλότερη ανάλυση.^{37,54}



Εικόνα 22. Απεικόνιση των Pixel κατά την DLP εκτύπωση ενός στρώματος του αντικειμένου.⁶³

Επισκόπηση υλικών

Υλικά: ποικιλία φωτοευαίσθητων πολυμερών, μέταλλα, κεριά, ρητίνες- έχουν μεγάλες δυνατότητες για προσαρμοσμένη μηχανική ιστών και άλλες βιοϊατρικές εφαρμογές.^{40,65}

Κανονικά, οι ελεύθερες ρίζες των φωτοπολυμερών ρητινών χρησιμοποιούνται στην DLP τρισδιάστατη εκτύπωση. Η τεχνολογία αυτή δεν απαιτεί κατιονικό πολυμερισμό και ο λόγος οφείλεται: πρώτον, στο ότι ο κατιονικός φωτοεκκινητής δύσκολα θα μπορούσε να λειτουργήσει με ακτινοβολία 405 nm. Παρότι, κάποιιοι έχουν αυτή την ικανότητα, η τιμή αυτών είναι ιδιαίτερα υψηλή και επομένως οι εφαρμογές τους είναι περιορισμένες. Δεύτερον, η ένταση φωτός της τρισδιάστατης εκτύπωσης DLP δεν είναι αρκετά υψηλή (405nm) για να προκαλέσει την φωτόλυση των κατιονικών φωτοεκκινητών.⁴²

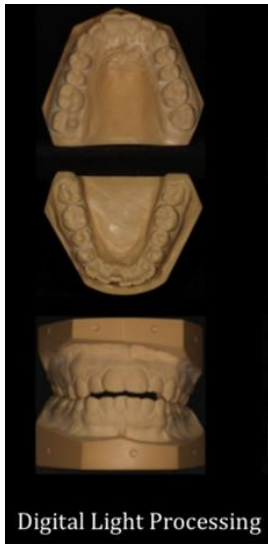


Εφαρμογές

Η τεχνική DLP βρίσκει εφαρμογή στην μηχανική ιστών, δηλαδή μπορεί να παράγει δείγματα με προκαθορισμένες εσωτερικές δομές για πολύπλοκα όργανα, συμπεριλαμβανομένης της τραχείας, της καρδιάς, των πνευμόνων και των αγγείων με ικανοποιητική βιομηχανική. Αυτό αποδεικνύει την υψηλή ακρίβεια των προϊόντων της.^{40,66}

Επίσης, χρησιμοποιείται στην προσθετική οδοντιατρική αποκαλύπτοντας τη σκοπιμότητά της για την ανάπτυξη της ψηφιακής ροής της εργασίας για εξατομικευμένη ιατρική, όπως εξωτερικές δομές για εξατομικευμένα εμφυτεύματα. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία οδοντιατρικών μοντέλων με υψηλή ακρίβεια. Πρόσφατα, η τεχνική DLP έχει χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή στερεών παρασκευασμάτων για στοματικές χορηγήσεις φαρμάκων.^{40,66}

Άλλες εφαρμογές της τεχνολογίας DLP: εκμαγεία, χυτές κατασκευές, προσωρινές αποκαταστάσεις, πλαίσια για κινητές οδοντοστοιχίες, ατομικά δισκάρια, παραγωγή τεχνητών δοντιών για πλήρεις οδοντοστοιχίες, δείκτη σιλικόνης για προσωρινή δοκιμή και μόνιμη παραγωγή όψεων ρητίνης.^{40,66}



Εικόνα 23. Εκμαγεία εκτυπωμένα με τεχνολογία DLP.⁶⁷



Εικόνα 24. Εκμαγεία εκτυπωμένα με τεχνολογία DLP.⁴⁹



Πλεονεκτήματα

- ✚ Υψηλή ακρίβεια και ανάλυση, η οποία μπορεί να μειωθεί, ανάλογα με την ποιότητα του προβολέα και το χρησιμοποιούμενο υλικό.⁶⁸ Για την εξασφάλιση άλλους ακρίβειας, το μέγεθος του προβολέα πρέπει να είναι περιορισμένο. Γι' αυτό, η DLP αποδίδει πολύ υψηλά αποτελέσματα σε μικρής διάστασης αντικειμένων και αυτό την κάνει ιδανική για τον κλάδο άλλους οδοντιατρικής.^{54,37} Επιπροσθέτως, δύναται να φτάσει σε πάχος στρώματος μικρότερο από 30 μικρά και το μέγεθος εκτύπωσης μπορεί να φθάσει 100*60 mm έως 190*120 mm.^{18,34,36,38,42}
- ✚ Λείες επιφάνειες και υψηλού επιπέδου ποιότητα επιφανειών. Με την DLP παράγουμε προϊόντα με εξαιρετικές λεπτομέρειες δυνατότητα μικρογραφιών και πολύπλοκων σχημάτων.^{17,38,42,65,68,69}
- ✚ Η DLP μπορεί να παράγει αντικείμενα με μεγάλη ποικιλία ιδιοτήτων, υψηλή διαύγεια, αντοχή, ευελιξία, αδιάβροχες ιδιότητες, θερμική αντίσταση και ανθεκτικότητα.^{42,54,37}
- ✚ Μείωσή του χρόνου κατασκευής. Ο πολυμερισμός άλλους ολοκλήρου στρώματος των φωτοπολυμερων αποδίδει μεγάλες ταχύτητες επεξεργασίας.^{17,25,35,42,66-70}
- ✚ Χαμηλότερο κόστος τεχνολογίας από άλλους τρισδιάστατους εκτυπωτές.^{17,35,42}

Μειονεκτήματα

- ✚ Φθηνότεροι εκτυπωτές DLP μερικές φορές υποφέρουν από μικρή παραμόρφωση voxel. Ωστόσο, αυτό το πιθανό ζήτημα γίνεται λιγότερο πρόβλημα εάν κάποιος επενδύσει λίγο περισσότερα χρήματα. Αυτό συμβαίνει επειδή, με εκτυπωτές υψηλότερης ποιότητας συνοδεύεται και υλικό υψηλότερης ποιότητας, το οποίο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να διορθώνει την παραμόρφωση.^{34,42}
- ✚ Οι εκτυπωτές DLP έχουν ως τεχνικό μειονέκτημα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν, τα (προσιτά) τσιπ DMD, τα οποία είναι συνήθως 1920*1080 pixel,

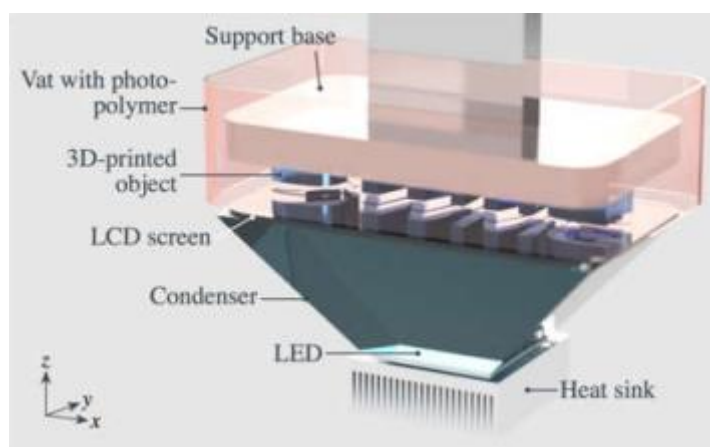


γεγονός που περιορίζει την ποιότητα της εκτύπωσης κατά την αναβάθμιση της περιοχής κατασκευής.^{34,42,69}

- ✚ Ίδιες αδυναμίες σχετικά με την υγεία με αυτές που αναφέραμε στην SLA τεχνολογία, καθώς χρησιμοποιούνται τα ίδια υλικά (ερεθισμοί κατά την επαφή και από τις εκπομπές).^{34,42}
- ✚ Απαιτούνται ελαφρώς πολυμερισμένα υγρά πολυμερή και υλικά, τα οποία προσομοιάζουν με κερί (για χύτευση), τα οποία όμως είναι αρκετά ακριβά και όχι τόσο εχρηστά.³⁴
- ✚ Μετεπεξεργασία. Τα υλικά στήριξης πρέπει να αφαιρεθούν και να αποστραγγιστεί η περίσσεια ρητίνη.^{34,42}
- ✚ Όσο πιο εξατομικευμένο είναι το εκτυπωμένο προϊόν, τόσο περισσότερο αυξάνεται και η περιπλοκότητα της περάτωσης του τυπωμένου προϊόντος.⁶⁹
- ✚ Χρήση ενός μόνο υλικού τη φορά, καθώς το αντικείμενο είναι χτισμένο από μια ενιαία δεξαμενή.⁵⁴
- ✚ Περιορισμένη διάρκεια ζωής των υλικών και διάρκεια ζωής κατά την αποθήκευση.⁵⁴
- ✚ Τα βασικά υλικά και ο ίδιος ο εκτυπωτής (εξοπλισμός) είναι ακριβά.^{34,69}
- ✚ Τα χρώματα των εφαρμοστέων υλικών είναι περιορισμένα.⁶⁹
- ✚ Δεν υπάρχει δυνατότητα αποστείρωσης με θερμότητα.⁴²
- ✚ Πολύ ακριβή τεχνολογία εκτύπωσης.⁵⁴



4.3 ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΕ ΟΘΟΝΗ ΥΓΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ (LIQUID CRYSTAL DISPLAY-LCD)



Εικόνα 25. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός LCD εκτυπωτή.⁷¹

Σε όλες τις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης με φωτοπολυμερισμό, από την τεχνική SLA (σάρωση με λέιζερ), σε ψηφιακή προβολή DLP, στην πιο πρόσφατη εκτύπωση LCD τεχνολογία, η κύρια διαφορά είναι η πηγή φωτός και το σύστημα απεικόνισης, ενώ το σύστημα ελέγχου και ο τρόπος εξέλιξης της εκτύπωσης παρουσιάζουν μικρές διαφορές. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης DLP και LCD αποτελεί το σύστημα απεικόνισης.⁴²

Επισκόπηση λειτουργίας

Η τρισδιάστατη εκτύπωση υγρών κρυστάλλων (LCD) βασίζεται στη χρήση οθονών LCD ως συστήματος απεικόνισης.⁶² Σύμφωνα με την αρχή απεικόνισης ενός φωτοευαίσθητου τρισδιάστατου εκτυπωτή με ακτινοβολία φωτός LCD, τα σήματα της εικόνας παρέχονται μέσω ενός προγράμματος υπολογιστή και εμφανίζονται σε ένα κύκλωμα οθόνης.⁵⁰ Ουσιαστικά, εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο σε έναν υγρό κρύσταλλο, τροποποιώντας τη μοριακή του διάταξη και αποτρέποντας ή επιτρέποντας την διέλευσή του φωτός.⁴² Έτσι, ορισμένες περιοχές μετατρέπονται σε διαπερατές-διαφανείς επιφάνειες και εμφανίζονται στην οθόνη πριν από την ακτινοβολία, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν αδιαφανείς-μη διαπερατές.⁵⁰ Υπό την ακτινοβολία με τα φώτα της LCD, δηλαδή, οι διαπερατές περιοχές εμφανίζονται στην οθόνη των υγρών κρυστάλλων επιτρέποντας την



διέλευσή του φωτός από τις λυχνίες LCD. Ωστόσο, στις περιοχές στις οποίες δεν παρουσιάζονται εικόνες, το υπεριώδες φως δεν προωθείται.^{42,50,62}

Η οθόνη LCD, όπως και στην τεχνολογία DLP, προβάλλει ένα ολόκληρο στρώμα στην δεξαμενή με την υγρή ρητίνη, η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια της οθόνης των υγρών κρυστάλλων. Μια διαφανής ταινία έχει οριστεί στο κάτω μέρος της δεξαμενής του υγρού. Τα φώτα LCD ακτινοβολούν απευθείας στη φωτοευαίσθητη ρητίνη δια μέσω της διαφανούς μεμβράνης, έτσι ώστε αυτή να μπορεί να πολυμεριστεί με την αντίδραση σκλήρυνσης και στη συνέχεια να στερεοποιηθεί. Όσο για το αδιαφανές τμήμα της οθόνης LCD, αυτό εμποδίζει τις λυχνίες UV, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να μην προσπίπτει στις περιοχές της ρητίνης και να παραμένει σε υγρή κατάσταση κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Η οθόνη λειτουργεί ως μάσκα, αποκαλύπτοντας μόνο τα pixel που είναι απαραίτητα για το τρέχον επίπεδο. Ως εκ τούτου, δεν απαιτείται ειδική συσκευή για να κατευθύνει το φως, όπως συμβαίνει τόσο στο SLA όσο και στο DLP. Τέλος, η πλατφόρμα κατασκευής ανυψώνεται αργά από την δεξαμενή καθώς σχηματίζεται στρώμα προς στρώμα το αντικείμενο.⁵⁰

Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τη συμβατική τεχνική SLA, όπου η στερεοποίηση του φωτοπολυμερούς λαμβάνει χώρα υπό έκθεση εστιασμένης πηγής υπεριώδους φωτός, οι εκτυπωτές LCD χρησιμοποιούν μια πηγή LED χαμηλής ισχύος ως πηγή για το μπλε φως (μήκος κύματος 400 nm), το οποίο διέρχεται από το λεπτό πάνελ LCD, το οποίο λειτουργεί ως οπτικό κλείστρο για την πηγή φωτός, παρέχοντας έτσι έκθεση σε ολόκληρο το στρώμα. Η τυπική ανάλυση 2Kπ της οθόνης LCD παρέχει μέγεθος pixel XY 42 μm (600 dpi), σε όγκο κατασκευής 12,1 × 6,8 × 16 cm³ με πάχος στρώσης 25 μm.⁷²

Χάρη στην προηγμένη τεχνολογία αναπαραγωγής υγρών κρυστάλλων, η ανάλυση της οθόνης είναι ιδιαίτερα υψηλή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φως δεν επεκτείνεται και έτσι η παραμόρφωση των εικονοστοιχείων δεν αποτελεί πρόβλημα. Αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα εκτύπωσης ενός εκτυπωτή LCD εξαρτάται από την πυκνότητα LCD. Όσο περισσότερα pixel έχει, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα εκτύπωσης.⁴²

Ωστόσο, κατά τη διάρκεια διακοπών του ηλεκτρικού πεδίου, μικρός αριθμός μοριακών υγρών κρυστάλλων δεν μπορεί να αναδιαταχθεί, με αποτέλεσμα την ασθενή διαρροή φωτός. Αυτό οδηγεί σε μειωμένη ακρίβεια, η οποία είναι κατώτερη από αυτή της τεχνολογίας DLP.⁴² Η τρισδιάστατη εκτύπωση LCD, παρ' όλα αυτά, είναι μια οικονομικά αποδοτική τεχνική κατασκευής ρητίνης για τη λήψη μεγάλων και λεπτομερών λειτουργικών εξαρτημάτων. Αυτή η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης εστιάζει στη μαζική κατασκευή και στην τρισδιάστατη εκτύπωση μεγάλων εξαρτημάτων για υλικά ρητίνης χάρη στους



τρισδιάστατους εκτυπωτές με μεγαλύτερο δίσκο κατασκευής, που από εταιρείες όπως η Photocentric.

Επισκόπηση υλικού

Υλικά: ρητίνες, εποξειδικές ρητίνες ανάμεικτες με φωτοδιαλυτή, ακρυλικές ρητίνες.⁴²

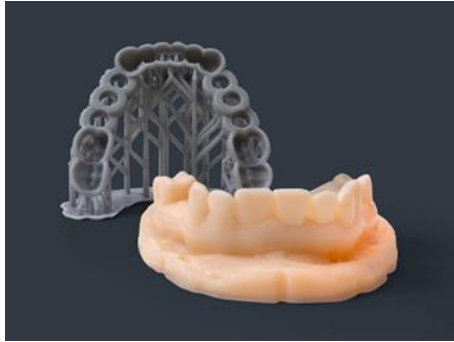
Οι εκτυπωτές LCD παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα της περιορισμένης επιλογής υλικών. Καθώς δεν είναι όλες οι ρητίνες συμβατές με τις διαφορετικές τεχνικές εκτύπωσης. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές με λέιζερ διαθέτουν ένα πολύ ισχυρό λέιζερ, το οποίο θα χρειαζόταν μια πιο αργή ρητίνη σκλήρυνσης για να έχει μια σταθερή διαδικασία εκτύπωσης. Ενώ οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές LCD έχουν πηγή φωτός LED χαμηλής ισχύος, η οποία λειτουργεί πολύ καλά με ρητίνες γρήγορης σκλήρυνσης.⁴²

Επίσης, ένας ακόμα λόγος για τον οποίο δεν είναι εφικτή η χρήση των ιδίων ρητινών, που χρησιμοποιούνται στις άλλες τεχνικές, αποτελεί η ένταση του φωτός. Είναι γνωστό ότι η ένταση του φωτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον φωτοπολυμερισμό, ο οποίος καθορίζει την ταχύτητα εκτύπωσης και τον βαθμό πολυμερισμού. Επομένως, για την επιτυχή χρήση ρητινών για DLP εκτύπωση στην εκτύπωση με LCD πρέπει είτε να αυξηθεί η ποσότητα του ενεργοποιητή ή να παραταθεί ο χρόνος έκθεσης. Μόνο τότε θα μπορούσαν οι φωτοευαίσθητες ρητίνες για εκτύπωση DLP να χρησιμοποιηθούν από LCD εκτυπωτές.⁴²

Εφαρμογές

Τώρα το LCD η μηχανή φωτογράφισης εφαρμόζεται στους τομείς της οδοντιατρικής, του κοσμήματος, της μηχανικής βιομηχανίας, των παιχνιδιών και ούτω καθεξής.⁴²





Εικόνα 27. Χειρουργικός οδηγός και εκμαγείο εκτυπωμένα με τεχνολογία DLP.⁷³



Εικόνα 26. Εκμαγείο εκτυπωμένο με DLP τεχνολογία.⁷⁴

Πλεονεκτήματα

- ✚ Διατίθενται σε μεγέθη από 3" έως 80", οπότε η προβολή είναι άμεση και κάθετη στη βάση σε όλη την επιφάνεια. Αυτό αποφεύγει τη χρήση ακριβών και πολύπλοκων συστημάτων φακών προβολής και τις παραμορφώσεις που προκαλούν στα εξαρτήματα που παράγονται με DLP. Επιπλέον, ξεπερνά την τεχνολογία DLP με δύο βασικούς τρόπους. Όπως σημειώθηκε παραπάνω, η κάθετη προβολή αποτρέπει την παραμόρφωση από την λοξή προβολή, που παρέχουν οι φακοί στα συστήματα DLP. Δεύτερον, οι συσκευές LCD όχι μόνο μπλοκάρουν ή επιτρέπουν στο φως να περάσει, αλλά μπορούν επίσης να το φιλτράρουν μεταβάλλοντας την ένταση του φωτός ανεξάρτητα σε κάθε pixel. Αυτό καθιστά δυνατή τη χρήση διεργασιών κατά της παραμόρφωσης, που μειώνουν το φαινόμενο της σκάλας και επιτρέπουν την ποιότητα της επιφάνειας πολύ κοντά σε εκείνα που λαμβάνονται από το SLA.^{34,42}
- ✚ Δυνατότητα ταχύτατου πολυμερισμού και χρόνου παραγωγή. Τόσο η DLP όσο και η LCD μπορούν να επιτύχουν γρήγορες ταχύτητες εκτύπωσης και αναπαραγωγή εξαιρετικών λεπτομερειών, αλλά καθώς η τιμή αυξάνεται, οι εκτυπωτές DLP αρχίζουν να υπερσχύουν των ομολόγων τους LCD. Η βασική ιδιότητα της εκτύπωσης LCD είναι ότι το φως λάμπει μέσω των επίπεδων πάνελ LCD απευθείας στη μη πολυμερισμένη ρητίνη. Αυτό επιτρέπει στο φως να μην επεκτείνεται και, ως εκ τούτου, η παραμόρφωση των εικονοστοιχείων δεν χρήζει ιδιαίτερης σημασίας όπως στην τεχνική DLP. Επιπλέον, ένα ολόκληρο στρώμα μπορεί να εκτεθεί ταυτόχρονα και δεν υπάρχει ανάγκη σάρωσης σημείο προς σημείο όπως στο SLA.



Έτσι, έχουμε μια ταχύτερη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σε πολλούς εκτυπωτές LCD το φως προέρχεται από μια σειρά UV ή LED λάμπες.^{42,62}

- ✚ Παρέχει καλή ανάλυση. Οι ρητίνες φωτός ημέρας θεραπεύονται στα 460 nm, ενώ οι περισσότερες από τις άλλες φωτοπολυμεριζόμενες ρητίνες πολυμερίζονται στην περιοχή UV, χρησιμοποιώντας μήκη κύματος μεταξύ 325-420 nm. Σύμφωνα με τη Photocentric, η χρήση του φωτός σε μεγαλύτερο μήκος κύματος αποδείχθηκε ότι επιτρέπει ένα μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης στο φωτοπολυμερές υλικό και επομένως μια πιο ομοιόμορφη και ακριβή διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ο συνδυασμός του ορατού φωτός με τη χρήση των οθονών LCD για τρισδιάστατη εκτύπωση, επιτρέπει μια ταχύτερη, πιο αποτελεσματική και οικονομική κατασκευή επεξεργάζομαι, διαδικασία.^{42,62}
- ✚ Οι εκτυπωτές LCD είναι ιδιαίτερα οικονομικοί. Γενικά, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές τεχνολογίας LCD χρησιμοποιούν φθηνότερα εξαρτήματα από τους τρισδιάστατους εκτυπωτές DLP, καθιστώντας τους μια προσιτή λύση για 3D εκτύπωση ρητίνης. Αυτό οδήγησε στην εφαρμογή τους κυρίως ως επιτραπέζιους εκτυπωτές. Αυτό αποτελεί μεγάλο προνόμιο καθώς επεκτείνεται η εμβέλεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης με ρητίνη σε ένα ευρύτερο κοινό κατασκευαστών.⁴²

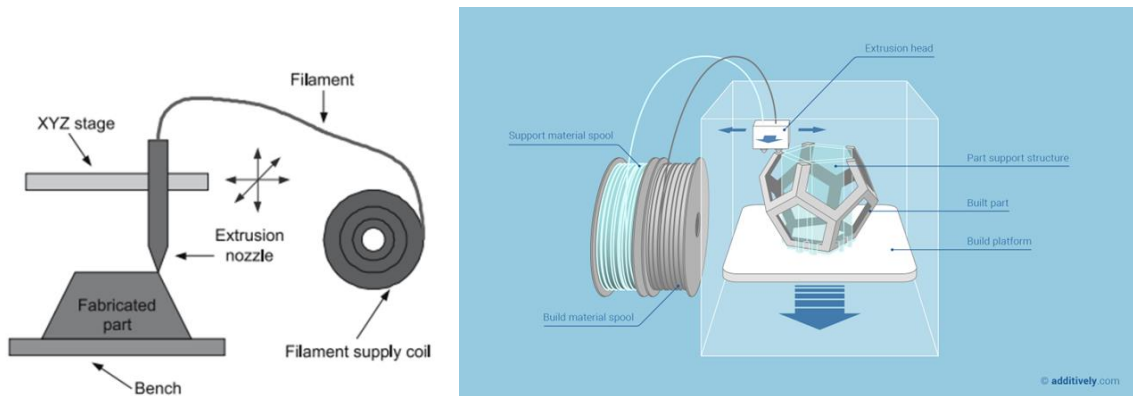
Μειονεκτήματα

- ✚ Υπερθέρμανση. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα είναι το υψηλό επίπεδο θέρμανσης, που παράγεται από τις χρησιμοποιούμενες μήτρες LED, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να εφαρμοστούν αποτελεσματικά συστήματα ψύξης για να αποτραπεί η θέρμανση της ρητίνης σε μεγάλες εκτυπώσεις.^{34,42}
- ✚ Περιορισμένος πολυμερισμός και χρήση ειδικών ρητινών. Η ένταση της τρισδιάστατης εκτύπωσης LCD είναι πολύ ασθενής, επειδή μόνο το 10% του φωτός μπορεί να διεισδύσει από την οθόνη LCD και το 90% του φωτός απορροφάται από την οθόνη LCD.^{34,42}
- ✚ Μερική διαρροή φωτός. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε σταδιακή καθίζηση της φωτοευαίσθητης ρητίνης στον πάτο της δεξαμενής του υγρού, η οποία θα πρέπει να καθαρίζεται τακτικά.⁴²



