

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΠΡΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Συγκριτική αποτίμηση  
διαστασιολογικής ακρίβειας  
συμβατικών και τρισδιάστατα  
εκτυπωμένων μετωπικών  
οδοντωτών τροχών

Τομέας: Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Καθηγητής ΕΜΠ



Αθήνα, Ιούλιος 2024



## Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ένα μεγάλο κεφάλαιο της ακαδημαϊκής και προσωπικής μου πορείας, για αυτό και θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνέβαλαν σε αυτή, από την αρχή έως το τέλος της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βασίλειο Σπιτά για την πολύτιμη καθοδήγηση, τις διορατικές παρατηρήσεις και την αδιάλειπτη υποστήριξή του, τόσο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, όσο και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου γενικότερα. Η εμπειρογνωσία του και η ενθάρρυνσή του ήταν καθοριστικές για τη διαμόρφωση της κατεύθυνσης αυτής της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Χρήστο Παπαλέξη με τον οποίο συνεργαζόμουν κατά κόρον όλο τον καιρό εκπόνησης της εργασίας. Δίνοντας μου απλόχερα τις γνώσεις του και παραθέτοντας πάντα την άποψη του για όλα τα ζητήματα, στάθηκε αρωγός στην περάτωση αυτής της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο Κρυφό για την πολύτιμη βοήθειά του αλλά και για την εκπαίδευση που μου παρείχε στον χειρισμό της CMM, προκειμένου να πραγματοποιήσω τις λήψεις των μετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, τους φίλους μου και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους, για τη συμπαράσταση που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια τόσο των σπουδών μου, όσο και της ζωής μου γενικότερα. Ιδιαίτερος σεβασμός αρμόζει να αποδοθεί στους γονείς μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει στη ζωή παρά τις όποιες δυσκολίες αντιμετώπισαν.

*Αφιερώνεται στους γονείς μου, Στέφανο και Θεοδώρα  
και στην αδελφή μου, Καλλιόπη.*

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Νικόλαος Μπρης

## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| Ευχαριστίες.....  | 3  |
| 1. Περίληψη .....   | 8  |
| 2. Abstract .....   | 9  |
| 3. Εισαγωγή.....  | 10 |
| 4. Οδοντωτοί τροχοί προς διερεύνηση .....   | 12 |
| 4.1 Μεταλλικοί οδοντωτοί τροχοί .....   | 12 |
| 4.2 Τρισδιάστατα εκτυπωμένοι οδοντωτοί τροχοί .....                               | 13 |
| 5. Μετρήσεις.....   | 18 |
| 5.1 Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine – CMM) .....      | 18 |
| 5.1.1 Εξοπλισμός.....   | 18 |
| 5.1.2 Λογισμικό .....   | 19 |
| 5.2 Σύστημα Συντεταγμένων .....   | 21 |
| 5.3 Βάσεις στήριξης (Jigs) .....  | 21 |
| 5.4 Αποτελέσματα μετρήσεων .....  | 24 |
| 6. Βαθμοί ποιότητας οδοντωτών τροχών κατά ISO.....                                | 25 |
| 6.1 Γενικά .....  | 25 |
| 6.2 Ορισμοί .....   | 25 |
| 6.3 Επεξεργασία μετρήσεων.....  | 29 |
| 6.3.1 Περιστροφή μετρήσεων.....   | 29 |
| 6.3.2 Διόρθωση σημείων .....  | 30 |
| 6.3.3 Σημεία τροχοειδούς και κεφαλής.....   | 32 |
| 6.4 Υπολογισμός σφαλμάτων .....   | 34 |
| 6.5 Υπολογισμός αποκλίσεων κατατομής και βήματος .....                            | 36 |
| 6.5.1 Συνολική απόκλιση κατατομής – Total profile deviation ( $F_\alpha$ ).....   | 37 |
| 6.5.2 Απόκλιση μορφής κατατομής – Profile form deviation ( $f_{fa}$ ).....        | 38 |
| 6.5.3 Απόκλιση κλίσης κατατομής – Profile slope deviation ( $f_{H\alpha}$ ) ..... | 38 |
| 6.5.4 Απλό σφάλμα βήματος – Single pitch deviation ( $f_p$ ).....                 | 39 |
| 6.6 Κατηγοριοποίηση οδοντωτών τροχών σε βαθμούς ποιότητας .....                   | 40 |
| 6.6.1 Τιμές ανοχών.....   | 41 |
| 6.6.2 Κανόνες στρογγυλοποίησης .....  | 41 |
| 6.6.3 Εξισώσεις ανοχών .....  | 41 |
| 7. Μορφολογία σφαλμάτων κατατομών.....  | 47 |
| 7.1 Στατιστική ανάλυση .....  | 47 |
| 7.2 Ανάλυση σφαλμάτων κατατομών με χρήση της σειράς Fourier.....                  | 56 |
| 7.3 Γεωμετρικά σφάλματα τρισδιάστατα εκτυπωμένων οδοντωτών τροχών.....            | 61 |
| 8. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα .....                                       | 68 |
| 9. Κατάλογος Πινάκων .....  | 69 |
| 10. Κατάλογος Εικόνων.....  | 70 |
| 11. Κατάλογος Αναφορών .....  | 73 |
| 12. Παράρτημα .....   | 74 |



