



ΠΑΝΕΜΙΣΤΗΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διερεύνηση των μεθόδων παραγωγής και της ποιότητας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΓΑΒΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ
ΜΑΡΤΙΟΣ, 2021

Εξεταστική Επιτροπή

Αντώνιος Τσολάκης
(Επιβλέπων Καθηγητής)

Ανδρέας Θεοδωρακάκος

Κωνσταντίνος Ράπτης

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος..... ΓΑΒΙΩΤΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ.....
του.....ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ....., με αριθμό μητρώου
.....45138..... φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής
της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα
ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της 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».

Ο Δηλών



Περίληψη

Η τεχνολογία των πολυμερικών οδοντωτών τροχών έχει γνωρίσει τα τελευταία χρόνια μια αλματώδη ανάπτυξη. Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν αρχίσει να αντικαθιστούν τους αντίστοιχούς μεταλλικούς σε όλο και πιο απαιτητικές εφαρμογές δυναμικών συστημάτων. Για το λόγο αυτό απαιτείται πλέον να κατασκευάζονται με μεγάλη διαστασιολογική και γεωμετρική ακρίβεια. Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί από τις διάφορες μεθόδους παραγωγής που χρησιμοποιούνται στον τομέα των πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μέθοδο παραγωγής injection-molding, που είναι η κατεξοχήν μέθοδος παραγωγής πολυμερικών τροχών, αλλά και στην τρισδιάστατη εκτύπωση, που αναμένεται να κυριαρχήσει τα επόμενα χρόνια σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας. Αν και με τη μέθοδο του Injection-molding μπορούν να επιτευχθούν ακρίβειες που πλησιάζουν εκείνες των κλασικών μεθόδων παραγωγής μεταλλικών οδοντωτών τροχών, η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκεται ακόμα πίσω στον τομέα αυτό. Ωστόσο, η σωστή επιλογή των παραμέτρων και η βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια του τελικού προϊόντος και να επιτρέψει τη χρήση του σε μια σειρά απαιτητικών εφαρμογών.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
1. Εισαγωγή	9
2. Πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί.....	10
3. Η τρισδιάστατη εκτύπωση στην παραγωγή οδοντωτών τροχών	14
3.1. Μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγή οδοντωτών τροχών	15
3.1.1. Η μέθοδος JS.....	17
3.1.2. Η μέθοδος SLS.....	17
3.1.3. Η μέθοδος SLA.....	18
3.1.4. Η μέθοδος FDM.....	19
3.1.5. Η μέθοδος 3DP	20
3.2. Προετοιμασία των γεωμετρικών δεδομένων για τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	21
3.2.1. Τύποι αρχείων κατάλληλα για της διαδικασίες CAD και τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	22
3.2.2. Ακρίβεια χαρτογράφησης του μοντέλου σε μορφή STL.....	24
3.2.3. Χαρτογράφηση σφαλμάτων σε αρχεία μορφής STL.....	25
3.2.4. Προετοιμασία αρχείων STL για την τρισδιάστατη εκτύπωση	28
3.3. Ποιότητα οδοντωτών τροχών κατασκευασμένων μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	36
3.3.1. Προσδιορισμός ανοχών μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	36
3.3.2. Διερεύνηση διαστασιολογικών ανοχών μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγή οδοντωτών τροχών	46
4. Χύτευση θερμοπλαστικού υλικού υπό πίεση (Injection Molding).....	53
5. Συμπεράσματα	61
6. Βιβλιογραφία	62

1. Εισαγωγή

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών και των μεθόδων κατασκευής, οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν αρχίσει να αποτελούν μια αξιόπιστη εναλλακτική σε πολλές εφαρμογές των παραδοσιακών μεταλλικών τροχών. Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί συνδυάζουν μια σειρά χαρακτηριστικών που καθιστά τη χρήση τους εξαιρετικά πλεονεκτική σε μια σειρά εφαρμογών. Έχουν μικρότερη πυκνότητα από τους μεταλλικούς τροχούς και επομένως μικρότερη αδράνεια, έχουν μεγαλύτερη ενδοτικότητα και απορροφητικότητα στους κραδασμούς με αποτέλεσμα να προκαλούν μικρότερα επίπεδα κραδασμών και ταλαντώσεων, συχνά είναι εντελώς αυτόλιπαινόμενα, επομένως δεν χρειάζονται καθόλου λίπανση, η διαχείριση της οποίας είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στα μεταλλικά γρανάζια και παράγουν μικρότερο θόρυβο. Οι βασικοί λόγοι που δεν έχουν επιτρέψει ακόμα την ευρεία χρήση τους στην βιομηχανία είναι η φέρουσα ικανότητά τους και η ακρίβεια της γεωμετρίας τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την εξέλιξη που παρουσιάζεται στον τομέα της διαστασιογικής ακρίβειας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Βασικός παράγοντας που καθορίζει αυτή την ακρίβεια είναι η εκάστοτε μέθοδος παραγωγής. Από τους διάφορους μεθόδους παραγωγής πολυμερικών οδοντωτών τροχών ξεχωρίζουν η μέθοδος injection molding και η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Από τη μία η μέθοδος injection molding αποτελεί την πιο καθιερωμένη μέθοδο παραγωγής πολυμερικών τροχών με αρκετά χρόνια ανάπτυξης της τεχνογνωσίας και καθιέρωσης κανονισμών. Από την άλλη, οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης φαίνεται ότι αποτελούν το μέλλον της παραγωγής των οδοντών τροχών καθώς επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων κατ' απαίτηση (on demand), με εξατομικευμένες προδιαγραφές, λιγότερους περιορισμούς σχεδίασης ενώ αποσυνδέει το κόστος κατασκευής από την πολυπλοκότητα των εξαρτημάτων και μειώνει το χρόνο μεταξύ ιδέας και εμπορευματοποίησης.

Στο σώμα της εργασίας παρουσιάζονται οι βασικές αρχές παραγωγής της κάθε μεθόδου και παρατίθενται αναλυτικά στοιχεία για τις ακρίβειες που επιτυγχάνονται για την κάθε μία. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των πολυμερικών οδοντωτών τροχών καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους ως εξαρτήματα σε συστήματα μετάδοσης ισχύος. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά η τρισδιάστατη εκτύπωση ως μέθοδος παραγωγής οδοντωτών τροχών. Περιγράφονται οι διαφορετικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση και παρουσιάζονται παραδείγματα από την εκτύπωση οδοντωτών τροχών. Παρουσιάζονται στοιχεία για την προετοιμασία των ηλεκτρονικών αρχείων που δίνονται ως είσοδος στην διαδικασία (CAD μοντέλα) έτσι ώστε να μπορούν να επιτευχθούν καλύτερες ακρίβειες κατά την κατασκευή τους. Τελικά παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία από πειραματικές μελέτες για την διαστασιολογική ακρίβεια τόσο της τρισδιάστατης εκτύπωσης γενικά, όσο και της τρισδιάστατης εκτύπωσης συγκεκριμένα οδοντωτών τροχών. Στο Κεφάλαιο 4 δίνονται αντίστοιχα στοιχεία για τη μέθοδο injection molding η οποία μπορεί να επιτύχει καλύτερες ακρίβειες αυτή τη στιγμή από την τρισδιάστατη εκτύπωση.

2. Πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί

Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν αρχίσει να αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική για τα παραδοσιακά μεταλλικά γρανάζια σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Η χρήση πλαστικών γραναζιών έχει επεκταθεί από χαμηλής ισχύος και ακρίβειας εφαρμογές σε πιο απαιτητικές εφαρμογές μετάδοσης ισχύος. Καθώς οι σχεδιαστές προωθούν τα όρια των αποδεκτών εφαρμογών πλαστικών γραναζιών, μαθαίνουμε περισσότερα για τη συμπεριφορά των πλαστικών ως υλικό ενός οδοντωτού τροχού και πώς εκείνοι μπορούν να επωφεληθούν από τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους. Τα πλαστικά γρανάζια παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα μεταλλικά γρανάζια. Έχουν μικρότερο βάρος, χαμηλότερη αδράνεια και συνεργάζονται πολύ πιο αθόρυβα από τα αντίστοιχα μεταλλικά τους. Τα πλαστικά γρανάζια συχνά δεν απαιτούν λίπανση ή μπορούν να συνδυαστούν με εσωτερικά λιπαντικά όπως PTFE ή σιλικόνη. Τα πλαστικά γρανάζια έχουν συνήθως χαμηλότερο κόστος μονάδας από τα μεταλλικά γρανάζια και μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να ενσωματώνουν και άλλα χαρακτηριστικά που απαιτούνται στη συναρμολόγηση (ενοποίηση εξαρτημάτων). Αυτά τα γρανάζια είναι επίσης ανθεκτικά σε πολλά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Η πρώτη χρήση θερμοπλαστικών γραναζιών έγινε αναμφίβολα με χρήση γραναζιών φτιαγμένα από νάιλον και ακετάλη που μετέφεραν χαμηλά φορτία σε χαμηλές ταχύτητες. Καθώς τα πλεονεκτήματα της χρήσης θερμοπλαστικών γραναζιών έγιναν σαφέστερα και νέα υλικά υψηλότερης απόδοσης έγιναν διαθέσιμα, οι σχεδιαστές άρχισαν να χρησιμοποιούν πλαστικά γρανάζια σε πιο απαιτητικές εφαρμογές. Η χρήση ενισχύσεων και εσωτερικών λιπαντικών σε αυτά τα υλικά έχει διευρύνει ακόμη περισσότερο τη χρήση τους [10].

Οι κύριες πρώτες ύλες των πλαστικών γραναζιών περιλαμβάνουν PBT, νάιλον ρητίνη, POM, PET. Τα τελευταία χρόνια, τα πλαστικά υψηλής απόδοσης αναπτύχθηκαν ραγδαία (PEEK, PPS, FP, LCP κ.λπ.). Πλαστικά όλο και περισσότερο υψηλής απόδοσης χρησιμοποιούνται στα πλαστικά γρανάζια. Ωστόσο, η τιμή του πλαστικού υψηλής απόδοσης είναι σχεδόν δέκα φορές μεγαλύτερη από το συνηθισμένο πλαστικό ή περισσότερο. Ως αποτέλεσμα, τα πλαστικά γρανάζια υψηλής απόδοσης καταλαμβάνουν μικρότερο μερίδιο της αγοράς. Ωστόσο, τα πλαστικά γρανάζια υψηλής απόδοσης θα προσφέρουν μια νέα κατεύθυνση για την ανάπτυξη της αγοράς. Οι Dupont, SABIC, Asahi Kasei, Polyplastics, Teijin, Mitsubishi, BASF, Ticona και LG είναι οι κορυφαίοι παραγωγοί πρώτων υλών. Η Dupont έχει την μεγαλύτερη ικανότητα εφοδιασμού στον κόσμο. Η παγκόσμια αγορά πλαστικών γραναζιών αναμένεται να αυξηθεί με CAGR περίπου 1,3% τα επόμενα πέντε χρόνια, θα φθάσει τα 3310 εκατομμύρια δολάρια το 2024, από 3060 εκατομμύρια δολάρια το 2019, σύμφωνα με νέα μελέτη [10].

Τα πλαστικά γρανάζια μπορούν να παραχθούν με τις κλασσικές τεχνολογίες hobbing ή shaping, παρόμοια με μεταλλικά γρανάζια ή εναλλακτικά με χύτευση ή τριδιάστατη εκτύπωση.

Συγκεντρωτικά, τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης των πλαστικών οδοντωτών τροχών είναι [11]:

1. Η μεγάλη αποδοτικότητα της μεθόδου injection-molding.
2. Εξάλειψη των εργασιών κατεργασίας · ικανότητα κατασκευής με ένθετα και ολοκληρωμένα σχέδια (integral designs).
3. Χαμηλή πυκνότητα: ελαφριές κατασκευές, χαμηλή αδράνεια.
4. Ομοιομορφία μερών.
5. Ικανότητα απορρόφησης κραδασμών και ταλαντώσεων.
6. Δυνατότητα λειτουργίας με ελάχιστη ή καθόλου λίπανση.
7. Σχετικά χαμηλός συντελεστής τριβής.
8. Αντοχή στη διάβρωση.
9. Πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου.
10. Οι ανοχές συχνά είναι λιγότερο κρίσιμες από ό, τι για τα μεταλλικά γρανάζια, εν μέρει λόγω της μεγαλύτερης ενδοτικότητάς τους.
11. Συνάδουν με την γενική τάση για μεγαλύτερη χρήση πλαστικών περιβλημάτων και άλλων εξαρτημάτων.
12. Παραγωγή ενός σταδίου χωρίς σχεδόν καμία προκαταρκτική ή δευτερεύουσα κατεργασία.

Ταυτόχρονα, τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των πλαστικών γραναζιών είναι τα ακόλουθα:

1. Μικρότερη ικανότητα μεταφοράς φορτίου.
2. Χαμηλότερη ακρίβεια.
3. Μεγαλύτερη διαστασιολογική αστάθεια, λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή θερμικής διαστολής και την απορρόφηση υγρασίας.
4. Μειωμένη ικανότητα λειτουργίας σε εξαιρετικά υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες.
5. Αρχικό υψηλό κόστος καλουπιού για την ανάπτυξη σωστής μορφής και διαστάσεων δοντιού.
6. Μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από ορισμένα χημικά και ακόμη και από ορισμένα λιπαντικά.
7. Τα ακατάλληλα εργαλεία χύτευσης και η ίδια η διαδικασία της χύτευσης μπορούν να προκαλέσουν υπολειπόμενες εσωτερικές καταπονήσεις στις ρίζες των δοντιών, με αποτέλεσμα υπερβολική πίεση και / ή παραμόρφωση με τη γήρανση.
8. Το κόστος πλαστικών ακολουθεί τις τιμές των πετρελαιοειδών, και επομένως είναι πιο ασταθές και υπόκειται σε αυξήσεις σε σύγκριση με τα μέταλλα.

Τα πιο συνηθισμένα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή οδοντωτών τροχών περιλαμβάνουν ακετάλη και νάιλον. Ωστόσο, σε αυτήν την ομάδα υπάρχουν πολλές παραλλαγές. Διάφορες ακετάλες παράγονται με εμπορικά ονόματα όπως Delrin, Duracon και Celcon. Καθένα από αυτά τα εμπορικά σήματα περιλαμβάνει διάφορες συνθέσεις που διαφοροποιούν τις μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος. Μπορούν να προσθέσουν λίπανση ή να βελτιώσουν την αντοχή σε εφελκυσμό ή να κάνουν το υλικό κατάλληλο για επαφή με τρόφιμα. Παρομοίως, υπάρχουν διάφορα εμπορικά ονόματα για νάιλον συμπεριλαμβανομένων των MC901, MC602ST, Nylaton GSM και πολλών άλλων. Τα νάιλον που χρησιμοποιούνται για οδοντωτούς τροχούς είναι τυπικά τύπου 6, αν και είναι γνωστό ότι χρησιμοποιείται και ο τύπος 12. Ο προσδιορισμός του τύπου νάιλον καθορίζεται από τον αριθμό των ατόμων

μεθυλαιθυλενίου (CH₂) σε κάθε πλευρά του ατόμου αζώτου στην αλυσίδα πολυαμιδίου. Έτσι, το Νάιλον 12 έχει 12 άτομα μεθυλαιθυλενίου σε κάθε πλευρά, το οποίο επίσης δείχνει υψηλότερο βαθμό κρυστάλλωσης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί η κρυστάλλωση, καθώς αναστέλλει την απορρόφηση νερού, έτσι το Nylon 12 θα χειρίζεται την υγρασία καλύτερα από το Nylon 6 [12].



Σχήμα 1. Πλαστικά γρανάζι από ακετάλη



Σχήμα 2. Πλαστικά γρανάζι από νάιλον

Στις περισσότερες εφαρμογές, η ακετάλη χρησιμοποιείται στη χύτευση γραναζιών και το νάιλον χρησιμοποιείται στη μηχανουργική κατεργασία γραναζιών. Η ακετάλη είναι διαστασιολογικά σταθερή, είναι ανθεκτική στις περισσότερες χημικές ουσίες και δεν απορροφά υγρασία. Ωστόσο, απαιτεί συνεχή λίπανση όταν υπόκειται σε υψηλά φορτία. Το νάιλον είναι λιγότερο σταθερό στις διαστάσεις του καθώς μεταβάλλει το σχήμα του με την αλλαγή τόσο της θερμοκρασίας όσο και της υγρασίας. Το πλεονέκτημα του νάιλον για χρήση στους οδοντωτούς τροχούς είναι ότι είναι συνήθως αυτολιπαινόμενο. Κατά τη χρήση της ακετάλης ως υλικού για ένα γρανάτζι, υπάρχει πάντα η ανησυχία ότι η πρώτη ύλη μπορεί να περιέχει κενά. Αυτό δεν είναι πρόβλημα στη χρήση χυτού νάιλον.

Πολλοί σχεδιαστές είναι απρόθυμοι να χρησιμοποιήσουν πλαστικά για το σχεδιασμό οδοντωτών τροχών λόγω της χαμηλότερης αντοχής του υλικού σε σύγκριση με τα μέταλλα. Ένας από τους τρόπους για τη βελτίωση της αντοχής των γραναζιών από νάιλον είναι να χυτευθεί το υλικό σε μορφή ράβδου και να προστεθεί κάποιο είδος ίνας στο μείγμα, αυξάνοντας έτσι τη δύναμη συμπίεσης. Ένα τέτοιο υλικό είναι το MC602ST. Πρόκειται για νάιλον τύπου έξι με γέμισμα υαλοβάμβακα 30%. Ένα γρανάτζι κατασκευασμένο με γέμισμα υαλοβάμβακα 30% που περιλαμβάνει πυρήνα από ανθρακούχο χάλυβα μπορεί να προσαρμοσθεί σε οποιαδήποτε διαμόρφωση στήριξης άξονα, ενώ το εξωτερικό χείλος έχει όλα τα πλεονεκτήματα του να είναι πλαστικό γρανάτζι.



Σχήμα 3. Πλαστικά γρανάτζι με πυρήνα από χάλυβα

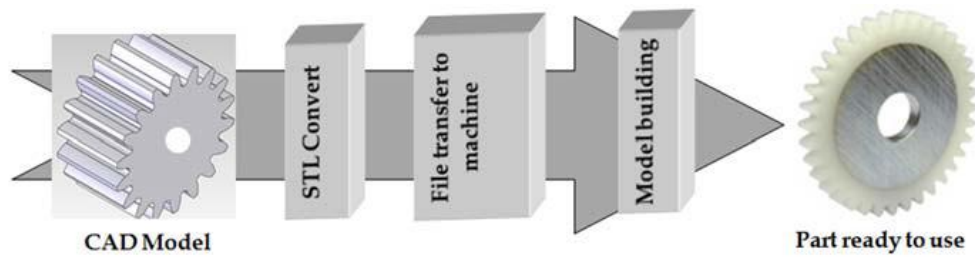
3. Η τρισδιάστατη εκτύπωση στην παραγωγή οδοντωτών τροχών

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (ή προσθετική κατασκευή – additive manufacturing) έχει προσδώσει στη βιομηχανία παραγωγής οδοντωτών τροχών ταχύτητα, ποιότητα και ευελιξία. Η παραγωγή γραναζιών υψηλής σχετικά ποιότητας με χαμηλό κόστος έχει γίνει πλέον αρκετά πιο εύκολη μετά την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας. Επιστημονικά όργανα, harmonic-drives, εκτυπωτές, ρομποτικές μονάδες, οικιακές συσκευές, μηχανήματα γραφείου, ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι μερικά από τα πεδία εφαρμογής των εργαλείων της τρισδιάστατης εκτύπωσης [1]. Από τη σύλληψή της το 1980 έως και σήμερα, υπήρξε τεράστια έρευνα και ανάπτυξη για την εκμετάλλευση αυτής της τεχνολογίας για την κατασκευή από μακρο- μέχρι μικρο-εξαρτημάτων συμπεριλαμβανομένων των οδοντωτών τροχών.

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης ακολουθεί μια πορεία «από τα κάτω προς τα πάνω» (*bottom-up approach*) για την κατασκευή σύνθετων γεωμετριών οδοντωτών τροχών όλων των τύπων ξεκινώντας από τα σχέδια CAD και φτάνοντας μέχρι την εναπόθεση των στρωμάτων κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης. Το Σχήμα 4 απεικονίζει διάφορα βήματα που ακολουθούνται από διαδικασίες βασισμένες στη τρισδιάστατη εκτύπωση για την κατασκευή γραναζιών [3]. Ξεκινά με την προετοιμασία μοντέλων CAD του γραναζιού που θα παραχθεί ακολουθούμενη από τη μετατροπή του μοντέλου CAD σε αρχείο STL το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται στο μηχάνημα για την κατασκευή των φυσικών μοντέλων των οδοντωτών τροχών [2].

Τα οφέλη της παραγωγής πρόσθετων σε σχέση με τη συμβατική κατασκευή είναι πολλαπλά, όπως:

- Δυνατότητα παραγωγής τόσο μεταλλικών όσο και μη μεταλλικών οδοντωτών τροχών
- Ευελιξία
- Μικρότερη ανάγκη χρήσης εργαλείων και δεσίματος τεμαχίων
- Μικρότερη κατανάλωση πόρων και ενέργειας
- Παραγωγή on-demand
- Λιγότερο απορριπτόμενο υλικό
- Χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω μικρής αλυσίδας διεργασιών και χαμηλών εκπομπών

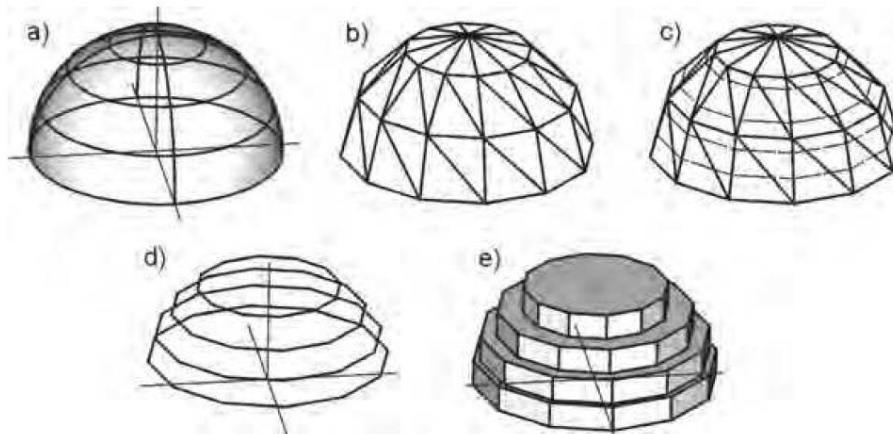


Σχήμα 4. Βήματα κατά τη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης οδοντωτών τροχών [3]

3.1. Μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγή οδοντωτών τροχών

Τα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης (ή ταχείας πρωτοτυποποίησης – rapid prototyping) καθιστούν δυνατή την κατασκευή πρωτοτύπων σύνθετων σχημάτων, συμπεριλαμβανομένων πρωτοτύπων οδοντωτών τροχών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε δοκιμές οδοντωτών τροχών. Η χρήση συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διαδικασία κατασκευής οδοντωτών τροχών μη τυποποιημένου (όχι εξειλιγμένη) προφίλ κατατομής οδόντα. Για αυτά το είδος τροχών, δεν είναι δυνατή η χρήση παραδοσιακών εργαλείων για κοπή οδόντων και ως εκ τούτου τα πρωτότυπα τέτοιων οδοντωτών τροχών κατασκευάζονται απευθείας με μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης με βάση το μοντέλο 3D-CAD [1].

Το αντικείμενο του κεφαλαίου του επικεντρώνεται σε τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούν διαδικασίες διαμόρφωσης του φυσικού μοντέλου μέσω της πρόσθεσης υλικού μέχρι τη στιγμή απόκτησης του απαιτούμενου σχήματος του τελικού αντικειμένου. Η κατασκευή του μοντέλου περιλαμβάνει τη μετατροπή της απεικόνισης του αντικειμένου στον υπολογιστή σε φυσική μορφή, με την ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση και το συντομότερο δυνατό χρόνο (Σχήμα 5). Το πρώτο κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι να οριστεί το αντικείμενο ως μοντέλο CAD-3D που δημιουργείται από υπολογιστή. Η επιτευχθείσα απεικόνιση στη συνέχεια μετατρέπεται σε μια συγκεκριμένη μορφή συνόλου δεδομένων μέσω διαφόρων μορφών δεδομένων, κατάλληλο για συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης [4].



Σχήμα 5. Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης: a) Μοντέλο 3D-CAD, b) Μοντέλο 3D-STL, c) Μοντέλο STL χωρισμένο σε επίπεδα (layers), d) Μοντέλο στρώσεων υλικού, e) Τελικό φυσικό πρωτότυπο [1]

Σχεδόν όλες οι διαθέσιμες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης βασίζονται στον ίδιο κανόνα διαίρεσης του μοντέλου σε οριζόντια επίπεδα, από τα οποία το φυσικό πρωτότυπο του αντικειμένου κατασκευάζεται με τη σωστή διαδοχή των στρωμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, η σταδιακή διαμόρφωση αντικειμένων καθίσταται πολύ αποτελεσματική στην περίπτωση παραγωγής κομματιών ή μικρών παρτίδων.

Λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας των συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης, το ποσοστό των ξεχωριστών μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αγορά αλλάζει γρήγορα. Οι διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με ένα ευρύ φάσμα κριτηρίων ταξινόμησης, όπως:

- το είδος των δεδομένων που παίρνει ως είσοδο,
- τη φυσική ή χημική αρχή λειτουργίας της μεθόδου τρισδιάστατης εκτύπωσης,
- την αρχική κατάσταση των πρώτων υλών,
- τις προτιμώμενες εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Οι διαδικασίες και οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης ταξινομούνται συχνότερα σύμφωνα με την αρχική κατάσταση του προς επεξεργασία υλικού. Δεν υπάρχει ταξινόμηση που να περιλαμβάνει όλες τις γνωστές μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς οι εφαρμοσμένες τεχνικές και τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές εξελίσσονται συνεχώς.