- ✚ Οθόνη ταχείας ανάλωσης. Η οθόνη LCD έχει μικρή διάρκεια ζωής και πρέπει να αντικαθίσταται τακτικά.⁴²

4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΛΙΩΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (FUSED DEPOSITION MODELING-FDM)



Εικόνα 28. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός εκτυπωτή FDM.³²

Εικόνα 30. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός εκτυπωτή FDM.³⁰

Η τεχνολογία μοντελοποίησης με εναπόθεση λιωμένου υλικού (FDM) ή όπως αλλιώς ονομάζεται κατασκευή σύντηξης νημάτων (Fused filament fabrication-FFF) ή εξώθηση υλικού (Material extrusion-ME) αναπτύχθηκε από τον Scott Crump στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και έγινε δημοφιλής από τη Stratasys (Stratasys Company, Eden Prairie, MN, USA).^{4,37,44,54,74} Η εταιρεία πήρε την κατοχή του εμπορικού σήματος της FDM το 1990.^{11,34,40,54,57,75} Η πρώτη παραγωγή ιατρικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε το 1999. Σήμερα, αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία εκτύπωσης στην ορθοδοντική και γενικότερα στην ιατρική.^{11,34,54,57,75} Τέλος, είναι μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τρισδιάστατες μεθόδους εκτύπωσης λόγω του χαμηλότερου κόστους, της αυξημένης ευχέρειας της κατά την χρήση (νήματα έναντι σκόνης), και τον μειωμένο κίνδυνο μόλυνσης ή υποβάθμισης των υλικών.⁷⁶

Επισκόπηση λειτουργίας



Η FDM είναι μια γρήγορη τεχνική παραγωγής πρωτοτύπων, κατά την οποία ένα θερμοπλαστικό υλικό εξωθείται στρώση προς στρώση από ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο, υπό ελεγχόμενη θερμοκρασία. Θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε την τεχνολογία αυτή με ένα «ρομποτικό πιστόλι κόλλας».^{10,32,34,77} Αυτή η τεχνική βασίζεται στη θέρμανση (έως περίπου του σημείου τήξης) ενός νήματος θερμοπλαστικού πολυμερούς υλικού ή ενός μεταλλικού σύρματος, τα οποία ξετυλίγονται από ένα πηνίο, τροφοδοτούνται από ένα ακροφύσιο εξώθησης και εναποθέτονται σε μία πλατφόρμα κατασκευής.^{4,11,32,54,57} Ολόκληρο το σύστημα περιέχεται σε ένα θάλαμο που βρίσκεται σε θερμοκρασία ακριβώς κάτω από το σημείο τήξης του υλικού-πλαστικού. Ο επιμελής έλεγχος της θερμοκρασίας και η διατήρηση αυτής κατά την τοποθέτηση του υλικού αποτελούν το κλειδί αυτής της μεθόδου.^{10,32,77}

Ουσιαστικά, το ακροφύσιο θερμαίνεται 1°C υπό του σημείου τήξης. Με αυτόν τον τρόπο λιώνει το εκάστοτε υλικό και μετατρέπεται σε ημι-υγρή μορφή, η οποία έχει την δυνατότητα να ρέει ελεύθερα και να εναποθέτεται σε λεπτά στρώματα.^{4,32} Επίσης, η διαδικασία αυτή μπορεί να ενεργοποιείται και να απενεργοποιείται ανά πάσα στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι μόνο μετά την πλήρωση ενός ολόκληρου επιπέδου συνεχίζεται η παρασκευή του επόμενου. Στην FDM τεχνολογία η δημιουργία του αντικειμένου ξεκινάει από την βάση αυτού προς την κορυφή.^{4,10,32,36,77}

Συνήθως χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες ή σερβοκινητήρες για να μετακινηθεί η κεφαλή εξώθησης. Η μετατόπιση της κεφαλής του ακροφυσίου γίνεται στο ΧΟΥ επίπεδο (μετακινείται τόσο σε οριζόντια όσο και σε κάθετη διεύθυνση) και ελέγχεται από έναν επεξεργαστή.^{4,10,58} Ο αριθμητικά ελεγχόμενος μηχανισμός καθορίζει την κατεύθυνσή αυτού άμεσα από το σύστημά λογισμικού (CAD). Το λιωμένο υλικό με μεγάλη ακρίβεια πλαστικοποιείται στην άκρη της κεφαλής του ακροφυσίου και τοποθετείται αμέσως στην προβλεπόμενη συντεταγμένη σύμφωνα με τον σχηματισμό του παραγόμενου αντικειμένου. Αμέσως μετά την εναπόθεση, το υλικό στερεοποιείται ταχύτατα (εντός 0,1s), ελαχιστοποιώντας έτσι πιθανές ανακρίβειες.^{10,32,54} Το πάχος του στρώματος του εφαρμοσμένου υλικού καθορίζεται από τη διατομή της κεφαλής του ακροφυσίου.³⁹ Η κατασκευή πραγματοποιείται κατά ένα στρώμα κάθε φορά πριν την ανύψωσή του ακροφυσίου και την πτώση της πλατφόρμας παραγωγής.³³ Επίσης, η πλατφόρμα διατηρείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ταχύτητα πήξης του



θερμοπλαστικού υλικού. Έτσι, το κάθε στρώμα προσκολλάται στο προηγούμενο μέχρι την ολοκλήρωση του μοντέλου.^{10,33,44,77}

Επιπρόσθετα, οι δομές στήριξης δεν αποτελούν μέρος του τελικού προϊόντος, αλλά χρειάζονται για την υποστήριξη τμημάτων του υλικού, όπου περίπλοκοι σχεδιασμοί συνυπάρχουν με εσωτερικές υποσκαφές κατά την κατασκευή.^{10,58,77} Για την αύξηση της παραγωγικότητας του σχεδιασμού, οι δομές αυτές χτίζονται με ελασματοειδή δομή, με ασθενέστερο υλικό, με υδατοδιαλυτό υλικό (διαλύεται γρήγορα με εξειδικευμένο μηχανισμό μηχανικής ανάδευσης)⁴ ή με διάτρητους συνδέσμους.⁴⁴ Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η σπατάλη των αναλώσιμων και διευκολύνεται η απομάκρυνσή τους από το κύριο προϊόν κατά την μετέπειτα επεξεργασία. Εξίσου σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως χάρις την χρήση διαφορετικών ακροφυσίων έχουμε την δυνατότητα η προκύπτουσα δομή του τελικού αντικείμενου να κατασκευαστεί με συνδυασμό διαφόρων υλικών όπως ακρυλικό ή κερί.^{10,32,36,63,77}

Τέλος, η ποιότητα της επιφάνειας των παραγόμενων μοντέλων και άρα και το τελικό μοντέλο είναι συχνά ατελείς (μεγάλο πάχος στρώματος). Έτσι, η μετεπεξεργασία είναι απαραίτητη. Ταυτόχρονα όμως με την επεξεργασία η ακρίβεια των αντικείμενων κινδυνεύει να υποστεί αλλοιώσεις και υποβαθμίσεις.¹⁵

Επισκόπηση υλικών

Υλικά: θερμοπλαστικά πολυμερή (πολυγαλακτικό οξύ (PLA), ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS), πολυβινυλικό οξύ (PVA), πολυανθρακικό (PC), σύνθετα και νάνο-σύνθετα υλικά με βάση τα προαναφερθέντα πολυμερή, πολυαιθέρα αιθέρα κετόνη PEEK, πολυφαινυλοσουλφόνες, κεριά, πολυκαπρολακτόνη, πολυανθρακικά, πολυαμίδια, κλπ.^{33,40,41}

Για τη μέθοδο FDM διατίθενται διάφορα υλικά ποικίλων χρωμάτων με μεγάλο εύρος τόσο αντοχής όσο και θερμικών ιδιοτήτων. Όλα τα υλικά πρέπει να είναι εξ' ορισμού θερμοπλαστικά. Σε αυτά τα υλικά συμπεριλαμβάνονται διάφοροι τύποι όπως ακρυλονιτρίλιο, βουταδιένιο στυρόλιο (ABS)⁵⁴, που προσφέρει πολλή καλή αντοχή, πολυαμίδιο (PA)⁴⁰, πολυστυρόλιο (PS), πολυαιθεριμίδιο (PEI), πολυοξυμεθυλένιο (POM) πολυαιθυλένιο, πολυανθρακικά, πολυκαπρολακτόνη⁴, πολυφαινυλοσουλφόνες,



πολυθειούχα και κεριά (κεριά επένδυσης). Αυτά είναι υπεύθυνα για την πρόσφατη βελτίωση της FDM, όσον αφορά στη δύναμη και το θερμοκρασιακό εύρος.^{4,33,34,40,44,54,78}

Επιπλέον, στην κατασκευή με FDM εφαρμόζεται και το PEEK, του οποίου η ημικρυσταλλική δομή και η υψηλή θερμοκρασία τήξης, σε σύγκριση με άλλα υλικά νήματος όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS), αποτελεί τροχοπέδη για την επεξεργασία του και η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει υπερβολική θερμική καταπόνηση και δημιουργία ρωγμών στο τελικό προϊόν.⁷⁶

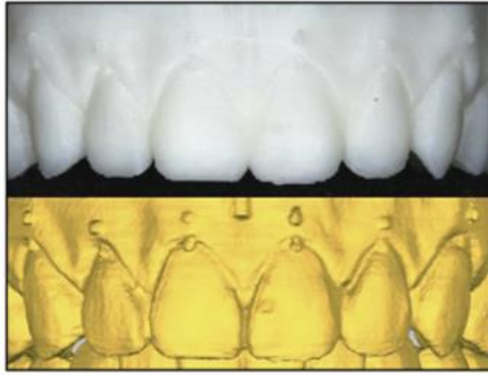
Αυτά διατίθενται ως νήματα με διάμετρο $1,75 \pm 0,05\text{mm}$. Επίσης, δίνεται η ευκαιρία επιλογής από μια ευρεία γκάμα χρωμάτων και δημιουργίας πολύχρωμων αντικειμένων. Αυτό δεν επιτυγχάνεται με αλλαγή των νημάτων κατά την διάρκεια της παραγωγής, αλλά με χρήση πολλαπλών ακροφύσιων.⁴⁰

Εφαρμογές

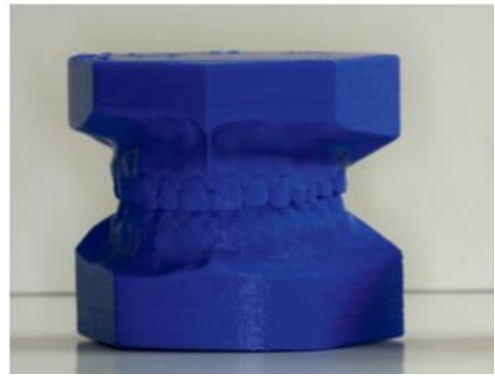
Οι συσκευές FDM χρησιμοποιούνται κυρίως στην εκτύπωση πρότυπων πιλοτικών κατασκευών πριν την τελική εφαρμογή τους από την βιομηχανία και στην ιατρική για πρωτότυπες πορώδεις δομές στην μηχανική ιστών και βιο-εκτύπωση οργάνων. Με ακρίβεια μόλις λίγων μικρομέτρων, είναι σε θέση να κατασκευάσει μέρη του σώματος με διαφορετικές μικροδομές και λεπτομέρειες, συμπεριλαμβανομένου των αιμοφόρων αγγείων, των οστών και των μαλακών ιστών.^{34,54} Επίσης, χρησιμοποιείται κατά κόρων στην ορθοδοντική (εκμαγεία, μηχανήματα κ.α) και γναθοπροσωπική (ενόδοντες γνάθους).^{34,54}

Επιπλέον, η FDM μπορεί να παράγει μοντέλα και εκμαγεία, καθώς και χειρουργικούς οδηγούς, από ABS μέσης ποιότητας, στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί αποστείρωση με ακτίνες γάμμα. Επίσης, είναι διαφανές και πληροί όλες τις απαιτήσεις του FDA USP Class VI για προσωρινή χρήση μέσα στο σώμα. Τέλος, η FDM μπορεί να παρέχει ανώτερη οπτικοποίηση επισημαίνοντας επιλεγμένα χαρακτηριστικά σε διαφορετικό χρώμα.³²





Εικόνα 31. Ψηφιακό αρχείο και το εκτυπωμένο με τεχνολογία LCD εκμαγείο.⁶⁶



Εικόνα 32. Εκτυπωμένα εκμαγεία με τεχνολογία LCD.⁵⁷

Πλεονεκτήματα

- ✚ Μεταβλητή μηχανική αντοχή. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τις ιδιότητες των εκτυπωμένων μοντέλων όπως πάχος στρώματος, ταχύτητα εκτύπωσης, θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία ακροφυσίου και θερμική επεξεργασία.⁷⁶ Με αυτόν τον τρόπο μας δίνεται η δυνατότητα παραγωγής προϊόντων (τμημάτων και εξαρτημάτων) με διαφορετική μηχανική αντοχή σε διάφορα σημεία ανάλογά το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ουσιαστικά, παρέχεται η δυνατότητα παραγωγής με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και συχνά σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής. Έτσι, με μερική ή πλήρη τήξη των σύνθετων νημάτων τροφοδοσίας μπορούν να αποδοθούν μέρη με διαφορετικές δομές και ιδιότητες.^{34,74}
- ✚ Εύκολη απομάκρυνση των δομών στήριξης. Όταν το αντικείμενο χρειάζεται επιπλέον στήριξη, υπάρχει μια δεύτερη κεφαλή η οποία εκκρίνει υλικό στήριξης, το οποίο διαλύεται στο νερό.⁶² Μετά το πέρας της εκτύπωσης, το αντικείμενο πλένεται με νερό υπό πίεση, ώστε να αποκολληθεί το περισσευούμενο υλικό.^{33,61}
- ✚ Υψηλή απόδοση σε ανατομικά μοντέλα. Πολλές χρήσεις σε διάφορα ιατρικά προϊόντα της οδοντιατρικής. Τα τρισδιάστατα (πρωτότυπα) οδοντιατρικά μοντέλα είναι αρκετά ακριβή της τάξεως του ενός χιλιοστού. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ορθοδοντική και να αντικαταστήσουν τα γύψινα εκμαγεία.^{9,33,60}



- ✚ Χαμηλό κόστος. Χαμηλού κόστους πρωτότυπα και μέρη με απλά ανατομικά χαρακτηριστικά. Η παράγωγή με τη μέθοδο FDM αποτελεί την πιο οικονομική και προσιτή τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, όσον αφορά το κόστος παραγωγής.^{33,34,60,75,79} Τόσο τα υλικά, όσο και ο εξοπλισμός κυμαίνονται μεταξύ χαμηλών και μεσαίων τιμών σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.⁷⁷
- ✚ Εύχρηστα υλικά με μεγάλη ποικιλία πολυμερών. Δεν χρησιμοποιούνται «ασταθή» υλικά, τα οποία θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πιθανές επιπλοκές κατά την παραγωγή, όπως υγρά φωτοπολυμερή, σκόνες και λείζερ.⁴⁴
- ✚ Γρήγορη παραγωγή. Η FDM είναι αρκετά γρήγορη στην κατασκευή μικρών εξαρτημάτων της τάξης των λίγων κυβικών ιντσών ή εκείνων που έχουν μικρολεπτομέρειες.³²
- ✚ Οικονομία υλικού. Δεν παράγεται μεγάλη ποσότητα χαμένου υλικού και ούτε χρησιμοποιείται επιπλέον από το υλικό της κύριας κατασκευής για της δομές στήριξης.⁷⁷
- ✚ Αποτελεσματική κατασκευή πορώδους. Για την παραγωγή προϊόντων με διακύμανση πορότητας κατά μήκος του αντικειμένου.⁷⁷
- ✚ Ευρεία διαθεσιμότητα. Ευρεία εφαρμογή της χάρις την αποτελεσματική, απλή και βολική διαδικασία εκτύπωσης 3D.⁶⁰
- ✚ Ευκολία εγκατάστασης. Δεν χρειάζονται ειδικές συνθήκες λειτουργίας και εγκατάστασης.^{33,77}
- ✚ Ευκολία χρήσης. Δεν απαιτείται ιδιαίτερη επεξεργασία των παραγόμενων προϊόντων.^{33,68}
- ✚ Δεν παράγει ρύπους. Ιδανική επιλογή για χρήση σε ιατρεία και εργαστήρια.⁶⁰

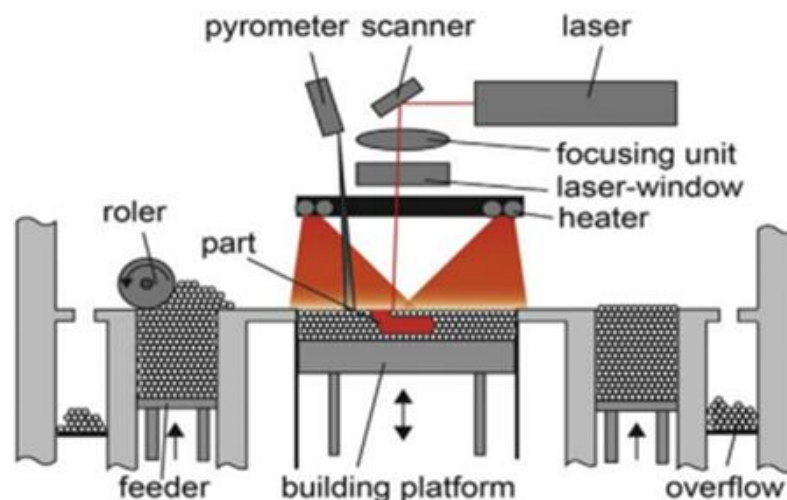
Μειονεκτήματα

- ✚ Χαμηλή ποιότητα και ανάλυσή παραγόμενης επιφάνειας εκτός αν επιλεγθεί ακριβός εξοπλισμός. Μειωμένη απόδοση λεπτομερειών, αδρή επιφάνεια με τη χαρακτηριστική εμφάνιση «σκαλοπατιών» (φαινόμενο σκάλας). Η διαστρωμάτωση είναι ορατή.⁸⁰ Επίσης δεν ενδείκνυται για λεπτά τοιχώματα προϊόντων.^{11,33,77}



- ✚ Απαιτούνται δομές υποστήριξης και μετεπεξεργασία. Το υλικό των δομών στήριξης πρέπει να αφαιρεθεί, όπως και να απομακρυνθούν οι εμφανείς διαστρωματώσεις στην επιφάνεια.³³ Δεν παράγονται πολύχρωμα αντικείμενα. Διαφορετικά χρώματα ή υλικά δεν μπορούν να τοποθετηθούν στο ίδιο σχέδιο.^{33,37}
- ✚ Αργή παραγωγή. Χαμηλός ρυθμός κατασκευής εξαρτημάτων με ευρείας διατομής και περιπλοκών δομών.³²
- ✚ Δυσκολία παραγωγής μεγάλων προϊόντων. Σχετικά μικρής έκτασης αντικείμενα μπορούν να παραχθούν.³⁷
- ✚ Περιορισμένη πολυπλοκότητα σχημάτων για βιολογικά υλικά.³⁷
- ✚ Ορισμένα μόνο υλικά μπορούν να αποστειρωθούν θερμικά.^{32,37}
- ✚ Περιορισμένη ποικιλία υλικών, μόνο θερμοπλαστικά υλικά.³⁷
- ✚ Χαμηλή ακρίβεια συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες(0,1-0,2 mm).³⁷

4.5 ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ LASER (SLS) ΚΑΙ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΤΗΞΗ ΜΕ LASER (SLM)



Εικόνα 33. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός SLS εκτυπωτή.⁶²

Η τεχνική SLS αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Texas από τον Carl Deckard και κατοχυρώθηκε το 1989. Η εκλεκτική πυροσυσσωμάτωση λέιζερ (SLS) και η επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM), ουσιαστικά, εισήχθησαν αμέσως μετά τη τεχνική SLA, αλλά



χρησιμοποιούν κυρίως ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά προπολυμερή σωματίδια ως δομικό υλικό, απουσία αποβλήτων.^{37,82} Η αρχή της λειτουργίας τους στηρίζεται στη συσσωμάτωση διαδοχικών στρώσεων σκόνης υλικού με την εφαρμογή ελεγχόμενης δέσμης λέιζερ. Η τεχνική βασίζεται σε δύο ενεργειακές πηγές, οι οποίες επιτυγχάνουν μερική-παραγωγή (part-production). Με ελεγχόμενη εισροή ενέργειας από λέιζερ CO₂ υψηλής ισχύος πραγματοποιείται τοπική θερμική σύντηξη των σωματιδίων. Η δέσμη λέιζερ ανιχνεύει το δισδιάστατο-2D σχέδιο του στρώματος και συγχωνεύει τα εκτεθειμένα σωματίδια σε ένα στρώμα και τα συνδέει με το προηγούμενο σαρωμένο υποκείμενο επίπεδο.^{37,82}

Επισκόπηση λειτουργίας

Οι εκτυπωτές SLM αποτελούνται από τρία κύρια μέρη: μια κινητή πλατφόρμα κατασκευής, ένα ισχυρό λέιζερ CO₂ και μια δεξαμενή παροχής σκόνης του υλικού. Γίνεται χρήση λέιζερ υψηλής ενέργειας με την βοήθεια H/Y και καθρεπτών για τον σχηματισμό ενός τμήματος του τρισδιάστατου αντικειμένου με τοπική τήξη της σκόνης. Οι κόκκοι με αυτόν τον τρόπο ενώνονται μεταξύ τους. Η ενέργεια του λέιζερ είναι αρκετά ισχυρή, ώστε να επιτρέπει την πλήρη (SLM) ή μερική-επιφανειακή (SLS) τήξη αυτών.^{32,54,63,83,84}

Η διαδικασία ξεκινάει με μετακίνηση ενός κυλίνδρου, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την διανομή του κονιοποιημένου υλικού στην επιφάνεια της πλατφόρμας κατασκευής.^{6,32,63} Ακολούθως, η πλατφόρμα με την κίνηση ενός εμβόλου μετακινείται προς τα κάτω, σε πάχος ίσο με ένα στρώμα του προϊόντος, για την προσάρτηση του νέου στρώματος και την αρχή ενός νέου κύκλου σάρωσης. Το σύστημα παροχής σκόνης είναι παρόμοιο σε λειτουργία με τον κύλινδρο κατασκευής. Η διαφορά τους έγκειται στο έμβολο της πλατφόρμας του υλικού, που ανεβαίνει βαθμιαία προς τα επάνω, για να παρέχει την ανάλογη ποσότητα σκόνης για κάθε στρώμα.