## 1. Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση μεταξύ μεταλλικών και τρισδιάστατα εκτυπωμένων μετωπικών οδοντωτών τροχών, ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οδόντων, με διερεύνηση των παραμέτρων εκτύπωσης. Αρχικά, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για την λήψη και ανάλυση μετρήσεων, το οποίο επίσης υπολογίζει τις ζητούμενες αποκλίσεις και κατηγοριοποιεί τους τροχούς στους εκάστοτε βαθμούς ποιότητας. Η λήψη μετρήσεων στις κατατομές τόσο των μεταλλικών, όσο και των πλαστικών οδοντωτών τροχών, πραγματοποιείται με τη χρήση μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε κατάλληλους κώδικες που αναπτύχθηκαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον, ώστε να υπολογισθούν τα σφάλματα των κατατομών και του βήματος. Από αυτά τα σφάλματα, υπολογίζεται ο συνολικός βαθμός ποιότητας της κατατομής και του βήματος για κάθε μετρημένο οδοντωτό τροχό. Έπειτα, επιλέγεται η τεχνολογία και οι παράμετροι εκτύπωσης των πλαστικών τροχών, καθώς επίσης και το πλήθος των εκτυπώσεων που θα πραγματοποιηθούν. Επιπλέον, πραγματοποιείται μια εκτενής ανάλυση στη μορφολογία των σφαλμάτων, υπολογίζοντας αρχικά τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση για τα σφάλματα όλων των κατατομών κάθε τροχού. Με αυτόν τον τρόπο, έχοντας την μέση τιμή των σφαλμάτων, γίνεται χρήση της σειράς Fourier ώστε να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που αντιπροσωπεύει ολόκληρο τον οδοντωτό τροχό και με βάση αυτό, να συγκριθούν οι μορφές των σφαλμάτων των κατατομών των μεταλλικών και των πλαστικών τροχών. Τέλος, αναλύονται σε βάθος οι τρισδιάστατα εκτυπωμένοι τροχοί, καθώς οι διαφορετικές παράμετροι εκτύπωσης, εμφανίζουν ποικίλα αποτελέσματα τόσο στα σφάλματα, όσο και στη γεωμετρία του οδόντος.



## 2. Abstract

The purpose of this diploma thesis is to compare metallic and 3D-printed spur gears in terms of the geometric characteristics of their teeth, with an investigation of printing parameters. Firstly, a comprehensive model was developed for acquiring and analyzing measurements, which also calculates the required deviations and categorizes the gears into their respective quality classes. Measurements of the profiles of both metallic and plastic gears are conducted using a coordinate measuring machine (CMM). The measurement results are used as input for appropriate codes developed in a programming environment to calculate profile and pitch errors. From these errors, the overall quality grade of the profile and pitch for each measured gear is determined. Next, the technology and printing parameters for the plastic gears are selected, as well as the number of printings to be performed. Additionally, an extensive analysis of the error morphology is performed by initially calculating the mean value and standard deviation for the errors of all profiles of each gear. In this way, using the mean value of the errors, the Fourier series is employed to develop a model that represents the entire gear, and based on this model, the error patterns of the profiles of the metallic and plastic gears are compared. Finally, the 3D-printed gears are analyzed in depth, as the different printing parameters yield varied results in both tooth deviations and tooth geometry.

### 3. Εισαγωγή

Οι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα συστήματα μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Είναι στοιχεία μηχανών που επιτυγχάνουν μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος με την κατάλληλη διαδοχική εμπλοκή συνεργαζόμενων οδόντων. Οι οδόντες είναι αλληπάλληλες εσοχές και προεξοχές της επιφανείας ενός οδοντωτού τροχού, τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζόμενου οδοντωτού τροχού (Κωστόπουλος, 2010).