Αναλύοντας μεμονωμένες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης προσθετικής κατασκευής, είναι δυνατόν να καθοριστούν τα κριτήρια για την επιλογή της κάθε μεθόδου, ταξινομημένα ως εξής:

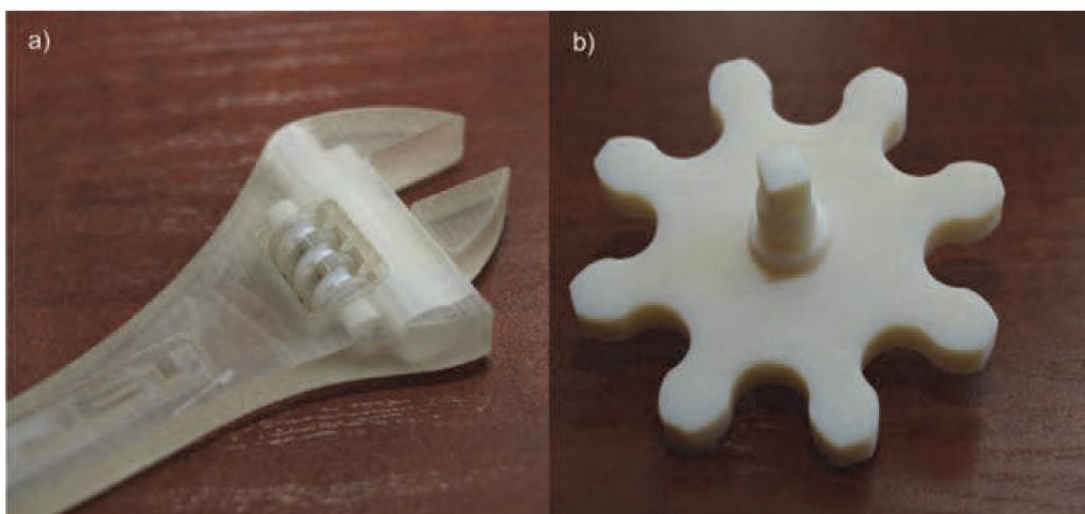
- η ακρίβεια της κατασκευής του πρωτοτύπου,
- οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πρωτοτύπου,
- ο χρόνος της κατασκευής του πρωτοτύπου,
- το κόστος κατασκευής του πρωτοτύπου.

Η απομόνωση των επιμέρους κριτηρίων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, καθώς για ορισμένες μεθόδους, τα διάφορα κριτήρια μπορεί να είναι αντικρουόμενα. Επίσης, εντός των κατηγοριών πρώτων υλών και τις συγκεκριμένες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης με βάση μια συγκεκριμένη φυσική ή χημική αρχή, είναι δυνατόν να καθοριστεί μια ποικιλία διαδικασιών ταχείας πρωτοτυποποίησης [4].

3.1.1. Η μέθοδος JS

Η μέθοδος εκτόξευσης στρώματος υγρού φωτοπολυμερούς υλικού (JS - Jetting Systems) συνίσταται στην έγχυση υπό πίεση ενός στρώματος πολυμερούς από την κεφαλή εκτύπωσης και την επακόλουθη σκλήρυνση του στρώματος πολυμερούς μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια λάμπα ενσωματωμένη στην κεφαλή εκτύπωσης. Σε αυτό το σύστημα υπάρχουν δύο υλικά που εφαρμόζονται στην πλατφόρμα εργασίας κατά τη διάρκεια της κατασκευής του μοντέλου: το υλικό του μοντέλου και το υλικό που υποστηρίζει το μοντέλο.

Τα μοντέλα είναι κατασκευασμένα σε μια πλατφόρμα εργασίας που κινείται κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα (z) του χώρου εργασίας. Στρώματα πολυμερούς εφαρμόζονται ένα προς ένα από την κεφαλή εκτύπωσης στο παράλληλο επίπεδο της πλατφόρμας εργασίας (x, y). Οι μέθοδοι Jetting System της ProJet (3D Systems) και της PolyJet (OBJET) επιτρέπουν την εφαρμογή υλικών ρητίνης για την κατασκευή πρωτοτύπων με διάφορες μηχανικές ιδιότητες. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται μοντέλα γραναζιών που παρήχθησαν με μεθόδους ProJet (Σχ. 6α - ένα ρυθμιζόμενο worm gear) και μέθοδοι PolyJet (Σχ. 6β - ένα γρανάτζι κυκλοειδές προφίλ).



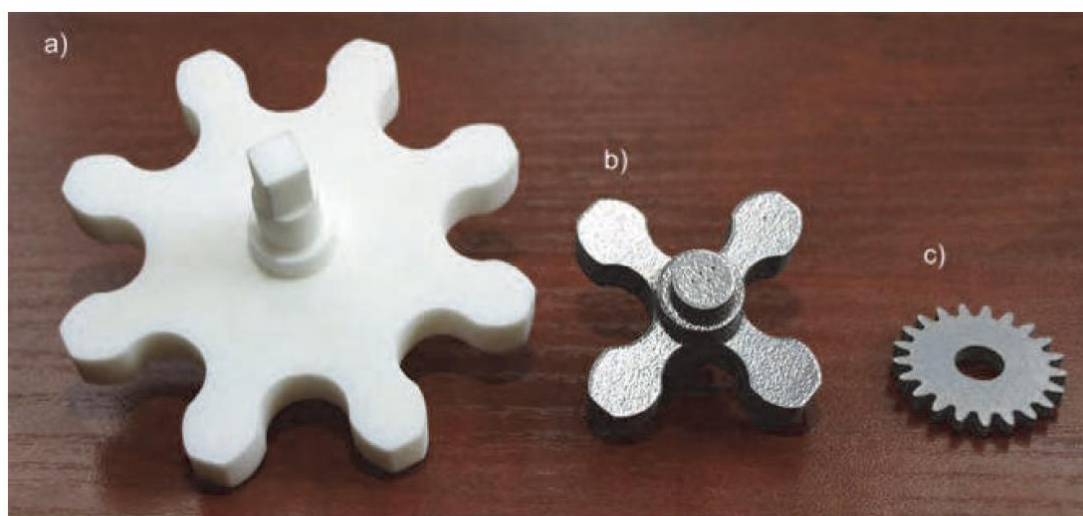
Σχήμα 6. Οδοντωτοί τροχοί που παρήχθησαν από την μέθοδο JS: a) Γρανάζι που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια της τεχνικής ProJet, b,) Οδοντωτός τροχός που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια της τεχνικής PolyJet. [1]

3.1.2. Η μέθοδος SLS

Η μέθοδος Selective Laser Sintering (SLS) συνίσταται στη σκλήρυνση της επιφάνειας υλικού σε σκόνη μέσω δέσμης λέιζερ. Το φυσικό μοντέλο κατασκευάζεται με βάση το 3D-CAD μοντέλο αποθηκευμένο σε μια κατάλληλη μορφή π.χ. STL.

Η μέθοδος SLS περιλαμβάνει τη χρήση ενός κονιάματος, το οποίο απλώνεται σε στρώσεις μέσω ενός άξονα στην πλατφόρμα εργασίας. Η δέσμη λέιζερ προκαλεί τη σύντηξη του στρώματος σύμφωνα με τα καθορισμένα όρια και την επίτευξη συμπαγούς διατομής. Μετά τη σκλήρυνση, το στοιχείο εργασίας μειώνεται καθ' ύψος από την τιμή του πάχους του στρώματος και ένα νέο στρώμα σκόνης εξαπλώνεται. Κατά τη σύντηξη του επόμενου στρώματος, το προηγούμενο λιώνει μερικώς, βοηθώντας να σχηματιστεί ένα ομοιόμορφο στερεό μοντέλο. Μόλις το πλήρες μοντέλο έχει ολοκληρωθεί, αφαιρείται η σκόνη που δεν έχει συντηχθεί.

Καθώς κατασκευάζεται, το μοντέλο υποστηρίζεται από τη σκόνη, η οποία γεμίζει τον χώρο εργασίας, επομένως δεν είναι απαραίτητες ξεχωριστές δομές στήριξης. Το λαμβανόμενο μοντέλο έχει πορώδη δομή. Ανάλογα με τη λειτουργία του μοντέλου, μπορεί να εμποτιστεί με άλλα υλικά, τα οποία οδηγούν στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται μοντέλα γραναζιών κατασκευασμένα με τη μέθοδο SLS: ένα γρανάτζι από πολυαμίδιο – συσκευή EOS Formiga P100 (Σχ. 4α) και γρανάτζια από σκόνη TiAl6V4 - συσκευή EOSINT (Σχ. 4β, γ). Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές σκόνες στην τεχνική SLS (π.χ. σκόνες πλαστικών και μείγματα μεταλλικών και κεραμικών σκονών), αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την κατασκευή μεταλλικών και κεραμικών εργαλείων.



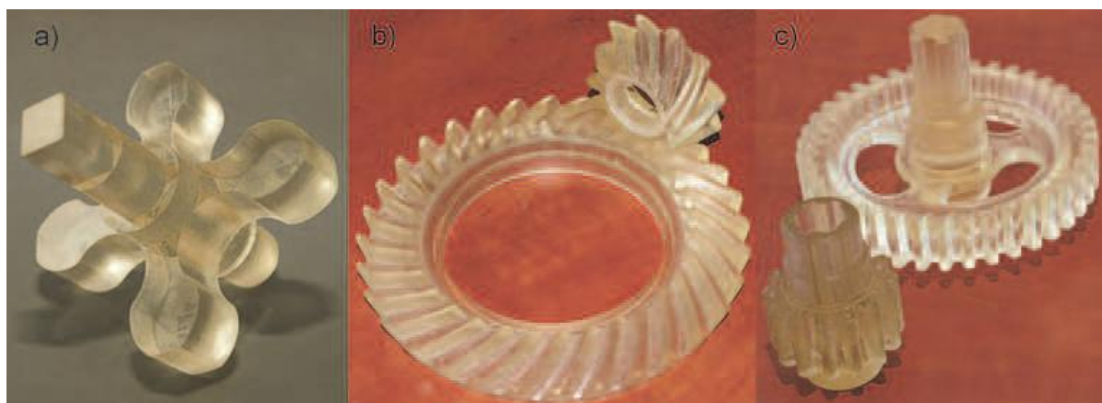
Σχήμα 7. Οδοντωτοί τροχοί που παρήχθησαν από την μέθοδο SLS: a) Γρανάτζι που κατασκευάστηκε από πολυαμίδιο PA2200, b,c) Οδοντωτός τροχός που κατασκευάστηκε από τιτάνιο TiAl6V4. [1]

3.1.3. Η μέθοδος SLA

Η στερεολιθογραφία (SLA) είναι μια από τις παλαιότερες μεθόδους ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων. Η έναρξη της κατασκευής του μοντέλου και η τοποθέτησή του στην πλατφόρμα απαιτούν την κατασκευή υποστηρικτικών κατασκευών. Τα υποστηρίγματα μπορούν δημιουργούνται αυτόματα ή χειροκίνητα και είναι δυνατόν να διορθωθεί το σχήμα τους. Μόλις μια διατομή σκληρυνθεί σύμφωνα με το CAD

μοντέλο, η πλατφόρμα εργασίας κατεβαίνει, μαζί με το κατασκευασμένο τμήμα του μοντέλου, το οποίο τοποθετείται μέσα σε ένα δοχείο γεμάτο με υγρή ρητίνη, με πάχος το ύψος κάθε στρώματος. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται μοντέλα γραναζιών που έχουν παραχθεί με τη μέθοδο SLA.

Το φινίρισμα του μοντέλου - το λεγόμενο Post Processing - περιλαμβάνει την αφαίρεση των στηριγμάτων, το πλύσιμο του μοντέλου με τη χρήση ακετόνης ή ισοπροπανόλης (καθαρισμός των υπολειμμάτων υγρής ρητίνης από την επιφάνεια) και επιπλέον ακτινοβολία UV για την ολοκλήρωση του πολυμερισμού σε ολόκληρο τον όγκο του μοντέλου.



Σχήμα 8. Οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι με τη μέθοδο SLA: a) οδοντωτός τροχός κυκλοειδούς προφίλ, b) κωνικοί οδοντωτοί τροχοί, c) κυλινδρικοί οδοντωτοί τροχοί

3.1.4. Η μέθοδος FDM

Η μέθοδος FDM συνίσταται στην κατασκευή του μοντέλου με τη μορφή στρωμάτων με τη χρήση ενός υλικού που θερμαίνεται από την κεφαλή εκτύπωσης και ρευστοποιείται και το οποίο αντλείται μέσω ενός ακροφυσίου εξοπλισμένου με μηχανισμό ελέγχου και διακοπής της παροχής υλικού. Το ακροφύσιο είναι τοποθετημένο σε ένα στήριγμα που έχει τη δυνατότητα να κινείται οριζόντια και κάθετα, πράγμα που επιτρέπει την τοποθέτηση ενός στρώματος υλικού στον χώρο εργασίας σύμφωνα με την καθορισμένη γεωμετρία της διατομής. Το εφαρμοζόμενο στρώμα στερεοποιείται μόλις έρχεται σε επαφή με το στρώμα που εφαρμόστηκε προηγουμένως, δημιουργώντας μια ενιαία δομή υλικού. Κατά την κατασκευή του μοντέλου, ένα άλλο ακροφύσιο αντλεί επιπλέον υλικό που υποστηρίζει την κατασκευή του πρωτοτύπου. Αυτό το υλικό εξυπηρετεί επίσης το σκοπό της σύνδεσης του πρωτοτύπου με την πλατφόρμα εργασίας. Οι δομές στήριξης που δημιουργούνται μαζί με το μοντέλο αφαιρούνται όταν έχει κατασκευαστεί το πλήρες αντικείμενο. Επίσης, είναι δυνατή η κατασκευή υποστηριγμάτων χρησιμοποιώντας ένα υδατοδιαλυτό υλικό, το οποίο διευκολύνει την αφαίρεσή τους.

Διάφορα είδη υλικών μπορούν να εφαρμοστούν στη μέθοδο FDM, όπως κεριά, αλκυλοβενζολοσουλφονικά και πολυκαρβονικά καθώς και μη συμβατά υλικά. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται μοντέλα γραναζιών που παράγονται με τη μέθοδο FDM.



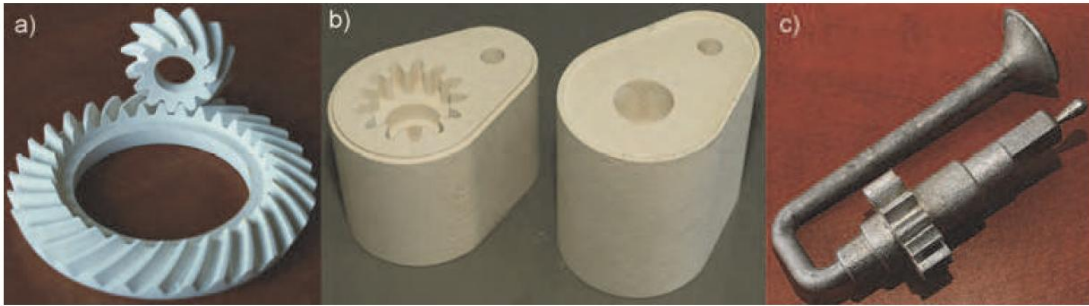
Σχήμα 9. Εργαλεία κατασκευασμένα με τη μέθοδο FDM: a) γρανάζια μονής βαθμίδας με τροχούς κυκλοειδούς προφίλ, b) γρανάζια μονής βαθμίδας με τροχούς εξειλιγμένης, c) πλανητικός μηχανισμός

3.1.5. Η μέθοδος 3DP

Η μέθοδος του three-dimensional printing (3DP) συνίσταται στο συνδυασμό ενός κονιοποιημένου υλικού σε στρώσεις μέσω ενός συνδετικού παράγοντα που εφαρμόζεται από την κεφαλή εκτύπωσης. Η διαδικασία εκτύπωσης ξεκινά με την εφαρμογή ενός στρώματος σκόνης από το συμπληρωματικό δοχείο. Μια μετρούμενη ποσότητα σκόνης δοσολογείται από ένα σύστημα που κινεί το έμβολο στον κύλινδρο της συσκευής και μετά απλώνεται (διανέμεται) με τη χρήση του κυλίνδρου στην επιφάνεια της πλατφόρμας εργασίας. Ο συνδετικός παράγοντας εφαρμόζεται πάνω στην προετοιμασμένη στρώση σκόνης σύμφωνα με την καθορισμένη διατομή του στερεού. Ο παράγοντας δεσμεύει το κονιοποιημένο υλικό, δημιουργώντας έτσι ένα στρώμα του μοντέλου, μετά το οποίο η πλατφόρμα εργασίας μειώνεται από την τιμή του πάχους του στρώματος (π.χ. 0,1 mm) και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Αυτή η μέθοδος καθιστά δυνατή την εκτύπωση γεωμετρικών μοντέλων (Σχ. 10α) καθώς και καλουπιών (Σχ. 10β) για χύτευση κραμάτων θερμοκρασίας έκχυσης έως 1100°C (Σχ. 10γ).

Ορισμένες συσκευές επιτρέπουν επίσης την τρισδιάστατη εκτύπωση σε μια παλέτα χρωμάτων 24 bit (π.χ. Z 510 της Z Corporation), γεγονός που καθιστά δυνατή τη χαρτογράφηση περιοχών ή την ανακατασκευή της εμφάνισης αντικειμένων που κατασκευάζονται από διάφορα διαφορετικά υλικά. Στον χώρο εργασίας των συσκευών που έχουν σχεδιαστεί για τη μέθοδο 3DP, είναι δυνατόν να παράγονται μερικά μοντέλα ταυτόχρονα ή να δημιουργείται ένα μοντέλο που αποτελείται από μερικά στοιχεία διαφορετικού χρώματος [5].



Σχήμα 10. Μοντέλα που παράγονται με τη μέθοδο 3DP: a) Οδοντωτοί τροχοί, b) καλούπι χύτευσης γραναζιών, c) χυτευμένο τεμάχιο στο καλούπι από κράμα Al

3.2. Προετοιμασία των γεωμετρικών δεδομένων για τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Τα φυσικά πρωτότυπα που κατασκευάζονται με τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης βασίζονται σε ένα μοντέλο 3D-CAD. Ανάλογα με τη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης, απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία δεδομένων στον υπολογιστή. Η δημιουργία του πρωτοτύπου είναι δυνατή με βάση ένα γεωμετρικό (ογκομετρικό) μοντέλο CAD. Η επεξεργασία του υπολογιστή ξεκινά στο περιβάλλον CAD, από το οποίο το μοντέλο εξάγεται στη σωστή μορφή του συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Είναι επίσης δυνατό να κατασκευαστεί το πρωτότυπο βάσει δεδομένων απευθείας από τη διαδικασία αντίστροφου σχεδιασμού. Πρέπει να θυμόμαστε, ωστόσο, ότι τα δεδομένα αυτού του τύπου είναι λιγότερο ακριβή από τα δεδομένα που υποβάλλονται σε επεξεργασία σε προγράμματα 3D-CAD. Προγράμματα αφιερωμένα σε συσκευές τρισδιάστατης εκτύπωσης επαληθεύουν την ορθότητα των μοντέλων. Περαιτέρω επεξεργασία αρχείων καταλήγει στον καθορισμό των σωστών παραμέτρων της λειτουργίας της συσκευής (το πάχος του στρώματος για τα στοιχειώδη συστήματα ή η διαδρομή για τα συστήματα CNC). Είναι το λεγόμενο πρόγραμμα μετεπεξεργασίας, το οποίο συνίσταται στην προετοιμασία των τελικών δεδομένων, απαραίτητο για την κατασκευή του φυσικού μοντέλου (αρχεία σε μορφή συσκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης).

Η διαδικασία προετοιμασίας δεδομένων έχει σημαντική επίδραση στην ακρίβεια του μοντέλου που δημιουργείται στη διαδικασία ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων. Οι παράμετροι των δεδομένων που εξάγονται από συστήματα CAD πρέπει πάντα να είναι υψηλότερες από την ακρίβεια της συσκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης. Χάρη σε αυτό, κατά τη διαδικασία κατασκευής του μοντέλου, η συσκευή τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν επαναλαμβάνει σφάλματα προγράμματος.

Η διαδικασία προετοιμασίας δεδομένων έχει σημαντική επίδραση στην ακρίβεια του μοντέλου που λαμβάνεται κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Τα συστήματα σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή έχουν συγκεκριμένη ακρίβεια χαρτογράφησης της γεωμετρίας του μοντέλου 3D-CAD (π.χ. η γραμμική ακρίβεια του μοντέλου που κατασκευάζεται στο σύστημα CATIA είναι 0,001 mm). Στο τρέχον

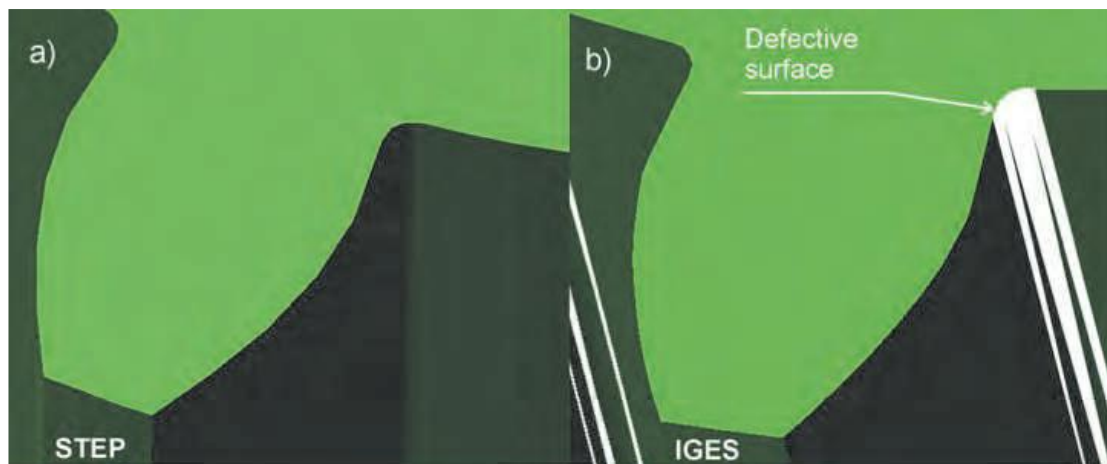
στάδιο της τεχνολογικής ανάπτυξης, αυτή η ακρίβεια είναι υψηλότερη από την ακρίβεια της χαρτογράφησης της γεωμετρίας του πρωτοτύπου που παράγεται με τη χρήση συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι παράμετροι των γεωμετρικών δεδομένων που εξάγονται από συστήματα CAD πρέπει να προσαρμόζονται στην επιθυμητή ακρίβεια της φυσικής κατασκευής πρωτότυπου. Γενικά, η ακρίβεια του μοντέλου 3D-CAD πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ακρίβεια της χαρτογράφησης της γεωμετρίας της συσκευής τρισδιάστατης εκτύπωσης. Χάρη σε αυτό, κατά τη διαδικασία κατασκευής του φυσικού μοντέλου, η συσκευή τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν επαναλαμβάνει σφάλματα προγράμματος [6].

3.2.1. Τύποι αρχείων κατάλληλα για της διαδικασίες CAD και τρισδιάστατης εκτύπωσης

Τα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης και γενικότερα ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων απαιτούν τα αρχεία των ψηφιακών μοντέλων 3D-CAD να αποθηκεύονται σε κατάλληλες μορφές. Οι πιο δημοφιλείς μορφές 3D-RP περιλαμβάνουν: μορφή STL (Stereolithography Language), μορφή SLC (Sliced Layer Contour), μορφή CLI (Common Layer Interface), μορφή HPGL (Hewlett Packard Graphic Language) και τη μορφή MGX - μια μορφή του προγράμματος Magic RP.

Στη διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων μέσω 3D-CAD / 3D-RP εφαρμόζονται επίσης καθολικές μορφές 3DCAD, όπως STEP, IGES ή 3DS. Για παράδειγμα, το ZPrint, ένα πρόγραμμα λειτουργίας τρισδιάστατων εκτυπωτών, καθιστά δυνατή την ανάγνωση στο μοντέλο CAD με έγχρωμη χαρτογράφηση αποθηκευμένη σε μορφή 3DS. Το καθολικό πρόγραμμα Magisc RP επιτρέπει την ανάγνωση αρχείων στις περισσότερες μορφές που εφαρμόζονται σε συστήματα CAD, ανάλογα με τους εγκατεστημένους μεταφραστές. Ωστόσο, στην πράξη, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μορφές είναι STEP και IGES.

Συγκρίνοντας τις πιθανές εφαρμογές των μορφών STEP και IGES στη διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων 3DCAD / 3D-RP, πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η χρήση της μορφής STEP επιτρέπει την ακριβή χαρτογράφηση του σχήματος μοντέλου CAD, συχνά τα σφάλματα χαρτογράφησης εμφανίζονται στη μορφή IGES, όπως ελαττωματικές ή χαμένες επιφάνειες του μοντέλου. Στην περίπτωση των γραναζιών, τέτοια σφάλματα ενδέχεται να εμφανιστούν στην επιφάνεια (Σχ. 11).



Σχήμα 11. Τα μοντέλα γραναζιών 3D-CAD αποθηκεύονται σε: a) Μορφή STEP και b) Μορφή IGES με ορατά ελαττώματα στις παραχθείσες επιφάνειες

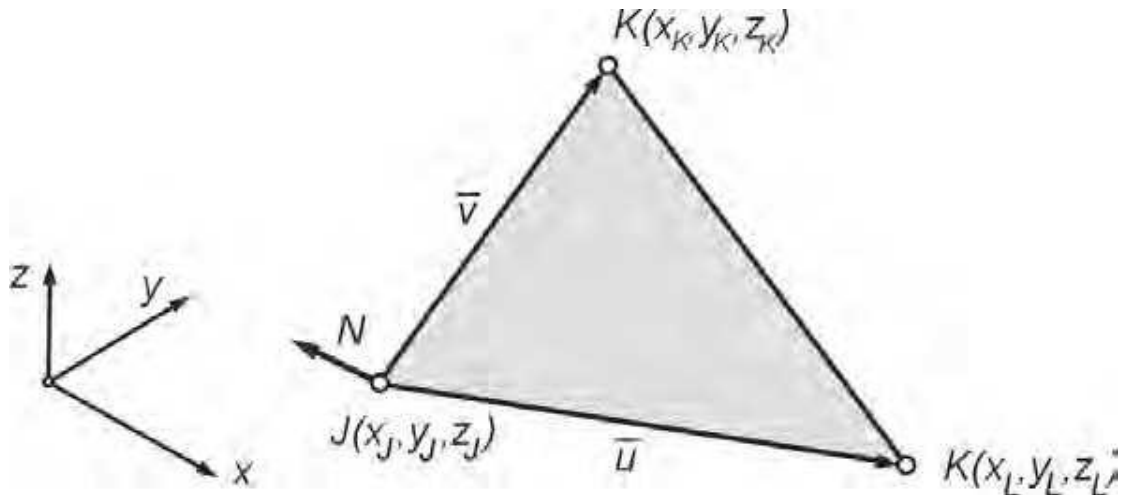
Σφάλματα αυτού του είδους μεταφέρονται συχνότερα σε περαιτέρω επεξεργασία δεδομένων στη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία, για παράδειγμα στο μοντέλο STL, έχει τη μορφή χαμένων επιφανειών [7].

Σε αυτήν την περίπτωση, δεν είναι δυνατή η κατασκευή του φυσικού πρωτοτύπου με μια σταδιακή μέθοδο. Ωστόσο, μπορεί να γίνει προσπάθεια διόρθωσης του μοντέλου STL χρησιμοποιώντας κατάλληλα εργαλεία προγράμματος (π.χ. Magics RP).

Οι μορφές αποθήκευσης αρχείων αναπτύσσονται συνεχώς από κατασκευαστές συσκευών ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων. Αυτή η ανάπτυξη απαιτεί συνεργασία με τους παραγωγούς λογισμικού CAD. Λόγω της εφαρμογής της μορφής STL, η συντριπτική πλειονότητα των προγραμμάτων CAD έχει τη δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων σε αυτήν τη μορφή. Αυτά τα προγράμματα περιλαμβάνουν: AutoCAD, Alibre, CATIA, I-DEAS, IronCAD, Mechanical Desktop, ProE, Rhino, SolidDesigner, SolidEdge, SolidWorks, Think3, NX και 3D Studio Max.