Η ακτίνα λέιζερ εντοπίζεται, στη συνέχεια, στην επιφάνεια της συμπιεσμένης σκόνης. Η αλληλεπίδραση της δέσμης λέιζερ με τη σκόνη ανεβάζει τη θερμοκρασία της στο σημείο τήξης, συνενώνοντας τα σωματίδια των κόκκων και σχηματίζοντας μια εγκάρσια τομή του αντικειμένου. Η ενέργεια της δέσμης λέιζερ διαμορφώνεται κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να λιώνει τους κόκκους μόνο στις περιοχές που καθορίζονται από τη γεωμετρία του αντικειμένου.⁴¹ Ο θάλαμος κατασκευής διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης σε θερμοκρασία ακριβώς κάτω από το σημείο τήξης της σκόνης (προθέρμανση) και πάνω από



την απαραίτητη θερμοκρασία, για την ανακρυστάλλωση κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης.³⁷ Η προθερμασμένη πλατφόρμα εναπόθεσης της σκόνης περιορίζει την απαιτούμενη ενέργεια από το λέιζερ για την επίτευξη πυροσυσσωμάτωσης. Έτσι, η θερμότητα από το λέιζερ χρειάζεται ελαφριά αύξηση της θερμοκρασίας, για να προκαλέσει πυροσυσσωμάτωση.^{37,55} Σε αυτό οφείλεται και η ταχύτητα της όλης παραγωγής.^{37,55}

Όταν τελειώσει το πρώτο στρώμα, ένα πρόσθετο στρώμα σκόνης εναποτίθεται μέσω του προαναφερθέντος μηχανισμού κυλίνδρων στην κορυφή του προηγούμενου σαρωμένου επιπέδου.⁸³ Αυτή η διαδικασία οικοδόμησης επαναλαμβάνεται με κάθε στρώμα να συντήκεται στην κορυφή του προγενέστερου στρώματος, έως τη λήψη του τελικού προϊόντος. Μετά την περάτωση της εκτύπωσης, το τμήμα αφαιρείται από τον θάλαμο και το μη χρησιμοποιημένο υλικό απομακρύνεται για επαναχρησιμοποίηση.³⁷

Η σκόνη, που περιβάλλει το μοντέλο, βοηθά στην υποστήριξη αυτού, έτσι απαιτούνται λιγότερες δομές μηχανικής υποστήριξης για τη σταθεροποίησή του πάνω στην πλατφόρμα.³⁷ Γενικότερα, αποφεύγονται οι μεγάλες θερμικές διαφορές που διαφορετικά θα οδηγούσαν σε μερική στρέβλωση. Πιο συγκεκριμένα, στο σχεδιασμό του αντικειμένου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο ικανοποιητικός ρυθμός αγωγής της θερμότητας, αφού σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να προκληθούν ρωγμές και παραμορφώσεις. Αφού γίνουν επαναλαμβανόμενοι κύκλοι σάρωσης με την δέσμη laser και ολοκληρωθεί η διαμόρφωση του τελικού αντικειμένου, αφήνεται να ψυχθεί, ενώ τα υπολείμματα σκόνης στις επιφάνειες απομακρύνονται σε θάλαμο μέσω πεπιεσμένου αέρα. Η σκόνη που δεν εκτέθηκε στη δέσμη laser και παρέμεινε αναλλοίωτη, συλλέγεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός νέου αντικειμένου.³⁷

Η επαναχρησιμοποίηση γενικά υφίσταται, αν και με ανησυχίες για πιθανές μεταβολές των υλικών που σχετίζονται με την οξείδωση – η οποία μπορεί να αποφευχθεί κυρίως με καθαρισμό αδρανών αερίων – τη θερμική υποβάθμιση και ακόμη και την αύξηση του μοριακού βάρους του πολυμερούς – με αλλαγές σε πολλές ιδιότητες συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης κρυσταλλικότητας πολυμερούς – κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παρατεταμένης θέρμανσης. Για την αποφυγή αυτού και τη διασφάλιση της «ακεραιότητας» των υλικών, αναμειγνύονται οι περισσειες της σκόνης από την εκτύπωση με παρθένα σκόνη για μετέπειτα χρήση.³⁷

Τέλος, απαιτείται κάποια μετα-επεξεργασία, όπως λείανση ανάλογα με την προβλεπόμενη εφαρμογή. Δεν απαιτούνται υποστηρίξεις με αυτή τη μέθοδο, δεδομένου ότι



οι προεξοχές και οι υποσκαφές υποστηρίζονται από το στρώμα της σκόνης, που τοποθετείται στην πλατφόρμα κατασκευής.³⁷

Επισκόπηση υλικού

Υλικά: ποικιλία κεραμικών και μετάλλων, όπως τιτάνιο, χρώμιο, κοβάλτιο, ανοξείδωτο ατσάλι, ποικιλία κραμάτων και χρήση ζirkονίου⁴ – σε πρώιμα στάδια – κεριών, πολυκαπρολακτόνη, μίγματα υδροξυαπατίτη και συνθετικών υάλων και πολυμερών υλικών, όπως νάιλον, πολυαιθυλένιο, πολυαμίδιο-PA^{63,69}, πολυστυρόλιο, πολυπροπυλένιο, θερμοπλαστικά ελαστικομερή, κερία επένδυσης για χύτευση.⁶ Ειδικότερα, σκόνες όπως αλουμίνιο, σωματίδια γυαλιού με πολυαμίδιο, σαν καουτσούκ πολυουρεθάνης.^{4,32,33,41,54,84}

Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, η ισχύς του λέιζερ (20-50W), το μέγεθος (τυπικά περίπου 0,5 mm), η ταχύτητα της δέσμης, η απόσταση μεταξύ των σαρώσεων/το διάστημα μεταξύ δύο παλμών, η ένταση και η διάρκεια του λέιζερ πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά για την αποτελεσματική εξισορρόπηση της τήξης και την αποφυγή της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του πολυμερούς με αναπόφευκτη υπερθέρμανση.³⁷ Η διασπορά του υλικού, κατά τα στάδια της τήξης, πραγματοποιείται με εφαρμογή πρόσθετης στρώσης σκόνης προ-πολυμερούς περίπου 100μm, η οποία εφαρμόζεται με ρολό ή λεπίδα. Δεδομένου, ότι οι σκόνες πολυμερούς είναι περίπου 30-90μm σε μέγεθος, αυτό υποδηλώνει ότι μόνο 2-4 σωματίδια περίπου αντιπροσωπεύουν το πάχος ενός στρώματος. Αυτό ελαχιστοποιεί την έκταση της έμμεσης θέρμανσης, η οποία βασίζεται στη θερμική αγωγιμότητα και συμβάλλει στην τήξη. Τα σωματίδια πρέπει να ρέουν ελεύθερα, εφόσον τα στρώματα δεν λαμβάνουν περαιτέρω συμπύκνωση. Επομένως, το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα και η ελεύθερη κατανομή της πυκνότητας της διαστρωμάτωσης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες τόσο για τον σχεδιασμό του υλικού όσο και για την διαχείριση της θερμικής συμπεριφοράς.³⁷

Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι τα σφαιρικά σωματίδια ρέουν πιο εύκολα και συσσωρεύονται με μεγαλύτερη πυκνότητα από τα ακανόνιστα σχήματα. Η επεξεργασία των πολυμερών αποτελεί πρόβλημα για την εκτύπωση, αφού δημιουργεί ακανόνιστο σχήμα και ευρεία κατανομή των σωματιδίων διαφόρων μεγεθών. Τα πολύ μικρά σωματίδια δημιουργούν επιπλοκές κατά την επεξεργασία εξαιτίας είτε της υψηλής πυκνότητας είτε των ηλεκτροστατικών αποθητικών δυνάμεων.³⁷



Μετά την περάτωση του κύκλου κατασκευής, ολόκληρος ο θάλαμος του εκτυπωτή ψύχεται αργά για την μεγιστοποίηση της κρυστάλλωσης του πολυμερούς. Αυτό έχει ως επακόλουθο την παροχή πρόσθετης δύναμης (αυξημένη αντοχή), τη μείωση της ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων και τη βελτίωση της ακρίβειας των διαστάσεων, η οποία μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την ενσωμάτωση του μοντέλου συρρίκνωσης κατά τον αρχικό σχεδιασμό αυτού.³⁷

Συμπληρώνοντας στα προαναφερθέντα, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα, ότι οι ιδιότητες κατά τη σύντηξη του υλικού όπως η σύνθεση, η θερμοκρασία τήξης, η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, οι συντελεστές απορρόφησης και η ανάκλαση της δέσμης λέιζερ, όπως και η θερμική αγωγιμότητα είναι σημαντικοί παράγοντες για τη διασφάλιση των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, το μέσο μέγεθος σωματιδίων σκόνης θα μπορούσε να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες και την κίνηση της σύντηξης κατά τη στερεοποίηση.⁸³

Ολοκληρώνοντας, οι ρυθμίσεις του εκτυπωτή, όπως η ταχύτητα σάρωσης, ο χρόνος παραμονής, η θερμοκρασία του προθερμασμένου στρώματος και το πάχος του κάθε στρώματος, έχει αναφερθεί ότι επηρεάζουν εξίσου την αντοχή, την πυκνότητα και την ποιότητα των τελικών προϊόντων. Έτσι, ο σημαντικότερος στόχος όλων των ροών εργασίας SLM και SLS είναι η ελαχιστοποίηση της θερμικής παραμόρφωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σωστή επιλογή της θερμοκρασία προθέρμανσης του θαλάμου και προσεκτική επιλογή των διαφόρων παραμέτρων της εκτύπωσης.⁸³

Εφαρμογές

Αν και οι περισσότερες από τις αρχικές εφαρμογές των τεχνολογιών με λέιζερ αφορούσαν κυρίως την κατασκευή ελαφρών αεροδιαστημικών μερών, οι τεχνολογίες SLM και SLS είναι πλέον πλήρως λειτουργικές και στους κλάδους των Βιοϊατρικών επιστημών. Μερικοί κατασκευαστές προσφέρουν πλέον συσκευές SLM και SLS σχεδιασμένες για οδοντιατρική χρήση.⁸⁵ Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται στην παραγωγή όλων των οδοντιατρικών ειδικοτήτων για την δημιουργία ορθοπεδικών και οδοντικών εμφυτευμάτων, οδοντικών εκμαγείων, οδοντικών στεφάνων^{33,62}, γεφυρών^{33,62}, σκελετών μερικών οδοντοστοιχιών⁸⁵, είτε από ρητίνη είτε από μέταλλο, και στην μηχανική ιστών όπως προσαρμοσμένων εμφυτευμάτων οστών, ελέγχοντας με ακρίβεια το μέγεθος, το σχήμα και



την κατανομή των πόρων της πορώδους δομής για την επίτευξη του βέλτιστου εμφυτεύματος κ.α.^{33,41,54,85}



Εικόνα 34. Εκμαγεία εκτυπωμένα με SLS τεχνολογία.⁸⁷

Πλεονεκτήματα

- ✚ Υψηλή ακρίβεια προϊόντων. Υψηλή απόδοση και δυνατότητα αναπαραγωγής μεγάλης ακριβείας λεπτομερειών, η οποία εξαρτάται από την ισχύ εστίασής του λειζερ και το μέγεθος των σωματιδίων της σκόνης. Το σύστημα SLS μπορεί να δημιουργήσει μέρη με χαρακτηριστικά μόλις 0,5 mm (λίγες δεκάδες μικρόμετρα τυπικά 10-15 μm). Η τυπική ακρίβεια των εξαρτημάτων SLS είναι $\pm 0,2$ mm. και το γενικό πάχος τοιχώματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 mm, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εφικτό ένα μικρότερο τοπικό πάχος τοιχώματος, όπως ως 0,3 mm.^{5,32,34,54,85}
- ✚ Γεωμετρική ελευθέρια. Παρέχεται η ικανότητα σχηματισμού αντικειμένων με πολύπλοκες γεωμετρίες, με πολύ λεπτά τοιχώματα και κρυφά κανάλια ή κενά απευθείας από ψηφιακά δεδομένα CAD. Σε σύγκριση με άλλους τύπους της τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα SLM/SLS έχουν πολύ υψηλή παραγωγικότητα.⁵⁴
- ✚ Δυνατότητα ανακύκλωσης του υλικού. Έτσι, εξοικονομούμε υλικό (ελάχιστη χρήση αυτού) και το ποσοστό του απορριφθέντος περιορίζεται πολύ.^{34,85}
- ✚ Μεγάλη ευελιξία επιλογής εμπορικών υλικών με τη μορφή σκόνης. Με επικάλυψη των σωματιδίων, με θερμική συνδετικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγάλη ποικιλία υλικών.^{32,34,54}



- ✚ Αυτοϋποστηριζόμενη διαδικασία. Δεν απαιτείται υποστήριξη, επειδή το υλικό που δεν έχει λιώσει συμπεριφέρεται ως ένα καλό στήριγμα για το επόμενο στρώμα.^{4,32,34,85}
- ✚ Άριστες μηχανικές ιδιότητες. Υψηλή αντοχή και κρυσταλλοποίηση του πολυμερούς.^{4,34,85} Η πυκνότητα μπορεί να είναι κοντά στο 100%.⁸⁵
- ✚ Υλικά χαμηλότερου κόστους, εάν χρησιμοποιούνται σε μεγάλο όγκο ή αγοράζονται ως χύμα προϊόν.³⁴
- ✚ Παραμετροποίηση. Δυνατότητα προσαρμογής των ιδιοτήτων της σκόνης του υλικού.³⁴
- ✚ Υψηλή παραγωγικότητα. Δυνατότητα κατασκευής πολλαπλών αντικειμένων.^{4,34}
- ✚ Δυνατότητα προσαρμογής του πορώδους και της σύνθεσης του υλικού.³⁴
- ✚ Το εκτυπωμένο αντικείμενο μπορεί να έχει πλήρη μηχανική λειτουργία.³⁴
- ✚ Εύκολη και ταχύτερη μετεπεξεργασία.³²
- ✚ Εύκολη εγκατάσταση του εξοπλισμού.³²
- ✚ Καλή κλινική προσαρμογή.^{32,82,85}

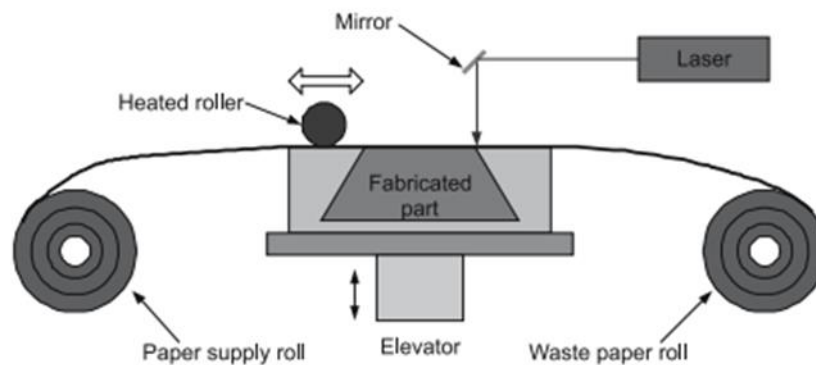
Μειονεκτήματα

- ✚ Δύσκολη εναλλαγή υλικών. Ενώ θεωρητικά η χρήση ενός μηχανήματος για την εκτύπωση με διαφορετικά υλικά μπορεί να φαίνεται εφικτή, στην πράξη είναι εξαιρετικά δύσκολος ο πλήρης καθαρισμός του μηχανήματος. Με αυτόν τον τρόπο, πιθανές προσμίξεις είναι εφικτές με αναπόφευκτες επιπλοκές στην σύστασή του υλικού, όπως η εναλλαγή μεταξύ εμφυτεύσιμου μετάλλου και υλικού αποκατάστασης δεν είναι καθόλου πρακτική.³⁴
- ✚ Κίνδυνος για την υγεία. Έγκειται στην πιθανή εισπνοή των συμπτυκνωμένων νανοσωματιδίων και της σκόνης, αποτελώντας μια πρόκληση για την ασφαλή χρήση των υλικών.³⁴
- ✚ Δύσκολη μετεπεξεργασία για μεταλλικά προϊόντα, καθώς απαιτείται θερμική επεξεργασία για την ανακούφιση των εσωτερικών καταπονήσεων σε εκτυπωμένα αντικείμενα.³⁴
- ✚ Απαιτείται ειδική υποδομή, π.χ. συμπιεσμένος αέρας, έλεγχος των συνθηκών εκτύπωσης.³²



- ✚ Ακριβός εξοπλισμός. Τεχνολογία υψηλού κόστους.^{32,54,63}
- ✚ Τραχιά επιφάνεια φινιρίσματος των μοντέλων.³⁴
- ✚ Σχετικά αργή διαδικασία.³⁴

4.6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΣΕ ΦΥΛΛΑ (LAMINATED OBJECT MODELING-LOM)



Εικόνα 35. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός εκτυπωτή LOM.³²

Η κατασκευή πολυστρωματικών αντικειμένων (LOM) είναι μια διαδικασία που συνδυάζει προσθετική και αφαιρετική τεχνική για την κατασκευή ενός αντικειμένου.^{54,87,88} Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ από την εταιρία Helisys. Βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με συγκόλληση λεπτών φύλλων ενός υλικού, τα οποία φέρουν επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας. Ουσιαστικά, λειτουργεί τοποθετώντας διαδοχικά φύλλα υλικού το ένα πάνω στο άλλο και συνδέοντάς τα μεταξύ τους με τη χρήση συγκολλητικής ουσίας, πίεσης και εφαρμογής θερμότητας. Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το χαρτί, ενώ αργότερα η εταιρία ανέπτυξε και χρησιμοποίησε και άλλα υλικά όπως αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά, λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης. Αυτή η διαδικασία έχει εμπορευματοποιηθεί για πλαστικά υλικά από το 1991.⁵⁴

Επισκόπηση λειτουργίας

Η τεχνολογία LOM τοποθετεί διαδοχικά στρώματα λεπτών φύλλων πλαστικού ή άλλου υλικού για την παραγωγή του πρωτότυπου. Το μηχανικό μέρος του συστήματος



περιέχει ένα ρολό, το οποίο ξετυλίγει και ένα το οποίο τυλίγει τα φύλλα του υλικού. Τα δύο ρολά συνδέονται μεταξύ τους με μια κορδέλα από το φύλλο, που δρομολογείται μέσα από πολλούς αδρανείς κυλίνδρους. Αυτά τα ρολά είναι υπεύθυνα για την προμήθεια και αποθήκευση του υλικού.³¹

Ειδικότερα, σύμφωνα με τη μέθοδο, το πρώτο φύλλο τοποθετείται σε μια πλατφόρμα κατασκευής, η οποία δύναται για κάθετη σταδιακή κίνηση υπό τη δράση ενός βηματικού κινητήρα. Πάνω από αυτή, τοποθετημένος βρίσκεται ένας θερμαινόμενος κύλινδρος, ικανός να συμπιέζει και να θερμαίνει το φύλλο του υλικού στην πλατφόρμα, αναγκάζοντας την ένωση των δυο στρωμάτων μέσω της συγκολλητικής ουσίας. Ως αποτέλεσμα μιας και μόνο κίνησης του θερμαινόμενου κυλίνδρου, το φύλλο του υλικού ενσωματώνεται στην κορυφή του παραγόμενου αντικείμενου.^{32,54}

Μια πλατφόρμα τοποθέτησης X-Y φέρει δύο καθρέφτες – οι οποίοι αντανακλούν την δέσμη λέιζερ CO₂ – και έναν φακό, που εστιάζει τη δέσμη στην επιφάνεια του πλαστικοποιημένου μοντέλου για την κοπή του ανώτατου στρώματος (πλαστικού φύλλου) στο επιθυμητό σχήμα. Μετά την κοπή του ενός στρώματος, το περίσσιο πλαστικό κόβεται, για να διαχωριστεί το επίπεδο από το υπόλοιπο φύλλο. Τέλος, το μη χρησιμοποιημένο υλικό τυλίγεται γύρω από τον κύλινδρο «τυλίγματος».⁸⁹ Για τη δημιουργία του επόμενου στρώματος, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει, τοποθετείται ένα νέο φύλλο του υλικού και ακολουθείται ξανά η ίδια διαδικασία συμπίεσης αυτού μεταξύ του ήδη παραγόμενου τμήματος και του θερμαινόμενου κυλίνδρου. Θραύσματα του απορριφθέντος υλικού παραμένουν στην πλατφόρμα, όπως είναι το αντικείμενο χτισμένο. Ουσιαστικά, μετά την κοπή τους από τη δέσμη λέιζερ σε διασταυρωμένα τετράγωνα, χρησιμεύουν ως δομή στήριξης για το μοντέλο.³²

Μόλις η διαδικασία ολοκληρωθεί, τα αντικείμενα κόβονται στις επιθυμητές διαστάσεις με ένα μαχαίρι, ένα λέιζερ ή τροποποιούνται επιπλέον με μηχανική διάτρηση. Η τεχνολογία είναι σε θέση να παράγει σχετικά μεγάλα εξαρτήματα, αφού δεν απαιτείται χημική αντίδραση.³²

Επισκόπησή υλικού

Υλικά: σε αυτή την τεχνολογία μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαρτί, πλαστικά, σύνθετα υλικά, κεραμικά και μέταλλα.^{32,54}



Αυτή η τεχνολογία είναι πολύ ευέλικτη, καθώς χρησιμοποιείται σχεδόν οποιοδήποτε υλικό, το οποίο μπορεί να κολληθεί. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας κατασκευής πρόσθετων, στρώσεις χαρτιού, πλαστικού, κεραμικών ή μεταλλικών ελασμάτων επικαλυμμένων με κόλλα ενώνονται διαδοχικά μεταξύ τους. Το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται είναι το χαρτί, καθώς κόβεται εύκολα. Το πλαστικό μπορεί επίσης, να αξιοποιηθεί, χρησιμοποιώντας λεπίδα ή λέιζερ κατά το στάδιο κοπής. Τα μεταλλικά φύλλα είναι πιο ασυνήθιστα, επειδή το στάδιο κοπής είναι πιο περίπλοκο.^{32,54}

Όλα τα προαναφερθέντα υλικά είναι ευρέως διαθέσιμα και αποδίδουν συγκριτικά μια φθηνή μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης. Τα υλικά μπορούν να αναμειχθούν σε διάφορες στρώσεις σε όλο το μήκος της διαδικασίας εκτύπωσης, δίνοντας μεγαλύτερη ευελιξία στο τελικό αποτέλεσμα των αντικειμένων.⁵⁴

Εφαρμογές

Τα συστήματα LOM χρησιμοποιούνται για μοντελοποίηση ιδεών, εργονομικές μελέτες, οπτικοποίηση τομογραφίας, μοντέλα αρχιτεκτονικής, παραγωγή λειτουργικών πρωτότυπων και κατασκευή μεταλλικών, κεραμικών και σύνθετων εξαρτημάτων. Επίσης, σε χύτευση με άμμο, χύτευση επενδύσεων, επεξεργασία κεραμικών.⁵⁴

Επιπλέον, με θερμοπλαστικές ίνες είναι δυνατή η άμεση κατασκευή λειτουργικών ελαφρών τεχνικών στοιχείων για τις βιομηχανίες αεροδιαστημικής και αυτοκινητοβιομηχανίας, με μεγάλο ανταγωνιστικό κόστος.

Εφαρμογές για τρισδιάστατα εξαρτήματα κατασκευής αντικειμένων 3D περιλαμβάνουν πρωτότυπα και πιλοτικές εργασίες.