Στις σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές, η χρήση πλαστικών οδοντωτών τροχών έχει γνωρίσει σημαντική άνοδο, καθοδηγούμενη από τις εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών και τις τεχνολογίες προσθετικών κατεργασιών. Οι προσθετικές κατεργασίες (ή αλλιώς τρισδιάστατη εκτύπωση – 3D Printing) αποτελούν μία διαδικασία κατά την οποία κατασκευάζονται αντικείμενα από ψηφιακά τρισδιάστατα μοντέλα, μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Προκειμένου να γίνει τρισδιάστατη εκτύπωση ενός αντικειμένου, πρέπει πρώτα το αρχείο CAD να μετατραπεί κατάλληλα ώστε να μπορεί να το ερμηνεύσει το λογισμικό του εκτυπωτή (Slicer). Αυτό επιτυγχάνεται με την μετατροπή του CAD αρχείου σε .STL αρχείο. Τα .STL αρχεία χρησιμοποιούν τρίγωνα (ή πολύγωνα) ώστε να δημιουργήσουν ένα πλέγμα που θα αντιπροσωπεύει την γεωμετρία των επιφανειών των αντικειμένων. Άλλος παρόμοιος τύπος αρχείου είναι το .3MF, που έχει την ίδια λογική με το .STL παρέχοντας όμως μεγαλύτερη πληροφορία, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο .STEP τύπος αρχείου με μεγαλύτερη ακρίβεια στην αναπαράσταση της γεωμετρίας του αντικειμένου από ότι οι άλλοι δύο τύποι αρχείων. Στη συνέχεια το αρχείο αυτό εισάγεται στο λογισμικό του εκτυπωτή, το οποίο «τεμαχίζει» το σχέδιο σε στρώσεις, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για να δημιουργηθεί το τελικό αντικείμενο (Diegel et al., 2019).

Στις πιο γνωστές τεχνολογίες προσθετικών κατεργασιών, συγκαταλέγονται η Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SL), η Κατασκευή με Εναπόθεση Υλικού (Fused Deposition Modelling -FDM), η Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering - SLS), η Συγκόλληση Κόκκων με Ψεκασμό (Powder Bed Inkjet Printing), η Κατασκευή με Πολλαπλό Ψεκασμό (Multi-jet Modelling - MJM) και η Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing - LOM). Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει την εκτύπωση οδοντωτών τροχών με τη μέθοδο της εναπόθεσης υλικού, όπου το υλικό αυτό είναι το θερμοπλαστικό πολυγαλακτικό οξύ (PLA). Στη μέθοδο εναπόθεσης υλικού, το υλικό εκτύπωσης βρίσκεται σε μορφή νήματος (filament) και με την βοήθεια προωθητή (feeder), προωθείται μέσα από ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο (nozzle), του οποίου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας τήξης του υλικού, και στη συνέχεια εναποθέτεται πάνω στην κλίση εκτύπωσης. Στην κλίση αυτή, το υλικό στερεοποιείται και έτσι, επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία, μπορούν να δημιουργηθούν πολλές στρώσεις ή μία πάνω στην άλλη, σχηματίζοντας το τελικό αντικείμενο (Redwood et al., 2018).

Η μετρολογία των οδοντωτών τροχών είναι μια ευρεία και πολύπλοκη υπόθεση, λόγω της μεγάλης ποικιλίας τύπων, μεγεθών, διαμορφώσεων και διαφορετικών παραμέτρων που εμπλέκονται. Για το λόγο αυτό, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τόσο χειροκίνητων όσο και αυτόματων τεχνικών μέτρησης, που κυμαίνονται από διαδικασίες σε πάγκο εργαστηρίου έως σύνθετες, αναλυτικές αξιολογήσεις που

πραγματοποιούνται σε μετρολογικά εργαστήρια με τη χρήση μηχανών μέτρησης συντεταγμένων (CMMs) (Pueo, 2017).

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να καλύψει το βιβλιογραφικό κενό που υπάρχει σε ότι αφορά την διαστασιολογική σύγκριση ανάμεσα σε μεταλλικούς και τρισδιάστατα εκτυπωμένους οδοντωτούς τροχούς, με διερεύνηση των παραμέτρων εκτύπωσης. Μέσα στην εργασία παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η λήψη των μετρήσεων στην CMM, η κατηγοριοποίηση των κατατομών των τροχών σε βαθμούς ποιότητας και η σύγκριση και ανάλυση των αποτελεσμάτων στα μορφολογικά σφάλματα των κατατομών. Τέλος, παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί, για κάθε διαφορετική παράμετρο εκτύπωσης.