Η εξαγωγή δεδομένων πραγματοποιείται συνήθως μέσω της εντολής "save as * .stl", μερικές φορές με την εντολή εξαγωγής στο STL. Σε σπάνιες περιπτώσεις, υπάρχει μια ξεχωριστή εντολή που εισάγεται στο παράθυρο διαλόγου προγράμματος (π.χ. "amstlout" στο Mechanical Desktop). Ανάλογα με το πρόγραμμα, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η ακρίβεια της χαρτογράφησης του μοντέλου. Ορισμένα προγράμματα επιτρέπουν έναν πολύ λεπτομερή ορισμό των παραμέτρων του αρχείου STL (π.χ. Mechanical Desktop). Η μορφή STL χρησιμοποιείται για να περιγράψει και να προσεγγίσει τα σχήματα διαφόρων επιφανειών μέσω επίπεδων τριγωνικών επιφανειακών νιφάδων. Το Σχήμα 12 δείχνει μία επίπεδη τριγωνική ενιαία επιφάνεια.

Η περιγραφή της ενιαίας επιφάνειας περιλαμβάνει έναν κανονικό φορέα (φυσιολογική όψη) και συντεταγμένες τριών κορυφών. Επιπλέον, για κάθε επιφάνεια, ορίζεται το κάθετο διάνυσμα N , κατευθυνόμενο έξω από το κατά προσέγγιση στερεό.

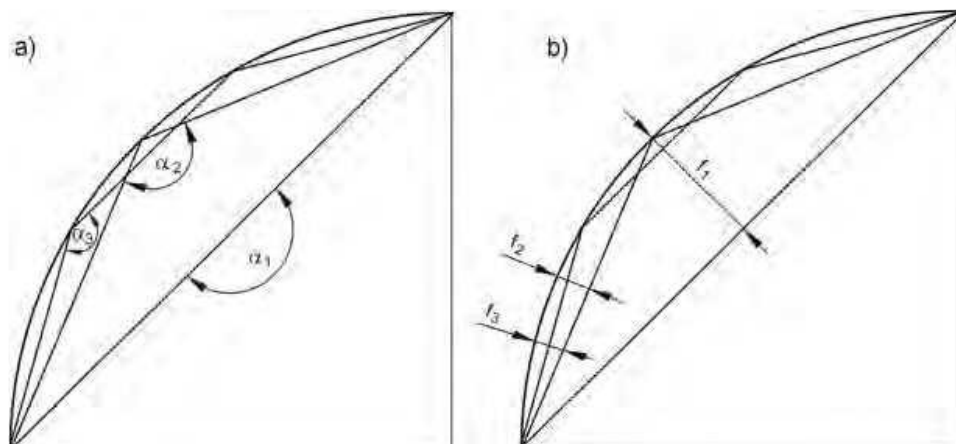


Σχήμα 12. Επίπεδη τριγωνική ενιαία επιφάνεια μορφής STL

3.2.2. Ακρίβεια χαρτογράφησης του μοντέλου σε μορφή STL

Η διαδικασία μετατροπής του μοντέλου 3D-CAD σε μορφή 3D-CAD-RP (μορφή STL) ονομάζεται ψηφιοποίηση (*tessellation*). Πρόκειται για μια διαδικασία στην οποία η τρισδιάστατη γεωμετρία του μοντέλου προσεγγίζεται μέσω τριγωνικών επιφανειών [8]. Το μέγεθος και τα σχήματα των τριγώνων μπορούν να ρυθμιστούν με τον καθορισμό των κατάλληλων παραμέτρων της εξαγωγής δεδομένων. Η ακρίβεια της προσέγγισης εξαρτάται από το σχήμα της επιφάνειας του μοντέλου. Οι επίπεδες επιφάνειες χαρτογραφούνται πλήρως με τρίγωνα [9]. Η χαρτογράφηση καμπυλοειδών επιφανειών προκαλεί την εμφάνιση του λεγόμενου σφάλματος χορδής, το οποίο εμφανίζεται μεταξύ της επιφάνειας του μοντέλου και του δικτύου τριγώνων που το προσεγγίζει. Το σφάλμα μετράται κάθετα στην επιφάνεια του τριγώνου και η τιμή του εξαρτάται από τις υποτιθέμενες παραμέτρους προσέγγισης (Σχ. 13α).

Το σφάλμα της χορδής ευθύνεται επίσης για την ακρίβεια της κατασκευής κυρτών και κοίλων επιφανειών με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας. Η ακρίβεια της προσέγγισης μπορεί επίσης να περιγραφεί μέσω της γωνίας προσέγγισης - α (Σχ. 13β).

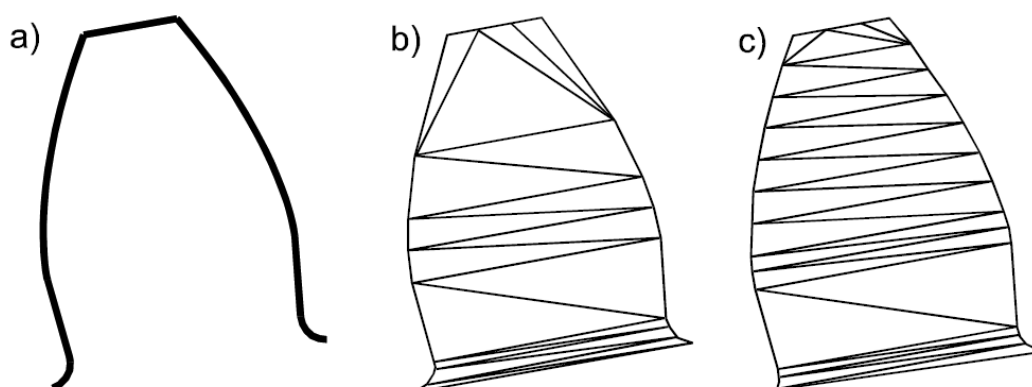


Σχήμα 13. Σφάλμα χαρτογράφησης μεταξύ σφαιρικής επιφάνειας μοντέλου CAD και προσέγγιση τριγώνου: a) απόκλιση γωνίας, b) απόκλιση χορδής

Οι παράμετροι της γεωμετρικής εξαγωγής δεδομένων από συστήματα 3D-CAD πρέπει να υπαγορεύονται από την υποτιθέμενη ακρίβεια της χαρτογράφησης του φυσικού μοντέλου που έχει κατασκευαστεί από τη συσκευή τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η αύξηση της ακρίβειας της προσέγγισης της επιφάνειας κατά τη διαδικασία της αφαίρεσης προκαλεί αύξηση του αριθμού των τριγώνων που περιγράφουν τις επιφάνειες του μοντέλου (Σχ. 14) και μεγαλύτερο μέγεθος του αρχείου STL.

Στην περίπτωση απλών γεωμετρικών μοντέλων, το μέγεθος του αρχείου STL που δημιουργείται δεν είναι μεγάλο. Είναι πολύ μεγαλύτερο για μοντέλα σύνθετων καμπυλοειδών επιφανειών, όπως π.χ. οδοντωτοί τροχοί.

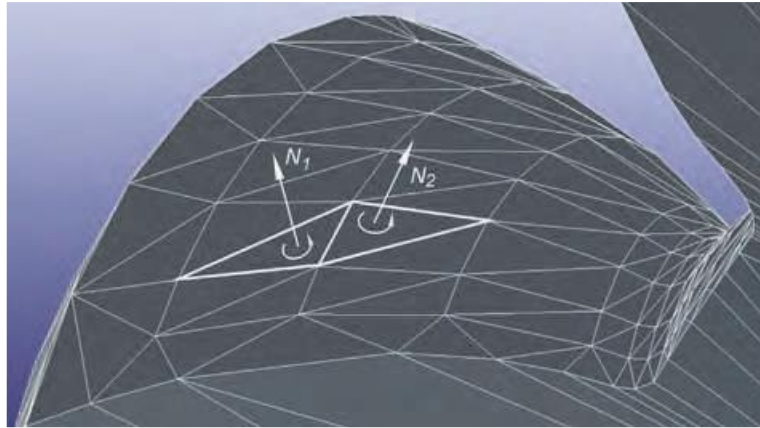
Η παραγωγή ακριβών μοντέλων γραναζιών τρισδιάστατης εκτύπωσης απαιτεί την εφαρμογή της σωστής ανοχής της εξαγωγής δεδομένων στη μορφή STL. Οι παράμετροι εκχώρησης ορίζονται σε συστήματα 3DCAD μέσω διαφόρων αλγορίθμων, οι οποίοι καθορίζουν την ακρίβεια χαρτογράφησης και ευθύνονται για την εμφάνιση σφαλμάτων χαρτογράφησης γεωμετρίας. Η μορφή STL είναι επίσης μια μορφή αποθήκευσης δεδομένων που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία σάρωσης 3D. Σε αυτήν την περίπτωση, η γεωμετρία του μοντέλου που έχει αποθηκευτεί σε μορφή STL περιέχει σχεδόν πάντα σφάλματα με τη μορφή θορύβου, απώλειας τμημάτων επιφάνειας ή ασυνέχεια επιφάνειας.



Σχήμα 14. Προφίλ δοντιού μοντέλου οδοντωτού τροχού: a) ονομαστικό προφίλ (θεωρητικό - CAD), b) προφίλ μοντέλου STL (2540 τρίγωνα όλου του γραναζιού), c) προφίλ μοντέλου STL (2724 τρίγωνα)

3.2.3. Χαρτογράφηση σφαλμάτων σε αρχεία μορφής STL

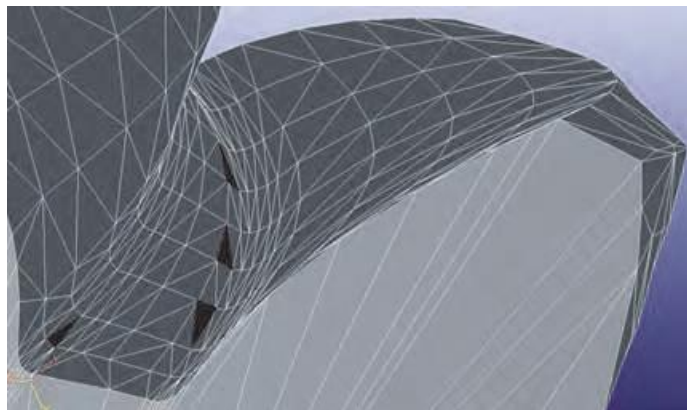
Κατά τη μετατροπή των αρχείων 3D-CAD σε μορφή STL, ενδέχεται να προκύψουν σφάλματα περιγραφής της γεωμετρίας. Αυτά τα σφάλματα προκύπτουν από την ανακρίβεια της επεξεργασίας μοντέλων από αλγόριθμους απόσπασης στους μεταφραστές συστημάτων CAD. Τα πιο συνηθισμένα σφάλματα μοντέλου STL περιλαμβάνουν: την αντιστροφή των κάθετων διανυσμάτων, κενά και διαστήματα μεταξύ των τριγώνων που περιγράφουν την επιφάνεια, στρεβλωμένα επιφάνεια, απώλειες ολόκληρων επιφανειών ή τμημάτων τους, αλληλεπικαλυπτόμενα τρίγωνα, αντιστοίχιση ενός μόνο άκρου σε περισσότερα από ένα τρίγωνα.



Σχήμα 15. Σωστή γεωμετρία τριγώνων με κάθετα διανύσματα προσανατολισμένα προς τα έξω (μοντέλο γραναζιού STL)

Η σωστή περιγραφή της γεωμετρίας με τη χρήση της μορφής STL πρέπει να πληροί την κατάσταση όλων των κάθετων διανυσμάτων των ενιαίων επιφανειών που κατευθύνονται έξω από το κατά προσέγγιση στερεό. Σε ορισμένα συστήματα CAD, παρουσιάζονται σφάλματα κατά την εξαγωγή στο αρχείο STL, που περιλαμβάνει την αντιστροφή του κάθετου διανύσματος. Η πιο κοινή πηγή σφάλματος είναι η λάθος σειρά παροχής των κορυφών των τριγώνων. Η ακολουθία εξαρτάται από την διεύθυνση (στροφή) του κανονικού διανύσματος, που ορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού (Σχ. 15) Ένα τέτοιο σφάλμα μπορεί να ισχύει για ολόκληρες επιφάνειες ή μεμονωμένα τρίγωνα.

Ένα άλλο σφάλμα είναι η «απώλεια» ενός τριγώνου ή τριγώνων. Τα κενά (τρίγωνα) μπορούν να εμφανιστούν μεμονωμένα ή ως συνδυασμοί μερικών τριγώνων. Τα κενά τρίγωνα μπορούν επίσης να εμφανιστούν όταν αλλάζουν οι ακτίνες καμπυλών, π.χ. στην περιοχή που φαίνεται στο Σχήμα 16.

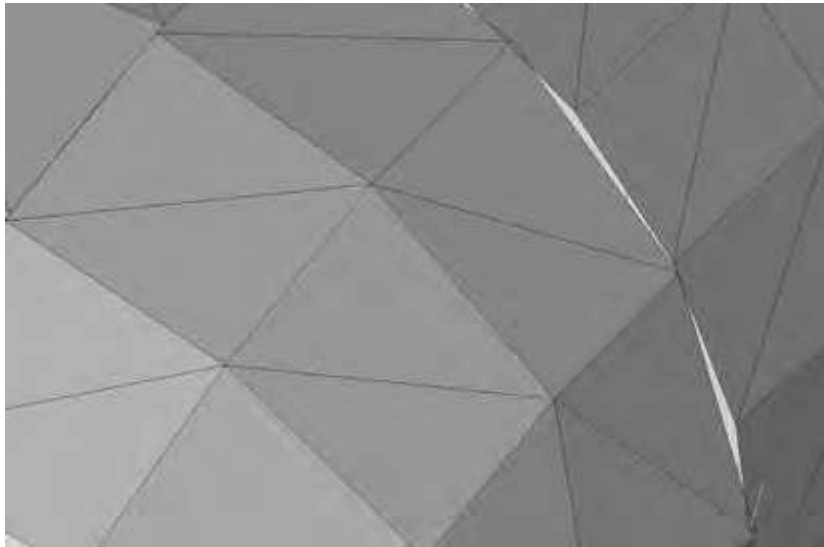


Σχήμα 16. Κενά τρίγωνα STL μοντέλου οδοντωτού τροχού (επισημαίνονται με μαύρο χρώμα)

Έχοντας ασυνέχεια στην επιφάνεια, ένα τέτοιο μοντέλο είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μέσω συσκευών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό το είδος σφάλματος δημιουργείται συνήθως από μοντέλα χαμηλής ποιότητας των συστημάτων CAD. Η διόρθωση ενός τέτοιου σφάλματος, δηλαδή "επιδιόρθωση" του κενού που δημιουργείται από το "χαμένο" (μη δημιουργημένο) τμήμα-νιφάδα της επιφανειακής

γεωμετρίας απαιτεί την εφαρμογή λειτουργιών γεωμετρικού προγράμματος Σε αυτήν την περίπτωση, το αρχείο STL θα πρέπει να ανοίξει σε ένα πρόγραμμα που υποστηρίζει μορφές STL (π.χ. Magisc RP), πρέπει να διαβαστούν οι συντεταγμένες των κορυφών της επιφανειακής νιφάδας, θα πρέπει να προσδιοριστεί το κάθετο διάνυσμα N στην επιφάνεια και μια τέτοια επιφάνεια πρέπει να αποθηκευτεί στο αρχείο STL.

Στην περίπτωση μοντέλων πολύπλοκων σχημάτων, μπορεί να προκύψουν γεωμετρικά σφάλματα, τα οποία δεν επιτρέπονται από τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την εκχώρηση. Αυτά τα φαινόμενα είναι η πηγή σφαλμάτων των μοντέλων STL. Αυτά τα σφάλματα εμφανίζονται συνήθως στα σημεία σύνδεσης των επιφανειακών νιφάδων σε ένα αντικείμενο (Σχ. 17). Ένα τέτοιο σφάλμα μπορεί να οδηγήσει στην έλλειψη σύνδεσης ενός κοινού άκρου των επιφανειακών νιφάδων.



Σχήμα 17. Στρέβλωση στην ένωση των επιφανειών στο μοντέλο STL

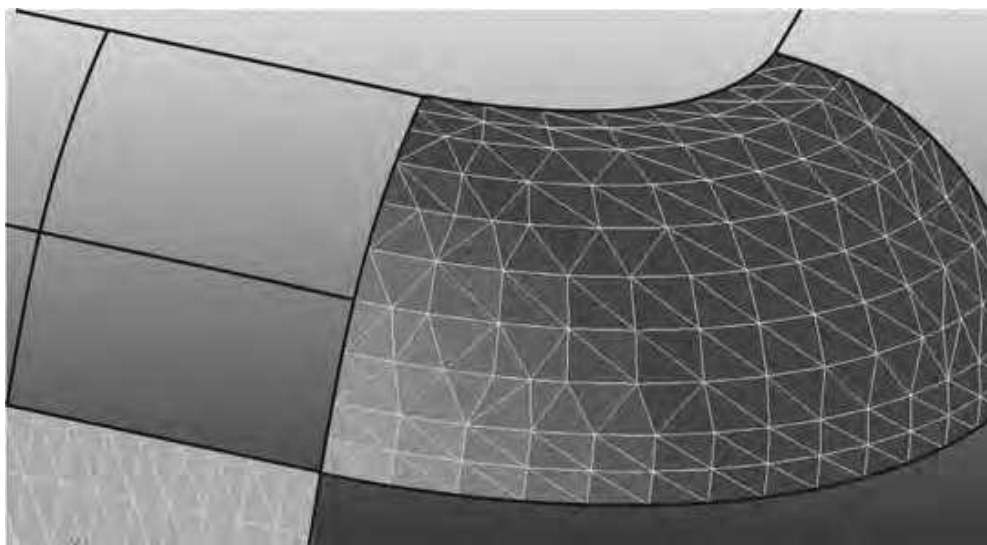
Είναι δυνατόν να διορθωθούν μερικά από τα σφάλματα στα προγράμματα CAD, χρησιμοποιώντας κάποιες συγκεκριμένες επιλογές. Εάν οι επιφάνειες του μοντέλου είναι κατασκευασμένες με χρήση παραμετρικών καμπυλών και επιφανειών, η διόρθωση του σφάλματος οφείλεται στην τροποποίηση των τιμών των παραμέτρων καμπυλών και επιφανειών.

Στην περίπτωση μοντελοποίησης ελεύθερων επιφανειών, η διόρθωση είναι δυνατή μέσω της τροποποίησης των σημείων ελέγχου καμπυλών ή επιφανειών.

Υπάρχουν επίσης σφάλματα χαρτογράφησης με τη μορφή εξαφάνισης ολόκληρων επιφανειακών νιφάδων (Σχ. 18). Σφάλματα αυτού του τύπου συμβαίνουν συνήθως κατά την εξαγωγή γεωμετρικών δεδομένων από το IGES στη μορφή STL όταν δεν υπάρχει αρχείο προέλευσης στη μορφή του προγράμματος στο οποίο έχει δημιουργηθεί το μοντέλο 3D-CAD. Τέτοια σφάλματα μπορούν να διορθωθούν με τη βοήθεια εξειδικευμένου λογισμικού (Magics RP) εξοπλισμένο με μια ενότητα εξαγωγής δεδομένων σε μορφή IGES.

Τα μοντέλα γεωμετρικών δεδομένων στο αρχείο STL περιγράφονται από τρίγωνα με συντεταγμένες x , y , z για καθεμία από τις κορυφές του τριγώνου. Οι συντεταγμένες περιγράφονται στο παγκόσμιο σύστημα των καρτεσιανών συντεταγμένων. Σφάλματα

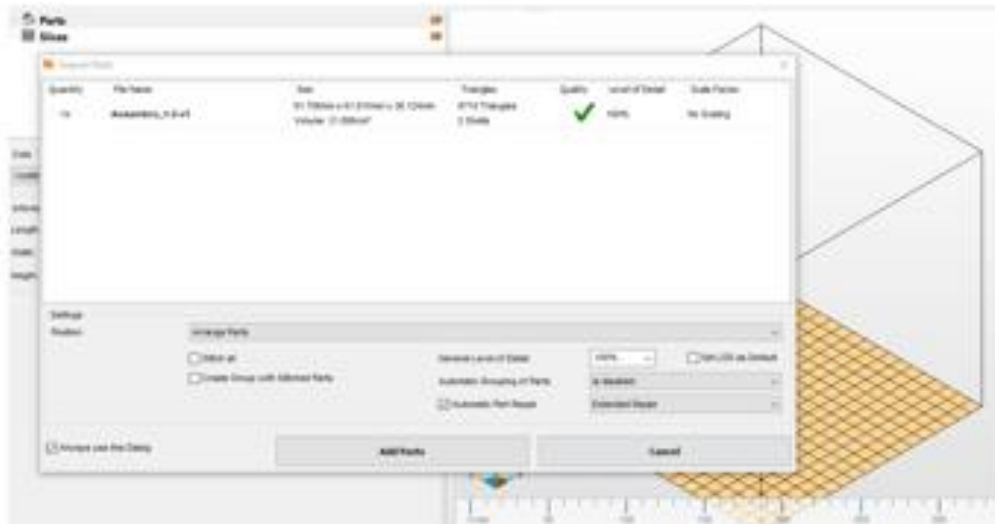
δεδομένων που δημιουργήθηκαν κατά τη δημιουργία του αρχείου STL προκύπτουν από τη διαδικασία αφαίρεσης. Το πρόγραμμα διόρθωσης σφαλμάτων βασίζεται σε μαθηματικούς μετασχηματισμούς των τριγωνικών επιφανειών σε 3D χώρο.



Σχήμα 18. Χαμένες επιφανειακές νιφάδες στο μοντέλο STL

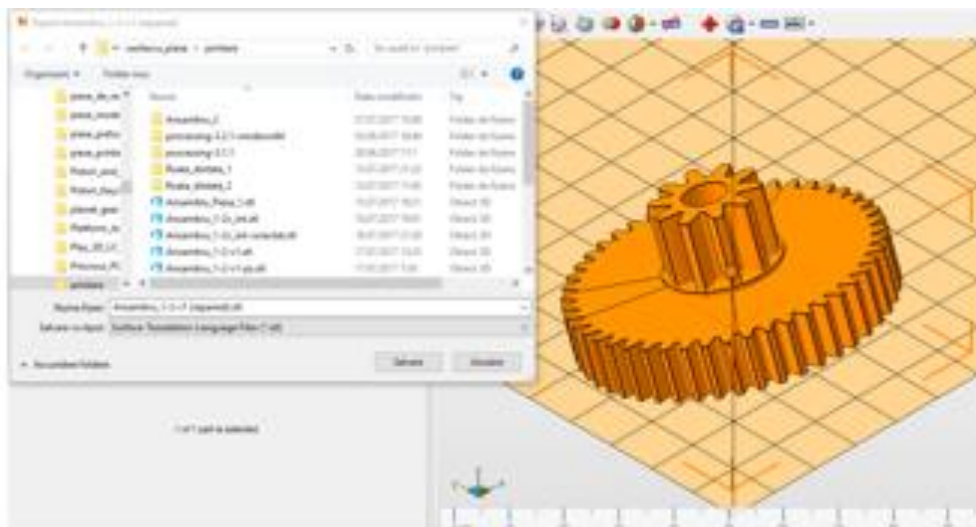
3.2.4. Προετοιμασία αρχείων STL για την τρισδιάστατη εκτύπωση

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η δημιουργία ενός αρχείου STL για τη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι απαραίτητη και ο τρόπος δημιουργίας αυτού του είναι πολύ σημαντικός. Σε γενικές γραμμές, εάν οι ρυθμίσεις για τη δημιουργία του αρχείου δεν έχουν επιλεγεί σωστά, ενδέχεται να προκύψουν σφάλματα κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση του υλικού που λείπει, όπως φάνηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης, πριν από την εκτύπωση του προγράμματος CAM, το αρχείο STL πρέπει να επαληθευτεί από την άποψη της δημιουργίας της τριγωνικής δομής, με ένα από τα γνωστά προγράμματα επαλήθευσης. Για την περίπτωση που θα εξεταστεί σε αυτό το κεφάλαιο, θα χρησιμοποιήσουμε ένα από τα προγράμματα που διατίθενται από την εταιρεία AUTODESK, το Netfabb [13], το οποίο διασφαλίζει ότι φορτώνεται το αρχείο STL, εάν η αυτόματη διόρθωση του CAD αρχείου (Σχ. 19) έχει οριστεί ως προεπιλογή. Ωστόσο, υπάρχει επίσης η επιλογή να γίνει επαλήθευση μετά τη φόρτωση του αρχείου και στη συνέχεια να επαληθευτεί η ακεραιότητα της δομής.



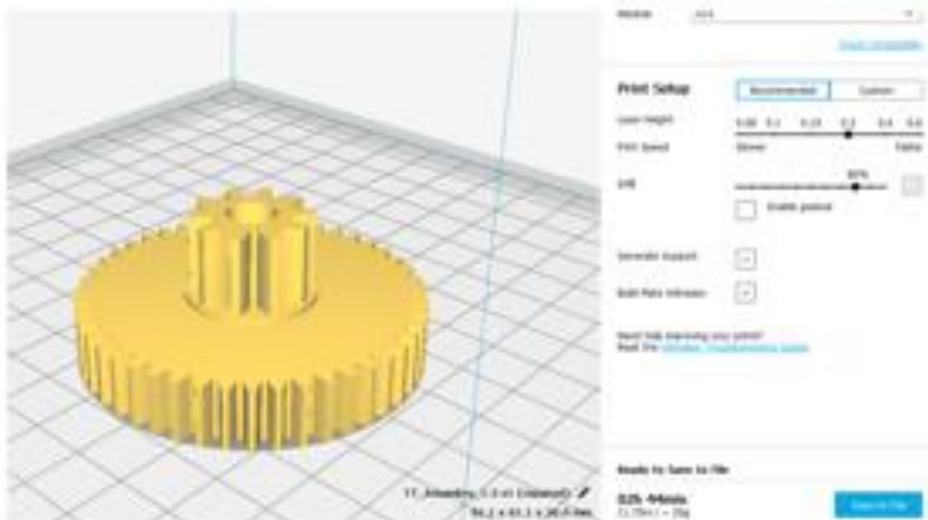
Σχήμα 19. Διόρθωση αρχείου STL για τρισδιάστατη εκτύπωση στο Netfabb

Στο Σχήμα 20 αποθηκεύεται το επισκευασμένο αρχείο σε μορφή STL.