Εικόνα 29. Πορτοκάλι εκτυπωμένο με τεχνολογία LOM.⁹⁰



Πλεονεκτήματα

- ✚ Ικανοποιητική ακρίβεια (± 0.1 mm). Η ακρίβεια εκτύπωσης εξαρτάται από το πάχος του στρώματος και επομένως εξαρτάται από το υλικό. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, δεν θεωρείται πολύ ακριβής. Η επιφανειακή ακρίβεια είναι ελαφρώς κατώτερη από τη στερεολιθογραφία και την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ. Τα μοντέλα LOM είναι ακριβή 0,0508 mm κατά μήκος του άξονα Z και 0,127 mm συνολικά. Το μέγεθος της μινιατούρας είναι 0,2 mm και το πάχος του στρώματος είναι 0,165 mm.^{54,91}
- ✚ Η LOM είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για σύνθετα, μεγάλα ή ογκώδη εξαρτήματα. Ο λόγος είναι, ότι δεν απαιτείται χημική αντίδραση αλλά κοπή του προφίλ χωρίς εκτεταμένες εργασίες πληρώσεως, όπως παρατηρείται σε άλλες τεχνικές.³²
- ✚ Δυνατότητα επεξεργασίας μόνο στην περίμετρο του αντικειμένου. Έτσι διασφαλίζονται σταθερές φυσικομηχανικές ιδιότητες και σταθερά αποτελέσματα.⁹⁴
- ✚ Μεγάλη ποικιλία οικονομικών υλικών. Χρήση πλαστικών μεμβρανών, μεταλλικών φύλλων κεραμικών ταινιών η χαρτιού.^{22,54}
- ✚ Οικονομική τεχνολογία. Το κόστος των υλικών, της μηχανής και της όλης διεργασίας είναι πολύ χαμηλό.³²
- ✚ Δυνατότητα χρήσης διαφορετικών υλικών και χρωμάτων. Έτσι, ανταγωνίζεται τις τεχνολογίες εκτόξευσης συνδετικού υλικού για την παραγωγή πολύχρωμων αντικειμένων.⁵⁴
- ✚ Δεν χρησιμοποιούνται χημικές αντιδράσεις, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται προστατευτικός θάλαμος.⁵⁴
- ✚ Παρουσιάζει χαμηλή εσωτερική τάση και ευθραυστότητα των εξαρτημάτων.⁹²
- ✚ Γρήγορη παραγωγή. Η ταχύτητα κατασκευής είναι πολύ γρήγορη.³²
- ✚ Δεν χρειάζεται δομές υποστήριξης.⁵⁴
- ✚ Ευκολία χειρισμού των υλικών.⁵⁴



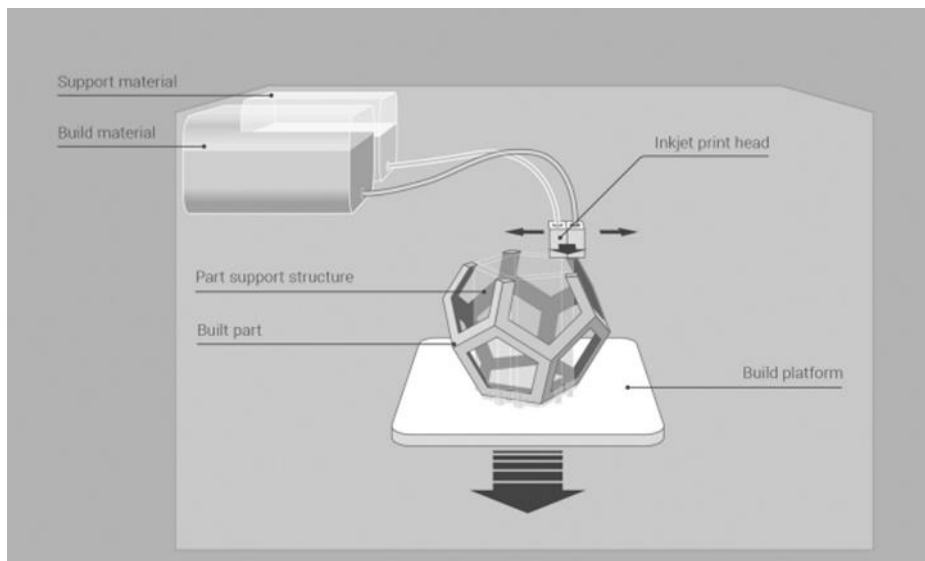
Μειονεκτήματα

- ✚ Θερμικό υπολειμματικό φαινόμενο. Η τεχνική LOM απαιτεί υψηλή θερμοκρασία κατασκευής και στην περίπτωση της χρήσης άνω του ενός υλικού, οδηγείται στην παρουσίαση υπολειμματικού θερμικού φορτίου, καθώς και στην υποβάθμιση της ποιότητας του μοντέλου. Απαραίτητη χρήση σύγχρονης ψύξης.
- ✚ Κοπή του περισσευούμενου ελασματοποιημένου υλικού (decubing). Επιβάλλεται η αφαίρεση του περιττού υλικού από κάθε στρώμα. Αυτό επιτυγχάνεται με στρέβλωση και αποκόλληση του παραγόμενου αντικειμένου. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ανάπτυξη τάσεων από την επαγόμενη συρρίκνωση λόγω πολυμερισμού του φωτοπολυμερούς και λόγω της θερμικής διαστολής και συστολής κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Η απόσυρση των παραλληλεπιπέδων στήριξης και του αχρησιμοποίητου υλικού είναι μια χρονοβόρα, κοπιαστική και κρίσιμη εργασία που μπορεί να οδηγήσει σε κατεστραμμένα αντικείμενα.⁹⁴
- ✚ Χαμηλή επιφανειακή ακρίβεια. Σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες RP, η επιφανειακή ποιότητα και η ακρίβεια διαστάσεων των μοντέλων, που παράγονται από την τεχνική LOM θέτονται σε κίνδυνο πιθανής υποβάθμισης, απαιτώντας έτσι μεταχείριση με χειροκίνητες λειτουργίες όπως η αμμοβολή, λείανση, πυρόλυση για πολλές εφαρμογές. Η LOM δεν μπορεί να δημιουργήσει πραγματικά ακριβή μοντέλα όπως η SLS ή ακόμα και η SLA τεχνολογίες.⁶⁴
- ✚ Παρουσιάζονται δυσκολίες στην ένωση των διαφορετικών στρωμάτων. Η αντοχή συγκόλλησης θα εξαρτηθεί από την τεχνική πλαστικοποίησης που χρησιμοποιείται και σε ορισμένες περιπτώσεις, οι συγκολλητικές συνδέσεις δεν είναι αρκετά καλές για μακροχρόνια χρήση της αντοχής και της ακεραιότητας του προϊόντος.
- ✚ Το ύψος του στρώματος δεν μπορεί να αλλάξει χωρίς αλλαγή του πάχους του φύλλου. Επομένως η ανάλυση του τμήματος συνδέεται με το πάχος του φύλλου κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα κατασκευής.⁹²
- ✚ Δεν αποτελεί ιδανική λύση για περίπλοκα γεωμετρικά σχήματα και αντικείμενα με κενά. Τα κοίλα εξαρτήματα (εσωτερικά κενά και κοιλότητες) είναι δύσκολο να παραχθούν.⁹⁴



- ✚ Τα απόβλητα υλικών μπορούν επίσης να είναι υψηλά, εάν το εξάρτημα που κατασκευάζεται είναι μικρότερο από την επιφάνεια κατασκευής ή το μέγεθος του φύλλου.⁹⁴

4.7 ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ (MATERIAL JETTING-MJ ή MULTIJET PRINTING ή POLYJET ή PP)



Εικόνα 30. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός MJ εκτυπωτή.

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης Material Jetting - ονομάζεται επίσης και PolyJet – αναπτύχθηκε το 1994 από ερευνητές στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από την Objet, μια Ισραηλινή εταιρεία, το 2000.^{31,42,40} Κατά την τεχνική αυτή εφαρμόζεται το υλικό στην κατασκευαστική πλατφόρμα με τη βοήθεια πολλαπλών πιεζοηλεκτρικών πιδάκων εκτύπωσης – είναι παρόμοια με τη Στερεολιθογραφία.^{40,41} Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης Polyjet και Multijet χρησιμοποιούν φως UV για τον πολυμερισμό ενός πολυμερούς είτε μέσω μιας σταθερής πλατφόρμας και δυναμικής κεφαλής εκτύπωσης είτε μέσω σταθερής κεφαλής εκτύπωσης και μια δυναμική πλατφόρμα.^{34,41} Οι εκτυπωτές Inkjet χωρίζονται σε δύο βασικές: α) τους binder jetting και, β) τους direct material jetting εκτυπωτές.⁸⁹



Επισκόπηση λειτουργίας

Οι εκτυπωτές Inkjet είναι σε θέση να εκτυπώνουν μοντέλα πολύ υψηλής ανάλυσης, εκτοξεύοντας εξαιρετικά μικρές σταγόνες υλικού. Η εκτύπωση inkjet λειτουργεί προωθώντας μεμονωμένα μικρά σταγονίδια «μελάνης» προς ένα υπόστρωμα. Σε αυτό το πλαίσιο, το μελάνι μπορεί να είναι οτιδήποτε από ένα υδατικό διάλυμα χρωστικών και συνδετικών παραγόντων έως ένα κεραμικό εναιώρημα, όπως χρησιμοποιείται σε ορισμένες μελέτες για την παραγωγή ζirkονίας οδοντικών αποκαταστάσεων ή κυτταρικό διάλυμα για την παραγωγή ιστών.^{4,54}

Το υλικό πιέζεται μέσα από ένα μικρό στόμιο ενός ακροφυσίου με ποικίλα μέσα, όπως πίεση, θερμότητα και δόνηση.^{32,54,95} Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής βασίζεται στη δημιουργία ενός στρώματος του αντικειμένου με εναπόθεση σταγονιδίων του υλικού και στη συνέχεια, μετά την ολοκλήρωση του ενός στρώματος, πραγματοποιείται η κατάθεση του επόμενου. Ανάλογα με το είδος της συμπίεσης, το υγρό μπορεί να εξέρχεται σε συνεχή ροή (continuous inkjet-CIJ) ή σε διακριτά σταγονίδια (drop on demand-DOD) και εναποτίθενται σε προεπιλεγμένα σημεία πάνω στη πλατφόρμα εκτύπωσης ή σε υποκείμενες στρώσεις.⁹⁶ Για να μπορούν όμως, να χρησιμοποιηθούν στην τρισδιάστατη εκτύπωση, τα σταγονίδια του υγρού πρέπει να αλλάζουν φάση σε στερεό κατά την εναπόθεση στο υπόστρωμα (κατά την εκτύπωση ενός στρώματος). Ανάλογα με το αποτιθέμενο υλικό, η αλλαγή φάσης μπορεί να γίνει με ξήρανση, μεταφορά θερμότητας, υπεριώδη ακτινοβολία (Polyjet) ή χημική αντίδραση.^{4,32,54,95}

Η τρισδιάστατη εκτύπωση MJP μπορεί να εκτυπώσει αποτελεσματικά διάφορα μοντέλα χάρη στις πολλές συστοιχίες ακροφυσίων, οι οποίες συνεργάζονται. Σύμφωνα με το μοντέλο τμηματοποίησης των δεδομένων, εκατοντάδες έως χιλιάδες ακροφύσια ψεκάζουν υγρή φωτοευαίσθητη ρητίνη στην πλατφόρμα κατά την εργασία στρώμα προς στρώμα. Τα ακροφύσια εκτύπωσης μετακινούνται κατά μήκος του επιπέδου XY.^{31,32,34,37,42} Οι φωτοευαίσθητες ρητίνες, που «θεραπεύονται» με υπεριώδη ακτινοβολία εφαρμόζονται μόνο, όπου είναι επιθυμητό σύμφωνα με το προς σχεδιασμό μοντέλο. Δεδομένου ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά ακροφύσια εκτύπωσης, το υποστηρικτικό υλικό εναποτίθεται παράλληλα με την κατασκευή του υπόλοιπου μοντέλου. Επιπλέον, είναι εφικτές διαφορετικές παραλλαγές σε χρώμα ή δομικά υλικά με διαφορετικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένου του σχηματισμού ή των δομών με χωροταξικά διαβαθμισμένες ιδιότητες.⁹⁶



Όταν η φωτοευαίσθητη ρητίνη ψεκάζεται στη πλατφόρμα εργασίας, ένας κύλινδρος θα επεξεργαστεί την επιφάνεια της, επιπεδώνοντας την, και η λάμπα UV θα πολυμερίσει τη φωτοευαίσθητη ρητίνη.^{34,37,41,42} Οι λαμπτήρες UV κινούνται ταυτόχρονα με την κεφαλή του ακροφυσίου (κατεύθυνση x-y) και χρησιμοποιούνται για τον πολυμερισμό των υγρών μονομερών.¹⁵ Λόγω της υψηλής απόδοσης τους, πολύ λεπτά στρώματα (16–20 μm), μπορούν να παραχθούν με αποτέλεσμα πολύ υψηλής ποιότητας επιφάνεια. Επομένως, η μετα-επεξεργασία δεν είναι πλέον απαραίτητη.¹⁵ Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση με τον ψεκασμό και τον πολυμερισμό του πρώτου στρώματος, η ενσωματωμένη πλατφόρμα εργασίας της συσκευής θα υποχωρήσει κατά πάχος ενός στρώματος με εξαιρετική ακρίβεια.¹⁵ Με το χαμήλωμα της πλατφόρμας στην κατεύθυνση z, το αντικείμενο συναρμολογείται από κάτω προς τα πάνω.¹⁵

Έπειτα, τα ακροφύσια θα συνεχίσουν να ψεκάζουν τη φωτοευαίσθητη ρητίνη για την επόμενη στρώση της εκτύπωσης.^{34,41,42} Επαναλαμβανόμενοι ψεκασμοί και πολυμερισμοί πραγματοποιούνται μέχρι την ολοκλήρωση του εκάστοτε μοντέλου. Παραλλήλως, ένα δεύτερο σύνολο ακροφυσίων είναι υπεύθυνο για την ταυτόχρονη εκτύπωση εύτηκτων ή διαλυτών υλικών, τα οποία είναι απαραίτητα για τη δημιουργία υποστηρικτικών δομών.^{40,42,96}

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτή την τεχνική ο ρυθμός εξώθησης του υλικού, το μέγεθος (διάμετρος και γεωμετρία) του ακροφυσίου, η απόσταση του ακροφυσίου από το υπόστρωμα και η ταχύτητα κίνησης των παραγόμενων σταγονιδίων είναι ικανά να επηρεάσουν την ακρίβεια διαστάσεων των οδοντικών αποκαταστάσεων.⁵⁴ Για την πρόβλεψη των παραγόντων αυτών, η σωστή επιλογή του υλικού και η προσοχή στις ιδιότητες αυτού, όπως η πυκνότητα, η επιφανειακή τάση, το ιξώδες κ.α. αποτελεί τον καθοριστικό γνώμονα. Ωστόσο, ο προσανατολισμός δόμησης μπορεί να επηρεάσει εξίσου σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας και τη θραύση καταπόνησης αλλά η αντοχή στον εφελκυσμό δεν επηρεάζεται σημαντικά από την κατεύθυνση της εκτύπωσης.³⁷



Επισκόπηση υλικού

Υλικά: ποικιλία φωτοπολυμερών, κεριά, μερικά ελαστικά υλικά που μοιάζουν με σιλικόνη.^{33,34,41}

Σε αντίθεση με την τρισδιάστατη εκτύπωση SLA, DLP, και LCD ο έλεγχος απεικόνισης και η πηγή λαμπτήρων της τρισδιάστατης εκτύπωσης MJP είναι ανεξάρτητοι. Θεωρητικά, το μήκος κύματος της πηγής φωτός της εκτύπωσης MJP μπορεί να είναι απεριόριστο. Έτσι, στην τρισδιάστατη εκτύπωση MJP, θα μπορούσε να επιλεγεί ριζικός, κατιονικός και υβριδικός πολυμερισμός φωτοπολυμερών· γεγονός που μας επιτρέπει την επιλογή πολλών διαφορετικών πρώτων υλών.¹⁴ Επιπλέον, το ιξώδες της ρητίνης είναι σημαντικό στην 3D εκτύπωση MJP για τις ανάγκες του ψεκασμού. Χρειάζεται χαμηλό ιξώδες και πρέπει να είμαστε βέβαιοι ότι το υλικό διατίθεται για ψεκασμό. Ως εκ τούτου, το χαμηλό ιξώδες ή το ακροφύσιο με συσκευή θέρμανσης αποτελεί προαπαιτούμενο. Όλα αυτά συμβάλλουν στη σωστή και ευρεία επιλογή υλικών ως προς αυτή την τεχνολογία.¹⁴

Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί ως υλικά ελαφρώς πολυμερισμένες ρητίνες και ακροφύσια εκτύπωσης, σαν αυτές που βρίσκονται σε ένα εκτυπωτή inkjet (αλλά πολύ πιο δαπανηρή), για να στρωθούν στρώματα φωτοπολυμερούς τα οποία είναι πολυμερίζονται με κάθε πέρασμα της κεφαλής εκτύπωσης. Η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιεί μια σταθερή πλατφόρμα και δυναμική κεφαλή εκτύπωσης ή σταθερή κεφαλή εκτύπωσης και δυναμική πλατφόρμα. Μια δομή στήριξης τοποθετείται σε ένα εύθρυπτο υλικό στήριξης.³⁴

Δεδομένου ότι πολλές κεφαλές εκτύπωσης είναι ταυτόχρονα διαθέσιμες, παραλλαγές σε ανάμεικτο χρώμα ή ακόμη και διαφορετικά κατασκευαστικά υλικά με διαφορετικές ιδιότητες που διαβαθμίζονται ανάλογα με τις δομικές ανάγκες των μερών μιας σύνθετης κατασκευής.³⁷ Για «μελάνια» εκτόξευσης, ένα μη νευτώνειο ρευστό (το ιξώδες του δεν ακολουθεί τον νόμο του Νεύτωνα), δηλαδή σταθερό ιξώδες ανεξάρτητο από την τάση, που αραιώνει με διάτμηση, αποτελεί ένα επιθυμητό συστατικό, το οποίο προσδίδει κάποιους περιορισμούς στο υλικό επιλογής. Το ιξώδες του «μελανιού» μπορεί να ποικίλλει και να αντισταθμίζεται με είτε αντιδραστικά αραιωτικά πρόσθετα είτε θερμαινόμενες κεφαλές εκτύπωσης. Από τη χρήση κεριού ως υλικού στήριξης, μπορούν να σχηματιστούν αντικείμενα εξ ολοκλήρου από εκτοξευόμενο κεριό και στη συνέχεια, χρησιμοποιείται απευθείας για επένδυση εφαρμογών προς χύτευση, που συναντάμε συχνά στην οδοντιατρική.³⁷



Λόγω του έντονου ενδιαφέροντος γύρω από τους τρισδιάστατους εκτυπωτές, αναπτύχθηκε μια σειρά από υλικά inject, τα οποία πολυμερίζονται με υπεριώδη ακτινοβολία για εκτύπωση 2D εφαρμογών. Αυτά τα σκευάσματα τυπικά αποτελούνται από μονομερή, ολιγομερή, χρωστικές ουσίες (χρωστικές ή βαφές διεσπαρμένες ή διαλυμένο στον αντιδραστικό φορέα), φωτοεκκινητή και άλλα πρόσθετα.

Ένα πολυμεριζόμενο υλικό με υπεριώδη ακτινοβολία εφαρμόζεται «ως λάδι σε νερό» και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία εσκεμμένου ελεγχόμενου πορώδους σε διαφορά μέρη κατά τον πολυμερισμό. Έπειτα, ακολουθεί εξάτμιση της υδάτινης φάσης και έτσι με συνεχή δόμηση του υλικού, διασυνδεδεμένοι πόροι μπορούν να δημιουργηθούν σε τυπωμένα μέρη που επιτρέπουν τη διείσδυση άλλου υλικού για την επίτευξη, όπως αγωγίων προϊόντων.^{4,34}

Εφαρμογές

Από το 2014, οι κατασκευαστές μπόρεσαν να συνδυάσουν άμμο και ανθρακικό ασβέστιο, κεραμική σκόνη και υγρό συνδετικό, ακρυλική σκόνη και κυανοακρυλικό, νερό και ζάχαρη (για την παρασκευή ζαχαρωτών) κ.λπ.⁵⁴ Η τεχνολογία MJF θα μπορούσε να εφαρμοστεί στα πεδία που απαιτεί υψηλή ακρίβεια επεξεργασίας. Σήμερα, χρησιμοποιείται συχνά στη χύτευση κοσμημάτων, στην ιατρική ακριβείας και ούτω καθεξής.⁴²

Ειδικότερα, ένα ευρύ φάσμα οδοντιατρικών εφαρμογών οφείλεται στη χρήση των πολλαπλών κεφαλών. Χάρη στην ταυτόχρονη εκτύπωση με διαφορετικά υλικά και βαθμονομημένα μείγματα αυτών, καθίσταται δυνατή η διαφοροποίηση των ιδιοτήτων του εκτυπωμένου αντικειμένου π.χ. με ευέλικτα και άκαμπτα μέρη.³² Συνδυάζοντας άκαμπτα και ελαστικά υλικά, είναι δυνατό να δημιουργηθούν νάρθηκες προστασίας με μαλακές και σκληρές περιοχές σε διαφορετικά χρώματα π.χ. προστατευτικοί αθλητικοί νάρθηκες κ.α.^{4,54} Περαιτέρω οδοντιατρικές εφαρμογές περιλαμβάνουν την παραγωγή εκμαγείων μελέτης⁴, χειρουργικών οδηγών για τοποθέτηση εμφυτευμάτων, συσκευών υπνικής άπνοιας⁴, οδηγών ορθοδοντικών στηριγμάτων⁴, προσωρινές όψεις κρανιογναθοπροσωπικών εμφυτευμάτων^{4,33,41,54}, εξελιγμένων ανατομικών μοντέλων, προσθετικής προσώπου (αυτί, μύτη, μάτι)³² και ανατομικών μοντέλων⁴⁰. Επίσης, βιοσυμβατά υλικά – που επιτρέπουν βραχυπρόθεσμη επαφή με τη βλεννογόνο μεμβράνη έως και 24 ώρες και παρατεταμένη

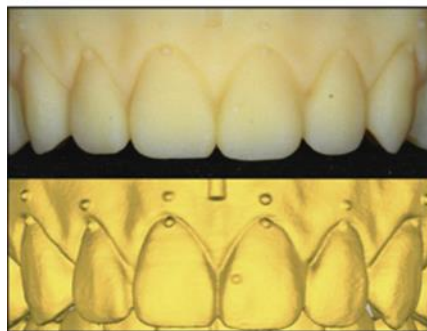


επαφή με το δέρμα περισσότερο από 30 ημερών – χρησιμοποιούνται για την κατασκευή προθέσεων μαλακών ιστών και ακουστικών βαρηκοΐας.⁵⁴

Τέλος, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές MJP συμβάλλουν στην εκτύπωση οδοντιατρικών μοντέλων και ανατομικών μελετών με μεγάλο κόστος ενώ οι οδηγοί εμφυτευμάτων μπορεί να παράγονται γρήγορα και φθηνά με αυτήν την τεχνολογία, καθώς είναι λιγότερο ογκώδη.³⁴



Εικόνα 38. Εκμαγεία εκτυπωμένα με τεχνολογία MJ.⁵⁴



Εικόνα 39. Ψηφιακό αρχείο εκμαγείου και το εκτυπωμένο με τεχνολογία MJ εκμαγείο.⁶⁶



Εικόνα 40. Εκμαγείο εκτυπωμένο με τεχνολογία MJ.⁵⁷

Πλεονεκτήματα

- ✚ Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές MJP-polyjet επιτρέπουν την κατασκευή ογκομετρικών έγχρωμων αντικειμένων με ταυτόχρονη ενσωμάτωση πολλαπλών υλικών με αρκετά διακριτές φυσικές ιδιότητες.^{4,40,42,54,58} Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη πολλών ακροφυσίων. Έτσι, μια ποικιλία υλικών συμπεριλαμβανομένων των ελαστικών-, χρωμάτων⁵⁹, ιδιοτήτων^{4,40} και ούτω καθεξής μπορούν να εκτυπωθούν ταυτόχρονα παράγοντας άπειρους συνδυασμούς. Με αυτή την τεχνική, μας δίνεται η δυνατότητα να καλύψουμε μια ευρεία ποικιλία αναγκών, όπως παραγωγή προϊόντων με μαλακές και σκληρές περιοχές, ποικίλες χρωματικές αλλαγές, διαβάθμιση ιδιοτήτων κ.α. Μέχρι τώρα, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης MJP είναι η μόνη τεχνολογία που μπορεί να εκτυπώσει πολύχρωμα μοντέλα.