## 4. Οδοντωτοί τροχοί προς διερεύνηση

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας μετρήθηκαν συνολικά 11 οδοντωτοί τροχοί, από τους οποίους οι 5 είναι μεταλλικοί και οι 6 πλαστικοί, εκτυπωμένοι σε τρισδιάστατο εκτυπωτή. Από τους μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς, ο ένας είναι πρότυπος τροχός δηλαδή είναι υψηλής ακρίβειας και ποιότητας, ενώ από τους πλαστικούς, έχουν μελετηθεί οι περιπτώσεις για 2 διαφορετικούς τροχούς όπου για τον έναν έγιναν 4 εκτυπώσεις και για τον άλλο 2, με διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης. Στον **Πίνακα 1**, παρουσιάζονται τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

**Πίνακας 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μετρηθέντων οδοντωτών τροχών**

| Υλικό     | Αριθμός Οδόντων | Module | Σταθερά τροχοειδούς (C <sub>c</sub> ) | Σταθερά κεφαλής (C <sub>k</sub> ) | Σταθερά ποδός (C <sub>f</sub> ) | Σταθερά πάχους οδόντος (C <sub>s</sub> ) | Μετατόπιση οδόντωσης (x) |
|-----------|-----------------|--------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------|
| Μεταλλικό | 38              | 3      | 0.3                                   | 1                                 | 1.25                            | 0.5                                      | 0                        |
| Μεταλλικό | 31              | 3      | 0.3                                   | 1                                 | 1.25                            | 0.5                                      | 0                        |
| Μεταλλικό | 26              | 3      | 0.3                                   | 1                                 | 1.25                            | 0.48                                     | 0                        |
| Μεταλλικό | 25              | 2      | 0                                     | 0.6                               | 1.25                            | 0.475                                    | 0.5                      |
| Μεταλλικό | 75              | 2      | 0                                     | 0.6                               | 1.25                            | 0.475                                    | 0.5                      |
| Πλαστικό  | 25              | 2      | 0.3                                   | 1                                 | 1.25                            | 0.49                                     | 0.5                      |
| Πλαστικό  | 30              | 3      | 0.3                                   | 1                                 | 1.25                            | 0.49                                     | 0                        |

### 4.1 Μεταλλικοί οδοντωτοί τροχοί

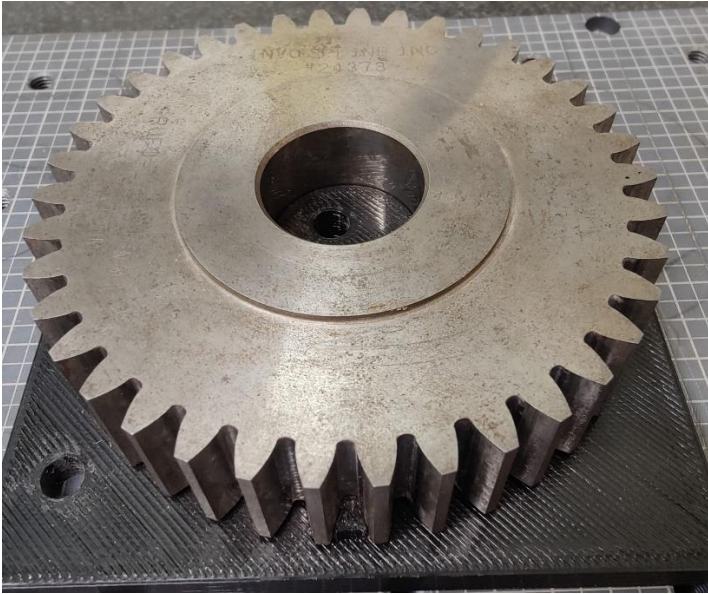
Οι μεταλλικοί οδοντωτοί τροχοί που μετρήθηκαν, επιλέχθηκαν από ένα πλήθος οδοντωτών τροχών που διαθέτει το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών Ε.Μ.Π. Επιλέχθηκε, να μετρηθούν 5 τροχοί, ο καθένας με διαφορετικό αριθμό οδόντων. Οι 3 από τους 5 έχουν module 3, ενώ οι άλλοι 2 έχουν module 2. Ο πρότυπος τροχός είναι αυτός με αριθμό οδόντων 38.

Πριν μετρηθούν, οι τροχοί αυτοί καθαρίστηκαν από σκόνες και τυχόν λάδια, καθώς όλοι τους έχουν λειτουργήσει στο παρελθόν.