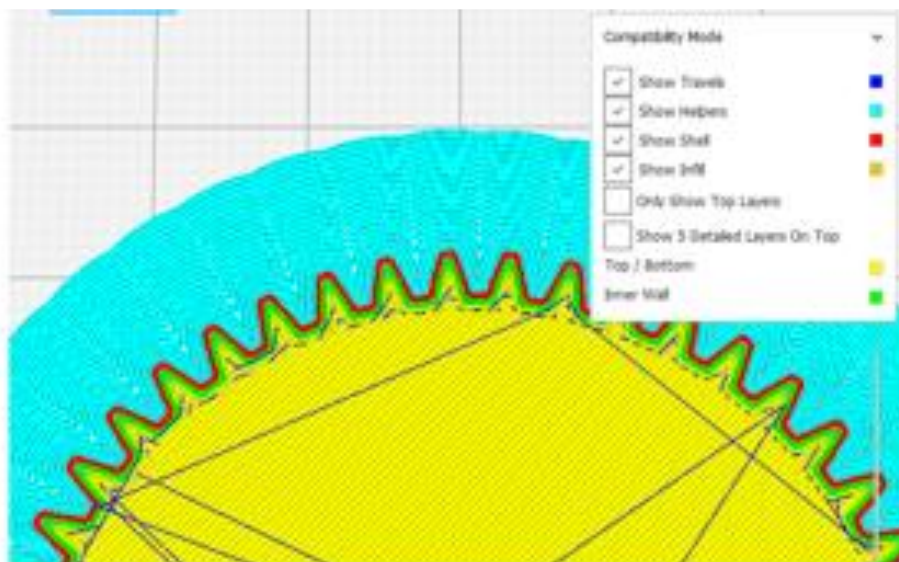
Σχήμα 20. Αποθήκευση διορθωμένου STL αρχείου στο Netfabb

Το τελευταίο είναι μια από τις πιο σημαντικές λειτουργίες, χωρίς την οποία δεν είναι εγγυημένη η απόκτηση ενός οδοντωτού τροχού με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση. Το αρχείο STL που θα πραγματοποιηθεί έτσι θα πρέπει να φορτωθεί στο πρόγραμμα δημιουργίας επιπέδων (slicer). Ένα από αυτά τα προγράμματα είναι το Cura από την Ultimaker [14], το οποίο διασφαλίζει τη διαδικασία της δημιουργίας επιπέδων. Στο Σχήμα 21 φαίνεται το γεωμετρικά φορτωμένο στοιχείο που είναι τοποθετημένο για την εκτέλεση της διαδικασίας δημιουργίας του κώδικα επεξεργασίας.

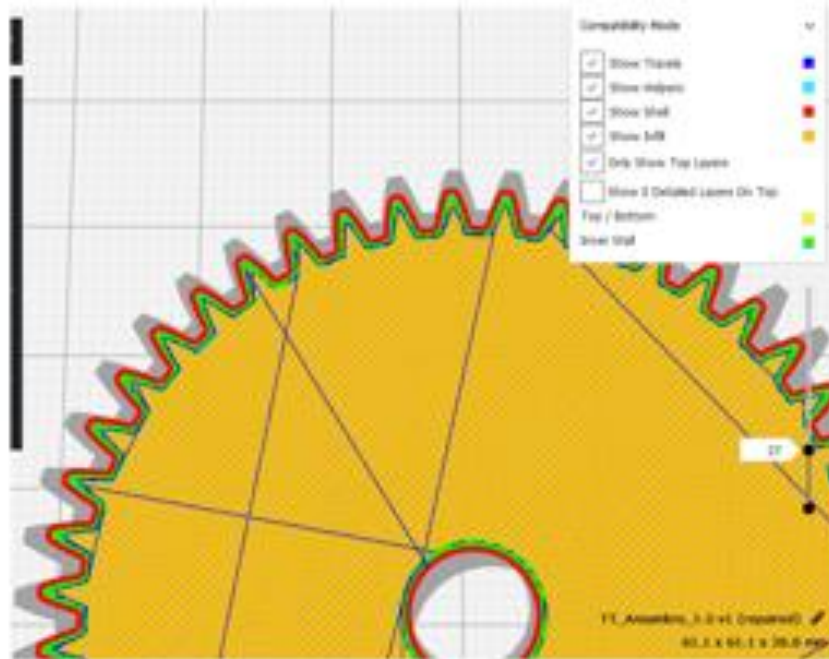


Σχήμα 21. Οδοντωτός τροχός τοποθετημένος για τρισδιάστατη εκτύπωση

Είναι δυνατόν να δούμε ότι για προεπιλεγμένες τυπικές παραμέτρους η διάρκεια εκτύπωσης είναι 2 ώρες και 44 λεπτά. Εάν απεικονίζει την διαδικασία στις οθόνες, συγκρίνοντας το πρώτο στρώμα (Σχ. 22) και ένα ενδιάμεσο στρώμα (Σχ. 23) φαίνεται ότι το πρόγραμμα συνιστά για καλύτερη πραγματοποίηση της γεωμετρίας του τροχού στο πρώτο στρώμα για να ενεργοποιηθεί η παραγωγή περιοχής στήριξης μπλε χρώματος που εξασφαλίζει καλή πρόσφυση των άκρων των τροχών χωρίς παραμορφωμένες περιοχές (Σχ. 22). Η λύση είναι κάτι παραπάνω από απαραίτητη για το υλικό ABS, αλλά συνιστάται και για άλλα υλικά.

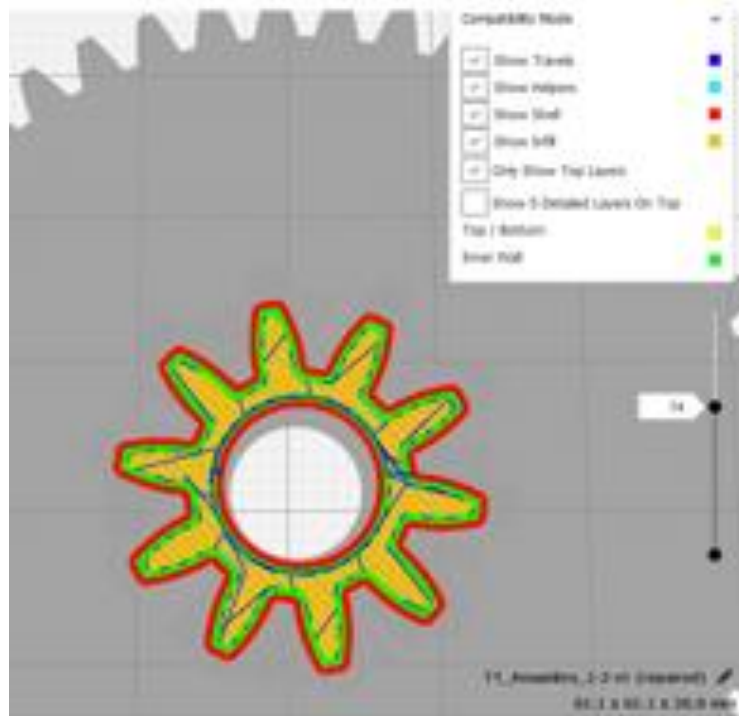


Σχήμα 22. Πρώτο στρώμα-επίπεδο του μοντέλου οδοντωτού τροχού κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση



Σχήμα 23. Ενδιάμεσο στρώμα-επίπεδο του μοντέλου οδοντωτού τροχού κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση

Είναι δυνατό να δούμε ότι μερικά προβλήματα που εμφανίζονται κατά την παραγωγή. Το πρώτο καθορίζεται από την περιοχή μεταξύ των συνεχών στρωμάτων που είναι διατεταγμένα στο εξωτερικό του τροχού των κόκκινων οδοντωτών τροχών και της παράλληλης σε αυτήν στην εσωτερική πλευρά του πράσινου χρώματος και του τμήματος της δομής βάσης. Αυτό θα κάνει το δόντι να μην έχει ομοιογενή δομή στην πλευρά αντίστασης του δοντιού με αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή του. Αν αναλύσουμε και δημιουργήσουμε το δόντι σε ένα ανώτερο στρώμα, αυτό μπορεί να γίνει ακόμη πιο εμφανές (Σχ. 24).



Σχήμα 24. Στρώμα-επίπεδο του μοντέλου οδοντωτού τροχού κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση κοντά στην πάνω επιφάνεια του τροχού

Οι Vasilescu και Fleser [15] ασχολήθηκαν με 2 περιπτώσεις εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία προετοιμασίας εκτύπωσαν 2 μοντέλα οδοντωτών τροχών με module 0,8 και 1,25.

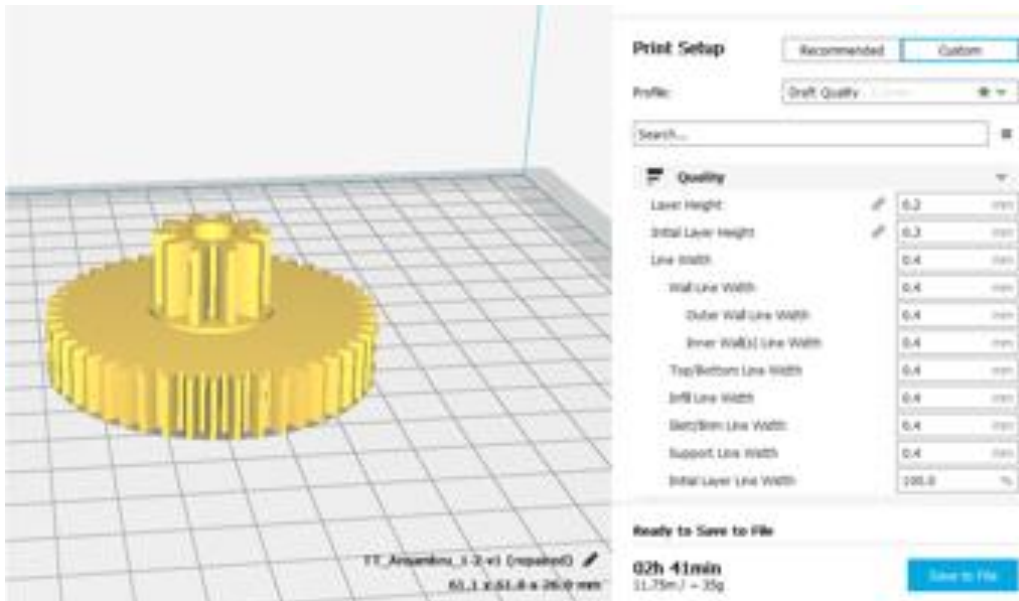
Το πρόγραμμα Cura 3.3.1. μπορεί να ορίσει διαφορετικές παραμέτρους για διάφορα εύρη εξαρτημάτων που δημιουργούνται. Θα πρέπει να θεωρηθεί ότι έχουμε δύο ξεχωριστούς τομείς και οι στρατηγικές μπορούν να στοχεύουν είτε στη δημιουργία δύο αλληλοεπικαλυπτόμενων μερών που θα έχουν διαφορετικές ρυθμίσεις παραγωγής ή για το διαχωρισμό μιας ολόκληρης μονάδας σε δύο κυλινδρικές περιοχές με διαφορετικές ρυθμίσεις.

Στην πράξη μπορεί να χρησιμοποιηθούν πολλές παραλλαγές στο Cura 3.3.1. για την παραγωγή δύο ξεχωριστών μερών. Ένα γεωμετρικό κυλινδρικό στοιχείο που θα εισαχθεί για την οριοθέτηση των δύο στοιχείων που υπόκεινται στην τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να δημιουργηθεί, διαφορετικά τα δύο γεωμετρικά στοιχεία που επικαλύπτονται θα ρυθμιστούν για εκτύπωση με διαφορετικές παραμέτρους.

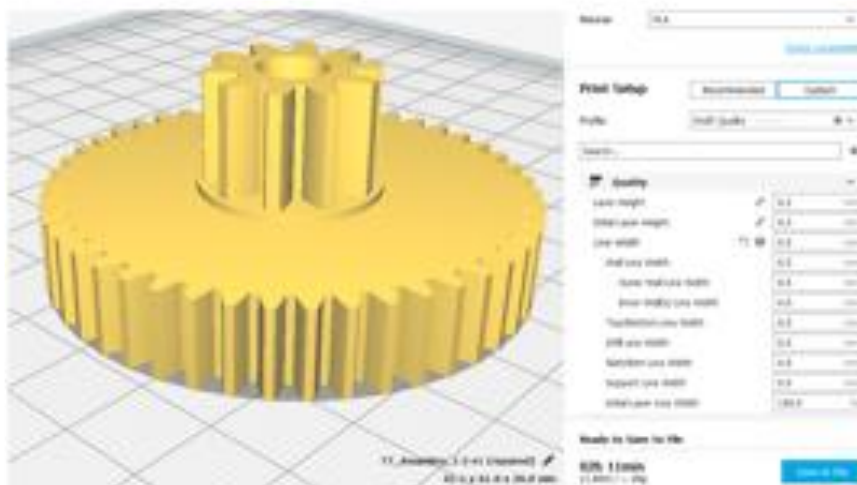
Και οι δύο παραλλαγές παράγουν άκαμπτα σχέδια διαχωρισμού μεταξύ του άνω και του κάτω επιπέδου που μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να παράγουν ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Προτείνεται να αναλυθούν αυτές οι παραλλαγές σε μια εφαρμογή στην οποία θα αναλυθούν και οι δοκιμές που μπορούν να γίνουν από τις δύο παραλλαγές σε σύγκριση με την τυπική παραλλαγή με αρκετές περιμετρικές γραμμές που θα αναλύσουμε περαιτέρω.

Για την περίπτωσή μας θα επιλέξουμε την παραλλαγή με 4 περιμετρικές γραμμές και θα παρουσιάσουμε για τα ίδια επίπεδα και τις παραμέτρους επεξεργασίας την εμφάνιση της περιφέρειας των δοντιών.

Στο Σχήμα 25 παρουσιάζονται οι επιλεγμένες παράμετροι παραγωγής για στρώματα στην αρχική παραλλαγή: Πλάτος γραμμής 0,4, και στο Σχήμα 26 αυτές που επιλέγονται για παραλλαγή πλάτους γραμμής 0,5. Το πρώτο αποτέλεσμα είναι να μειωθεί ο χρόνος εκτύπωσης σε 2 ώρες και 11 λεπτά από 2 ώρες και 41 λεπτά.



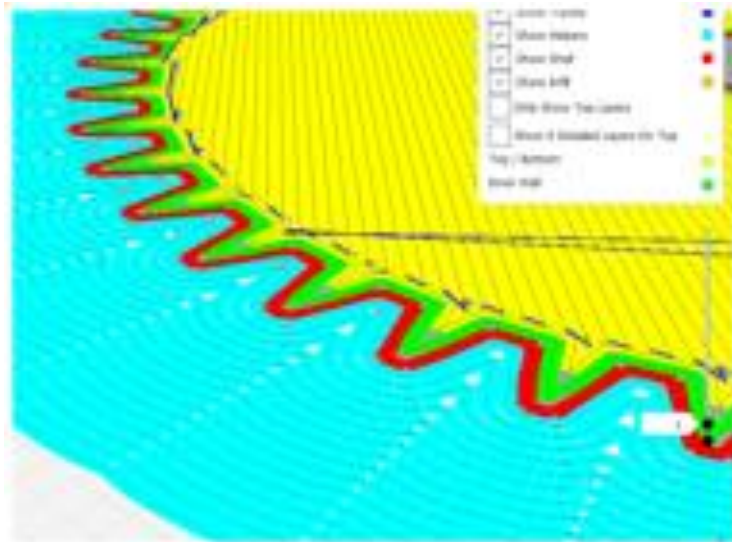
Σχήμα 25. Αρχική λύση για πλάτος γραμμής 0,4 mm



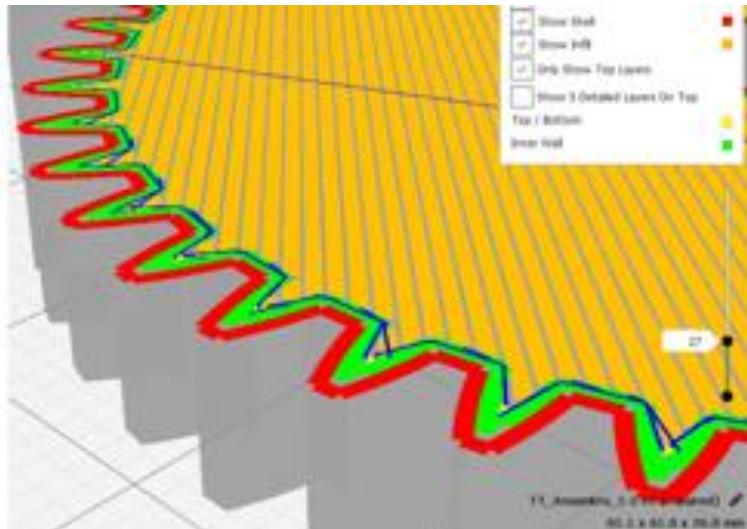
Σχήμα 26. Βελτιωμένη λύση για πλάτος γραμμής 0,5 mm

Στο Σχήμα 27 φαίνεται το πρώτο στρώμα και στο Σχήμα 28 φαίνεται ένα ενδιάμεσο στρώμα κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μπορεί να φανεί ότι το πρόγραμμα συνιστά για καλύτερη πραγματοποίηση της γεωμετρίας του τροχού στο πρώτο στρώμα να ενεργοποιηθεί η παραγωγή περιοχής στήριξης μπλε χρώματος που εξασφαλίζει καλή πρόσφυση του τροχού.

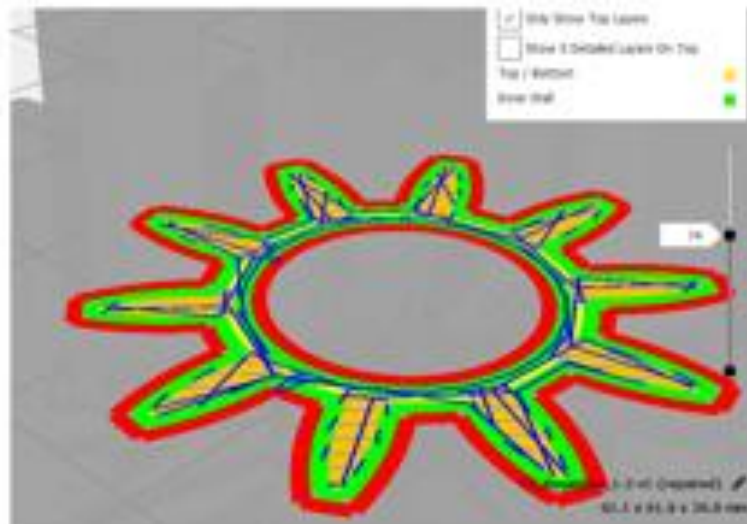
Αυτό φαίνεται καλύτερα και κατά την παραγωγή ανώτερων στρωμάτων στο υλικό (Σχήμα 29).



Σχήμα 27. Πρώτο στρώμα τρισδιάστατης εκτύπωσης οδοντωτού τροχού με πάχος γραμμής: 0,5 mm

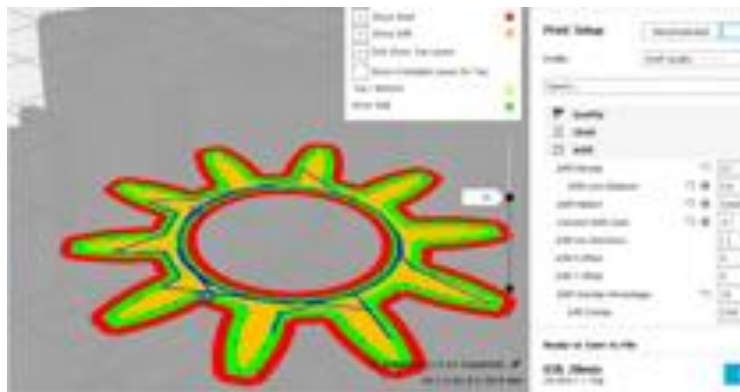


Σχήμα 28. Ενδιάμεσο στρώμα τρισδιάστατης εκτύπωσης οδοντωτού τροχού με πάχος γραμμής: 0,5 mm

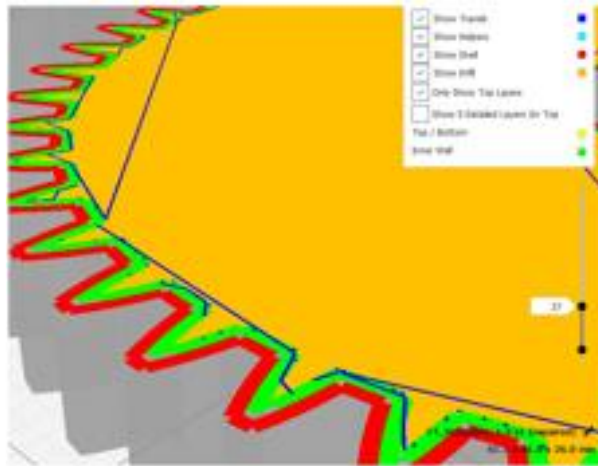


Σχήμα 29. Ανώτερο στρώμα τρισδιάστατης εκτύπωσης οδοντωτού τροχού με πάχος γραμμής: 0,5 mm

Η προτεινόμενη αλλαγή δείχνει αύξηση του πάχους των περιφερειακών γραμμών με ευεργετικά αποτελέσματα στη μηχανική αντοχή των δοντιών. Μια άλλη λύση είναι αυτή της αλλαγής του γεωμετρικού σχήματος των εσωτερικών γραμμών της κατασκευής με απόσταση μεταξύ γραμμών 0,5 mm. Παρά το ότι επιφέρει αύξηση της διάρκειας εκτύπωσης σε 3 ώρες και 28 λεπτά, αλλά και στην ποσότητα του καλωδίου από 35 g σε 70 g, επιτυγχάνεται καλύτερη πλήρωση των οδόντων του τροχού τόσο στο πάνω (Σχ. 30) όσο και στο κάτω μέρος (Σχ. 31).



Σχήμα 30. Πάνω μέρος οδοντωτού τροχού τρισδιάστατης εκτύπωσης με πάχος γραμμής: 0,5 mm



Σχήμα 31. Κάτω μέρος οδοντωτού τροχού τρισδιάστατης εκτύπωσης με πάχος γραμμής: 0,5 mm

Μοντέλα οδοντωτών τροχών με την παραπάνω διαδικασία κατασκευάστηκαν με το υλικό PLA σε τρισδιάστατο εκτυπωτή μοντέλου Fabrikator Mini και φαίνονται στο Σχήμα 32.



Σχήμα 32. Κάτω μέρος οδοντωτού τροχού τρισδιάστατης εκτύπωσης με πάχος γραμμής: 0,5 mm [15]

3.3. Ποιότητα οδοντωτών τροχών κατασκευασμένων μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης

3.3.1. Προσδιορισμός ανοχών μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, μέσω της προσθετικής κατασκευής χωρίς τη χρήση εργαλείων διαμόρφωσης, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να προσφέρει μεγάλα οφέλη σε σύγκριση με τις καθιερωμένες διαδικασίες κατασκευής. Ιδιαίτερα οι εξαιρετικές ελευθερίες σχεδιασμού που προσφέρει παρέχουν νέες δυνατότητες για το σχεδιασμό εξαρτημάτων, όπως ελικοειδή κανάλια ψύξης ή σύνθετες δομές πλέγματος. Από οικονομική άποψη, είναι εφικτή η αποσύνδεση του

κόστους κατασκευής από την πολυπλοκότητα των συστατικών [16]. Παρ' όλα αυτά, διάφοροι λόγοι, όπως οι μεγάλες γεωμετρικές αποκλίσεις, αναστέλλουν τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτές οι αποκλίσεις δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς.[17,18]. Ωστόσο, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι πραγματοποιήθηκαν διάφορες έρευνες για να ταξινομηθεί η γεωμετρική ακρίβεια των διαφόρων μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης [19-44]. Οι περισσότερες από τις αναφορές αξιολογούν τη γεωμετρική ακρίβεια με στάνταρ σημεία αναφοράς. Ωστόσο, η γεωμετρική ακρίβεια επηρεάζεται από πολλούς γεωμετρικούς παράγοντες, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη. Επιπλέον, συχνά λείπει η παραγωγή ανοχών. Επιπλέον, οι λόγοι για την εμφάνιση διαστάσεων αποκλίσεων είναι συχνά άγνωστοι. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει ένα κενό γνώσης σχετικά με τις εφικτές τιμές ανοχής για τον ρεαλιστικό περιορισμό των γεωμετρικών αποκλίσεων [17,18]. Επιπλέον, η επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στη γεωμετρική ακρίβεια δεν έχει ληφθεί υπόψη σοβαρά μέχρι τώρα. Είναι λοιπόν σημαντικό οι διαστάσεις ανοχής να διερευνώνται με δύο στόχους: τη συστηματική ανάπτυξη των διαστάσεων ανοχών για τις διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης και τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μηχανής και των επιρροών κατασκευής για την ελαχιστοποίηση των διαστασιολογικών αποκλίσεων.

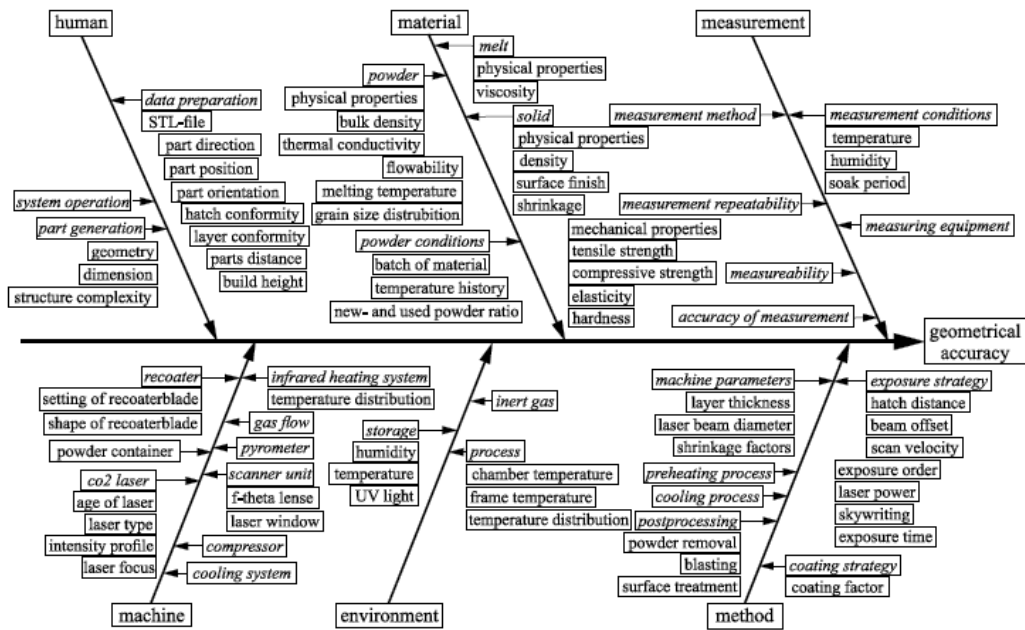
Προκειμένου να επιτραπεί ένας συστηματικός προσδιορισμός και ελαχιστοποίηση των διαστασιολογικών αποκλίσεων, οι Lieneke et. al [45] πρότειναν μια νέα μέθοδο που εκτελείται σε δύο στάδια:

- Πρώτον, αναπτύσσεται μια μέθοδος που επιτρέπει μια συστηματική ανάπτυξη διαστασιολογικών ανοχών υπό κανονικές συνθήκες εργαστηρίου για τις διαδικασίες κατασκευής προσθέτων. Οι κανονικές συνθήκες εργαστηρίου περιγράφουν τη χρήση των συχνά εφαρμοζόμενων παραμέτρων, των υλικών και των ρυθμίσεων του μηχανήματος.
- Δεύτερον, η ανάπτυξη της μεθόδου ασχολείται με την ελαχιστοποίηση των διαστασιολογικών αποκλίσεων με την εύρεση βελτιστοποιημένων παραμέτρων διαδικασίας και επιρροών κατασκευής.