- ✚ Η τρισδιάστατη εκτύπωση MJP έχει πολύ υψηλή ακρίβεια επεξεργασίας, η οποία μπορεί να αποδώσει πάχος στρώματος εκτύπωσης έως 16 μm ., το οποίο αποδίδει μικρά χαρακτηριστικά με εξαιρετικές λεπτομέρειες, αντοχή και ανθεκτικότητα. Ταυτοχρόνως, η τραχύτητα της επιφάνειας, Ra, επιτυγχάνει τιμές τις τάξης των 0,8–1,6 μm 103, ενώ το ελάχιστο πάχος στρώσης είναι μεταξύ 0,013 και 0,076 mm (ακρίβεια ± 0.1 mm).^{4,34,40,42}
- ✚ Εύκολη απομάκρυνση των δομών υποστήριξης. Όσον αφορά στα υποστηρικτικά υλικά, αυτά μπορεί να είναι εύτηκτα ή διαλυτά. Η διαδικασία αφαίρεσης των στηρίξεων δεν προκαλεί φθορές στο παραγόμενο μοντέλο και είναι απλή, όπως κερι ή άλλο υποστηρικτικό υλικό παρόμοιο με γέλη μπορεί να εναποτεθεί για μετέπειτα αφαίρεση με θέρμανση ή με έκπλυση νερού.^{37,40,42}
- ✚ Η τεχνολογία εκτύπωσης inkjet είναι ταχύτερη από άλλες διαδικασίες παραγωγής πρόσθετων όπως η μοντελοποίηση λιωμένης εναπόθεσης. Ωστόσο, ανάλογα με το υλικό και τη διαδικασία, το φινίρισμα της επιφάνειας, η πυκνότητα του αντικειμένου και η ακρίβεια μπορεί να είναι κατώτερα από τη στερεολιθογραφία και το επιλεκτικό λέιζερ πυροσυσσωμάτωση.^{34,54}
- ✚ Παραγωγή περίπλοκων δομών. Μπορούμε να δημιουργήσουμε εξαιρετικά περίπλοκες γεωμετρίες, που δεν απαιτούν φινίρισμα, αφού είναι δυνατές διαστάσεις πάχους στρώματος κάτω των 20 μm .^{34,37}
- ✚ Επομένως, η επιφάνεια των μοντέλων εκτύπωσης είναι λεία χάρη στην υψηλή ανάλυση στρώματος. Δυνατότητα φινιρίσματος υψηλής ανάλυσης και υψηλής ποιότητας.^{33,37,42}
- ✚ Το μέγεθος εκτύπωσης είναι απεριόριστο (θεωρητικά).⁴²

Μειονεκτήματα

- ✚ Η συσκευή εκτύπωσης MJP είναι πολύ ακριβή. Ο εξοπλισμός, η αγορά και η λειτουργία των υλικών είναι δαπανηρή και τα υλικά υποστήριξης μπορεί να είναι ανθεκτικά και μάλλον δυσάρεστα να αφαιρεθούν. Τα υλικά είναι επίσης ακριβά και απαιτείται χαμηλό ιξώδες.³⁴



- ✚ Τα περισσότερα προϊόντα απαιτούν δομές στήριξης. Το ανθεκτικό υλικό στήριξης μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες κατά την αφαίρεση, όπως και ερεθισμό του δέρματος.³⁴
- ✚ Οι μηχανικές ιδιότητες του φωτοευαίσθητου υλικού που χρησιμοποιείται στο PolyJet, υποβαθμίζονται γρήγορα με την πάροδο του χρόνου.⁹⁷
- ✚ Δεν είναι εύκολο να αποκτηθούν λειτουργικά κομμάτια λόγω της ευθραυστότητας των τεμαχίων που λαμβάνονται.⁹⁸
- ✚ Μεγάλη ποσότητα υλικού απαιτείται λόγω της αρχής σχεδιασμού με υποστήριξη δομές.⁴⁰
- ✚ Η τεχνική είναι πολύ αργή για μεγάλα αντικείμενα.³²
- ✚ Δεν μπορεί να αποστειρωθεί με θερμότητα.³⁴



5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην καθημερινή ορθοδοντική πράξη η ύπαρξη ενός άρτιου και αξιόπιστου εκμαγείου, συγκεκριμένα του οδοντικού φραγμού και των παρακείμενων ιστών αποτελεί παράγοντα ζωτικής σημασίας στο σχέδιο θεραπείας του εκάστοτε περιστατικού. Μέσω αυτού παρέχεται η δυνατότητα οπτικοποίησης όλων εκείνων των «πληροφοριών», δηλαδή των γναθιαίων κυρτωμάτων, της ουλοπαραειακής/ουλοχειλικής και ουλογλωσσικής αύλακας, των φατνιακών αποφύσεων, των καταφύσεων των χαλινών του χείλους, των παρειών και των δοντιών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση του εκάστοτε περιστατικού.

Μέχρι και σήμερα η κατασκευή των οδοντιατρικών εκμαγείων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στάδιο της εργαστηριακής πράξης, για το οποίο έχουν διεξαχθεί και εκπονηθεί αμέτρητες έρευνες και εργασίες. Λόγω της ιδιαίτερης βαρύτητας του συγκεκριμένου σταδίου, αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας – όπως και πολλών άλλων εργασιών – αποτελεί η αξιολόγηση και σύγκριση των μεθόδων παραγωγής αυτών. Η συμβατική μέθοδος παραγωγής γύψινων εκμαγείων εν' όψει της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης έρχεται αντιμέτωπη με την ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων. Η ταχεία πρωτοτυποποίηση ήρθε για να αλλάξει δραστικά τον τρόπο παραγωγής, αναδιαμορφώνοντας ριζικά τον οδοντιατρικό κλάδο. Έτσι, η σημερινή χρυσή σταθερά κατασκευής με γύψο τίθεται υπό αμφισβήτηση με στόχο την εύρεση της οικονομικότερης, ταχύτερης και βέλτιστης μεθόδου παραγωγής εκμαγείων από τις μεθόδους ταχείας εκτύπωσης.

Επί του παρόντος, πληθώρα τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης κατακλύζουν την αγορά παρέχοντας εναλλακτικές επιλογές παραγωγής εκμαγείων. Από αυτές τις τεχνολογίες διακρίνουμε τις SLA, DLP, LCD, SLM-SLS, FDM, LOM και MJ. Αναλύοντας τη λειτουργία, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών μπορούμε να καταλήξουμε αβίαστα στο συμπέρασμα ότι η αξιολόγηση και επιλογή της ιδανικής μεθόδου αποτελεί ένα πολυπαραγοντικό ζήτημα για το οποίο εγείρονται πολλά ερωτήματα. Για τη διευκόλυνση και διαλεύκανση του τοπίου σκόπιμη κρίνεται η επισήμανση κάποιων συγκεκριμένων παραγόντων, οι οποίοι μπορούν να αποτελέσουν τον οδηγό για τη σύγκριση και επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.

Ένας από τους πρωταρχικούς και καθοριστικούς παράγοντες αξιολόγησης αυτών, λοιπόν, αποτελεί η ακρίβεια.⁶⁶ Σύμφωνα με τον ορισμό του Διεθνούς Οργανισμού Προτύπων (ISO) το 1994, η «ακρίβεια» αποτελεί τον συνδυασμό «αλήθειας» και



«πιστότητας», όπου η «αλήθεια» ορίζεται ως η «εγγύτητα συμφωνίας μεταξύ του αριθμητικού μέσου όρου του συνόλου των επαναλαμβανόμενων αποτελεσμάτων και η αληθινή ή αποδεκτή τιμή αναφοράς (εγγύτητα ενός μοντέλου σε μια πραγματική τιμή-ISO 5725-1)».^{66,99} Ενώ, η «πιστότητα» ορίστηκε ως «η εγγύτητα συμφωνίας μεταξύ των διαφορετικών εκτυπωμένων μοντέλων».^{17,66} Όσο μεγαλύτερη είναι η πιστότητα τόσο πιο προβλέψιμη είναι η μέτρηση. Μια τιμή υψηλής αλήθειας είναι κοντά ή ίση με τις πραγματικές διαστάσεις του μετρούμενου αντικειμένου.⁶⁶

Πολλοί διαφορετικοί παράγοντες, όμως, επηρεάζουν την ακρίβεια. Σε αυτούς εντάσσονται τα υλικά, ο κατασκευαστής, οι παράμετροι εγκατάστασης, το λογισμικό, η ταχύτητα της φωτεινής πηγής, η ένταση της πηγής, η γωνία εκπομπής της ακτινοβολίας, η κατεύθυνση χιτισίματος του μοντέλου, ο αριθμός των στρωμάτων, ο χρόνος έκθεσης του κάθε στρώματος στην ενέργεια, η ποσότητα του υποστηρικτικού υλικού και η μετεπεξεργασία.^{25,31,100}

Ως εκ τούτου, διαφορετικές έρευνες εξετάζουν διαφορετικές παραμέτρους. Οι Jae-Won Choi et. al. το 2019 εξέτασαν την ακρίβεια των συμβατικών οδοντιατρικών εκμαγείων γύψου με εκμαγεία, που παρήχθησαν με τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση, συγκεκριμένα με SLA και DLP.³¹ Τα πορίσματα της έρευνας έδειξαν ότι η συμβατική μέθοδος σε εκμαγεία πλήρους οδοντικού φραγμού αποδίδει υψηλότερη ακρίβεια σε σύγκριση με τις τεχνολογίες 3D.^{24,26,36,67} Σύμφωνα με πολλούς, εξάλλου, η συμβατική μέθοδος αποδίδει εκμαγεία μεγαλύτερης ακρίβειας και αναπαράγει με μεγαλύτερη πιστότητα τις λεπτομέρειες, αποδίδοντας ταυτόχρονα καθορισμένα όρια ακόμα και σε περιστατικά συνωστισμού δοντιών.^{9,24,26,42,49,67,101}

Παράλληλα, η τεχνολογία DLP, η οποία χρησιμοποιεί προβολέα για τη θεραπεία ενός στρώματος τη φορά, παράγει μοντέλα με πληρέστερο πολυμερισμό στο συνολικό πάχος του στρώματος, αποδίδοντας υψηλότερη ακρίβεια από τη SLA^{68,102}, η οποία χρησιμοποιεί μία δέσμη λέιζερ, για να πολυμερίσει το φωτοπολυμερές υλικό από σημείο σε σημείο.⁶⁸ Η χαμηλότερη απόδοση των 3D σύμφωνα με τους Yeon Jang et. al.²⁵ οφείλεται στην πιθανή παραμόρφωση των παραγόμενων, λόγω συσσώρευσης τάσεων κατά τη συρρίκνωση του πολυμερισμού και τη επεξεργασία που ακολουθεί της εκτύπωσης.^{9,24,66,68} Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η SLA αποδίδει χαμηλότερο βαθμό πολυμερισμού και απαιτεί περισσότερη μετεπεξεργασία την καθιστά υποδεέστερη της DLP τεχνολογίας.^{9,24,66,68} Επίσης, σύμφωνα με τους Li Chen et. al.¹⁰³ και τους Niansong Ye et. al.⁴⁵ η DLP παράγει υψηλής ακρίβειας μοντέλα, με λείες επιφάνειες και ταχύ ρυθμό. Εξίσου



ενδιαφέροντα είναι τα αποτελέσματα των Stephen L. Sherman et. al.⁶⁴ και Oraphan Rungrojwittayakul et. al.⁴⁵, οι οποίοι εξέτασαν την επίδραση της παραγωγής εσωτερικά κενών (με κελύφος πάχους 2mm) και συμπαγών εκμαγείων. Στα αποτελέσματα τους δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις και η ακρίβεια και των δύο ειδών ήταν εντός των επιτρεπτών ορίων, με τα κενά εσωτερικά εκμαγεία να πλεονεκτούν λόγω της εξοικονόμησης χρόνου, υλικού και χρημάτων.⁵⁹ Η SLA και η DLP, παρόλο που παράγουν πρότυπα χαμηλότερης ακρίβειας είναι εντός των επιτρεπτών ορίων απόκλισης και θεωρούνται αξιόπιστες μέθοδοι παραγωγής εκμαγείων ειδικά στην ορθοδοντική.⁴³

Σε έρευνα, η οποία διεξήχθη το 2018 ένα μοντέλο πλήρους οδοντικού φραγμού σαρώθηκε με χρήση εξωστοματικού σαρωτή (Identica Blue) και χρησιμοποιήθηκε ως μέσο αναφοράς.²⁶ Για κάθε ομάδα δοκιμών κρίθηκαν δέκα εκμαγεία ως επαρκής αριθμός. Έτσι, τα γύψινα μοντέλα παρήχθησαν μέσω της συμβατικής μεθόδου από το μοντέλο αναφοράς. Αντίθετα, για τις πειραματικές ομάδες, τα ψηφιακά δεδομένα αποκτήθηκαν με χρήση ενδοστοματικού σαρωτή (CEREC Omnicam) και δημιουργήθηκαν επίσης εκμαγεία τεχνολογίας SLA και τεχνολογίας PolyJet. Όλα τα μοντέλα σαρώθηκαν με εξωστοματικό σαρωτή. Η έρευνα έδειξε ότι δεν υπήρξε στατιστικά σημαντική απόκλιση ως προς την αλήθεια μεταξύ των γύψινων εκμαγείων και των SLA-εκμαγείων ($p > 0,05$), ενώ τα φωτοπολυμερή εκμαγεία έδειξαν στατιστικά σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια από αυτή των γύψινων ($p < 0,05$).²⁶ Το ίδιο έτος οι Gregory B. Brown et. al.⁵⁵ συνέκριναν την ακρίβεια της DLP και Polyjet αφενός μεταξύ αυτών και αφετέρου με τη συμβατική μέθοδο. Οι έλεγχοι στους συντελεστές ενδοταξικής συσχέτισης ήταν υψηλοί για όλες τις καταγεγραμμένες μετρήσεις, γεγονός που αποδεικνύει ότι όλες οι μετρήσεις σε όλους τους τύπους εκμαγείων ήταν εξαιρετικά αναπαραγωγίμες. Επίσης, υπήρχαν υψηλοί βαθμοί συμφωνίας μεταξύ όλων των δοκιμών και όλων των μετρήσεων, με εξαίρεση τις μετρήσεις του ύψους της μύλης μεταξύ των γύψινων εκμαγείων και των DLP – εκμαγείων, όπου η μέση διαφορά ήταν στατιστικά σημαντική.⁵⁵

Ο εκτυπωτής Polyjet παρήγαγε μοντέλα με κλινικά αποδεκτή ακρίβεια για όλες τις καταγεγραμμένες μετρήσεις. Σε σύγκριση όμως με τον εκτυπωτή DLP, τα μοντέλα Polyjet πλησίαζαν περισσότερο την ακρίβεια των γύψινων. Η μέση διαφορά μεταξύ των μετρήσεων του ύψους της μύλης για τα DLP και τα γύψινα μοντέλα ήταν στατιστικά σημαντική, αλλά ο μέσος όρος του εύρους των τιμών ήταν κλινικά αποδεκτός.⁵⁵ Επιπροσθέτως, το 2017 οι Soo-Yeon Kim et. al.⁶⁶ σε πληρέστερη ερευνά τους συμπεριέλαβαν εκτός των προαναφερθέντων τεχνολογιών και την τρισδιάστατη τεχνολογία εκτύπωσης FDM.



Αποδείχθηκε ότι όλες οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης παρουσίασαν σημαντικές διαφορές στην ακρίβεια όλων των μετρήσεων, όσο και στην αλήθεια των μετρήσεων των δοντιών και του οδοντικού τόξου. Με τις τεχνικές DLP και Polyjet να είναι πιο ακριβείς από τις τεχνικές FDM και SLA και η τεχνική PolyJet να έχει την υψηλότερη ακρίβεια όλων. Οι δυο πρώτες παρουσίασαν παρόμοια παραμόρφωση τάσεων γεγονός που μπορεί να δικαιολογήσει τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Στα εκμαγεία από FDM και DLP επίσης, εντοπίστηκε τάση μείωσης των διαστάσεων, ενώ στα εκμαγεία των ομάδων Polyjet και SLA παρατηρήθηκε τάση αύξησης των διαστάσεων παρειακά και προσθιοπίσθια. Κατακόρυφα, οι αποκλίσεις ήταν μικρότερες από αυτές των άλλων κατευθύνσεων.³⁰ Παρόλα αυτά όλες οι τεχνικές ήταν εντός των επιτρεπτών αποκλίσεων και συνίστανται να επιλέγονται με βάση τις απαιτήσεις ακρίβειας των εκάστοτε ορθοδοντικών εργασιών. Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύονται και από νεότερες έρευνες.^{9,30,66,95,100,104}

Επιπλέον, οι Mid-Eum Park et. al.¹⁰⁴ απέδειξαν ότι οι ογκομετρικές αλλαγές στα εκμαγεία που γίνονται με τη συμβατική μέθοδο παρουσιάζουν τη μικρότερη ογκομετρική συστολή από τα εκτυπωμένα 3D εκμαγεία. Σημαντική απόκλιση ($P < .05$) βρέθηκε μεταξύ των διαφορετικών τύπων τρισδιάστατων εκτυπωτών (DLP-UV, DLP-UV-LED, Polyjet), με τη μικρότερη να είναι αυτή των εκμαγείων από DLP με φως υπεριώδους ακτινοβολίας. Ενώ, στις έγχρωμες τρισδιάστατες απεικονίσεις, οι παραμορφώσεις παρουσίαζαν παρόμοια μοτίβα σε όλους τους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα αποτελέσματα έρχονται τα πορίσματα της έρευνας των Raymund E. Rebono et. al.⁵⁷ οι οποίοι έδειξαν ότι στατιστικά σημαντικές διαφορές της τάξης του 0,35 mm υπήρξαν μεταξύ των γύψινων, των FDM, των SLA και των Polyjet εκμαγείων, ενώ τα μοντέλα FDM ήταν αυτά που αναπαρήγαγαν πιστότερα τα εκμαγεία γύψου. Τα εκμαγεία SLA και Polyjet έδειξαν τάση προς επέκταση για μετρήσεις εσωτερικά και εξωτερικά του οδοντικού τόξου και τάση προς συρρίκνωση κατά κατακόρυφο επίπεδο.⁵⁷

Αντικρουόμενα κρίνονται τα πορίσματα σε συγκριτική μελέτη της ακρίβειας των οδοντιατρικών εκμαγείων με FDM και SLA, η οποία διεξήχθη από τους Kasparova et al.²⁶ Τα εκμαγεία SLA παρουσίασαν μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη απόδοση των λεπτομερειών της επιφάνειας από εκείνες που κατασκευάζονται με FDM. Παρ' όλα αυτά, καθώς τα εκμαγεία FDM και SLA δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές από τα συμβατικά εκμαγεία εξήχθη το συμπέρασμα ότι τα εκτυπωμένα 3D εκμαγεία ήταν κατάλληλα για χρήση.



Ανακεφαλαιώνοντας, οι Nestler et. al.⁸⁰ σε έρευνά τους το 2020 διαπίστωσαν ότι τα εκμαγεία πρέπει να παρέχουν εκτός από υψηλή ακρίβεια διαστάσεων και υψηλή ανάλυση επιφάνειας (η δεύτερη παράμετρος την οποία θα εξετάσουμε), αν και οι απαιτήσεις όσον αφορά στην ακρίβεια των μοντέλων εργασίας για την ορθοδοντική δεν είναι το ίδιο υψηλές.⁴³ Οι προδιαγραφές του εκτυπωτή επιδρούν κυρίως στην ανάλυση, η οποία μπορεί να επηρεαστεί και από το ύψος του στρώματος, το οποίο επηρεάζει με τη σειρά του την ακρίβεια και τον χρόνο εκτύπωσης, ενώ η τρισδιάστατη γεωμετρία, η συρρίκνωση του υλικού όπως και οι πιθανές στρεβλώσεις μπορεί να επηρεάσουν περαιτέρω την ακρίβεια των διαστάσεων.¹⁰⁰ Παρ' όλο που οι εκτυπωτές που βασίζονται σε φωτοπολυμερισμό είναι καλύτεροι από τους εκτυπωτές που βασίζονται σε εξώθηση υλικού όσον αφορά στην ανάλυση, δεν παρατηρήθηκαν αποκλίσεις ως προς την ακρίβεια διαστάσεων.^{43,50}

Διαφορετικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την ανάλυση και ακρίβεια διαστάσεων των τρισδιάστατων εκτυπωτών: Η ανάλυση συγκεκριμένα σε διαστάσεις x και y καθορίζεται κυρίως από το μέγεθος του λέιζερ για SLA, το μέγεθος των pixel για DLP και το μέγεθος του ακροφυσίου για FDM ενώ η διάσταση z καθορίζεται από το ύψος στρώσης. Το ύψος του στρώματος συμβάλλει σε υψηλότερη ανάλυση, η οποία μπορεί να εκδηλωθεί με ομαλότερο φινίρισμα επιφανειών και με υψηλότερη απόδοση των λεπτομερειών.^{100,103} Καθώς μεν το μικρότερο ύψος στρώματος επιτρέπει την απόδοση μεγαλύτερης λεπτομέρειας στα εκμαγεία και βελτιωμένο φινίρισμα αλλά αυτό δεν εγγυάται ταυτόχρονα ότι το εκτυπωμένο εκμαγείο είναι πιο ακριβές από αυτά που εκτυπώνονται με χαμηλότερη ανάλυση (μεγαλύτερο πάχος στρώματος).^{100,105}

Ένας γενικός κανόνας, λοιπόν, ο οποίος θα μπορούσε να διατυπωθεί για την ανάλυση χωρίς να είναι καθολικός, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι ο εξής: όσο μικρότερο είναι το ύψος του στρώματος, τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα λεπτότερο στρώμα παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης απόδοσης των επιφανειών με λείο φινίρισμα, εστιάζοντας περισσότερο στις λεπτομέρειες του κάθε σημείου, καθιστώντας την εκτύπωση πιο ακριβή. Αντίθετα, ένα παχύτερο στρώμα αποδίδει λιγότερα διακριτά σημεία και με μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ένα εμφανές εφέ σκαλοπατιού στην επιφάνεια του μοντέλου, που επηρεάζει τη συνολική ανάλυση.^{17,59} Ταυτόχρονα, όμως, η ποιότητα της επιφάνειας των τυπωμένων μοντέλων εξαρτάται από την κατεύθυνση και την κλίση αυτών στην πλατφόρμα κατασκευής, γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να τοποθετούνται σύμφωνα με τις κλινικές απαιτήσεις του εκάστοτε περιστατικού.⁵⁹ Επίσης, η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζεται από τη μέθοδο



κατασκευής. Για κάθε κατασκευαστική μέθοδο, επιτυγχάνονται τιμές τραχύτητας εντός ενός συγκεκριμένου εύρους μόνο υπό καθορισμένες συνθήκες. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μοντέλων ουσιαστικά έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός προϊόντος με σταθερά υψηλή ποιότητα επιφάνειας.⁵⁹ Καθώς, η επαρκής ποιότητα εξασφαλίζει την παραγωγή ικανοποιητικών και αξιόπιστων εκμαγείων. Τη δυνατότητα επίτευξης αυτού του στόχου υποστηρίζουν οι Christin Arnold et. al. αποδεικνύοντας ότι τα εκμαγεία τα οποία παράγονται με τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να αποδώσουν συγκρίσιμη ή υψηλότερη ποιότητα επιφάνειας, ιδιαίτερα στην κατακόρυφη κατεύθυνση, από αυτή που επιτυγχάνεται με τη συμβατική μέθοδο γύψου, ακόμα και την αφαιρετική μέθοδο. Προϋπόθεση για την επίτευξη αυτού όμως αποτελεί ο σωστός προγραμματισμός του εκτυπωτή υπό καθορισμένες συνθήκες ανάλογα την κάθε περίπτωση.

Η ακρίβεια διαστάσεων επηρεάζεται κυρίως από τη συρρίκνωση και τη στρέβλωση του υλικού. Για τους εκτυπωτές που βασίζονται σε συστήματα φωτοπολυμερισμού, ένας συχνά αναφερόμενος λόγος συρρίκνωσης είναι ο ατελής πολυμερισμός του μονομερούς της ρητίνης από την πηγή φωτός κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης, γεγονός που απαιτεί περαιτέρω πολυμερισμό και μετεπεξεργασία γενικότερα. Σε συνδυασμό με τις δομές στήριξης που απαιτούνται τις περισσότερες φορές οδηγεί σε αύξηση του χρόνου μετεπεξεργασίας και σε ενδεχόμενη συρρίκνωση.^{43,80,100}

Τέτοια προβλήματα μπορούν να παρατηρηθούν και σε εκτυπωτές FDM. Παράγοντες που ευνοούν κάτι τέτοιο είναι μια ανεπαρκώς θερμαινόμενη βάση εκτύπωσης, ανεπαρκής πρόσφυση του πρώτου στρώματος ή αφαίρεση των εκμαγείων πολύ νωρίς όταν η θερμοκρασία είναι ακόμα υψηλή. Επιπλέον, οι Camardella et al.⁴⁹ κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα εκμαγεία – SLA, τα οποία εκτυπώνονται με βάση σε σχήμα πετάλου υφίστανται στατιστικά σημαντική μείωση κατά την εγκάρσια διάσταση. Σε αυτήν τη μελέτη, όλοι οι εκτυπωτές SLA που διερευνήθηκαν εμφάνισαν ανακρίβειες διαστάσεων σε όλες τις αποστάσεις. Συνεπώς, η απουσία μιας εγκάρσιας δομής στήριξης στην καμπύλη του οδοντικού τόξου μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη συρρίκνωση και παραμόρφωση.⁴⁹

Σύγκριση της ακρίβειας και της ανάλυσης των εκτυπωτών, οι οποίοι χρησιμοποιούν τεχνολογία LCD, με τους εκτυπωτές – DLP και SLA έδειξαν ότι δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές με τους DLP εκτυπωτές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δύο αυτές τεχνολογίες DLP και LCD παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούν και ίδια υλικά – ρητίνες οι οποίες πολυμερίζονται σε μήκος κύματος 405nm. Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογία DLP θεωρείται πιο ακριβής σε σύγκριση με τη LCD. Αυτό οφείλεται



στη διαφορετική πηγή φωτός. Πιο συγκεκριμένα, πολλοί υποστηρίζουν ότι αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι ο προβολέας των DLP εκτυπωτών ενεργοποιεί μόνο τα pixel, που χρειάζονται, ενώ η οθόνη σε έναν εκτυπωτή LCD δημιουργεί μια μάσκα που εμποδίζει το εισερχόμενο φως. Επειδή όμως η πηγή φωτός δεν είναι τελείως κάθετη προς την οθόνη, μερικές ακτίνες διαρρέουν γύρω από τα όρια της «καλυπτόμενης» επιφάνειας και πολυμερίζουν περιοχές, που δεν θα έπρεπε. Αν και το σφάλμα που δημιουργείται από αυτήν τη «διαρροή» φωτός είναι ελάχιστο και της τάξης των εκατοντάδων χιλιοστών, εξακολουθεί να υπάρχει.⁴⁹

Η τεχνολογία DLP δεν αποφεύγει αυτό το πρόβλημα εκπέμποντας φως μόνο όπου είναι απαραίτητο και όχι σε ολόκληρη την πλατφόρμα. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στον εκτυπωτή να αυξάνει ή να μειώνει την προβαλλόμενη εικόνα (σε αντίθεση με μια οθόνη LCD με σταθερά μεγέθη pixel). Ως εκ τούτου, το φως που προέρχεται από έναν προβολέα DLP πρέπει να επεκταθεί από μια μικρή πηγή, για να καλύψει μια ευρύτερη περιοχή. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι τα μοντέλα ευρείας κλίμακας έχουν αυξημένη πιθανότητα να παρουσιάσουν παραμόρφωση των pixel στις άκρες τους. Αυτό είναι ελαφρώς διαφορετικό σε σύγκριση με το προαναφερθέν πρόβλημα διαρροής φωτός με εκτυπωτές LCD, καθώς η δυνατότητα παραμόρφωσης του DLP είναι ανάλογη με την απόσταση από το κέντρο της πλατφόρμας. Επιπλέον, ο αριθμός των pixel σε έναν προβολέα DLP είναι ο ίδιος ανεξάρτητα από το μέγεθος της εκτύπωσης. Αυτό σημαίνει ότι οι μικρότερες και στενότερες εκτυπώσεις μπορούν να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τις ευρύτερες εκτυπώσεις που γίνονται στον ίδιο εκτυπωτή DLP. Αυτή η αδυναμία των LCD και DLP να αποδώσουν τις ακριβείς διαστάσεις οδηγεί σε προϊόντα με χαμηλότερη ανάλυση σε σχέση με αυτή των SLA εκτυπωτών. Ικανοποιητική ανάλυση και επαρκή ακρίβεια αποδίδουν και οι τεχνολογίες FDM και Polyjet με εκμαγεία με ομοιόμορφη λεία επιφάνεια και επαρκείς λεπτομέρειες επιφάνειας, με την Polyjet να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από τη FDM.^{49,106}

Ένας ακόμα καθοριστικός παράγοντας ειδικά στην εποχή μας, τον οποίο θα εξετάσουμε, δεν θα μπορούσε να είναι άλλος από τον χρόνο. Αναφερόμενοι στον χρόνο δεν εννοούμε μόνο εκείνον που απαιτείται για την εκτύπωση ενός ή περισσότερων εκμαγείων αλλά το συνολικό διάστημα, το οποίο απαιτείται για την όλη μεταχείριση αυτού έως ότου είναι έτοιμο για χρήση. Ο χρόνος ξεκινάει να μετράει από την στιγμή, που το αρχείο STL στέλνεται στο λογισμικό του εκτυπωτή για διαχείριση και επεξεργασία. Βασιζόμενοι σε προσωπική ερευνά ο χρόνος επεξεργασίας για να σταλεί για εκτύπωση, εκτός του γεγονότος ότι βασίζεται στον αριθμό των εκμαγείων, εξαρτάται επίσης και από την εξοικείωση του



εργαζομένοι με τις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης και τις ανάγκες προετοιμασίας των εκμαγείων, τα οποία ταυτόχρονα θα αποσταλούν για εκτύπωση.

Δεν πρέπει να παραλειφθεί σε αυτό το σημείο να αναφερθεί το πλεονέκτημα της πολλαπλής εκτύπωσης. Σε όλα τα εκτυπωτικά συστήματα υπάρχει η δυνατότητα να εκτυπωθούν ταυτόχρονα περισσότερα του ενός εκμαγεία. Ο αριθμός αυτών εξαρτάται από τη διάσταση της εκάστοτε πλατφόρμας, την κλίση με την οποία θα τοποθετηθούν αυτά όπως και το μέγεθός τους. Τα πλεονεκτήματα αυτής της δυνατότητας είναι προφανή καθώς επισπεύδουν την ροή εργασίας και αποδεσμεύουν τους υπαλλήλους, έως ότου ολοκληρωθεί η εκτύπωση όλων των εκμαγείων. Η δυνατότητα αυτή είναι κάτι το οποίο από κοινού μοιράζονται όλα τα εκτυπωτικά συστήματα και τα κάνει να υπερτερούν έναντι της συμβατικής μεθόδου με γύψο. Παρά το γεγονός ότι μπορούμε να κατασκευάσουμε με την παρασκευή περισσότερης γύψου περισσότερα του ενός εκμαγεία ο αριθμός είναι πάντα μικρός λόγω του περιορισμένου χρόνου, που διαθέτουμε, μέχρι να προχωρήσει η κρυστάλλωση και να καταστεί η γύψος ακατάλληλη για χρήση. Επίσης, στη συμβατική μέθοδο πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας αρχικά τον χρόνο, ο οποίος απαιτείται για την απολύμανση των αποτυπωμάτων (περίπου 10 λεπτά), τον χρόνο προετοιμασίας του πολτού της γύψου, το διάστημα, το οποίο απαιτείται για την πήξη αυτού, αφού εγχυθεί στο αποτύπωμα (1 ώρα) και τέλος τον χρόνο διαμόρφωσης (τριμάρισμα) αυτού. Όλα αυτά επηρεάζουν τον απαιτούμενο χρόνο εργασίας.

Μεμονωμένα, όμως, δεν παρουσιάζουν όλα τα εκτυπωτικά συστήματα την ίδια ταχύτητα εκτύπωσης, ούτε απαιτούν την ίδια μετεπεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, τον περισσότερο χρόνο απαιτούν οι τεχνολογίες SLA^{4,31,42,59} και SLS-SLM³⁴. Για τον λόγο ότι εκτός της μετεπεξεργασίας η οποία απαιτείται, κάθε σημείο του κάθε στρώματος του εκμαγείου χρειάζεται να σαρωθεί από την ακτίνα laser, για να πραγματοποιηθεί ο πολυμερισμός, αναφερόμενοι στην τεχνολογία SLA. Όσον αφορά την SLM-SLS, καθώς βασίζονται σε παρόμοια τεχνική, πρέπει η ακτίνα του λέιζερ να περάσει από τα σημεία τα οποία είναι προς τήξη για τη δημιουργία του κάθε στρώματος ώστε να πραγματοποιηθεί η πυροσυσσωμάτωση.^{66,59} Το γεγονός ότι και οι δύο τεχνικές βασίζονται σε «σάρωση» σημείο προς σημείο έχει σαν αποτέλεσμα ότι καθίστανται ιδιαίτερα αργές σε σχέση με τις υπόλοιπες, όπως η LCD⁶² η DLP^{17,35,42,54,68,69} και η FDM³². Παρόλα αυτά, οι τεχνολογίες LCD⁶² και DLP, χάρις την αρχή λειτουργίας τους- πολυμερισμός ενός ολόκληρου στρώματός ταυτόχρονα- κρίνονται ως οι ταχύτερες μέθοδοι εκτύπωσης.⁵⁸ Μεταξύ των δύο τεχνολογιών όμως η DLP παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι χρειάζεται λιγότερο χρόνο



έκθεσης της ρητίνης στο φως για τον πολυμερισμό αυτής, καθώς έχει πιο υψηλή ένταση πηγής από την οθόνη των εκτυπωτών LCD.⁴ Εξίσου ταχείς θεωρούνται και οι εκτυπωτές MJ, οι οποίοι σύμφωνα με τους Carla Evans et. al. και A. Dawood et. al.⁴⁹ είναι γρηγορότεροι από τους FDM.^{40,42} Οι δύο αυτές τεχνικές, όμως, παρέχουν τη δυνατότητα εύκολης απομάκρυνσης των δομών στήριξης με προσαρμογή και διαφοροποίηση του υλικού αυτών, εξοικονομώντας χρόνο από τη συνολική εργασία – MJ⁴² FDM^{34,74,107}. Αρκετά υψηλή ταχύτητα παρουσιάζουν και οι εκτυπωτές που βασίζονται σε τεχνολογία LOM.³² Βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται, δεν χρειάζονται μετεπεξεργασία-απομάκρυνση του υπολειπόμενου μονομερούς υλικού –, καθώς χρησιμοποιούνται πολυμερισμένα φύλλα ρητίνης. Επίσης, δεν χρειάζονται δομές στήριξης. Είναι, λοιπόν, εύκολο να αντιληφθούμε ότι η τεχνολογία LOM απαιτεί τον λιγότερο δυνατό χρόνο μετεπεξεργασίας σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες. Μη ύπαρξη δομών στήριξης, άρα και λιγότερη μετεπεξεργασία, δεν χρειάζεται και η τεχνολογία SLS-SLM^{4,32,34,37,85}, εφόσον το ίδιο το υλικό λειτουργεί ως υποστήριξη κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης του εκμαγείου. Εν αντιθέσει, τα συστήματα εκτύπωσης γενικότερα με φωτοπολυμερισμό, όπως έχει ήδη αναφερθεί, απαιτούν πάντα μετεπεξεργασία (λουτρά, όπτηση) εξαιτίας του ατελούς πολυμερισμού του μονομερούς των ρητινών και των πιθανών συρρικνώσεων, που μπορεί να προκύψουν εξαιτίας αυτού.^{43,80,100} Η μετεπεξεργασία όμως δεν αποτελεί τον μοναδικό λόγο αύξησης του απαιτούμενου χρόνου. Ένας ακόμα γενικός κανόνας, ο οποίος ισχύει για την 3D εκτύπωση είναι η σχέση ανάλυσης και χρόνου.^{59,9100} Οι δύο αυτές μεταβλητές αποτελούν ανάλογα πόσα. Συγκεκριμένα, αυξάνοντας την ανάλυση της εκτύπωσης – συνήθως περισσότερα στρώματα – αυξάνουμε και τον χρόνο εκτύπωσης, ο οποίος απαιτείται.^{18,59} Για την αποφυγή όλων αυτών θα μπορούσε εύκολα κάποιος να σκεφτεί ότι αυξάνοντας την ταχύτητα εκτύπωσης όλα τα προαναφερθέντα θα αντισταθμιζόντουσαν και θα επιταχυνόταν η διαδικασία, παρ' όλα αυτά η βιβλιογραφία διαφωνεί. Ο λόγος είναι ότι αυξάνοντας την ταχύτητα μπορεί να επιτυγχάνουμε μικρότερους χρόνους αλλά πολλές φορές αυτό συμβαίνει εις βάρος της ακρίβειας και της ανάλυσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την επιτάχυνση της εκτύπωσης οδηγούμαστε σε ελλιπή πολυμερισμό της ρητίνης ασταθή βάση και γενικότερες στρεβλώσεις. Στην τεχνολογία FDM παραδείγματος χάριν έχει ως αποτέλεσμα τα ασαφή όρια, την μη επαρκή πρόσφυση των αλληπάλληλων στρωμάτων και παρουσίαση ινών, φυσαλίδων και αποκοπών του νήματος του υλικού εντός του ζεστού ακροφυσίου. Εντούτοις, η αύξηση της ταχύτητας εκτύπωσης με ταυτόχρονη αποφυγή παραμορφώσεων των διαστάσεων των εκμαγείων προβλέπεται από



τον κατασκευαστή. Σε τέτοιου είδους εναλλακτικές μπορούμε να βασιστούμε μόνο ακολουθώντας πιστά τις συστάσεις του κατασκευαστή. Συνεπώς, η ταχύτητα της εκτύπωσης μπορεί να αυξηθεί μέχρι ενός σημείου, συμβουλευμένοι πάντα τις οδηγίες λειτουργίας αυτής, για να αποφύγουμε οποιαδήποτε υπονόμηση της ποιότητας των εκτυπωμένων εκμαγείων.¹⁰⁸

Ένα ακόμα εργαλείο για τη μείωση του χρόνου αποτελεί η εύρεση της ευνοϊκής γωνίας χτισίματος. Ειδικότερα, η εύρεση της κλίσης εκείνης η οποία μας εξασφαλίζει τη μικρότερη δυνατή χρήση δομών στήριξης. Συνήθως η γωνία αυτή είναι εκείνη η οποία αξιοποιεί στο μέγιστο το σχήμα του ίδιου του μοντέλου, χρησιμοποιώντας το ως στήριξη κατά την εκτύπωση. Αυτό εξασφαλίζεται καθώς επιτρέπει στον εκτυπωτή να δημιουργήσει γεωμετρίες, που κρέμονται ή αποτελούν εσοχές χωρίς να βασίζεται σε δομές στήριξης. Η χρήση κλίσης 45 μοιρών είναι μία από τις συνήθεις μεθόδους για να γίνει αυτό. Επίσης, αυτή η τεχνική σε συνδυασμό με την προσαρμογή της εσωτερικής δομής των τρισδιάστατων εκτυπώσεων (infill) βοηθάει στην εξοικονόμηση υλικού κατά την εκτύπωση. Το μοτίβο πλήρωσης επηρεάζει τις ταχύτητες εκτύπωσης, ενώ η πυκνότητα πλήρωσης αλλάζει δραστικά τους χρόνους εκτύπωσης. Εν ολίγοις, μια υψηλότερη πυκνότητα πλήρωσης θα αυξήσει την αντοχή του εξαρτήματος αλλά ταυτοχρόνως θα αυξήσει και τον χρόνο εκτύπωσης.¹⁰⁹

Επιπροσθέτως, ο χρόνος δεν αποτελεί τον τελευταίο παράγοντα που μας απασχολεί όσον αφορά στις μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ειδικότερα, δεν πρέπει να αγνοούμε το γεγονός ότι ένα οδοντοτεχνικό εργαστήριο, βάσει των ελληνικών δεδομένων και συνθηκών, παραμένει μία επιχείρηση, η οποία χρειάζεται να είναι πάντοτε κερδοφόρα. Έτσι, ευνόητο καθίσταται ότι κάθε επένδυση, η οποία γίνεται προς όφελος του εργαστηρίου, πρέπει να εξετάζεται διεξοδικά. Το συνολικό κόστος της εγκατάστασης και χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης για αυτούς τους λόγους ορίζεται ως ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας σύγκρισης των τρισδιάστατων εκτυπωτών, τον οποίο πρέπει οι επαγγελματίες να λαμβάνουν πάντοτε υπόψιν τους. Στο κόστος εμπεριέχονται οι δαπάνες για τα αναλώσιμα του εκτυπωτή, την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τα ανταλλακτικά. Η ανάλυση και εξακρίβωση των οικονομικότερων ή ακριβότερων μεθόδων, όμως, είναι πρακτικά αδύνατη καθώς όπως οι ανάγκες, το μοντέλο, η επωνυμία της εταιρείας, το μέγεθος αλλάζουν από εργαστήριο σε εργαστήριο. Εκτός αυτών, η συνεχής διακύμανση των τιμών λόγω των εξελίξεων της παραγωγής νέων τεχνολογιών και αναβαθμίσεων στο λογισμικό των εκτυπωτών καθιστά αδύνατο τον προσδιορισμό του κόστους ακόμα και όταν πρόκειται για



μία μόνο τεχνολογία εκτυπωτή. Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, απουσιάζει και από τη βιβλιογραφία η αναφορά της τιμής ενός εκτυπωτή και παρουσιάζεται μόνο μία συγκριτική εικόνα της υπάρχουσας κατάστασης στην αγορά.

Ειδικότερα, στην καθημερινή ορθοδοντική πράξη μία από τις πιο ακριβές τεχνολογίες θεωρείται η SLA,^{34,107} καθώς όχι μόνο ο εξοπλισμός αλλά και τα αναλώσιμα είναι ιδιαίτερα ακριβά. Η DLP όμως αποτελεί την πιο ακριβή τεχνολογία^{34,42,69}, η οποία παρόλο που χρησιμοποιεί παρόμοια υλικά με την SLA, τόσο ο εκτυπωτής όσο και η ίδια η τεχνολογία της – βασίζεται σε μικροτσίπ και προτζέκτορα – αυξάνουν πολύ το κόστος της εγκατάστασης.⁶⁹ Σχετικά με την τεχνολογία LCD⁴² και οι δυο προαναφερθέντες εκτυπωτές δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τις τιμές της. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι χάρις στη διευρυμένη διάδοση της στο ευρύτερο κοινό και τη χρήση της ως επιτραπέζιο εκτυπωτή κατάφερε να γίνει ιδιαίτερα ανταγωνιστική στην αγορά τρισδιάστατης εκτύπωσης, κάτι το οποίο δεν κατάφερε η τεχνολογία DLP ή η SLA. Επίσης, στους εκτυπωτές DLP έχει παρατηρηθεί μία ανάλογη σχέση μεταξύ ποιότητας και τιμής. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι αυξάνοντας την ανάλυση και την ακρίβεια, οδηγούμαστε και σε εκτυπωτές μεγαλύτερου κόστους. Το χαμηλό κόστος των εξαρτημάτων και των ανταλλακτικών συνηγορεί υπέρ των εκτυπωτών με τεχνολογία LCD. Η μοναδική οικονομική επιβάρυνση, η οποία αποτελεί μειονέκτημα στην τεχνολογία LCD, θεωρείται η ανάγκη συχνής αντικατάστασης της ταχείας ανάλυσης οθόνης της. Εντούτοις, παραμένει οικονομικότερη επιλογή από την DLP και SLA.⁴² Μεταξύ όμως των συνηθέστερων τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην ορθοδοντική πράξη, η τεχνολογία FDM είναι με διαφορά η πιο φθηνή επιλογή.^{4,33,59,75,79} Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι συνδυάζει τον οικονομικότερο εξοπλισμό και προσφέρει εύκολη εγκατάσταση με χαμηλό κόστος υλικών, αποδίδοντας αξιόπιστη ποιότητα των εκτυπωμένων εκμαγείων. Σε αυτά προστίθεται και η ευρεία διάδοσή της στην αγορά, όπως αναφέρθηκε και για την τεχνολογία LCD, καθιστώντας την μία ιδανική επιλογή. Μία ακόμα εξίσου οικονομική τεχνολογία αποτελούν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές οι οποίοι βασίζονται σε τεχνολογία LOM. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι ακόμα διαδεδομένοι στον οδοντιατρικό κλάδο, είναι μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος. Παρά τις ανάγκες για αλλαγή κοπτικών εργαλείων (αν δεν χρησιμοποιεί λέιζερ) και ο περιορισμός στην ποικιλία των υλικών οι δαπάνες που απαιτούνται και το συνολικό κόστος μιας τέτοιας επένδυσης παραμένουν χαμηλές. Όσον αφορά στους εκτυπωτές SLM-SLS και PJ-MJ καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι παρά τη χρήση τους στην προσθετική οδοντιατρική δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στην ορθοδοντική.^{34,54,69,99} Το κύριο αίτιο εν γένει αυτού



αποτελεί το υψηλό κόστος του εξοπλισμού, της τεχνολογίας και των υλικών (με χαμηλό ιξώδες).