Μέσα στη μέθοδο, εξετάστηκαν διάφορες σημαντικές πτυχές στον προσδιορισμό των ανοχών. Η ανάπτυξη της μεθόδου ξεκίνησε με τον εντοπισμό σημαντικών παραγόντων στη γεωμετρική ακρίβεια των κατασκευασμένων μοντέλων από μια βιβλιογραφική έρευνα [19-44] και από ένα workshop με ειδικούς από τον χώρο της επιστήμης και της βιομηχανίας. Εκτός από τον προσδιορισμό σημαντικών παραγόντων, σχεδιάστηκε ένα δείγμα δοκιμής, το οποίο επιτρέπει την εξέταση όλων των επιλεγμένων παραγόντων. Για τον προσδιορισμό των διαστάσεων αποκλίσεων, αναπτύχθηκε μια κατάλληλη μέθοδος μέτρησης, που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

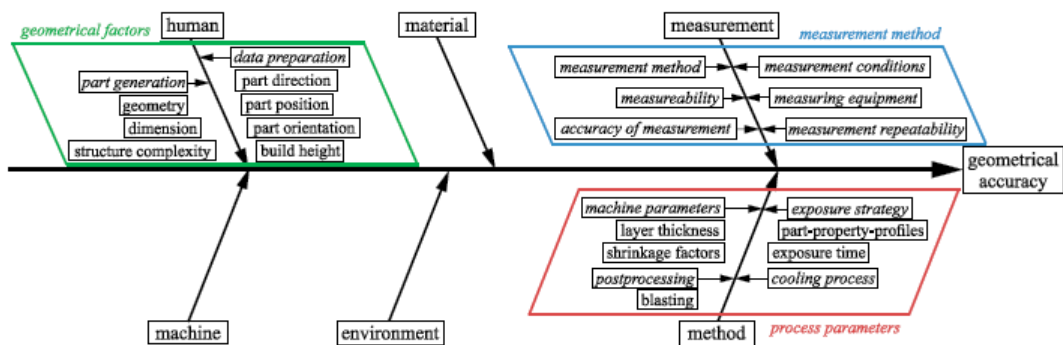
3.3.1.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Λόγω των αρχών κατασκευής της τρισδιάστατης εκτύπωσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη νέοι παράγοντες και επιδράσεις στη γεωμετρική ακρίβεια. Για παράδειγμα, σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν στην ακρίβεια κομματιών που κατασκευάζονται μέσω του Laser Sintering παρουσιάζονται σε σχέση με ένα διάγραμμα Ishikawa στο Σχήμα 33.



Σχήμα 33. Διάγραμμα Ishikawa για Laser Sintering [45]

Λόγω του μεγάλου αριθμού παραγόντων, πραγματοποιήθηκε μια επιλογή από τις πιο σχετικές επιρροές για την πειραματική έρευνα. Ειδικοί τόσο από την επιστήμη όσο και από τη βιομηχανία, καθόρισαν την επιλογή των σχετικών επιρροών και τον καθορισμό των ορίων παραλλαγής. Οι επιλεγμένοι παράγοντες για την πειραματική δοκιμή φαίνονται στο Σχήμα 34. Οι υπόλοιποι παράγοντες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε γεωμετρικούς παράγοντες, παραμέτρους διαδικασίας και επιρροές μέτρησης. Οι επιπτώσεις του υλικού, της μηχανής και του περιβάλλοντος διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο σταθερές. Για παράδειγμα, τα δοκιμαστικά δείγματα με λείζερ είναι κατασκευασμένα από μία παρτίδα υλικού. Τα υλικά για τις εξεταζόμενες διαδικασίες παρατίθενται στον Πίνακα 1. Επιπλέον, δεν προγραμματίζονται αλλαγές στα μηχανικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα του μηχανήματος.

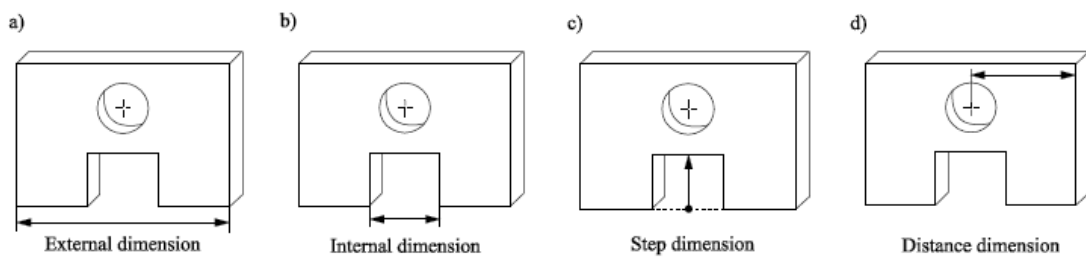


Σχήμα 34. Επιλεγμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την πειραματική έρευνα του Laser Sintering [45]

Μέθοδος	Fused Deposition Modeling	Laser Sintering	Laser Melting
Υλικό	ABS-M30	PA2200	Stainless steel 316L

Πίνακας 1. Υλικά για τη διερεύνηση των διαστασιολογικών αποκλίσεων κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση

Στην επόμενη ενότητα, οι παράγοντες που επηρεάζουν περιγράφονται με περισσότερες λεπτομέρειες. Οι γεωμετρικοί παράγοντες περιγράφουν το σχήμα και τη χωρική θέση των εξαρτημάτων στον θάλαμο κατασκευής. Αυτοί οι παράγοντες ισχύουν για όλες τις εξεταζόμενες διαδικασίες. Για κάθε παραλλαγή παραγόντων καθορίστηκαν όρια και βήματα. Επειδή οι πρώτες έρευνες επικεντρώνονται στις διαστασιολογικές αποκλίσεις, πρέπει να ληφθούν υπόψη τέσσερις ομάδες διαστάσεων - εξωτερική, εσωτερική, βήμα και απόσταση (Σχήμα 35). Οι πρώτες πειραματικές έρευνες επικεντρώνονται σε εξωτερικές διαστάσεις.



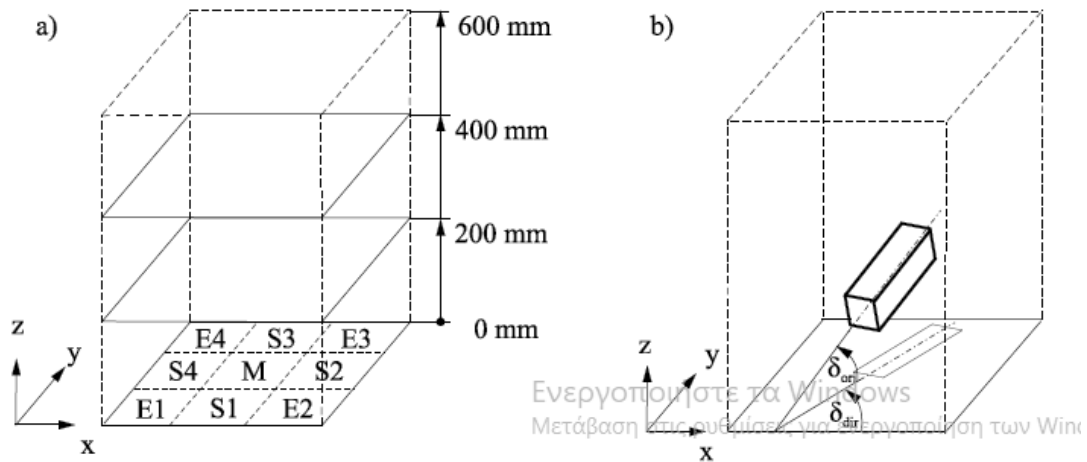
Σχήμα 35. Εξωτερική (a), εσωτερική (b), βήμα (c) και διάσταση απόστασης (d) [45]

Σε αυτήν την περίπτωση, μια διάσταση ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο αντίθετων σημείων και μια διαστασιολογική ανοχή ελέγχεται από μια μέτρηση δύο σημείων. Η εξέταση των διαστασιολογικών αποκλίσεων απαιτεί τη διερεύνηση διαφόρων ονομαστικών διαστάσεων. Για το σκοπό αυτό, οι ονομαστικές διαστάσεις προέρχονται από το DIN EN ISO 286-1. Αυτό το γερμανικό πρότυπο περιγράφει το σύστημα ISO για ανοχή σε γραμμικές διαστάσεις και καθορίζει τις βασικές αρχές ανοχών, αποκλίσεων και προσαρμογών. Το DIN EN ISO 286-1 επιτρέπει επίσης τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών διεργασιών κατασκευής που υπόκεινται στις επιτευξίμες ανοχές τους.

Αν και ο ορισμός είναι ανεξάρτητος από τη γεωμετρία, πρέπει να ληφθούν υπόψη διαφορετικές γεωμετρίες. Σύμφωνα με τον Adam [46], τα γεωμετρικά βασικά στοιχεία χωρίζονται σε μη, απλά και διπλά καμπύλα στοιχεία. Αυτοί οι ορισμοί περιγράφουν για παράδειγμα κυβοειδή, κυλίνδρους και σφαίρες. Αυτή η ταξινόμηση είναι σκόπιμη και για τον προσδιορισμό των διαστασιολογικών αποκλίσεων. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα της δομής επηρεάζει τη γεωμετρική ακρίβεια. Οι πολυπλοκότητες ποικίλλουν μεταξύ απλών γεωμετριών πλήρους υλικού, π.χ. κυβοειδή και πολύπλοκες γεωμετρίες, π.χ. δομές δικτυωτού πλέγματος. Στο πλαίσιο των πρώτων ερευνών, κατασκευάζονται απλά υλικά και μη καμπύλα στοιχεία.

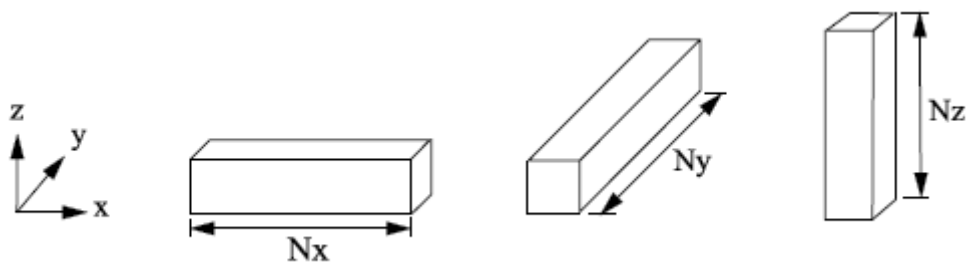
Εκτός από το σχήμα του εξαρτήματος, επίσης η χωρική θέση των εξαρτημάτων στον θάλαμο κατασκευής επηρεάζει τη γεωμετρική ακρίβεια. Επειδή προκύπτουν διαφορετικά διαφορικά θερμοκρασίας και περιοχές θερμοκρασίας στο σώμα της σκόνης [47], η θέση των εξαρτημάτων επηρεάζει τη γεωμετρική ακρίβεια στο Laser Sintering. Επομένως, είναι απαραίτητη η εκτίμηση της θέσης στο επίπεδο x-y καθώς και στην κατεύθυνση του άξονα z. Ως εκ τούτου, ορίστηκαν εννέα διαφορετικές θέσεις

στο επίπεδο x-y και τρεις θέσεις κατά μήκος του άξονα z (Σχήμα 33α). Στο επίπεδο x-y, έχουν επιλεγεί η μέση (M), οι τέσσερις πλευρές (S) και οι τέσσερις ακμές (E). Κατά μήκος του άξονα z οι θέσεις μεταξύ 0 - 200 mm, 200 - 400 mm και 400 - 600 mm διερευνώνται στο Laser Sintering.



Σχήμα 36. Καθορισμένες χωρικές θέσεις για Laser Sintering (a) και σχηματική αναπαράσταση προσανατολισμού και κατεύθυνσης (b) [45]

Επιπλέον, η βιβλιογραφία αποδίδει σημασία στον προσανατολισμό και την κατεύθυνση των συνιστωσών σχετικά με τις εμφανιζόμενες αποκλίσεις [48, 49]. Επομένως, αυτοί οι γεωμετρικοί παράγοντες πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη. Σύμφωνα με τον Adam [46], ο προσανατολισμός ορίζεται ως η πολική γωνία (δ_{ori}) μεταξύ της επιφάνειας του εξαρτήματος και του επιπέδου x-y. Προκειμένου να επιτευχθεί μια σαφής περιγραφή για τη χωρική ευθυγράμμιση των συστατικών, απαιτείται ένας περαιτέρω ορισμός για την κατεύθυνση. Η κατεύθυνση καθορίζεται ως η γωνία αζιμουθίου (δ_{dir}) μεταξύ της προβολής του εξαρτήματος στο επίπεδο x-y και του άξονα x (Σχήμα 36β) [46]. Για τις πειραματικές έρευνες, επιλέχθηκαν συνδυασμοί προσανατολισμού και κατεύθυνσης για τους οποίους οι ονομαστικές διαστάσεις τρέχουν παράλληλα με τον άξονα x-, y-, z, όπως φαίνεται στο Σχήμα 37.



Σχήμα 37. Χωρική ευθυγράμμιση - Ονομαστικές διαστάσεις κατά μήκος του άξονα x, y και z [45]

Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι παράμετροι της διαδικασίας και οι επιρροές κατασκευής για το Laser Sintering, το Fused Deposition Modeling και το Laser Melting προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι γεωμετρικές αποκλίσεις. Για το Laser Sintering

επιλέχθηκαν από τους Lieneke et al. [45] διαφορετικά πάχη στρώματος, παράγοντες συρρίκνωσης, πυκνότητες συσκευασίας, χρόνοι ψύξης εντός του μηχανήματος, θερμοκρασίες θαλάμου αφαίρεσης και στρατηγικές αμμοβολής. Οι πειραματικές έρευνες θα προσδιορίσουν την επίδρασή τους στη γεωμετρική ακρίβεια.

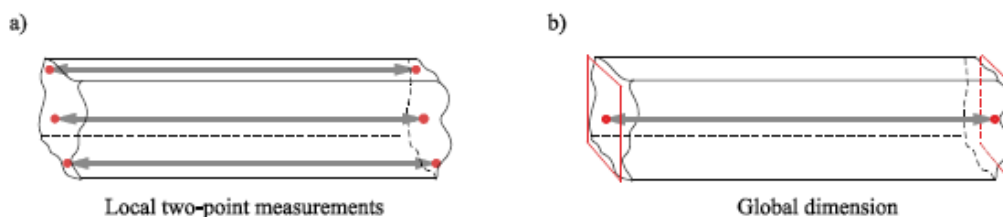
3.3.1.2. Διερεύνηση ποιότητας μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται πειραματικές έρευνες διεξήχθησαν από τους Lieneke et al. [45] για τις μεθόδους Fused Deposition Modeling (FDM), το Laser Sintering και το Laser Melting. Οι έρευνες πρέπει να προσδιορίζουν τα αίτια και τα αποτελέσματα των διαστασιολογικών αποκλίσεων. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκαν απλά κυβίδια πλήρους υλικού με σταθερή επιφάνεια διατομής 10 επί 10 mm και διαφορετικές ονομαστικές διαστάσεις (Πίνακας 2) για τη διερεύνηση εξωτερικών διαστάσεων. Οι ονομαστικές διαστάσεις ευθυγραμμίστηκαν κατά μήκος του άξονα x-, y- και z (Σχήμα 37). Μέσα στις πρώτες πειραματικές έρευνες, δημιουργήθηκαν τρία δείγματα για κάθε ονομαστική διάσταση, ευθυγράμμιση και θέση. Στη συνέχεια, προβλέπεται μια διαδοχική αλλαγή της ομάδας διαστάσεων των γεωμετρικών παραγόντων, της γεωμετρίας και της πολυπλοκότητας της δομής.

Ονομαστική διάσταση [mm]												
3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400	500

Πίνακας 2. Ονομαστικές διαστάσεις που προέρχονται από το DIN EN ISO 286-1

Για να καταστεί δυνατή η ομοιόμορφη και επαναλήψιμη διαπίστωση των εμφανιζόμενων αποκλίσεων, δημιουργήθηκε μια μέθοδος μέτρησης. Η πραγματική διάσταση μετριέται από ένα μικρόμετρο με στοπ καστανίας. Το όργανο μέτρησης συμφωνεί με το γερμανικό πρότυπο DIN 863-1 και έχει ακρίβεια 0,01 mm. Σε αυτήν την περίπτωση, καταγράφονται διαγώνια τρεις τοπικές μετρήσεις δύο σημείων στα άκρα του δείγματος δοκιμής (Σχήμα 38α). Η θέση των σημείων μέτρησης καθορίστηκε για κάθε ευθυγράμμιση ώστε να επιτρέπει την επαναληψιμότητα της μέτρησης. Από αυτές τις μετρούμενες τιμές, μια γενικευμένη διάσταση αξιολογείται ως μέγιστη διάσταση για εξωτερική διάσταση κάθε δείγματος (Σχήμα 38β). Μετά από αυτό το βήμα, η διαστασιολογική απόκλιση υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της πραγματικής παγκόσμιας διάστασης και της ονομαστικής διάστασης.



Σχήμα 38. Μέτρηση δειγμάτων δοκιμής - Τοπικές μετρήσεις δύο σημείων (a) και αξιολογημένη γενικευμένη (global) διάσταση (b) [45]

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με σταθερές τυπικές παραμέτρους διαδικασίας, οι οποίες δίδονται από τους κατασκευαστές μηχανημάτων. Οι οριακές συνθήκες φαίνονται στον Πίνακα 3. Τα δείγματα δοκιμής από το Laser Sintering δέχθηκαν επεξεργασία (blasting) μετά την κατασκευή για να αφαιρεθεί η μη λιωμένη σκόνη. Το blasting πραγματοποιήθηκε με πίεση 4,0 bar και απόσταση περίπου 300 mm μεταξύ του ακροφυσίου και του δείγματος. Η διάρκεια του blasting ήταν 300 δευτερόλεπτα. Ένας πλευρικός κόφτης αφαίρεσε το στερεό υλικό στήριξης στα FDM και LM μηχανικά όσο το δυνατόν περισσότερο.

Boundary condition	FDM (Insight 9.1)	LS (PPP Balance)	LM (Standard)
Machine	Fortus 400mc	EOSINT P396	SLM 280HL
Material	ABS-M30	PA2200	Stainless steel 316L
Layer thickness	0.178 mm	0.120 mm	0.050 mm
Shrinkage factors (x/y/z)	0.55/ 0.55/ 0.59 %	3.2/ 3.2/ 2.2-1.6 %	0.223/ 0.223/ 0.223 %

Πίνακας 3. Οριακές συνθήκες κατά την κατασκευή για FDM, LS και LM

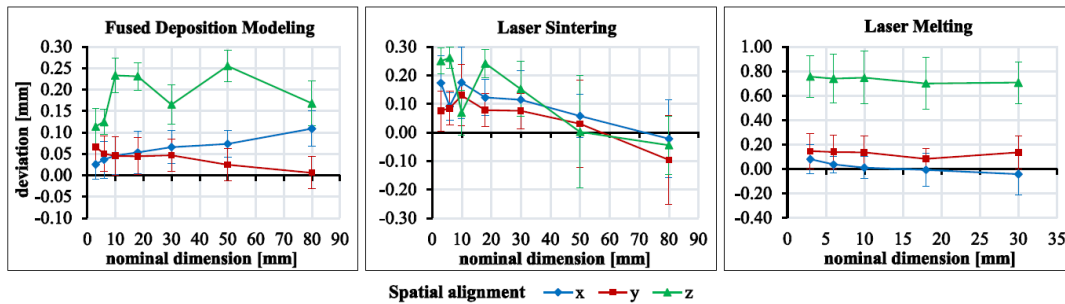
Τα διαγράμματα στο Σχήμα 39 δείχνουν τη διακύμανση της μέσης τιμής σε συνδυασμό με τη τυπική απόκλιση που εξαρτάται από την ονομαστική διάσταση και την ευθυγράμμιση για τις εξεταζόμενες διαδικασίες. Τα αποτελέσματα είναι κατά μέσο όρο σε σχέση με τις θέσεις που ερευνηθήκαν. Όσον αφορά τις εμφανιζόμενες αποκλίσεις, είναι σημαντικό να δοθεί προσοχή στις διαφορετικές κλίμακες άξονα για τις εξεταζόμενες διαδικασίες.

Για τη διαδικασία FDM, καθίσταται προφανές ότι όλα τα δείγματα δοκιμής παρουσιάζουν διαστάσεις μεγαλύτερες από τις ονομαστικές ανεξάρτητα από τη χωρική τους ευθυγράμμιση. Στον άξονα x, η θετική απόκλιση προκύπτει με την αύξηση της ονομαστικής διάστασης. Σε αντίθεση με αυτό, η θετική απόκλιση στον άξονα y μειώνεται. Τα δείγματα δοκιμής, τα οποία ευθυγραμμίζονται κατά μήκος του άξονα z, δείχνουν μια ακανόνιστη καμπύλη ανάλογα με την ονομαστική διάσταση.

Στο Laser Sintering, παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές για μικρές ονομαστικές διαστάσεις ανεξάρτητα από τη χωρική ευθυγράμμιση. Όλες οι ευθυγραμμίσεις δείχνουν μια φθίνουσα διαστασιολογική απόκλιση με αυξανόμενη ονομαστική διάσταση. Η μέση απόκλιση του δείγματος δοκιμής με ονομαστική διάσταση 80,0 mm είναι αρνητική. Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται μεγάλη τυπική απόκλιση για τις ονομαστικές διαστάσεις 50,0 και 80,0 mm. Αυτή η μεγάλη τυπική απόκλιση προκαλείται από την ισχυρή επίδραση θέσης των συντηγμένων με λέιζερ εξαρτημάτων. Αυτή η επιρροή γίνεται εμφανής στο Σχήμα 40. Πρέπει να ληφθούν υπόψιν και άλλες επιρροές για να δικαιολογηθεί η εμφάνιση αποκλίσεων. Για παράδειγμα, οι παράγοντες συρρίκνωσης έχουν τεράστια σημασία στις διαστασιολογικές αποκλίσεις που καταγράφονται. Αυτοί οι παράγοντες καθορίζονται συνήθως για μια μέση ονομαστική διάσταση [50] και μπορούν επίσης να ευθύνονται για τις θετικές και αρνητικές αποκλίσεις που εξαρτώνται από την ονομαστική διάσταση.

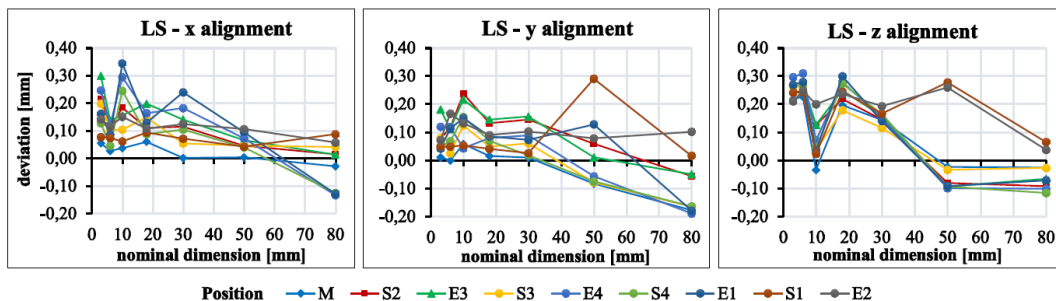
Τα δείγματα από το Laser Sintering στον άξονα x δείχνουν μικρές αποκλίσεις. Στον άξονα y εμφανίζουν μια σταθερή θετική απόκλιση περίπου 0,15 mm. Στον άξονα z δείχνουν μεγάλη θετική απόκλιση περίπου 0,7 mm. Τα υπολείμματα στήριξης στις περιοχές μέτρησης προκαλούν κυρίως αυτό το υπερβολικό μέγεθος στον

προσανατολισμό z. Επιπλέον, το λουτρό τήξης διεισδύει βαθύτερα του ενός στρώματος στην σκόνη του υλικού δημιουργώντας ένα ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ των στρώματων. Από τη μία πλευρά αυτό είναι χρήσιμο για τα περισσότερα στρώματα έτσι ώστε να διασφαλίζεται ένας δεσμός μεταξύ του πραγματικού στρώματος τμήματος και του στρώματος παρακάτω. Από την άλλη πλευρά, το πρώτο στρώμα δεν έχει άλλο στρώμα παρακάτω, έτσι το λουτρό τήξης δεσμεύει απροσδιόριστα σωματίδια σκόνης. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν υπερμεγέθη αποτελέσματα [46].



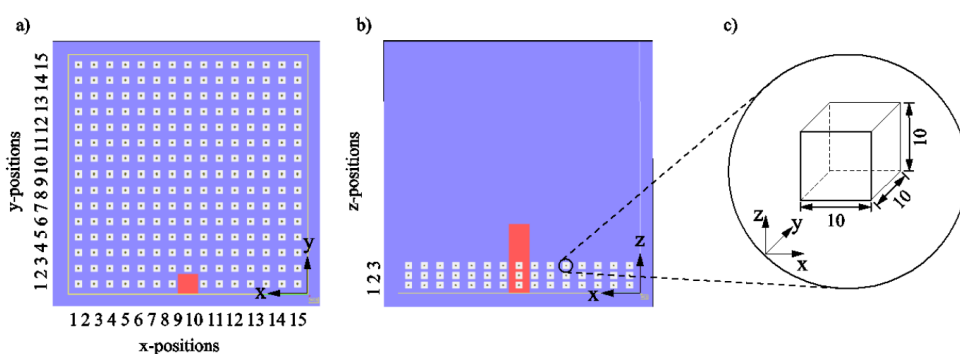
Σχήμα 36. Μέσες τιμές αποκλίσεων σε σχέση με την επιλεγμένη ονομαστική διάσταση και ευθυγράμμιση των δοκιμίων [45]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θέση των δειγμάτων δοκιμής έχει μεγάλη επίδραση στη γεωμετρική ακρίβεια. Σε αυτό το πλαίσιο, ερευνήθηκαν εννέα διαφορετικές θέσεις (Σχήμα 36) στο επίπεδο x-y. Η πρώτη πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε θέσεις z μεταξύ 0,0 mm και 200,0 mm για Laser Sintering. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 40. Είναι προφανές ότι η επιλεγμένη θέση επηρεάζει την διαστασιολογική απόκλιση. Ωστόσο, δεν είναι εμφανής καμία σαφής κανονικότητα μεταξύ θέσης και απόκλισης. Αυτό συμβαδίζει με τα αποτελέσματα του Adam [46]. Τα αποτελέσματα για την ευθυγράμμιση z δείχνουν μια χαρακτηριστική ακανόνιστη καμπύλη. Αυτές οι καμπύλες προκαλούνται από την ανάλυση διαφορετικών ονομαστικών διαστάσεων κατά μήκος του άξονα z. Ειδικά, οι ονομαστικές διαστάσεις, που δεν είναι πολλαπλάσιο του πάχους του στρώματος, περιλαμβάνουν μεγαλύτερες αποκλίσεις. Γενικά, η μεσαία θέση (Σχήμα 36) δείχνει την καλύτερη μέση γεωμετρική ακρίβεια.



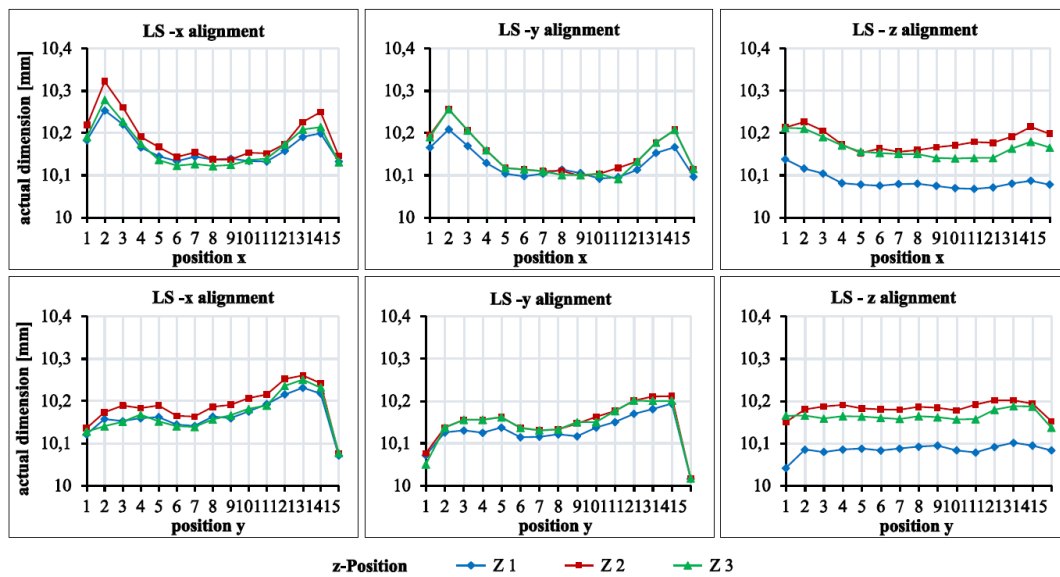
Σχήμα 40. Μέση απόκλιση διαστάσεων σε σχέση με την ευθυγράμμιση, τη θέση και την ονομαστική διάσταση των δειγμάτων δοκιμής [45]

Ο δεύτερος στόχος είναι η διερεύνηση των παραμέτρων του μηχανήματος και των επιρροών της κατασκευής. Για παράδειγμα, η θέση στο επίπεδο x-y διερευνήθηκε με μια μήτρα λεπτομερούς θέσεων (Σχήμα 41α) για τον προσδιορισμό της επίδρασης διαφορετικών περιοχών θερμοκρασίας στο επίπεδο x-y σύμφωνα με τις προκύπτουσες αποκλίσεις. Μέσα στο επίπεδο x-y, κατασκευάστηκαν 224 κύβοι (Σχήμα 41c) με ονομαστική διάσταση 10 x 10 x 10 mm σε τρεις διαφορετικές θέσεις-z κοντά στην πλατφόρμα κατασκευής (Σχήμα 41α / β). Η πειραματική έρευνα πραγματοποιήθηκε σε ένα EOSINT P396 με τις ίδιες οριακές συνθήκες που αναφέρονται στον Πίνακα 3. Μετά την κατασκευή, μετρήθηκε η πραγματική γενικευμένη διάσταση κάθε κύβου κατά μήκος του άξονα x-, y και z με ένα μικρόμετρο.



Σχήμα 41. Δημιουργία διάταξης εργασίας για τη διερεύνηση της επίδρασης θέσης στη γεωμετρική ακρίβεια με κύβους (c) - επίπεδο x-y με 15 θέσεις για κάθε άξονα (a) και τρεις θέσεις z (b) [45]

Τα αποτελέσματα για τις διαφορετικές θέσεις φαίνονται στο Σχήμα 42. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την πραγματική διάσταση για τις 15 θεωρούμενες θέσεις στην ευθυγράμμιση x και y. Εμφανίζεται ότι οι διαστασιολογικές αποκλίσεις αυξάνονται στις οριακές περιοχές κατά μήκος του άξονα x. Εξαιρέσεις αποτελούν οι θέσεις 1 και 15, οι οποίες δείχνουν απότομη μείωση της πραγματικής διάστασης σε σύγκριση με τις παρακείμενες θέσεις τους. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι θέσεις 1 και 15 είναι κοντά στις άκρες και τις πλευρές. Μόνο οι πραγματικές διαστάσεις κατά μήκος του άξονα z επηρεάζονται από τις διαφορετικές θέσεις z. Αντίθετα, η θέση-z στο εξεταζόμενο εύρος δεν εμφανίζει σημαντική επίδραση στην πραγματική διάσταση της ευθυγράμμισης x και y. Λαμβάνοντας υπόψη τις θέσεις z, πρέπει να σημειωθεί ότι οι θέσεις z δεν είναι επαρκείς επειδή τα δείγματα δοκιμής κατασκευάζονταν στην συνοριακή περιοχή του άξονα z. Σε άλλες θέσεις-z, είναι δυνατή διαφορετική συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα κατά μήκος των θέσεων x υπογραμμίζουν ότι εμφανίζονται σταθερές αποκλίσεις μεταξύ των θέσεων 5 και 11. Τα αποτελέσματα κατά μήκος των θέσεων y δείχνουν ελαφρώς αυξανόμενες αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση x και y με την αυξανόμενη θέση κατά μήκος του άξονα y. Οι πραγματικές διαστάσεις στην ευθυγράμμιση z επηρεάζονται από τη θέση κατά μήκος του άξονα z όπως περιγράφεται και για τις θέσεις x. Εδώ, γίνεται προφανές ότι οι πραγματικές διαστάσεις αυξάνονται όταν η θέση z αυξάνεται στα εξεταζόμενα όρια.



Σχήμα 42. Πραγματικές διαστάσεις x-, y- και z των κατασκευασμένων κύβων σε σχέση με τη θέση τους στο επίπεδο x-y και κατά μήκος του άξονα z [45]

Γενικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν μια ομοιογενή περιοχή σχετικά με την πραγματική διάσταση μεταξύ της θέσης 5 και 11 στην κατεύθυνση x και μεταξύ της θέσης 3 και 10 στην κατεύθυνση y, η οποία πιθανώς σχετίζεται με το προφίλ θερμοκρασίας στο επίπεδο x-y [51]. Η καθορισμένη περιοχή θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό άλλων επιλεγμένων επιδράσεων της διαδικασίας στη γεωμετρική ακρίβεια. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την εξέταση άλλων παραγόντων διεργασίας και επιρροών στην κατασκευή χωρίς μεγάλη επίδραση στην επιλεγμένη θέση.

3.3.1.3. Σύγκριση με συμβατικές μεθόδους παραγωγής

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 39 χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση των διαδικασιών τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατηγορίες ISO Tolerance (IT), οι οποίες ορίζονται στο DIN EN ISO 286-1 (Πίνακας 4) Οι ανοχές ISO ορίζουν το μέγεθος ανοχής και τη θέση της ζώνης ανοχής σε σχέση με τη μηδενική γραμμή. Το μέγεθος των ανοχών αντιπροσωπεύεται από τους αριθμούς IT (1... 18) και τη θέση της ζώνης ανοχής με διαφορετικά γράμματα (A... ZC). Οι υψηλότερες τιμές αντιπροσωπεύουν πιο μεγάλες αποκλίσεις. Αυτό το σύστημα επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ των νέων και των καθιερωμένων διαδικασιών παραγωγής όσων αφορά τις επιτεύξιμες ανοχές τους. Μέσω της ταξινόμησης, καθίσταται σαφές ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να δηλωθεί υπό τις εξεταζόμενες οριακές συνθήκες με κλάσεις IT 11 έως 16. Οι εξεταζόμενες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτυγχάνουν ανοχές παρόμοιες με τη χύτευση, τη σφυρηλάτηση, τη διάτρηση και την αφαίρεση υλικού μέσω cutting. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παράγωγες ανοχές επηρεάζονται κυρίως από τη χωρική ευθυγράμμιση του δείγματος δοκιμής. Σύμφωνα με αυτή προέκυψαν και οι ανοχές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Τα δείγματα από διαδικασίες που

συμπεριλάμβαναν τήξη μέσω λέιζερ, στην ευθυγράμμιση z δείχνουν ιδιαίτερα υψηλές αποκλίσεις λόγω των υπολειμμάτων στήριξης και του λουτρού τήξης, το οποίο διεισδύει βαθύτερα από το πάχος ενός στρώματος μέσα στο κονίαμα, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως [46]. Αυτό απεικονίζεται από τις κλάσεις IT 15 και 16 για την ευθυγράμμιση z στο Laser Melting (Πίνακας 4). Ωστόσο, το υλικό στήριξης είναι απαραίτητο αν και προκαλεί υψηλή τραχύτητα στην επιφάνεια. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις για λειτουργικές περιοχές, θα πρέπει να προβλεφθεί μεταγενέστερη κατεργασία αυτών των περιοχών για εξαρτήματα με τήξη λέιζερ.

Process	IT-Classes (DIN EN ISO 286-1)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Casting												
Sintering												
Drop forging												
Precision forging												
Cold extrusion												
Milling												
Cutting												
Turning												
Drilling												
Face milling												
Planing												
Stripping												
Circular grinding												
Additive manufact.												
FDM												
LS												
LM												

Πίνακας 4. Επισκόπηση των κλάσεων ακριβείας για διάφορες διαδικασίες κατασκευής σύμφωνα με τον Fritz [52]

3.3.2. Διερεύνηση διαστασιολογικών ανοχών μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγή οδοντωτών τροχών

Στον τομέα της παραγωγής οδοντωτών τροχών χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, η υπάρχουσα βιβλιογραφία δείχνει ότι η κλάση IT 10 είναι δύσκολο να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης [53], επομένως η τρισδιάστατη εκτύπωση οδοντωτών τροχών μπορεί να εφαρμοστεί, όταν η απαιτούμενη ακρίβεια δεν χρειάζεται να είναι κάτω από ISO Tolerance 10 και η επιτρεπόμενη θερμοκρασία και αντοχή είναι δευτερεύουσας σημασίας [54]. Η πειραματική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα στον τομέα της διερεύνησης της διαστασιολογικής ακρίβειας οδοντωτών τροχών με μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι περιορισμένη και παρατίθεται αναλυτικά παρακάτω.

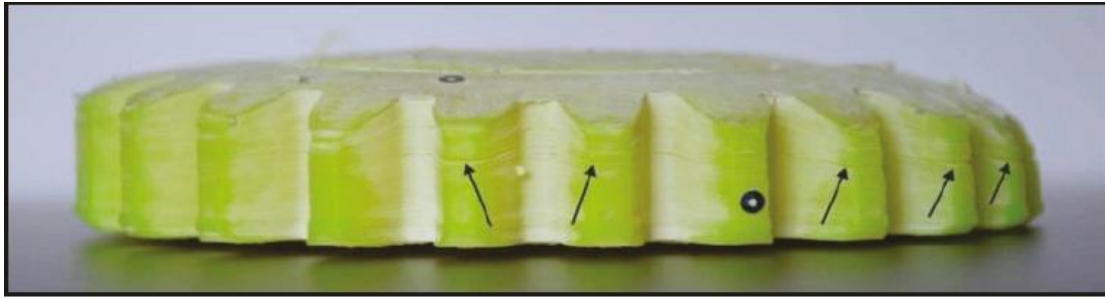
Οι Kotliński et al. [56] αξιολόγησαν την ακρίβεια των πλαστικών γранаζιών από τις μεθόδους Multi Jet Modeling (MJM) και Selective Laser Sintering (SLS). Πιο συγκεκριμένα, στόχος της έρευνας ήταν να εκτιμηθεί η ακρίβεια των οδοντωτών που

έγιναν με μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης σε σχέση με την ακρίβεια των ίδιων χαλύβδινων τροχών που κατασκευάστηκαν με μηχανική κατεργασία. Τα CAD μοντέλα των οδοντωτών τροχών, απαραίτητα για τη χρήση τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, δημιουργήθηκαν με βάση χαλύβδινο γρανάζι χρησιμοποιώντας την τεχνική αντίστροφης μηχανικής. Όπως προαναφέρθηκε, τα πλαστικά γρανάζια εκτυπώθηκαν με δύο μεθόδους 3D Printing: Selective Laser Sintering (SLS) και Multi Jet Modeling (MJM) από πλαστικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μεθόδους. Η γεωμετρία των τροχών μετρήθηκε χρησιμοποιώντας μια μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM). Για τον προσδιορισμό της ακρίβειας κατασκευής, έχουν χρησιμοποιηθεί οι κλάσεις ακρίβειας για τις γεωμετρικές παραμέτρους του οδοντωτού τροχού. Προέκυψε ότι η ακρίβεια κατασκευής και για τις δύο μεθόδους τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι παρόμοια αλλά χειρότερη από ό, τι για τις κλασικές μεθόδους παραγωγής οδοντωτών τροχών. Τα ληφθέντα αποτελέσματα της ακρίβειας των γραναζιών που έγιναν με τις μεθόδους SLS και MJM αντιστοιχούν σε κλάση ακρίβειας IT12.

Οι Μαδονιό et al. [58] ανέλυσαν την επίδραση της κατεύθυνσης εναπόθεσης υλικού στις γεωμετρικές ανοχές των οδοντωτών τροχών. Οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τη διαδικασία FDM. Κατασκευάστηκαν ένα γρανάζι πολυαμιδίου (PA) και δύο ABS. Ένα από τα γρανάζια ABS κατασκευάστηκε σε κατακόρυφη και το άλλο σε οριζόντια θέση, ενώ το γρανάζι από PA κατασκευάστηκε σε οριζόντια θέση (Σχήματα 43-44). Οι αποκλίσεις προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τόσο τον τύπο επαφής όσο και τα οπτικά όργανα μέτρησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στο πάχος των δοντιών και στο πλάτος του χώρου των δοντιών μεταξύ όλων των τροχών. Οι καλύτερες ιδιότητες διαστάσεων επιτυγχάνονται στον οδοντωτό τροχό από ABS τυπωμένο σε οριζόντια θέση, αν και κανένας τροχός δεν μπορούσε να αποδοθεί σε μια κατηγορία IT.



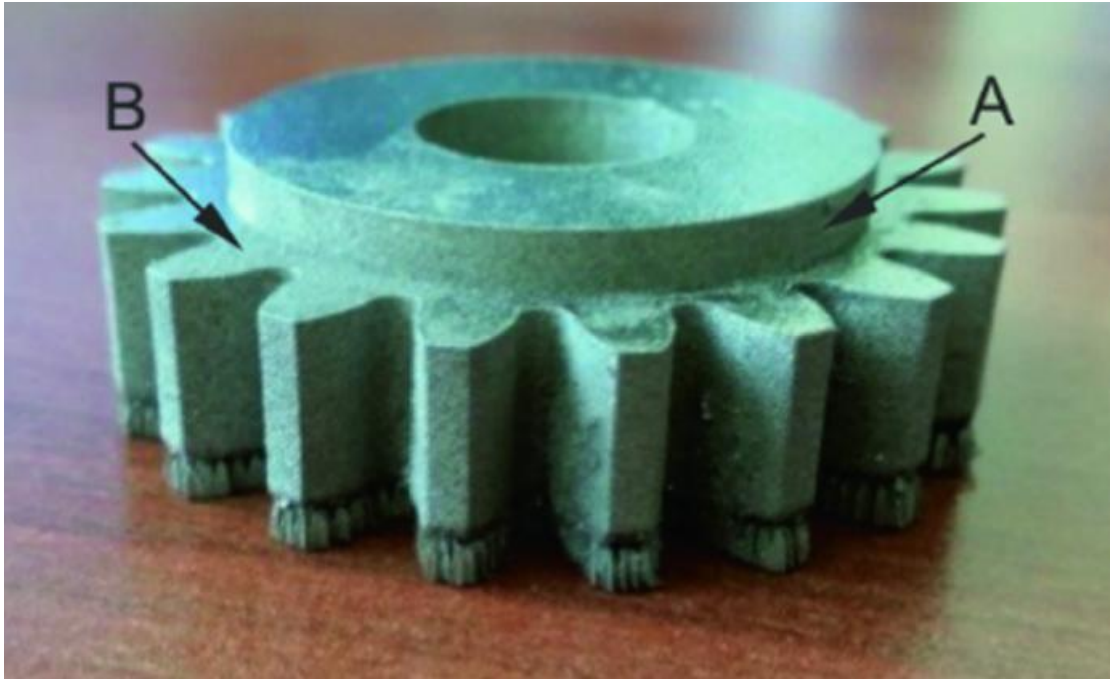
Σχήμα 43. Οδοντωτός τροχός από ABS τυπωμένος οριζόντια (αριστερά), οδοντωτός τροχός από ABS τυπωμένος κατακόρυφα (κέντρο) και οδοντωτός τροχός από PA τυπωμένος οριζόντια (δεξιά) [58]



Σχήμα 44. Γεωμετρικές αποκλίσεις οδοντωτού τροχού από PA [58]

Οι Berger και Maule [55] διερεύνησαν τις δυνατότητες κατασκευής ταχύτατα νέων πολυμερών οδοντωτών τροχών υψηλής μείωσης με χαμηλό κόστος, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παράδειγμα σε αναδιαμορφώσιμα συστήματα χειρισμού (handling systems). Απέδειξαν ότι η κατασκευή πρόσθετων με στερεολιθογραφία μπορεί να επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία κατασκευής οδοντωτών τροχών. Η σμίκρυνση των harmonic drives και cycloid drives μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα και με χαμηλό κόστος, αλλά περιορίζεται από την ακρίβεια της μηχανής που επηρεάζει και την ακρίβεια του τελικού προϊόντος. Παρά την εφαρμογή ενός βρόχου βελτιστοποίησης, ο στόχος της επίτευξης της κλάσης IT 8 δεν μπόρεσε να επιτευχθεί, ωστόσο η κλάση IT 10 η οποία επιτεύχθηκε είναι θετικό αποτέλεσμα, καθώς είναι το πρότυπο για πλαστικά γρανάζια με injection molding. Βέβαια, τα καλούπια injection molding εξοπλισμένα με πρόσθετους αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης επιτρέπουν την κατασκευή πλαστικών γραναζιών σε βαθμό ανοχής έως IT6.

Οι Pisula et al. [60] μπόρεσαν να προσδιορίσουν την ακρίβεια της γεωμετρίας οδοντωτών τροχών που παρήχθησαν μέσω DMLS (Direct Metal Laser Sintering) και δέχθηκαν αποπερατική κατεργασία με αφαιρετικό φινίρισμα. Αξιολόγησαν την παραμόρφωση για τα μοντέλα δοκιμής που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της πρόσθετης ύλης (additive method), μαζί με την επίδραση της μετα-επεξεργασίας, ειδικά όσον αφορά τις γεωμετρικές αποκλίσεις και την παρουσία συρρίκνωσης που επηρεάζει το ποσό του επιτρεπόμενου ορίου που απαιτείται στη σωστή αφαιρετική διαδικασία κατασκευής. Η γεωμετρία του μοντέλου επαληθεύτηκε από το ανέπαφο οπτικό σύστημα ATOS II Triple Scan και μια ειδική μηχανή μέτρησης συντεταγμένων P40 από την Klingelnberg. Οι αναλύσεις αποκάλυψαν ότι το περιθώριο μηχανικής κατεργασίας 0,4 mm στο μοντέλο δοκιμής κατέστησε δυνατή την απόκτηση ακρίβειας ταχύτητας κλάσης 8 σύμφωνα με το DIN 3962 όταν τα διάκενα μεταξύ των δοντιών κατεργάστηκαν χρησιμοποιώντας ένα μη εξειδικευμένο εργαλείο (εργαλείο φρέζας). Στα Σχήματα 45-48 φαίνεται ο οδοντωτός τροχός που παράχθηκε μετά τα διάφορα στάδια κατεργασίας. Στο Σχήμα 49 φαίνεται η διακύμανση των αποκλίσεων του οδοντωτού τροχού για διάφορα επίπεδα περιθωρίου που δοκιμάστηκαν. Ομοίως, οι Lin et al. [57] χρησιμοποίησαν DMLS για να εξοικονομήσουν υλικά και πραγματοποίησαν δευτερεύουσα διαδικασία CNC επιτυγχάνοντας καλή εμπλοκή και υψηλή ακρίβεια για το ζεύγος μετωπικών οδοντωτών τροχών.



Σχήμα 45. Οδοντωτός τροχός που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο DMLS αμέσως μετά την κατασκευή του [60]



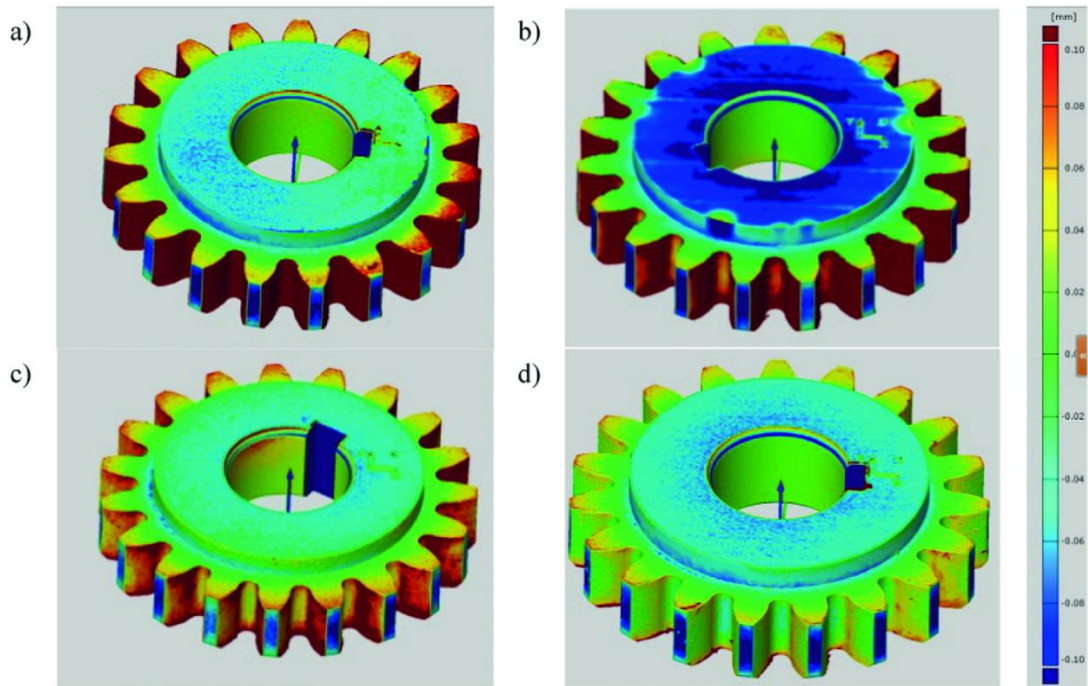
Σχήμα 46. Οδοντωτός τροχός που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο DMLS μετά την αφαίρεση των δομών στήριξης [60]



Σχήμα 47. Οδοντωτός τροχός που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο DMLS μετά τη διαδικασία αμβολής [60]



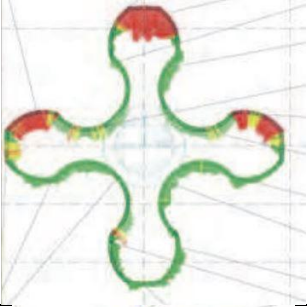
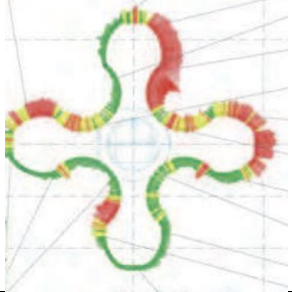
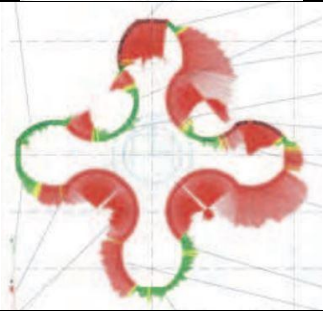
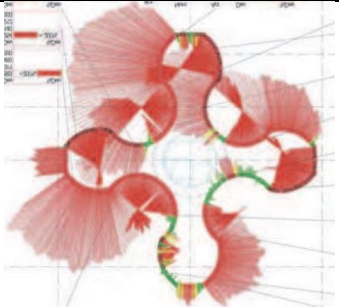
Σχήμα 48. Οδοντωτός τροχός που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο DMLS μετά την αποπερατική μηχανουργική κατεργασία [60]



Σχήμα 49. Χάρτες απόκλισης ακρίβειας για το γρανάτζι που κατασκευάζονται με μια συγκεκριμένη ζώνη ανοχής που παράγεται με αναφορά στο ονομαστικό μοντέλο: a) περιθώριο 0,4 mm. b) περιθώριο 0,3 mm · c) περιθώριο 0,2 mm · d) περιθώριο 0,1 mm. [60]

Για να συγκρίνει τις διαφορετικές μεθόδους AM στο ίδιο σημείο αναφοράς, ο Budzik [1] πραγματοποίησε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ της Layer jetting of liquid photopolymer (Jetting Systems –JS), της Three-Dimensional Printing (3DP), της SLS, της SLA και της FDM. Η υψηλότερη ακρίβεια παρουσιάστηκε από το μοντέλο SLA, ακολουθούμενο από το FDM. Μεγαλύτερα σφάλματα προφίλ μετρήθηκαν σε γρανάτζια κατασκευασμένα από JS και SLS, ενώ το 3DP ήταν η λιγότερο ακριβής μέθοδος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

A/A	Μέθοδος εκτύπωσης	Ακρίβεια εκτύπωσης
1	SLA (SL5170 material)	

2	FDM (ABS material)	
3	JS-PolyJet (Vero material)	
4	SLS (PA 2200 material)	
5	3DP (ZP131 + Z-Max Epoxy material)	

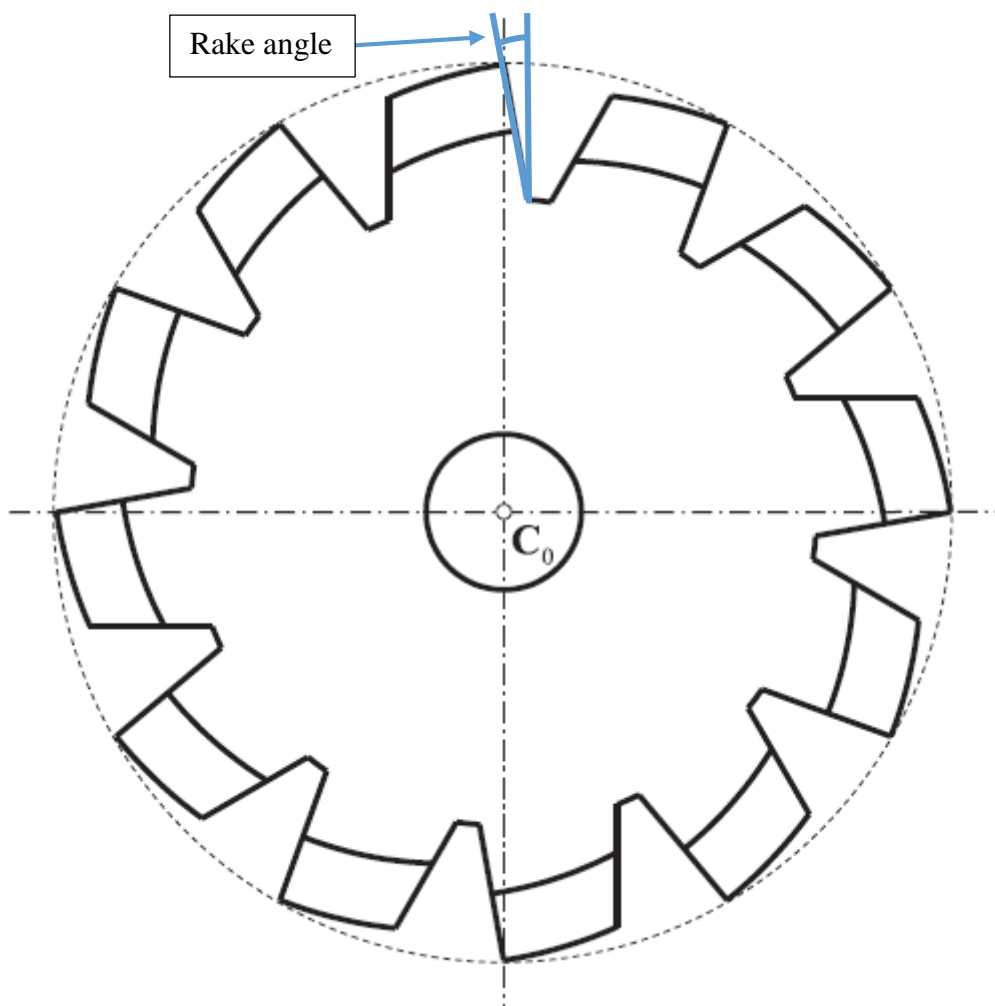
Πίνακας 5. Σύγκριση ακρίβειας διαφορετικών μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης (στοιχεία από [1])

Οι Michal et al. [59] εφάρμοσαν τη μέθοδο DLP για να συγκρίνουν το επίπεδο ακρίβειας ενός οδοντωτού τροχού που κατασκευάζεται με τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς εκτύπωσης, 0, 45 και 90 βαθμούς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καλύτερη ακρίβεια επιτεύχθηκε όταν η εκτύπωση έγινε σε προσανατολισμό 45 μοιρών. Οι Rohit et al. [61] κατασκεύασαν πλαστικά γρανάζια με μεθόδους FDM. Οι διαστάσεις αυτών των πραγματικών στερεών μοντέλων συγκρίθηκαν με τα εικονικά γρανάζια σε περιβάλλον CAD. Παρατηρήθηκε ότι οι διαστάσεις των τροχών ταίριαζαν αρκετά με τις ιδανικές τους τιμές που λαμβάνονται από το λογισμικό.