Εν κατακλείδι, συγκρίνοντας τη συμβατική μέθοδο γύψου με τις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, αβίαστα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το κόστος αυτών των τεχνολογιών ξεπερνά κατά πολύ τις οποιεσδήποτε δαπάνες της συμβατικής μεθόδου. Το πρόβλημα όμως αυτό αντισταθμίζεται από τις δυνατότητες πολλαπλής παραγωγής των εκμαγείων και της προβλεπόμενης και σταθερής απόδοσης – υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης. Γενικότερα, χάρις τη συνεχή εξέλιξη τόσο των υλικών όσο και της αύξησης των μοντέλων εκτύπωσης, το κόστος της τρισδιάστατης εκτύπωσης εν γένει τείνει να φθίνει καθιστώντας αυτές τις τεχνολογίες πιο προσιτές στο ευρύτερο κοινό.¹⁰⁶

Ο τελευταίος παράγοντας τον οποίο θα εξετάσουμε και χρήζει ιδιαίτερας σημασίας, αποτελεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Όντας ήδη μάρτυρες των καταστροφικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής καταλαβαίνουμε τη σημαντικότητα αυτής της παραμέτρου.^{49,111} Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μία ταχέως ανερχόμενη μέθοδο παραγωγής, η οποία σταδιακά τείνει να κατακλείσει την αγορά. Για αυτόν τον λόγο, καλούμαστε να αναλογιστούμε τη συμβολή του οδοντιατρικού κλάδου ως υψηλής ή όχι σημασίας.⁴⁹ Εν όψει όμως της τάσης του κατασκευαστικού κλάδου, καταλαβαίνουμε ότι μας απασχολεί στο σύνολο της τεχνολογίας αυτής το οικολογικό κόστος και με βάση αυτό κρίνουμε και την επίδραση της οδοντιατρικής σε αυτόν τον κλάδο.^{48,110}

Οι ενεργειακές απαιτήσεις αυτής αποτελούν ένα πραγματικό πρόβλημα το οποίο έχει εγείρει την ανησυχία πολλών γι' αυτή την τεχνολογία. Οι εκτυπωτές ταχείας πρωτοτυποποίησης, δυστυχώς, έχουν δείξει ότι καταναλώνουν πολύ μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.^{108-110,111,12} Ουσιαστικά, συμβάλλουν στην αύξηση των επιπέδων του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.^{110,111,112} Αυτές όμως δεν είναι οι μοναδικές εκπομπές οι οποίες μας απασχολούν. Σε μικρότερη κλίμακα και σε επίπεδο εργαστηρίου έχουν παρατηρηθεί εκπομπές σωματιδίων ανησυχητικές για την υγεία των εργαζομένων.^{110-112,113,114} Ειδικότερα, σε έρευνα από τους A. B. Stefaniaka et. al. αποδείχθηκε ότι η χρήση εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού ρητίνης, όπως οι DLP και SLA, οδηγούν σε εκπομπή νανοσωματιδίων και διαλυτών οργανικών ενώσεων.⁵⁵ Αυτοί διαφέρουν από τους άλλους τύπους ταχείας πρωτοτυποποίησης όπως η εξώθηση υλικού, εκτόξευση υλικού ή συνδεδετικό υλικού και σύντηξη στρώματος υλικού στο γεγονός ότι η κατασκευή ενός αντικειμένου περιλαμβάνει



το πολυμερισμό της υγρής ρητίνης· εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες τεχνικές, στις οποίες παρατηρείται εξώθηση λιωμένου νήματος, εναπόθεση σταγονιδίων μονομερούς και σύντηξη κόκκων σκόνης, αντίστοιχα.¹¹⁵ Κατά τις εκπομπές σημειώνονται εκπομπές σωματιδίων όπως αλουμίνιο, φώσφορος, κασσίτερος, χαλκός, χρώμιο, νικέλιο. Εξ αυτών ιδιαίτερο κίνδυνο παρουσιάζουν το χρώμιο και το νικέλιο, τα οποία αποτελούν ανοσοευσαιθητοποιητές και σε συνδυασμό με τις πτητικές οργανικές ενώσεις είναι υπεύθυνα ανοσοποιητικών ευαισθησιών, αναπνευστικών συμπτωμάτων εν γένει – όπως ρινική συμφόρηση, βήχας, φαγούρα στη μύτη/λαιμό/μάτια. Στη συγκεκριμένη έρευνα παρατηρήθηκαν εναποθέσεις δραστικών μετάλλων και σωματιδίων στην περιοχή των κυψελίδων των πνευμόνων.¹¹⁵ Για αποφυγή τέτοιων προβλημάτων συνιστάται η εφαρμογή κατάλληλων προφυλάξεων, π.χ. εργασία σε καλά αεριζόμενο χώρο, χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών με φίλτρα αέρα, χρήση μάσκας κ.λ.π.^{35,55,112}

Έχει αποδειχτεί όμως ότι τα μειονεκτήματα υστερούν των πλεονεκτημάτων και ότι η αγορά έχει ανοίξει τον δρόμο ούτως η άλλως προς την εξάλειψη τους.¹⁰⁸ Ένα από τα πλεονεκτήματα αποτελεί η μειωμένη απόρριψη υλικού σε σχέση με άλλες μεθόδους. Αυτό αποτελεί αποτέλεσμα δύο βασικών παραγόντων.^{113,114,116} Ειδικότερα, ο ένας από αυτούς είναι η μείωση του απορριφθέντος υλικού. Αυτό βασίζεται αρχικά στην ίδια τη φιλοσοφία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στη μέθοδο αυτή παράγεται μόνο το επιθυμητό προϊόν αποφεύγοντας περιττές δομές, όπως συμβαίνει αντίθετα στην αφαιρετική μέθοδο, όπου η αφαίρεση του υλικού οδηγεί στην αυξημένη σπατάλη αυτού.^{113,114,116} Επιπλέον, παρά τη χρήση δομών στήριξης, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνικές παραμένει η λιγότερη δαπανηρή. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται και η κατανάλωση της ενέργειας, η οποία απαιτείται για την αφαίρεση του πλεονάζοντος υλικού και της γενικότερης διαμόρφωσης του εκμαγείου.^{113,114,116} Η εκτύπωση του επιθυμητού προϊόντος κρίνεται ως ο δεύτερος παράγοντας που συμβάλλει στην ελάχιστη απόρριψη υλικού. Αναφερόμαστε, δηλαδή, στη γνώση και επίβλεψη του περιστατικού πριν σταλεί η εντολή για την εκτύπωση του εκμαγείου, επιτρέποντας και εξασφαλίζοντας την παραγωγή περίπλοκων γεωμετριών χωρίς κίνδυνο αποτυχίας.^{112,114} Κάτι το οποίο μας προφυλάσσει από πιθανές εκπλήξεις ή ακόμα και ανεπιθύμητα αποτελέσματα.¹¹³ Σε περίπτωση βέβαια που θέλουμε να μειώσουμε ακόμα περισσότερο τη χρήση του υλικού έχουμε τη δυνατότητα εκτύπωσης των εκμαγείων με κούφιο εσωτερικό· κάτι το οποίο όχι μόνο εξοικονομεί υλικό και χρόνο εκτύπωσης αλλά ταυτοχρόνως χάρις το μειωμένο βάρος του – πυκνότητα υλικού – απαιτείται και λιγότερη κατανάλωση ενέργειας παραγωγής.^{110,111} Επιπροσθέτως, αν και όπως προαναφέρθηκε



παρατηρούμε επιβαρύνσεις εκπομπών, παραδόξως πραγματοποιείται ταυτόχρονα μείωση αυτών στο περιβάλλον.^{113,114,116} Αυτό οφείλεται στη δυνατότητα αποστολής των διάφορων αρχείων σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου οποιαδήποτε στιγμή με την αποφυγή χρήση μεταφορικών μεσών. Πλέον δεν χρειάζεται οι οδοντίατροι και οι οδοντοτεχνίτες να στέλνουν με μεθόδους παράδοσής το οποιοδήποτε εκμαγείο ή αποτύπωμα. Η λήψη και αποστολή αρχείων είναι πλέον ο πιο άμεσος και γρήγορος τρόπος ανταλλαγής πληροφοριών.^{113,114,116} Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται και οποιαδήποτε ποσοστό ρύπων-καυσίμων και άρα μεταφορικών, το οποίο θα δημιουργούνταν από τη μεταβίβαση αυτών από το ένα μέρος στο άλλο.^{113,114,116}

Τέλος, δεν πρέπει να αγνοήσουμε τη διαδικασία διευθέτησης των απορριμμάτων τα οποία παράγονται. Ως γνωστόν όλες οι ρητίνες αποτελούν βλαπτικές ουσίες, τόσο για τον οργανισμό μας όσο και για το περιβάλλον με αποτέλεσμα η απόρριψη αυτών να επιφυλάσσει κινδύνους. Στην εκτύπωση εκμαγείων οι ορθοδοντικοί και οι ιδιοκτήτες εργαστηρίων βασίζονται στη χρήση θερμοπλαστικών υλικών.^{110,111,113} Παρ' όλα αυτά όσο και αν αυτό αποτελούσε έναν ανησυχητικό παράγοντα, ο οποίος έχρηζε επίλυσης στο παρελθόν, η λύση δόθηκε. Πλέον υλικά βιοδιασπώμενά, όπως το PLA, κυκλοφορούν στην αγορά με ανταγωνιστικές τιμές αποτελώντας μία «πράσινη» επιλογή.^{110,111,113} Τα φιλικά προς το περιβάλλον υλικά μέσω υγειονομικής ταφής πλέον συμβάλλουν στη μείωση της οικολογικής ρύπανσης.¹¹⁰ Σημαντικό επίσης κρίνεται να αναφερθεί ότι βάσει πηγών ο κλάδος αυτός λόγω της ταχείας ανάπτυξης¹¹⁴ των υλικών υπόσχεται την εύρεση όχι μόνο νέων υλικών αλλά δίνει ταυτόχρονα την ελπίδα για τη δημιουργία προσέγγισης της ανακύκλωσης¹¹¹ αυτών των προϊόντων.^{110,111,112}

Όσον αφορά τέλος στην παραδοσιακή μέθοδο κατασκευής γύψινων εκμαγείων, διάφορες έρευνες έχουν εκπονηθεί, πραγματευόμενες το περιβαλλοντικό στίγμα της χρήσης αυτής και τις μεθόδους ανακύκλωσης και υγειονομικής ταφής της.¹¹⁰ Η γύψος ως γνωστόν αποτελεί διένυδρο θειικό ασβέστιο και βρίσκεται σε αφθονία στη φύση. Δεν αποτελεί βλαπτικό παράγοντα για την υγεία του ανθρώπου, των φυτών ή του υδροφόρου ορίζοντα¹⁰⁹, ενώ γνωστό είναι ότι λόγω της υψηλής συγγένειας της με το νερό αποτελεί εξαιρετική πηγή ασβεστίου και θείου για τη θρέψη τους εδάφους-καλλιεργειών, βελτιώνοντας τη χημεία αυτού. Παρ' όλα αυτά, ως περιβαλλοντική επιβάρυνση θεωρούνται οι εγκαταστάσεις εναπόθεσης και διάθεσης της γύψου με τη μορφή χωματερών.¹¹¹ Πιο συγκεκριμένα, η απόρριψη αυτής ρυπαίνει το περιβάλλον, διότι η ενυδατωμένη μορφής της, ειδικά σε μεγέθη όπως τα εκμαγεία, δεν ευνοεί τη διάσπαση της υπό φυσιολογικές περιβαλλοντικές συνθήκες.



Ειδικότερα, κατά την απόρριψη της σε χωματερές έχουν σημειωθεί προβλήματα όταν αυτή βρίσκεται υπό αναερόβιες συνθήκες με χαμηλό PH σε παρουσία υγρασίας, διότι, τότε παράγεται υδρόθειο (H_2S), αέριο το οποίο είναι τοξικό και εύφλεκτο με χαρακτηριστική οσμή κλούβιου αυγού.¹¹⁰ Το υδρόθειο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, όταν βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα – διέγερση του νευρικού συστήματός, η οποία οδηγεί σε διακοπή της αναπνοής και θάνατο – ενώ σε μικρές συγκεντρώσεις κάτω των 100 ppm προκαλεί μονάχα ερεθισμούς και μη μακροπρόθεσμες επιδράσεις.¹¹⁰ Αναφερόμενοι σε επίπεδο εργαστηρίου πλέον κρίνεται απαραίτητο για την αποφυγή επιπλοκών και μολύνσεων, η γύψος να εκπλένεται σε ειδικούς και ξεχωριστούς νεροχύτες, όπου έχει εγκατασταθεί ειδικός εξοπλισμός: γυψοπαγίδες.^{110,111}

Για την αντιμετώπιση όλων των προαναφερθέντων επιπλοκών, η γύψος – σε άλλες χώρες του κόσμου κυρίως – αποτελεί προϊόν ειδικής μεταχείρισης όσον αφορά στη διαχείριση των απορριμμάτων ή ακόμα και ανακυκλώνεται. Συγκεκριμένα έχουν δημιουργηθεί εργοστάσια όπου, αφού αυτή συλλεχθεί, αποστέλλεται σε αυτά και εκεί τοποθετείται μεταξύ δύο πλακών χάλυβδου μίας μηχανής πίεσης, με σκοπό την άλεση αυτής και τη δημιουργία της σε μικρά κομμάτια. Έπειτα, απομακρύνονται οποιεσδήποτε προσμίξεις και ακαθαρσίες με πύρωση και εν συνεχεία ξηραίνεται. Τέλος, κονιοποιείται και είναι έτοιμη προς χρήση. Το τελικό προϊόν δεν παρουσιάζει διαφορετικές λειτουργικές ιδιότητες ή χρόνο πήξης με τη μη ανακυκλωμένη γύψο. Επιπροσθέτως, είναι πιο οικονομική, καθώς μειώνει τις ανάγκες χρήσης νέας γύψου και απαιτεί κατά την παρασκευή του πολτού μικρότερη ποσότητα σκόνης. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη αντοχή της στη θλίψη.¹¹¹ Έτσι οι Servas Shiyo et. al. κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η γύψος θα μπορούσε να διατηρήσει το περιβάλλον ασφαλές και να μειώσει τη ρύπανση αυτού με επανειλημμένη ανακύκλωση της.^{110,111,117}



6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η τρισδιάστατη εκτύπωση υπερισχύει έναντι της αφαιρετικής μεθόδου, παρά τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες που έχουν τα προϊόντα της τελευταίας: αντοχή και καλή κλινική εφαρμογή, καθώς παραμένει ασύμφορη στον κλάδο της ορθοδοντικής.
2. Μία επένδυση σαν την τρισδιάστατη εκτύπωση πρέπει πάντα να συνοδεύεται με ανάλογη εκπαίδευση του προσωπικού.
3. Μπορούμε να μειώσουμε το συνολικό κόστος των δαπανών, όταν διαθέτουμε εκτυπωτή τεχνολογίας SLA με τη χρήση χύμα υλικών, χωρίς να ανησυχούμε για τα αποτελέσματα στην ακρίβεια και ποιότητα των εκμαγείων.
4. Ευνοϊκή κρίνεται η χρήση μικρών διαστάσεων εκτυπωτών DLP στην ορθοδοντική, καθώς εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ακρίβεια και από αυτήν που απαιτείται.
5. Στην τεχνολογία LCD μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε υλικά τα οποία προορίζονται για εκτυπωτές DLP με ανάλογες τροποποιήσεις, αποδίδοντας υψηλή ανάλυση επιφάνειας που προσομοιάζουν στις επιφάνειες των SLA – εκμαγείων, αν θέλουμε να αποφύγουμε την αγορά διαφορετικών προϊόντων.
6. Με τις τεχνολογίες FDM και SLM-SLS μειώνουμε τις ώρες εργασίας, καθώς δεν απαιτούνται δομές στήριξης και χρονοβόρες διαδικασίες μετεπεξεργασίας.
7. Η εκτύπωση με MJ-εκτυπωτές παρέχει τη δυνατότητα εκτύπωσης με διαφορετικά υλικά και χρώματα, διαφορετικούς βαθμούς πολυμερισμού και υψηλή ακρίβεια. Παρ' όλο που αυτό θα μπορούσε να φανεί χρήσιμο για άλλες εργασίες στην ορθοδοντική, η χρήση αυτών για παραγωγή εκμαγείων δεν είναι συμφέρουσα λόγω του υψηλού κόστους της τεχνολογίας.
8. Η SLA απαιτεί περισσότερο χρόνο μετεπεξεργασίας από την DLP λόγω του χαμηλού βαθμού πολυμερισμού της, τον οποίο πρέπει να έχουμε υπόψιν μας.
9. Για την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους οι τεχνολογίες DLP και SLA μπορούν να παράγουν κούφια εκμαγεία με αποδεκτή ακρίβεια.
10. Η FDM παρουσιάζει χαμηλότερη ακρίβεια από την SLA αλλά παραμένει εντός των επιτρεπτών ορίων.
11. Η DLP παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια (πιστότητα και αλήθεια) από την SLA και παρόμοια με τη συμβατική μέθοδο γύψινων εκμαγείων.



12. Όλες οι τεχνολογίες (SLA, DLP, PJ ή MJ, LOM, LCD, FDM, SLS-SLM) αποδίδουν ικανοποιητικής ακρίβειας και ανάλυσης εκμαγεία για τις ανάγκες της ορθοδοντικής. Η σειρά ακρίβειας από την υψηλότερη στη χαμηλότερη είναι η εξής : γύψινα εκμαγεία>PJ>DLP>SLA>LCD+ FDM>LOM.
13. Όλες οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης φωτοπολυμερισμού παρουσιάζουν υψηλότερη ανάλυση από τις τεχνολογίες εξώθησης. Επίσης, το μειωμένο ύψος στρώματος αποδίδει καλύτερη ανάλυση αλλά όχι απαραίτητα ακρίβεια.
14. Όλα τα εκμαγεία που παρουσιάζουν χαμηλό βαθμό πολυμερισμού και δημιουργούνται από τεχνολογίες οι οποίες απαιτούν περισσότερη μετεπεξεργασία έχουν μεγαλύτερο κίνδυνο να στρεβλωθούν. Συνιστώνται εγκάρσιες δομές στα εκμαγεία για την αποφυγή αυτού του φαινομένου και προσοχή στις απαιτούμενες θερμοκρασίες σε τεχνολογίες όπως η FDM.
15. Αν μας απασχολεί ο χρόνος, συνιστάται η χρήση DLP και LCD εκτυπωτών. Οι FMD και LCD είναι πιο γρήγοροι από τους SLA και SLS-SLM (παρ' όλο που δεν απαιτούν πολλή μετεπεξεργασία). Η DLP είναι γρηγορότερη από την LCD, όπως και η MJ από την FDM. Στην LOM επίσης δεν απαιτείται χρονοβόρα μετεπεξεργασία. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση του αριθμού των στρωμάτων (μείωση του πάχους αυτών) οδηγεί σε αυξημένο χρόνο εκτύπωσης.
16. Αν μας απασχολεί το κόστος, οι τεχνολογίες MJ ή PJ, SLM-SLS και DLP είναι οι ακριβότερες και ακολουθούν οι SLA, LCD, FDM με αυτήν τη σειρά. Χαμηλότερης ακρίβειας εκτυπωτές είναι πιο οικονομικοί και ταυτοχρόνως αποδίδουν την απαιτούμενη ακρίβεια για την κατασκευή ορθοδοντικών εκμαγείων.
17. Για την ελαχιστοποίηση προβλημάτων υγείας συνιστάται η αποφυγή εκτυπωτών οι οποίοι χρησιμοποιούν σκόνη ή φωτοπολυμερισμό, όπως οι SLA, DLP, LCD, SLS-SLM, με τους τελευταίους να θεωρούνται προτιμότεροι. Οι εκτυπωτές FDM, MJ ή PJ, SLS-SLM και LOM συνιστώνται.
18. Οι FDM παρουσιάζουν τον χαμηλότερο κίνδυνο μόλυνσεων του υλικού (νήματα και όχι σκόνες).
19. Στο σύνολο της η τρισδιάστατη εκτύπωση μειώνει το ποσοστό βλαβερών εκπομπών στο περιβάλλον αλλά έχει υψηλές ενεργειακές ανάγκες.



20. Για τη γύψο υπάρχουν τρόποι να απορριφθεί έτσι ώστε να μη δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα, οι οποίοι δεν εφαρμόζονται ακόμα στην Ελλάδα. Ταυτόχρονα, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει προοπτικές να γίνει φιλική προς το περιβάλλον με τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων και τη χρήση βιοδιασπώμενων υλικών.
21. Η χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ισάξια να ανταγωνιστεί τη συμβατική μέθοδο γύψου και μελλοντικά να την αντικαταστήσει πλήρως.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ορθοδοντική αποτελεί τον κλάδο της οδοντιατρικής ο οποίος έχει ως στόχο την αποκατάσταση των λειτουργιών του στοματογναθικού συστήματος (μάσηση, φώνηση, αναπνοή) καθώς και την αναχαίτηση και πρόληψη γναθοπροσωπικών ανωμαλιών και σοβαρών μελλοντικών επιπλοκών. Με αυτόν τον τρόπο αποκαθιστά αισθητικά και λειτουργικά προβλήματα, διασφαλίζοντας έτσι και την ψυχολογική ευεξία του ασθενή. Για την επίτευξη αυτού όμως απαραίτητη κρίνεται η σωστή διάγνωση και οργάνωση του σχεδίου θεραπείας, μέσω της αξιολόγησης και μελέτης του εκάστοτε περιστατικού. Κατά συνέπεια, καθοριστικός κρίνεται ο ρόλος ενός αρτίου εκμαγείου μελέτης και εργασίας.

Με την πάροδο του χρόνου όμως οι τρόποι κατασκευής αυτών αυξήθηκαν και πλέον με την εισχώρηση της ψηφιακής τεχνολογίας και των υπολογιστών στην ιατρική, η δημιουργία εκμαγείων δεν περιορίζεται μόνο στη συμβατική μέθοδο με γύψο. Η ανάπτυξη των συστημάτων CAD/CAM παρέχει τη δυνατότητα επιλογής από μία ευρεία γκάμα τεχνολογιών, αφαιρετικής και προσθετικής μεθόδου, από τις οποίες θα μας απασχολήσει η τρισδιάστατη εκτύπωση και συγκεκριμένα οι τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται στην ορθοδοντική (SLA, DLP, LCD, FDM, LOM, SLS-SLM, MJ ή PJ). Η τρισδιάστατη εκτύπωση με τη χρήση εργαλείων ψηφιοποίησης και λογισμικών επεξεργασίας χτίζει σταδιακά στρώμα προς στρώμα το επιθυμητό εκμαγείο, αποφεύγοντας τις χρονοβόρες διαδικασίες. Με αυτόν τον τρόπο, άνοιξε τον δρόμο για μία ευκολότερη παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών εξατομικευμένων μοντέλων με τη χρήση ποικιλίας υλικών, μεγάλης ταχύτητας και ακρίβειας με μειωμένο κόστος παραγωγής.

Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, η τεχνολογία αυτή προσέλκυσε το ενδιαφέρον της ορθοδοντικής και γι' αυτό πραγματοποιήθηκε ανάλυση και διερεύνηση του τρόπου λειτουργίας αυτών, των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους, των υλικών που χρησιμοποιούν και των εφαρμογών τους, ώστε να βρούμε εκείνη που θα μπορούσε να ανταγωνιστεί ή να αντικαταστήσει τη συμβατική μέθοδο γύψου.

Λέξεις κλειδιά: προσθετική μέθοδος, τρισδιάστατη/3D εκτύπωση, γύψινα εκμαγεία, προϋποθέσεις για ικανοποιητικά εκμαγεία, κατασκευή εκμαγείων, ορθοδοντική, στερεολιθογραφία, ψηφιακή επεξεργασία μοντελοποίησης, εκτύπωση με οθόνη υγρών κρυστάλλων, μοντελοποίηση με εναπόθεση λιωμένου υλικού, επιλεκτική



πυρροσυσσωματωση με λέιζερ, μοντελοποίηση αντικειμένων σε φύλλα, εκτόξευση υλικού, στάδια κατασκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης, κριτήρια επιλογής τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης

ABSTRACT

Orthodontics is the specialty of dentistry whose goal is to restore the functions and aesthetics of the oral-maxillofacial system (chewing, speaking, breathing), as well as the aversion and prevention of maxillofacial abnormalities and serious future complications. In this way, it restores aesthetic and functional problems, thus ensuring the psychological well-being of the patient. However, to achieve this, the correct diagnosis, and the correct planning of the treatment plan, through the evaluation and study of each case, are considered necessary. Consequently, the role of a perfect model of study and work is considered decisive. However, over time the ways of making models have increased and nowadays with the use of digital technology and computers in medicine, the creation of casts is not limited to the conventional plaster method. The development of CAD/CAM systems provides the possibility of choosing from a wide range of technologies, specifically subtractive and additive methods, of which we will be concerned with 3D printing and specifically the technologies used in orthodontics (SLA, DLP, LCD, FDM, LOM, SLS-SLM, MJ or PJ). 3D printing using digitization tools and processing software gradually builds the desired casts layer by layer, avoiding time-consuming procedures. In addition, it paved the way for an easier production of customized models with much complex geometries using a variety of materials, high speed, and precision with reduced production expenses.

The above-mentioned methods of orthodontic models manufacturing have been presented and discussed in this thesis, focusing on the advantages and disadvantages, the materials which are used for each method and their applications for the orthodontic technician.