4. Χύτευση θερμοπλαστικού υλικού υπό πίεση (Injection Molding)

Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς μεταλλικούς, όπως μικρότερο βάρος, καλύτερη ευελιξία σχεδιασμού και βελτιωμένη ικανότητα απορρόφησης κραδασμών και δονήσεων. Επιπλέον, παράγονται εύκολα σε καλούπια έγχυσης θερμοπλαστικών υπό πίεση (injection molding) και συνεπώς μπορούν να παραχθούν μαζικά με χαμηλό κόστος και σε μεγάλους αριθμούς. Ωστόσο, σημαντική πρόσκληση αποτελεί ο σχεδιασμός των κατατομών των τροχών ώστε να αντισταθμίζεται η συρρίκνωση που υφίσταται ο τροχός κατά την διαδικασία της χύτευσης έτσι ώστε το τελικό τεμάχιο να είναι διαστατικά αποδεκτό.

Ο Tsai στην μελέτη του [64] προτείνει μια αλγεβρική μέθοδο υπολογισμού του κατάλληλου μεγέθους του καλουπιού ενός οδοντωτού τροχού με βάση τον πραγματικό ρυθμό συρρίκνωσης του πολυμερούς υλικού ρυθμίζοντας σταδιακά την γωνία κλίσης (rake angle) του κοπτικού εργαλείου στην κατάλληλη (Σχήμα 50). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει μια αποτελεσματική τεχνική για την αντιστάθμιση του ρυθμού συρρίκνωσης των πλαστικών γκραναζιών.



Σχήμα 50: Κοπτικό εργαλείο (hob) καλουπιού με αρνητική γωνία κλίσης (rake angle)

Αποτέλεσμα της μελέτης είναι η αύξηση της ευελιξίας της διαδικασίας κατασκευής με την παράλληλη μείωση του κόστους. Επιπλέον, η προτεινόμενη μέθοδος υλοποιείται εύκολα με χρήση λογισμικού και έτσι παρέχει μια βολική πλατφόρμα για τον αυτοματοποιημένο σχεδιασμό πλαστικών καλουπιών οδοντωτών τροχών.

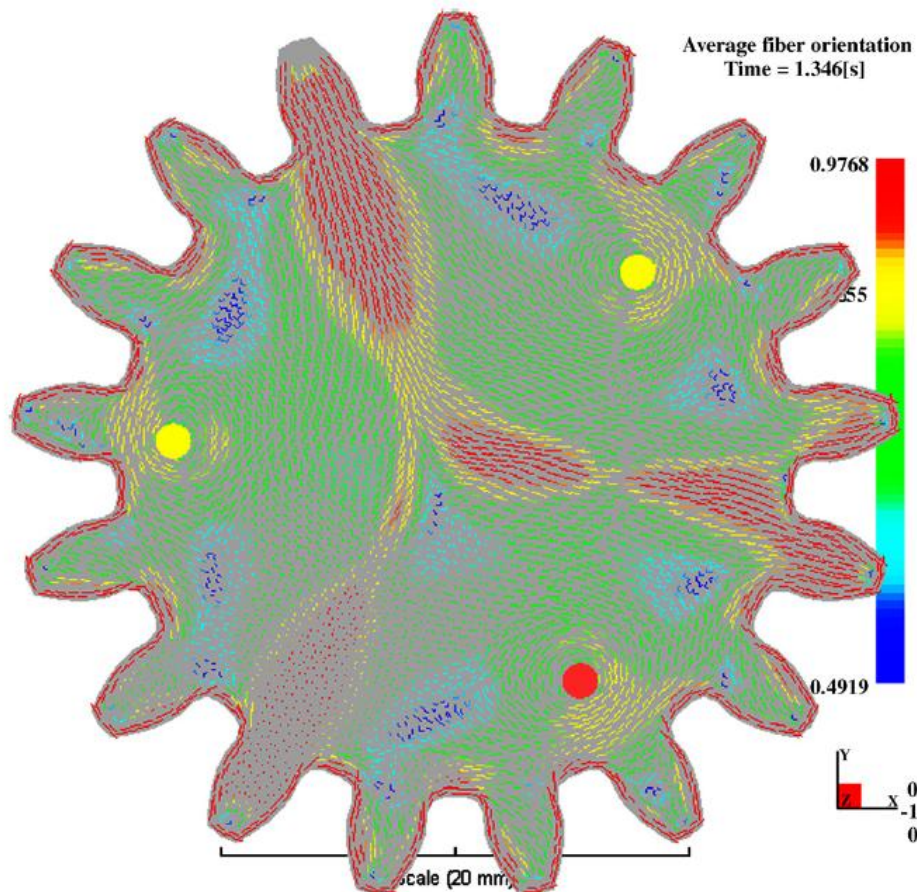
Οι Luscher και Houser [66] μελέτησαν τις σημαντικότερες παραμέτρους αυτής της κατεργασίας, οι οποίες εκτός του ίδιου του υλικού αφορούν την θέση των σημείων έγχυσης στο καλούπι και την πίεση, ως προς τον αντίκτυπο τους στην διαστατική ακρίβεια του παραγόμενου οδοντωτού τροχού, ελέγχοντας σε αυτόν το σφάλμα μετάδοσης (transmission error), τις αποκλίσεις της επιφάνειας των οδόντων κατά την διεύθυνση του πλάτους των (lead error) και το runout. Διαπιστώθηκε ότι οι θέσεις των οπών στο καλούπι έχει μεγάλη επίδραση στην επαναληψιμότητα των παραπάνω σφαλμάτων στον τροχό αν και δεν επηρεάζει το μέγιστη τιμή τους, ενώ με αύξηση της πίεσης ελαττώνονται όλα τα εξεταζόμενα γεωμετρικά σφάλματα.

Οι Williams και Kleiss [65] διερεύνησαν την επίδραση που έχει η προσθήκη λιπαντικού, όπως PTFE, στην υφιστάμενη συρρίκνωση των τροχών κατά την χύτευση και συνεπώς στην ποιότητά τους. Από την έρευνα τους καθίσταται ξεκάθαρο ότι η προσθήκη λιπαντικού σε πολυμερικούς τροχούς, με ενισχύσεις ή χωρίς, μειώνει την συρρίκνωση με αποτέλεσμα έναν μεγαλύτερο οδοντωτό τροχό υψηλότερης διαστασιολογικής ακρίβειας λαμβάνοντας υπ' όψιν διαστάσεις όπως το βήμα των οδόντων, το πάχος τους και τις διαμέτρους ποδός και κεφαλής αλλά και χαρακτηριστικά σύμπλεξης όπως η απόκλιση από την επιθυμητή χάρη κατατομών.

Οι ενισχυμένοι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί που παράγονται με injection molding χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές μετάδοσης ισχύος και κίνησης. Προκειμένου να διευρυνθεί η χρήση ενισχυμένων πολυμερών σε μεταδόσεις κίνησης υψηλής ακριβείας και χαμηλού θορύβου, η ποιότητα των χυτευμένων τροχών πρέπει να αυξηθεί. Δεδομένου ότι η ποιότητα του τροχού επηρεάζεται σημαντικά από τη συμπεριφορά συρρίκνωσης του υλικού, είναι αδήριτη η ανάγκη της κατανόησης της επίδρασης του προσανατολισμού των ινών στη συρρίκνωση του τεμαχίου και ως εκ τούτου στην ποιότητα του. Για να το πετύχουν αυτό οι Senthilvelan και Gnanamoorthy [63] χύτησαν μη ενισχυμένους οδοντωτούς τροχούς με ευθείς μετωπικούς οδόντες από Nylon 6/6 και ενισχυμένους με 20% υαλονύματα μικρού μήκους και μήτρας επίσης Nylon 6/6, ενώ επίσης προσομοίωσαν την χύτευση τους με αριθμητικές μεθόδους σε υπολογιστικό περιβάλλον (Σχήμα 51). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ροής στο καλούπι τα συσχέτισαν με τον πραγματικό προσανατολισμό των ινών αλλά και με μετρήσεις από τους κατασκευασθέντες τροχούς.

Με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου παρατηρήθηκε ο πραγματικός προσανατολισμός των ινών στην κατατομή των οδόντων και τα σημεία έγχυσης. Η ευθυγράμμιση των ινών κατά μήκος της κατατομής των οδόντων περιορίζει τη συρρίκνωση προκαλώντας μία ανισοτροπική συρρίκνωση, η οποία μειώνει σημαντικά την απόκλιση της πραγματικής κατατομής από την εξειλιγμένη.

Η μη ευθυγράμμιση των ινών κατά το πάχος του οδόντος συμβάλλει στην αύξηση του πάχους του, στην αλλοίωση της απαιτούμενης χάρης κατατομών και στην εμφάνιση ακτινικών και εκ περιστροφής αποκλίσεων.



Σχήμα 51: Προβλεπόμενος προσανατολισμός ινών σε εωισμένο με υαλονήματα τροχό πολυμερικής μήτρας Nylon 6/6

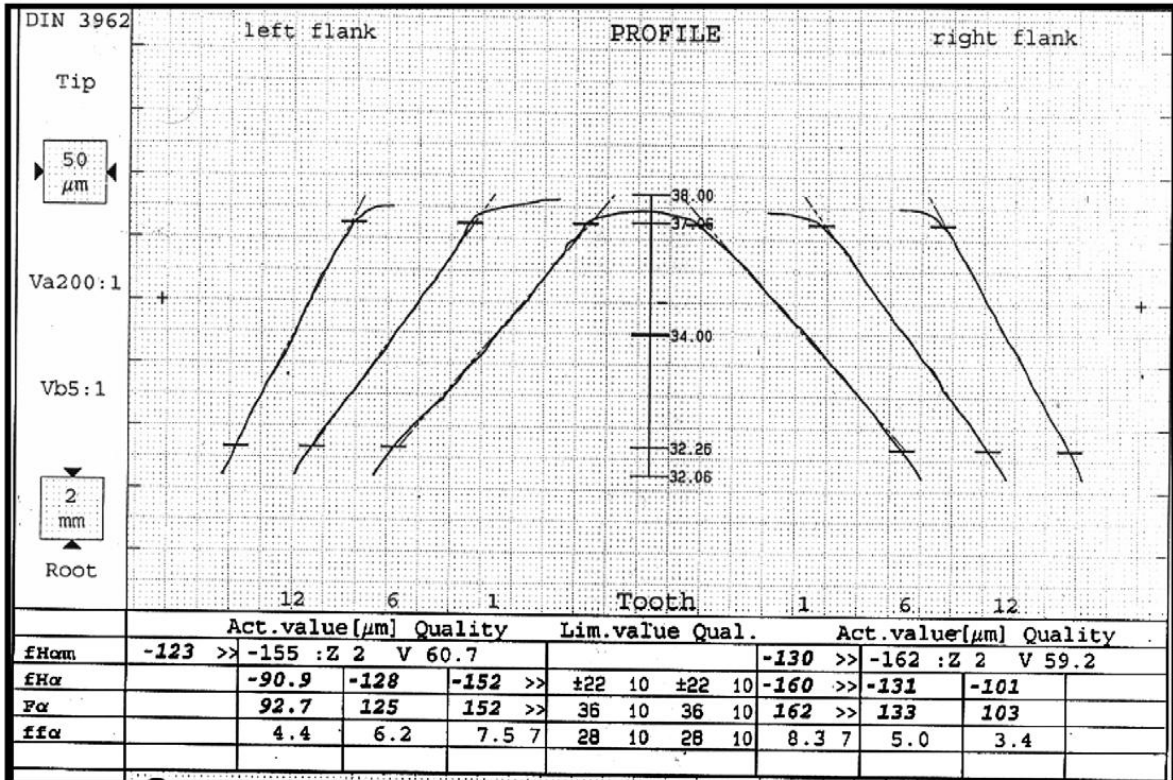
Με αυτήν την μελέτη επιτυγχάνεται ο συσχετισμός του προσανατολισμού των ινών στον ενισχυμένο οδοντωτό τροχό με την ποιότητά του και εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Με την ευθυγράμμιση των ινών κατά μήκος της κατατομής περιορίζεται η συρρίκνωση και ως εκ τούτου η συνολική απόκλιση της κατατομής από την ονομαστική (total profile deviation) παρατηρείται μειωμένη στους ενισχυμένους πολυμερικούς τροχούς. Στην (Σχήμα 52) παρατίθενται οι αποκλίσεις από την ονομαστική εξειλιγμένη των εκατέρωθεν κατατομών τριών οδόντων, όπου παρατηρείται μέγιστη απόκλιση (maximum involute profile deviation F_a) 127.9 μm στους μη ενισχυμένους τροχούς, τιμή που αντιστοιχεί σε κατά DIN ποιότητα αρκετά μεγαλύτερη από 12, ενώ στους ενισχυμένους 42.2 μm , δηλαδή ποιότητα 11 κατά DIN. Ενώ, όμως, με την προσθήκη ινών επιτυγχάνεται σχεδόν τέλεια ταύτιση της κατατομής με την ονομαστική επηρεάζεται αρνητικά οι επιφάνεια των κατατομών με αποτέλεσμα να παρατηρούνται μεγαλύτερα profile form errors 20.6 μm (ποιότητα 10 κατά DIN) έναντι 5.7 μm (ποιότητα 7 κατά DIN) που παρατηρείται στους μη ενισχυμένους τροχούς (Σχήμα 52) λόγω της παρουσίας σκληρών ινών στην επιφάνεια της κατατομής

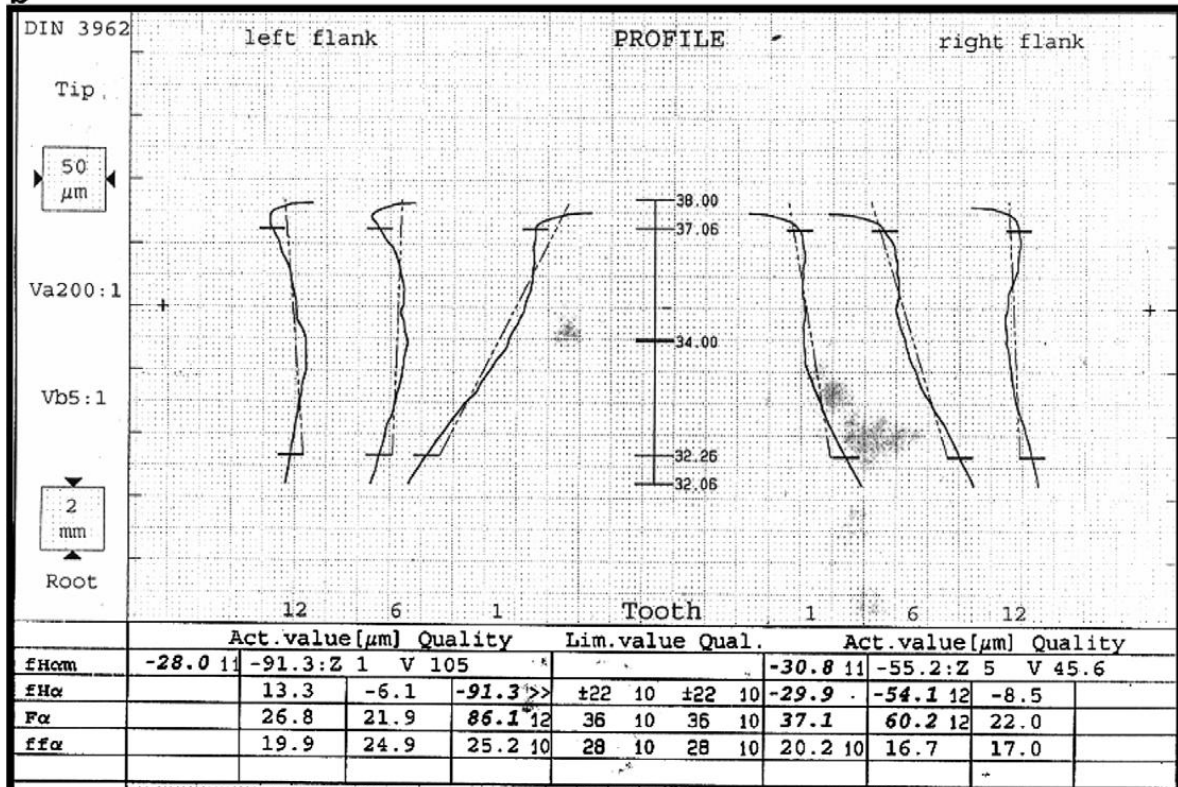
2. Δεδομένου ότι ο προσανατολισμός των ινών συμπίπτει με την διεύθυνση της κατατομής και όχι με του πλάτους του οδόντα, στην αξονική διεύθυνση δεν περιορίζεται η συρρίκνωση. Ως εκ τούτου τα σφάλματα total lead deviation (F_β) και

lead form deviation (ffβ) παρουσιάζουν αύξηση από 28.1 μm (DIN ποιότητα 9) για τους μη ενισχυμένους σε 52 mm (DIN ποιότητα 11) και από 11.5 μm (DIN ποιότητα 9) and 45 μm (DIN ποιότητα 12), αντίστοιχα (Σχήμα 53).

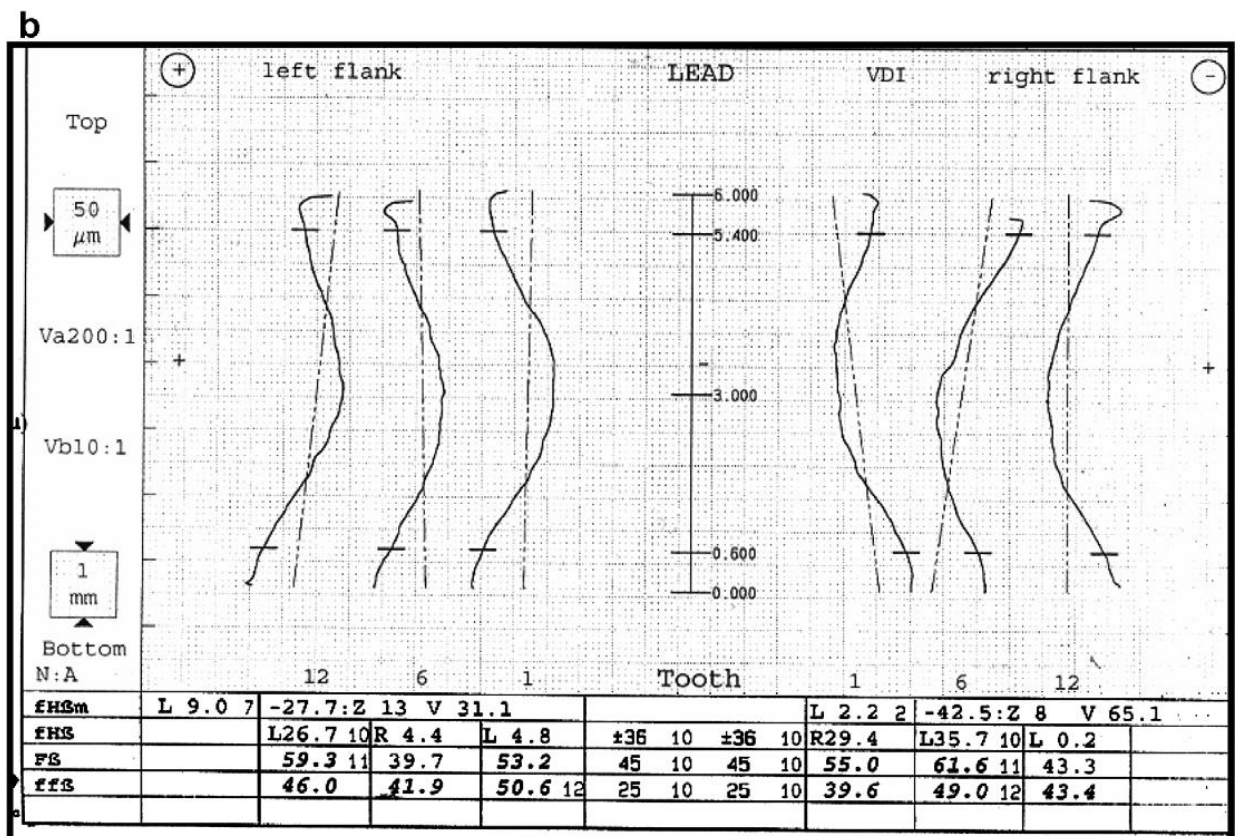
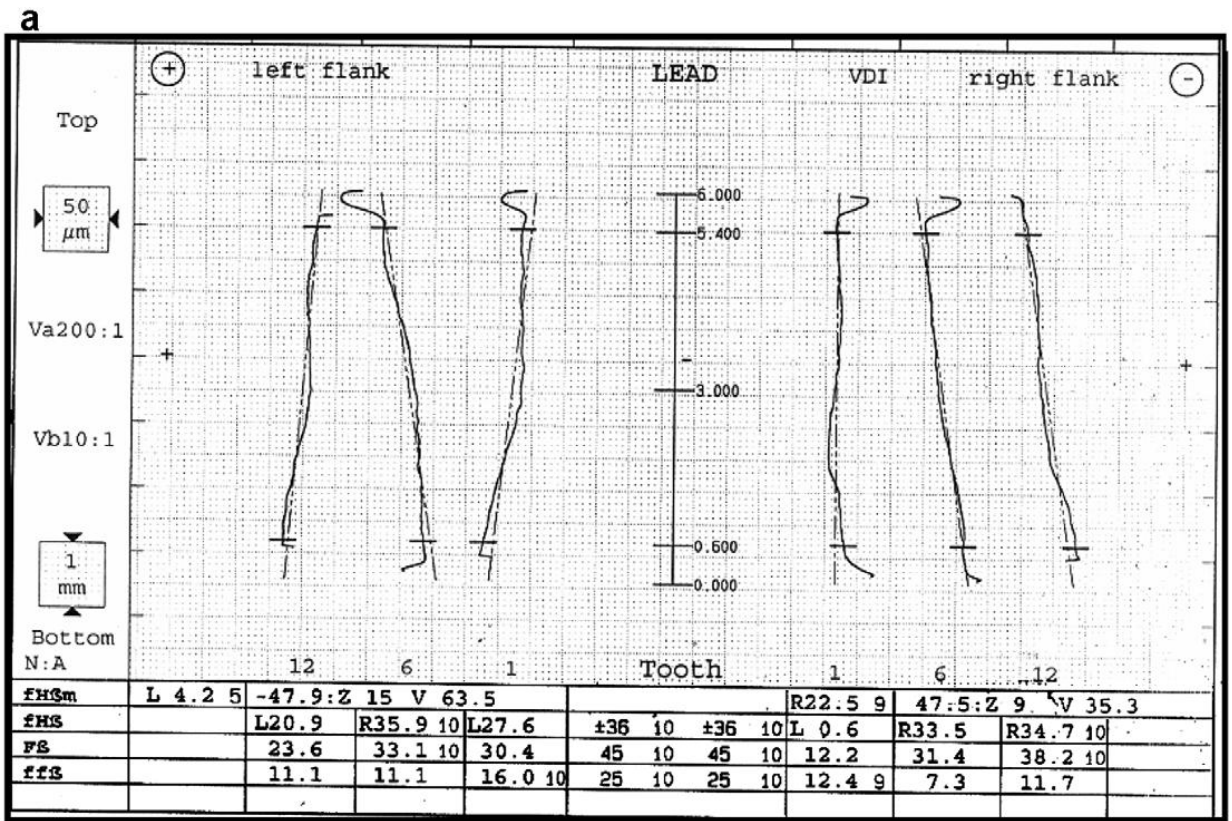
a



b

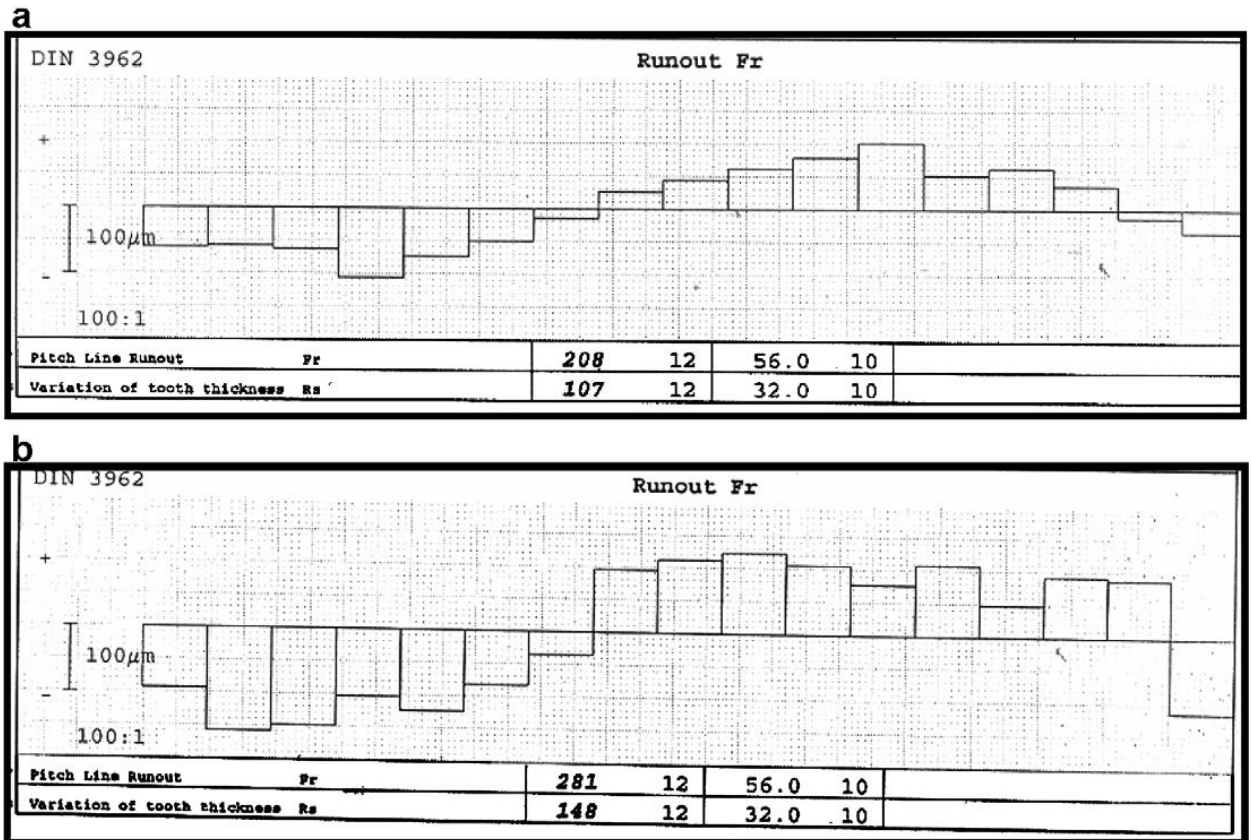


Σχήμα 52: Διαγράμματα απόκλισης κατατομών από την εξειλιγμένη καμπύλη σε a) μη ενισχυμένους τροχούς από Nylon 6/6 και b) ενισχυμένους με υαλονήματα



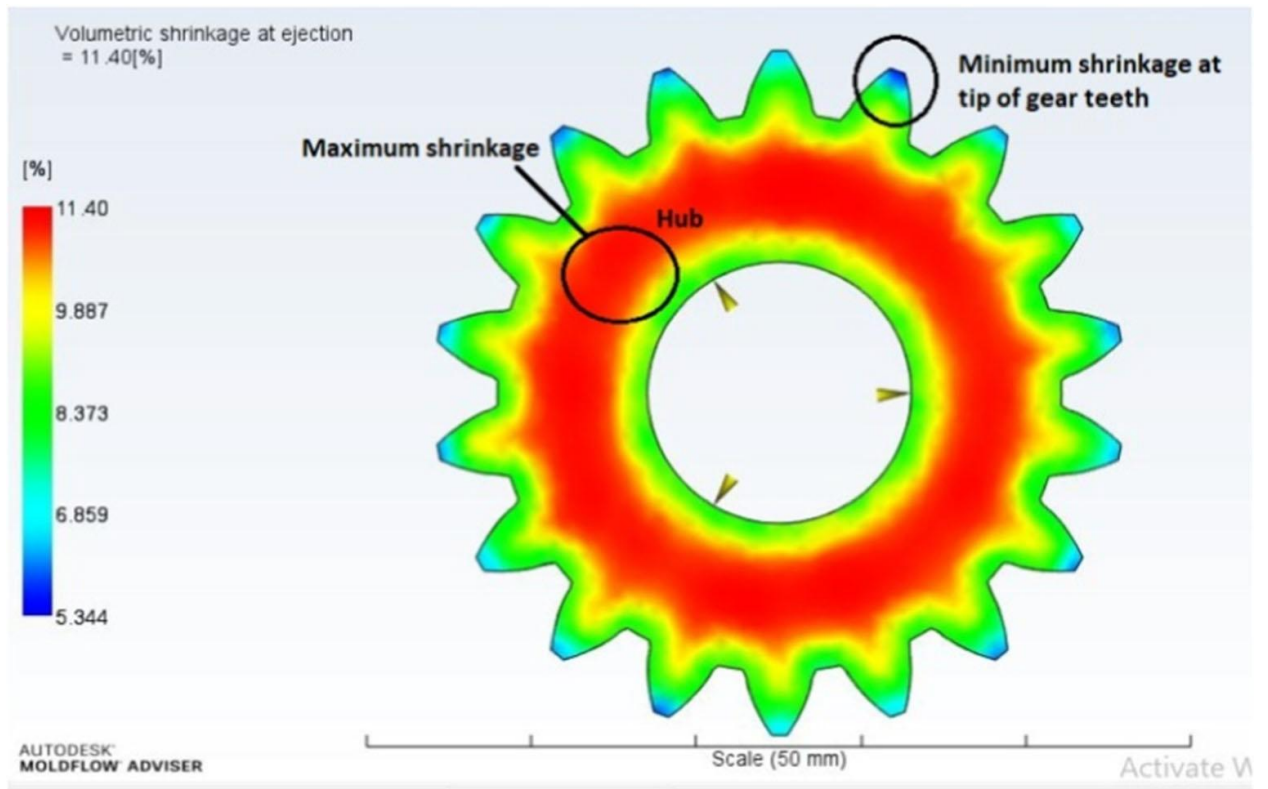
Σχήμα 53: Διαγράμματα lead deviation σε a) μη ενισχυμένους τροχούς από Nylon 6/6 και b) ενισχυμένους με υαλονήματα

3. Λόγω του ότι κάθε οδόντας απέχει διαφορετική απόσταση από τα σημεία έγχυσης στο καλούπι τα σφάλμα στο πάχος των οδόντων και στο βήμα τους διαφέρουν μεταξύ ενισχυμένων τροχών και μη, καθώς η παρουσία ινών καθιστά έναν τροχό πιο ανομοιογενή με αποτέλεσμα το μέγιστο εκ περιστροφής σφάλμα που στους μη ενισχυμένους τροχούς παρατηρείται 208μm να αυξάνεται στα 281μm (ποιότητα 12 κατά DIN) και η μέγιστη απόκλιση του πάχους των οδόντων από 107μm σε 148μm (ποιότητα 12 κατά DIN).

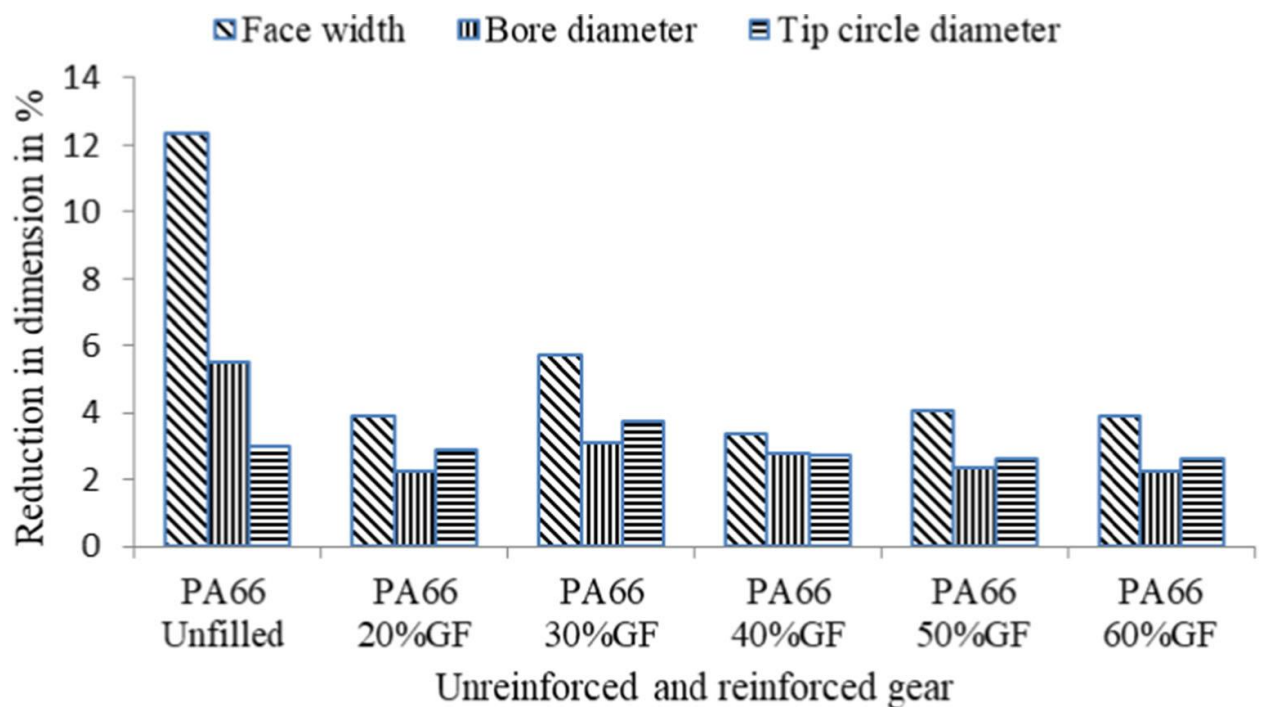


Σχήμα 54: Σφάλματα run out σε a) μη ενισχυμένους τροχούς από Nylon 6/6 και b) ενισχυμένους με υαλονήματα

Οι Dhaduti, Sarganacharim, Patil και Khan [1] για την πρόβλεψη των κατάλληλων παραμέτρων χύτευσης οδοντωτών τροχών με ευθείς μετωπικούς οδόντες πολυμερικής μήτρας Nylon 6/6 με ενίσχυση υαλονημάτων σε ποσοστό 20%, 30%, 40%, 50%, 60% και χωρίς πραγματοποίησαν προσομοιώσεις με την βοήθεια του λογισμικού Autodesk Moldflow Adviser 2017 (Σχήμα 55) και κατέληξαν σε αντίστοιχα συμπεράσματα για την επίδραση των ινών και του προσανατολισμού τους στην υφιστάμενη συρρίκνωση. Στο γράφημα του Σχήματος 56 αποτυπώνεται η μείωση στην απόκλιση του πάχους οδόντος ενός ενισχυμένου τροχού με έναν μη, ενώ οι διαστατικές αποκλίσεις των διαμέτρων κεφαλής και τρύμματος δεν επηρεάζονται από την προσθήκη των συγκεκριμένων ενισχύσεων.



Σχήμα 55: συρρίκνωση ενισχυμένου τροχού μήτρας Nylon 6/6 με υαλονήματα σε ποσοστό 20%



Σχήμα 56: Διαστασιολογικές αποκλίσεις λόγω συρρίκνωσης του υλικού σε ενισχυμένους και μη τροχούς

5. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των μεταλλικών τροχών, όπως χαμηλή αδράνεια, σχεδόν καθόλου ανάγκη λίπανσης, χαμηλά επίπεδα ταλαντώσεων και θορύβου. Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα που δεν επιτρέπει ακόμα την ευρεία διάδοσή τους σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι η διαστασιολογική ακρίβεια που επιτυγχάνεται κατά την κατασκευή τους από τις μεθόδους παραγωγής.

Από τις μεθόδους παραγωγής πολυμερικών οδοντωτών τροχών οι πιο βασικές είναι το Injection molding και η τρισδιάστατη εκτύπωση. Το injection molding γιατί είναι η πιο καθιερωμένη διαδικασία σήμερα και η τρισδιάστατη εκτύπωση γιατί αναμένεται να είναι το ίδιο ή και περισσότερο καθιερωμένη στο εγγύς μέλλον. Από την αναλυτική έρευνα που έγινε στη διεθνή βιβλιογραφία και μετά από την ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων και μετρήσεων βρέθηκε ότι τόσο το injection molding, όσο (και ακόμα περισσότερο) η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν μπορεί να φτάσει τα επίπεδα διαστασιολογικής ακρίβειας που μπορούν να επιτευχθούν με τις κλασσικές μεθόδους παραγωγής των μεταλλικών οδοντωτών τροχών.

Σημαντική επίδραση έχουν οι παράμετροι κατά τη διαδικασία παραγωγής, οι οποίοι πρέπει να βελτιστοποιηθούν για την επίτευξη του καλύτερου αποτελέσματος. Ακόμα και έτσι όμως η μέγιστη ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στην τρισδιάστατη εκτύπωση κατά ISO είναι IT10 ενώ με το injection molding IT6.

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και η επίτευξη όλο και στενότερων ανοχών με το πέρασμα των τελευταίων χρόνων δείχνει ότι σύντομα τα επίπεδα ακρίβειας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών θα μπορεί να είναι συγκρίσιμα με εκείνα των αντίστοιχων μεταλλικών. Για αυτό και η μελέτη των πολυμερικών οδοντωτών τροχών, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο μοντελοποίησης και σχεδιασμού, όσο και σε πειραματικό είναι εξαιρετικά σημαντική, μιας και σε λίγα μόνο χρόνια αναμένεται να χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές ιδιαίτερα απαιτητικές, όπως σε κιβώτια αυτοκινήτων και συστήματα οδήγησης αεροπλάνων.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Budzik, G. 2011. The use of the rapid prototyping method for the manufacture and examination of gear wheels, in: M. Hoque (Ed.), *Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering*, 1st Edition, InTech.
- [2] Gibson, I. Rosen, D. Stucker, B. 2015. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd Edition, Springer Science and Business Media Pvt Ltd.
- [3] Gupta, K., 2018. Recent developments in additive manufacturing of gears: A review. Presented at the *Advances in Transdisciplinary Engineering*, pp. 131–136. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-902-7-131>
- [4] Budzik, G. (2009). The Analysis of Geometrical Data Preparation Process of Aircraft Engines Parts Manufacturing with RP Systems Using, *Combustion Engines*, Vol. 2009-SC1, pp. 295-300.
- [5] Budzik, G., Oleksy, M., Grzelka, M., Wieczorowski, M., Magniszewski, M., Slota, J. (2010). The Application of Optical Measurements for the Determination of Accuracy of Gear Wheels Casts Manufactured in the RT/RP Process, *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 10, No. 1/2010, pp. 395-398.
- [6] Budzik, G., Kozik, B., Pacana, J., Żmuda, B. (2010). Modelling and Prototyping of Aeronautical Planetary Gear Demonstrator, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 17, No. 3/2010, pp. 49-54.
- [7] Budzik, G., Markowski, T., Sobolak M. (2008). Analysis of Surface Roughness of Transmission Gear Teeth made by Different Rapid Prototyping Methods, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 15, No. 2/2008, pp. 29-34.
- [8] Budzik, G., Markowski, T., Sobolak M. (2007). Hybrid Foundry Patterns of Bevel Gears, *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 7, No. 1/2007, pp. 131-134.
- [9] Campbell, I.R (2008). Designing a New Range of Products to Capitalize on Rapid Manufacturing, *Additive Layered Manufacturing: From Evolution to Revolution*, Faculty for Mechanical Engineering, Maribor 2008, pp. 123-132.
- [10] Available in: <https://www.marketwatch.com/press-release/plastic-gears-market-outlook-top-companies-consumption-by-regional-data-investigation-and-growth-trends-and-growth-factors-details-for-business-development-2021-02-01>
- [11] Available in: <https://www.sdp-si.com/plastic/design-of-plastic-gears.php>
- [12] Available in: <https://www.machinedesign.com/materials/article/21836156/plastic-gears-are-the-future>
- [13] Available in: <https://www.autodesk.eu/products/netfabb/overview>
- [14] Available in: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>

[15] Vasilescu, Mircea Dorin, and Traian Fleser. "Influence of Technological Parameters on the Dimension of GEAR Parts Generated with PLA Material by FDM 3D Printing." *Materiale Plastice* 55, no. 2 (June 30, 2018): 247–51.

[16] Schindel, R.: Additive Manufacturing definiert das Produktdesign neu. 8. SWISS RaPiD Forum, IRPD St.Gallen, 2012.

[17] Bourell, D.L.; Leu, M.C.; Rosen, D.W.: Roadmap for Additive Manufacturing – Identifying the Future of Freeform Processing. International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2009.

[18] Wohlers, T.: Wohlers Report 2014 – 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report, 2014.

[19] Gregorian, A.; Elliott, B.; Navarro, R.; Ochoa, F.; Singh, H.; Monge, E.; Foyos, J.; Noorani, R.; Fritz, B.; Jayanthi, S.: Accuracy Improvement in Rapid Prototyping machine (FDM-1650). International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2001.

[20] Sood, A.K.: Study on Parametric Optimization of Fused Deposition Modeling (FDM) Process. Dissertation, National Institute of Technology Rourkela, 2011.

[21] Byun, H.S.; Lee K.H.: Design of a New Test Part for Benchmarking the Accuracy and Surface Finish of Rapid Prototyping Processes. Lecture Notes in Computer Science, Volume 2669, S. 731-740. doi: 10.1007/3-540-44842-X_74, 2003.

[22] Boschetto, A.; Bottini, L.: Accuracy prediction in fused deposition modeling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 73, S. 913-928. doi: 10.1007/s00170-014-5886-4, 2014.

[23] Brøtan, V.: A new method for determining and improving the accuracy of a powder bed additive manufacturing machine. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 74, S. 1187-1195. doi: 10.1007/s00170-014-6012-3, 2014.

382

[24] Brajlili, T.; Valentan, B.; Balic, J.; Drstcensek, I.: Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines. Rapid Prototyping Journal, Volume 17, S. 64 – 75. doi: 10.1108/13552541111098644, 2011.

[25] Cooke, A.L.; Soons J.A.: Variability in the Geometric Accuracy of Additively Manufactured Test Parts. 21st International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2012.

[26] Tang, Y.; Loh H.T.; Fuh, J.Y.H.; Wong, Y.S.; Lu, L.; Ning, Y.; Wang, X.: Accuracy Analysis and Improvement for Direct Laser Sintering. Innovation in Manufacturing Systems and Technology. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/3898#files-area>, 2004. Accessed 22 June 2015

[27] Gregorian, A.; Elliott, B.; Navarro, R.; Ochoa, F.; Singh, H.; Monge, E.; Foyos, J.; Noorani, R.; Fritz, B.; Jayanthi, S.: Accuracy Improvement in Rapid Prototyping

Machine (FDM-1650). 21st International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2001.

[28] Dimitrov, D.; Van Wijck, W.; Schreve, K.; De Beer, N.: Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing. *Rapid Prototyping Journal*, Volume 12, S. 42-52. doi: 10.1108/13552540610637264, 2006.

[29] Fahad, M.; Hopkinson, N.: A new benchmarking part for evaluating the accuracy and repeatability of Additive Manufacturing (AM) processes. 2nd International Conference on Mechanical Production and Automobile Engineering, <http://psrcentre.org/-images/extraimages/6.%20412635.pdf>, 2012. Accessed 22 June 2015

[30] Islam, M.N.; Boswell, B.; Pramanik, A.: An Investigation of Dimensional Accuracy of Parts Produced by Three-Dimensional Printing. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2013.

[31] Kim, G.D.; Oh, Y.T.: A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost. *Journal of Engineering Manufacture*, doi: 10.1243/09544054JEM724, 2008.

[32] Kechagian, J.; Stavropoulos, P.; Koutsomichalis, A.; Ntintakis, I.; Vaxevanidis, N.: Dimensional Accuracy Optimization of Prototypes produced by PolyJet Direct 3D Printing Technology. *Advances in Engineering Mechanics and Materials*, http://www.researchgate.net/profile/John_Kechagias/publication/269809880_Dimensional_Accuracy_Optimization_of_Prototypes_produced_by_PolyJet_Direct_3D_Printing_Technology/links/54b7705b0cf2e68eb2801356.pdf, 2014. Accessed 22 June 2015

[33] Meindl, M.: Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing. *Dissertation, University of Munich, Herbert Utz Publisher*, 2005.

[34] Noriega, A.; Blanco, D.; Alvarez, B.J.; Garcia, A.: Dimensional accuracy improvement of FDM square cross-section parts using artificial neural networks and an optimization algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 69, S. 2301-2313. doi: 10.1007/s00170-013-5196-2, 2013.

[35] Paul, R.; Anand, S.: Optimal part orientation in Rapid Manufacturing process for achieving geometric tolerances. *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 30, S. 214– 222. doi: 10.1016/j.jmsy.2011.07.010, 2011.

[36] Raghunath, N.; Pandey, P.M.: Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 47, S. 985–995. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.07.001, 2007.

383

[37] Seepersad, C.C.; Govett, T.; Kim, K.; Lundin, M.; Pinero, D.: A Designer's Guide for Dimensioning and Tolerancing SLS Parts. *International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin*, 2012.

- [38] Sood, A.K.; Ohdar, R.K.; Mahapatra, S.S.: Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials and Design*, Volume 30, S. 4243–4252. doi: 10.1016/j.matdes.2009.04.030, 2009.
- [39] Senthilkumaran, K.; Pandey, P.M.; Rao, P.V.M.: Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering. *Materials and Design*, Volume 30, S. 2946-2954. doi: 10.1016/j.matdes.2009.01.009, 2009.
- [40] Fortus 3D Production Systems – Stratasys: Fortus 360mc/400mc Accuracy Study, 2009.
- [41] Taufik, M.; Jain, P.K.: Role of build orientation in layered manufacturing: a review. *Int. J. Manufacturing Technology and Management*, Volume 27. doi: 10.1504/IJMTM.2013.058637, 2013.
- [42] Wegener, K.: *Additive Technologien in der Fertigung; Zuverlässigkeit und Standards*. 8. SWISS RaPiD Forum, IRPD, St.Gallen, 2012.
- [43] Wegner, A.; Witt, G.: Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen. *Rapid.Tech*, <https://www.rtejournal.de/ausgabe10/-3818/artikelPDF>, 2013. Accessed 22 June 2015
- [44] Zhou, J.G.; Herscovici, D.; Chen, C.C.: Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 40, S. 363–379. doi: 10.1016/S0890-6955(99)00068-1, 2000.
- [45] Lieneke, T., G.A.O. Adam, S. Leuders, F. Knoop, S. Josupeit, P. Delfs, N. Funke, and D. Zimmer. “Systematical Determination of Tolerances for Additive Manufacturing by Measuring Linear Dimensions,” 371–84, 2020.
- [46] Adam, G.: *Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling*, Dissertation, University of Paderborn, Shaker Publisher, Aachen, 2015.
- [47] Josupeit, S.; Schmid, H.-J.: Three-Dimensional In-Process Temperature Measurement of Laser Sintering Part Cakes. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 2014.
- [48] Paul, R.; Anand, S.: Optimal part orientation in Rapid Manufacturing process for achieving geometric tolerances. *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 30, S. 214– 222, 2011.
- [49] Taufik, M.; Jain, P. K.: Role of build orientation in layered manufacturing: a review. *Int. J. Manufacturing Technology and Management*, Volume 27, 2013.
- [50] Wegener, A.; Witt, G.: *Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern*, *Jornal of Plastics Technology*, 2012.
- [51] Wegener, A.; Witt, G.: Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen, *RTEjournal*, 2013.
- [52] Fritz, A. H.; Schulze, G.: *Fertigungstechnik*, Springer Publisher, Berlin, 2010.

- [53] Berger, U., 2015. Aspects of accuracy and precision in the additive manufacturing of plastic gears. *Virtual and Physical Prototyping* 10, 49–57. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1026127>
- [54] Berger, U., 2014. A survey of additive manufacturing processes applied on the fabrication of gears. Presented at the Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing, pp. 315–320. https://doi.org/10.3850/978-981-09-0446-3_010
- [55] Berger, U., Maule, B., 2009. Rapid manufacturing of high reduction polymer gears by use of stereolithography, in: 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Presented at the 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 613–617. <https://doi.org/10.1109/AIM.2009.5229943>
- [56] Kotliński, J., Osowski, K., Kęsy, Z., Kęsy, A., 2020. Accuracy of Geometry of Plastic Gear Produced with 3D Printing Technology. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)* 14, 470-476–476. <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i7.18380>
- [57] Lin, C., Fan, Y., Zhang, Z., Fu, G., Cao, X., 2016. Additive manufacturing with secondary processing of curve-face gears. *Int J Adv Manuf Technol* 86, 9–20. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8118-7>
- [58] Mašović, R., Jagarčec, V., Miler, D., Domitran, Z., Bojčetić, N., Žeželj, D., 2019. Analysis of printing direction impact on dimensional accuracy of spur gears. *Mechanisms and Machine Science* 73, 1111–1120. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_110
- [59] Michal, D., Hrusecky, R., Görög, A., Milde, J., Simon, S., 2020. Analysis of shape and dimensional deformation of the gear made by digital light processing (Dlp) additive technology and measured by industrial tomography. *Materials Science Forum* 994, 205–212. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.994.205>
- [60] Pisula, J., Dziubek, T., Przeszłowski, Ł., Budzik, G., 2020. Evaluation of Geometrical Parameters of a Spur Gear Manufactured in an Incremental Process from GP1 Steel, in: Królczyk, G.M., Niesłony, P., Królczyk, J. (Eds.), *Industrial Measurements in Machining, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, Cham, pp. 109–127. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49910-5_11
- [61] Pohit, G., Kumar, K., 2012. Virtual manufacturing of various types of gears and validation of the technique using rapid prototype. *Virtual and Physical Prototyping* 7, 153–171. <https://doi.org/10.1080/17452759.2012.686696>
- [62] Dhaduti, S.C., Sarganachari, S.G., Patil, A.Y., Yunus Khan, T.M., 2020. Prediction of injection molding parameters for symmetric spur gear. *J Mol Model* 26, 302. <https://doi.org/10.1007/s00894-020-04560-9>
- [63] Senthilvelan, S., Gnanamoorthy, R., 2008. Influence of reinforcement on composite gear metrology. *Mechanism and Machine Theory* 43, 1198–1209. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.09.002>

- [64] Tsai, C.-Y., 2019. Gear module adjustment method for shrinkage compensation of injection molded plastic gears using single dedicated hob. *Mechanism and Machine Theory* 140, 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.05.026>
- [65] Williams III, E.H., Kleiss, R.E., 1999. The effect of internal lubricants on the accuracy of injection molded thermoplastic gears. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0851>
- [66] Luscher, A., Houser, D., Snow, C., 2000. An investigation of the geometry and transmission error of injection molded gears. *Journal of Injection Molding Technology* 4, 177–190.