Key words: plaster casts, requirements for satisfactory casts, casting, orthodontics, stereolithography (SLA), digital model processing (DLP), liquid crystal display printing



(LCD), fused deposition modeling (FDM), Selective laser sintering (SLS), sheet object modeling (LOM), material jetting (MJ), PolyJet (PJ), criteria of choosing of 3D printing technology, advantages/disadvantages of 3D printing



7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γιαννικάκης Στ., Σημειώσεις: Βασικές αρχές οδοντοτεχνικής,, Αθήνα: Οδοντιατρικές εκδόσεις ΜΠΙΟΝΙΣΕΛ, 2013 , σ. 39.
2. Μπουλούχου. Κ. : Εισαγωγή στην Εργαστηριακή Ορθοδοντική, Αθήνα : Αθ. Σταμούλης , 2000.
3. Γιαννικάκης Στ.: Ολικές Οδοντοστοιχίες, Αθήνα: Οδοντιατρικές εκδόσεις Μπόνισελ, 2003 σ.7, p. p.4.
4. van Noort R. The future of dental devices is digital. Dent Mater. 2012 Jan;28(1):3-12
5. Προμπονάς Α., Ψηφιακή Οδοντική : CAD/CAM, Αθήνα , σ.5, 2017.
6. Nayar S, Bhuminathan S, Bhat WM. Rapid prototyping and stereolithography in dentistry. J Pharm Bioallied Sci. 2015 Apr;7(Suppl 1):S216-9.
7. C, Muallah J, Mah J, Bumann A. Accuracy and efficiency of full-arch digitalization and 3D printing: A comparison between desktop model scanners, an intraoral scanner, a CBCT model scan, and stereolithographic 3D printing. Quintessence Int. 2017;48(1):41-50.
8. Borrello J, Nasser P, Iatridis J, Costa KD. 3D Printing a Mechanically-Tunable Acrylate Resin on a Commercial DLP-SLA Printer. Addit Manuf. 2018 Oct;23:374-380.
9. Camardella LT, Vilella OV, van Hezel MM, Breuning KH. Accuracy of stereolithographically printed digital models compared to plaster models. J Orofac Orthop. 2017 Sep;78(5):394-402. English.
10. Torabi K, Farjood E, Hamedani S. Rapid Prototyping Technologies and their Applications in Prosthodontics, a Review of Literature. J Dent (Shiraz). 2015 Mar;16(1):1-9.
11. Kasparova M, Grafova L, Dvorak P, Dostalova T, Prochazka A, Eliasova H, Prusa J, Kakawand S. Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models. Biomed Eng Online. 2013 May 31;12:49.
12. Sim JY, Jang Y, Kim WC, Kim HY, Lee DH, Kim JH.: Comparing the accuracy (trueness and precision) of models of fixed dental prostheses fabricated by digital and conventional workflows. J Prosthodont Res. 2019 Jan;63(1):25-30.



13. Park JY, Kim HY, Kim JH, Kim JH, Kim WC.: Comparison of prosthetic models produced by traditional and additive manufacturing methods. *J Adv Prosthodont.* 2015 Aug;7(4):294-302.
14. Δημητροπούλου Ε. Χ.: Η εργαστηριακή διαδικασία στην Ακίνητη Προσθετική, Αθήνα, 2014, σ.33.
15. Revilla-León M, Gonzalez-Martín Ó, Pérez López J, Sánchez-Rubio JL, Özcan M. Position Accuracy of Implant Analogs on 3D Printed Polymer versus Conventional Dental Stone Casts Measured Using a Coordinate Measuring Machine. *J Prosthodont.* 2018 Jul;27(6):560-567.
16. Snhmeil Fr., Hirschfelder U.: *Kieferorthopädische Zahntechnik*, Verlag Neuer Merkur GmbH, 2004, p.66-68
17. Tripathi T, Rai P, Singh N. Molar distalization with 2K appliance: one-year follow-up. *J Orthod Sci.* 2017 Jul-Sep;6(3):97-103.
18. Whip Mix. 2016 [Online]. Available from: <https://info.whipmix.com/what-gypsum-materials-should-i-use-stone-or-plaster>
19. Σταθόπουλος Α. : *Οδοντιατρικά Υλικά*, Αθήνα : Επιστημονικές εκδόσεις Παρισιανού Α.Ε, Αριστοτέλους Αδάμ, 2012, σ.140
20. Depositphotos [Online]. Available from: <https://gr.depositphotos.com/portfolio-4399371.html?content=photo>
21. Μπουλούχου Ου. : *Συμπληρωματικές σημειώσεις ορθοδοντικής*, Αθήνα, 2008, σ.44.
22. San José V, Bellot-Arcís C, Tarazona B, Zamora N, O Lagravère M, Paredes-Gallardo V. Dental measurements and Bolton index reliability and accuracy obtained from 2D digital, 3D segmented CBCT, and 3d intraoral laser scanner. *J Clin Exp Dent.* 2017 Dec 1;9(12):e1466-e1473.
23. Choi JW, Ahn JJ, Son K, Huh JB. Three-Dimensional Evaluation on Accuracy of Conventional and Milled Gypsum Models and 3D Printed Photopolymer Models. *Materials (Basel).* 2019 Oct 25;12(21):3499.
24. Jang Y, Sim JY, Park JK, Kim WC, Kim HY, Kim JH. Accuracy of 3-unit fixed dental prostheses fabricated on 3D-printed casts. *J Prosthet Dent.* 2020 Jan;123(1):135-142.
25. Jin SJ, Kim DY, Kim JH, Kim WC. Accuracy of Dental Replica Models Using Photopolymer Materials in Additive Manufacturing: In Vitro Three-Dimensional Evaluation. *J Prosthodont.* 2019 Feb;28(2):e557-e562



26. Akyalcin S, Dyer DJ, English JD, Sar C. Comparison of 3-dimensional dental models from different sources: diagnostic accuracy and surface registration analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013 Dec;144(6):831-7
27. Kheirollahi, H., & Abbaszadeh, F. Application of rapid prototyping technology in dentistry. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 2011, 2(1-2), 104-120.
28. Loflin WA, English JD, Borders C, Harris LM, Moon A, Holland JN, Kasper FK. Effect of print layer height on the assessment of 3D-printed models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2019 Aug;156(2):283-289.
29. Alharbi N, Osman RB, Wismeijer D. Factors Influencing the Dimensional Accuracy of 3D-Printed Full-Coverage Dental Restorations Using Stereolithography Technology. *Int J Prosthodont.* 2016 Sep-Oct;29(5):503-10.
30. Park JM, Jeon J, Koak JY, Kim SK, Heo SJ. Dimensional accuracy and surface characteristics of 3D-printed dental casts. *J Prosthet Dent.* 2021 Sep;126(3):427-437.
31. Revilla-León M, Özcan M. Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. *J Prosthodont.* 2019 Feb;28(2):146-158.
32. Liu, Q., Leu, M. C., & Schmitt, S. M. Rapid prototyping in dentistry: technology and application. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2006, 29, 317-335.
33. Oberoi G, Nitsch S, Edelmayr M, Janjić K, Müller AS, Agis H. 3D Printing- Encompassing the Facets of Dentistry. *Front Bioeng Biotechnol.* 2018 Nov 22;6:172.
34. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* 2015 Dec;219(11):521-9. doi: 10.1038/sj.bdj.2015.914. Erratum in: *Br Dent J.* 2016 Jan 22;220(2):86
35. Lin CH, Lin YM, Lai YL, Lee SY. Mechanical properties, accuracy, and cytotoxicity of UV-polymerized 3D printing resins composed of Bis-EMA, UDMA, and TEGDMA. *J Prosthet Dent.* 2020 Feb;123(2):349-354
36. Zaharia, C., Gabor, A. G., Gavrilovici, A., Stan, A. T., Idorasi, L., Sinescu, C., & Negruțiu, M. L. (2017). Digital dentistry—3D printing applications. *Journal of Interdisciplinary Medicine*, 2(1), 50-53.
37. Stansbury JW, Idacavage MJ. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent Mater.* 2016 Jan;32(1):54-64



38. Joo H, Cho S. Comparative Studies on Polyurethane Composites Filled with Polyaniline and Graphene for DLP-Type 3D Printing. *Polymers (Basel)*. 2020 Jan 2;12(1):67. doi: 10.3390/polym12010067.
39. Javaid M, Haleem A. Current status and applications of additive manufacturing in dentistry: A literature-based review. *J Oral Biol Craniofac Res*. 2019 Jul-Sep;9(3):179-185.
40. Jockusch J, Özcan M. Additive manufacturing of dental polymers: An overview on processes, materials and applications. *Dent Mater J*. 2020 Jun 5;39(3):345-354.
41. Kohli, T. M.: (2019). 3D printing in dentistry—An overview. *Acta Sci Dent Sci*, 2019, 3(6), 35-41.
42. Quan H, Zhang T, Xu H, Luo S, Nie J, Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioact Mater*. 2020 Jan 22;5(1):110-115.
43. Wan Hassan WN, Yusoff Y, Mardi NA. Comparison of reconstructed rapid prototyping models produced by 3-dimensional printing and conventional stone models with different degrees of crowding. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2017 Jan;151(1):209-218.
44. Budzik, G., Burek, J., Bazan, A., & Turek, P. Analysis of the accuracy of reconstructed two teeth models manufactured using the 3DP and FDM technologies. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 62(1), 11-20.
45. Ye N, Wu T, Dong T, Yuan L, Fang B, Xia L. Precision of 3D-printed splints with different dental model offsets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2019 May;155(5):733-738
46. Özkol, E., Zhang, W., Ebert, J., & Telle, R. Potentials of the “Direct inkjet printing” method for manufacturing 3Y-TZP based dental restorations. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(10), 2193-2201.
47. Yau, H. T., Yang, T. J., & Lin, Y. K. Comparison of 3-D Printing and 5-axis Milling for the Production of Dental e-models from Intra-oral Scanning. *Computer-aided design and applications*, 2016, 13(1), 32-38.
48. Barazanchi A, Li KC, Al-Amleh B, Lyons K, Waddell JN. Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. *J Prosthodont*. 2017 Feb;26(2):156-163.
49. Rungrojwittayakul O, Kan JY, Shiozaki K, Swamidass RS, Goodacre BJ, Goodacre CJ, Lozada JL. Accuracy of 3D Printed Models Created by Two Technologies of



- Printers with Different Designs of Model Base. *J Prosthodont.* 2020 Feb;29(2):124-128.
50. Tulcan A, Vasilescu MD, Tulcan L. Study of the Influence of Technological Parameters on Generating Flat Part with Cylindrical Features in 3D Printing with Resin Cured by Optical Processing. *Polymers (Basel).* 2020 Aug 27;12(9):1941
 51. Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D printing in dentistry—State of the art. *Operative dentistry.* 2020;45(1):30-40.
 52. Wong KV, Hernandez A. A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices.* 2012;2012.
 53. Ναζαίου Χ., Μπομπάη Α. Πτυχιακή εργασία : Τρισδιάστατη εκτύπωση 2015. PDF file [Online]. Available from :
<file:///C:/Users/%CE%B2%CE%B1%CE%BB%CE%B5%CE%BD%CE%B1/Desktop/KINGSTON/3D%20Printing/%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%A3%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%91%CE%A4%CE%97%20%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%A5%CE%A0%CE%A9%CE%A3%CE%97%20..pdf>
 54. Taneva, E., Kusnoto, B., & Evans, C. A.: 3D scanning, imaging, and printing in orthodontics. *Issues in contemporary orthodontics*, 2015, 148(5), 862-7.
 55. Brown GB, Carrier GF, Kadioglu O, Kierl JP. Accuracy of 3-dimensional printed dental models reconstructed from digital intraoral impressions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2018 Nov;154(5):733-739.
 56. Christensen, L. (2017). Digital workflows in contemporary orthodontics. *APOS Trends in Orthodontics*, 7(1), 12-12.
 57. Rebong RE, Stewart KT, Utreja A, Ghoneima AA. Accuracy of three-dimensional dental resin models create
 58. ed by fused deposition modeling, stereolithography, and Polyjet prototype technologies: A comparative study. *Angle Orthod.* 2018 May;88(3):363-369
 59. Fiorenza L, Yong R, Ranjitkar S, Hughes T, Quayle M, McMenamin PG, Kaidonis J, Townsend GC, Adams JW. Technical note: The use of 3D printing in dental anthropology collections. *Am J Phys Anthropol.* 2018 Oct;167(2):400-406.
 60. Sim JY, Jang Y, Kim WC, Kim HY, Lee DH, Kim JH. Comparing the accuracy (trueness and precision) of models of fixed dental prostheses fabricated by digital and conventional workflows. *J Prosthodont Res.* 2019 Jan;63(1):25-30



61. Sun Y, Ding Q, Tang L, Zhang L, Sun Y, Xie Q. Accuracy of a chairside fused deposition modeling 3D-printed single-tooth surgical template for implant placement: An in vitro comparison with a light cured template. *J Craniomaxillofac Surg.* 2019 Aug;47(8):1216-1221.
62. PartsBadger [Online] Available from: <https://parts-badger.com/dlp-3d-printer-guide/>
63. Tosto C, Pergolizzi E, Blanco I, Patti A, Holt P, Karmel S, Cicala G. Epoxy Based Blends for Additive Manufacturing by Liquid Crystal Display (LCD) Printing: The Effect of Blending and Dual Curing on Daylight Curable Resins. *Polymers (Basel).* 2020 Jul 18;12(7):1594.
64. You SG, You SM, Kang SY, Bae SY, Kim JH. Evaluation of the adaptation of complete denture metal bases fabricated with dental CAD-CAM systems: An in vitro study. *J Prosthet Dent.* 2021 Mar;125(3):479-485.
65. Sherman, S. L., Kadioglu, O., Currier, G. F., Kierl, J. P., & Li, J. Accuracy of digital light processing printing of 3-dimensional dental models. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 157(3), 2020, 422-428.
66. Chen H, Lee SY, Lin YM. Synthesis and Formulation of PCL-Based Urethane Acrylates for DLP 3D Printers. *Polymers (Basel).* 2020 Jul 5;12(7):1500.
67. Kim SY, Shin YS, Jung HD, Hwang CJ, Baik HS, Cha JY. Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2018 Jan;153(1):144-153.
68. Gjelvold B, Mahmood DJH, Wennerberg A. Accuracy of surgical guides from 2 different desktop 3D printers for computed tomography-guided surgery. *J Prosthet Dent.* 2019 Mar;121(3):498-503.
69. Zhang ZC, Li PL, Chu FT, Shen G. Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy. *J Orofac Orthop.* 2019 Jul;80(4):194-204.
70. Park JH, Lee H, Kim JW, Kim JH. Cytocompatibility of 3D printed dental materials for temporary restorations on fibroblasts. *BMC Oral Health.* 2020 Jun 1;20(1):157.
71. Maria R, Tan MY, Wong KM, Lee BCH, Chia VAP, Tan KBC. Accuracy of Implant Analogs in 3D Printed Resin Models. *J Prosthodont.* 2021 Jan;30(1):57-64.
72. Lo Giudice A, Ronsivalle V, Rustico L, Aboulazm K, Isola G, Palazzo G. Evaluation of the accuracy of orthodontic models prototyped with entry-level LCD-based 3D



- printers: a study using surface-based superimposition and deviation analysis. *Clin Oral Investig.* 2022 Jan;26(1):303-312
73. Janson G, de Freitas MR, Araki J, Franco EJ, Barros SE. Class III subdivision malocclusion corrected with asymmetric intermaxillary elastics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010 Aug;138(2):221-30.
 74. Phrozen [Online] Available from: <https://phrozen3d.com/blogs/guides/a-dentist-s-guide-to-choosing-dental-lcd-3d-printers>
 75. Metlerski M, Grocholewicz K, Jaroń A, Lipski M, Trybek G. Comparison of Presurgical Dental Models Manufactured with Two Different Three-Dimensional Printing Techniques. *J Healthc Eng.* 2020 Sep 29;2020:8893338.
 76. Ishida Y, Miura D, Miyasaka T, Shinya A. Dimensional Accuracy of Dental Casting Patterns Fabricated Using Consumer 3D Printers. *Polymers (Basel).* 2020 Sep 29;12(10):2244.
 77. Moraru, E., Dontu, O., Besnea, D., & Constantin, V.: Study and realization of prosthetic dental models by additive technologies. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, November, (Vol. 444, No. 4, p. 042017). IOP Publishing.
 78. Shakouri T, Cha JR, Owji N, Haddow P, Robinson TE, Patel KD, García-Gareta E, Kim HW, Knowles JC. Comparative study of photoinitiators for the synthesis and 3D printing of a light-curable, degradable polymer for custom-fit hard tissue implants. *Biomed Mater.* 2020 Dec 16;16(1):015007.
 79. Shakouri T, Cha JR, Owji N, Haddow P, Robinson TE, Patel KD, García-Gareta E, Kim HW, Knowles JC. Comparative study of photoinitiators for the synthesis and 3D printing of a light-curable, degradable polymer for custom-fit hard tissue implants. *Biomed Mater.* 2020 Dec 16;16(1):015007
 80. Jiang H, Fu J, Li M, Wang S, Zhuang B, Sun H, Ge C, Feng B, Jin Y. 3D-Printed Wearable Personalized Orthodontic Retainers for Sustained Release of Clonidine Hydrochloride.
 81. Nestler N, Wesemann C, Spies BC, Beuer F, Bumann A. Dimensional accuracy of extrusion- and photopolymerization-based 3D printers: In vitro study comparing printed casts. *J Prosthet Dent.* 2021 Jan;125(1):103-110
 82. Mantada, P., Mendricky, R., & Safka, J.: Parameters influencing the precision of various 3D printing technologies. *MM Sci. J*, 5, 2017, 2004-2012.



83. Presotto AGC, Barão VAR, Bhering CLB, Mesquita MF. Dimensional precision of implant-supported frameworks fabricated by 3D printing. *J Prosthet Dent.* 2019 Jul;122(1):38-45.
84. Al Maaz A, Thompson GA, Drago C, An H, Berzins D. Effect of finish line design and metal alloy on the marginal and internal gaps of selective laser melting printed copings. *J Prosthet Dent.* 2019 Aug;122(2):143-151.
85. Hong MH, Min BK, Lee DH, Kwon TY. Marginal fit of metal-ceramic crowns fabricated by using a casting and two selective laser melting processes before and after ceramic firing. *J Prosthet Dent.* 2019 Nov;122(5):475-481.
86. Chen H, Li H, Zhao Y, Zhang X, Wang Y, Lyu P. Adaptation of removable partial denture frameworks fabricated by selective laser melting. *J Prosthet Dent.* 2019 Sep;122(3):316-324.
87. Peng WM, Liu YF, Jiang XF, Dong XT, Jun J, Baur DA, Xu JJ, Pan H, Xu X. Bionic mechanical design and 3D printing of novel porous Ti6Al4V implants for biomedical applications. *J Zhejiang Univ Sci B.* 2019 Aug.;20(8):647-659.
88. Ρούσσοσ Π., Ανάπτυξη Τρισδιάστατου Εκτυπωτή, 2017 [Online] Available from: <file:///C:/Users/CE%B2%CE%B1%CE%BB%CE%B5%CE%BD%CE%B1/Desktop/KINGSTON/3D%20Printing/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CF%80%CF%84%CF%85%CE%BE%CE%B7%20%CE%A4%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%85%20%CE%95%CE%BA%CF%84%CF%85%CF%80%CF%89%CF%84%CE%AE.pdf>
89. Αναστασοπούλου Α., Τρισδιάστατοι εκτυπωτές και εφαρμογές τους στην Βιοϊατρική τεχνολογία, 2014, [Online] Available from: file:///C:/Users/CE%B2%CE%B1%CE%BB%CE%B5%CE%BD%CE%B1/Desktop/KINGSTON/3D%20Printing/anastasopoulou_bioprinters.pdf
90. Γουλιέλμος Ν., Χρόνης Ι., Τρισδιάστατοι εκτυπωτές και εφαρμογές τους στην Βιοϊατρική τεχνολογία, 2017, [Online] Available from: <SYΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ & Η ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ ΣΤΟ Ε BUSINESS.pdf>
91. All3DP.pro, The 7 Main Types of 3D Printing Technology, 2023, [Online] Available from: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>



92. Μπούτσικας Β., Πολυμερή και κράματα πολυμερών για συστήματα εκτύπωσης 3D, 2019, [Online] Available from: [Πολυμερή και Κράματα Πολυμερών για 3D Εκτύπωση .pdf](#)
93. Engineering product design, Sheet Lamination, 2017, [Online] Available from: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
94. Moritz, T., & Maleksaeedi, S. Additive manufacturing of ceramic components. In Additive manufacturing (pp. 105-161)., 2018, Butterworth-Heinemann.
95. Lee KY, Cho JW, Chang NY, Chae JM, Kang KH, Kim SC, Cho JH. Accuracy of three-dimensional printing for manufacturing replica teeth. Korean J Orthod. 2015 Sep;45(5):217-25.
96. Στουραϊτης Γ., Εφαρμογή της τεχνολογίας 3D printing στον κατασκευαστικό τομέα με έμφαση στα τσιμεντοειδή υλικά., 2021, [Online] Available from: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/53237/3d%20printing%20%CE%B4%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE.pdf?sequence=1>
97. Engineering product design, Material Jetting, 2017 [Online] Available from: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>
98. Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I. A., Espinosa, M. D. M., & Domínguez, M. Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects. Complexity, 2019.
99. Sanda M, Miyoshi K, Baba K. Trueness and precision of digital implant impressions by intraoral scanners: a literature review. Int J Implant Dent. 2021 Jul 27;7(1):97.
100. Favero CS, English JD, Cozad BE, Wirthlin JO, Short MM, Kasper FK. Effect of print layer height and printer type on the accuracy of 3-dimensional printed orthodontic models. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2017 Oct;152(4):557-565.
101. Al-Imam H, Gram M, Benetti AR, Gotfredsen K. Accuracy of stereolithography additive casts used in a digital workflow. J Prosthet Dent. 2018 Apr;119(4):580-585.
102. Gjelvold B, Mahmood DJH, Wennerberg A. Accuracy of surgical guides from 2 different desktop 3D printers for computed tomography-guided surgery. J Prosthet Dent. 2019 Mar;121(3):498-503.
103. Chen L, Lin WS, Polido WD, Eckert GJ, Morton D. Accuracy, reproducibility, and dimensional stability of additively manufactured surgical templates. J Prosthet Dent. 2019 Sep;122(3):309-314.



104. Park ME, Shin SY. Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers. *J Prosthet Dent*. 2018 May;119(5):861.e1-861.e7.
105. González G, Baruffaldi D, Martinengo C, Angelini A, Chiappone A, Roppolo I, Pirri CF, Frascella F. Materials Testing for the Development of Biocompatible Devices through Vat-Polymerization 3D Printing. *Nanomaterials (Basel)*. 2020 Sep 9;10(9):1788.
106. Murugesan K, Anandapandian PA, Sharma SK, Vasantha Kumar M. Comparative evaluation of dimension and surface detail accuracy of models produced by three different rapid prototype techniques. *J Indian Prosthodont Soc*. 2012 Mar;12(1):16-20.
107. Kim T, Lee S, Kim GB, Hong D, Kwon J, Park JW, Kim N. Accuracy of a simplified 3D-printed implant surgical guide. *J Prosthet Dent*. 2020 Aug;124(2):195-201.e2.
108. Simplify 3D, Stringing or Oozing, [Online] Available from:
<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/stringing-or-oozing/>
109. ALL3DP, The Best 3D Print Speed Settings for PLA & More, 2022, [Online] Available from:
<https://all3dp.com/2/3d-printing-speed-optimal-settings/>
110. 3D Printing Business Directory, The environmental impact of 3D printing., 2021, [Online] Available from:
<https://www.3dprintingbusiness.directory/environmental-impact-3d-printing/>
111. Khosravani MR, Reinicke T. On the environmental impacts of 3D printing technology. *Applied Materials Today*. 2020 Sep 1;20:100689.
112. 3D printing Industry. Is 3D printing really as ecofriendly as we think it is?. 2018. [Online] Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/is-3d-printing-really-as-ecofriendly-as-we-think-it-is-136335/>
113. Reader's digest. Is 3D Printing Good for the Environment?. 2022. [Online] Available from:
<https://www.rd.com/article/how-does-3d-printing-products-reduce-waste/>
114. Recompute. Environmental Impact Of 3D Printing. 2022. [Online] Available from:
<https://www.recompute.com.au/blog/environmental-impact-of-3d-printing/>
115. Stefaniak AB, Bowers LN, Knepp AK, Luxton TP, Peloquin DM, Baumann EJ, Ham JE, Wells JR, Johnson AR, LeBouf RF, Su FC, Martin SB, Virji MA. Particle and vapor



emissions from vat polymerization desktop-scale 3-dimensional printers, J Occup Environ Hyg. 2019 Aug;16(8):519-531.

116. Markforged. 3D Printing and the Environmental Impact of Manufacturing [Online] Available from: <https://markforged.com/resources/blog/3d-printing-and-the-environmental-impact-of-manufacturing>
117. Shiyo S, Nagels J, Shangali HG. Recycling of plaster of Paris, Afr J Disabil. 2020 May 27;9:503.