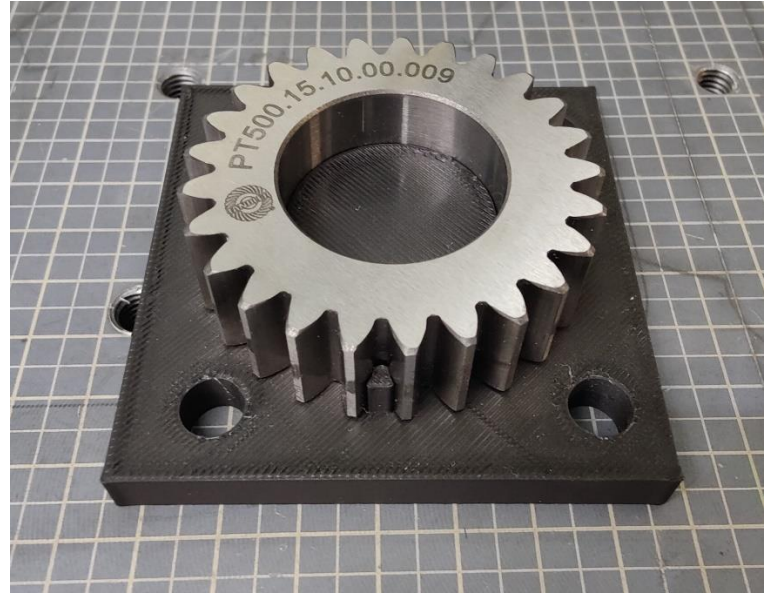
Στους τροχούς με αριθμό οδόντων 38, 31 και 26 μετρήθηκαν 5 οδόντες, ο 1<sup>ος</sup> και ο 2<sup>ος</sup> οδόντας, ένας στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του τροχού, ένας στο 3<sup>ο</sup> και ένας στο 4<sup>ο</sup>, ώστε να καλυφθεί όσον το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος περιμετρικά του τροχού.

Στους τροχούς με αριθμό οδόντων 25 και 75, μετρήθηκαν όλα τους τα δόντια, καθώς οι τροχοί αυτοί, ήταν καλύτερης ποιότητας από τους προηγούμενους και με βάση τον τροχό των 25 οδόντων, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση με τους τρισδιάστατα εκτυπωμένους οδοντωτούς τροχούς.

Στην παρούσα εργασία, οι μεταλλικοί τροχοί που θα συγκριθούν με τους πλαστικούς, και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια, είναι αυτοί με αριθμό οδόντων 38 και 25 όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1** και **Εικόνα 2**, αντίστοιχα.



**Εικόνα 1: Μεταλλικός οδοντωτός τροχός με 38 οδόντες**



**Εικόνα 2: Μεταλλικός οδοντωτός τροχός με 25 οδόντες**

## 4.2 Τρισδιάστατα εκτυπωμένοι οδοντωτοί τροχοί

Για την εκτύπωση των πλαστικών οδοντωτών τροχών, χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής P1S της Bambu Lab, τον οποίο διαθέτει το εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων Ε.Μ.Π. Ο εκτυπωτής αυτός, έχει διαστασιολογική ακρίβεια 0.1mm – 0.3mm. Οι παράμετροι εκτύπωσης προς διερεύνηση επιλέχθηκαν με βάση τα προκαθορισμένα προφίλ που παρέχει το λογισμικό του εκτυπωτή, το Bambu Studio, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3**. Τα προφίλ αυτά, ρυθμίζουν την ακρίβεια της εκτύπωσης με τις 2 βασικές παραμέτρους, το ύψος στρώσης (layer height) και την ταχύτητα εκτύπωσης (print speed) να διαφοροποιούνται. Στην **Εικόνα 4**, **Εικόνα 5**, **Εικόνα 6** και **Εικόνα 7** παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι εκτύπωσης για κάθε πλαστικό οδοντωτό τροχό.

- System presets -----
- 0.08mm Extra Fine @BBL X1C
  - 0.08mm High Quality @BBL X1C
  - 0.12mm Fine @BBL X1C
  - 0.12mm High Quality @BBL X1C
  - 0.16mm High Quality @BBL X1C
  - 0.16mm Optimal @BBL X1C
  - 0.20mm Standard @BBL X1C
  - 0.20mm Strength @BBL X1C
  - 0.24mm Draft @BBL X1C
  - 0.28mm Extra Draft @BBL X1C

**Εικόνα 3: Προκαθορισμένα προφίλ του λογισμικού Bambu Studio**

| 0.12mm Fine @BBL X1C       |          |               |         | 0.12mm High Quality @BBL X1C |          |               |         | 0.20mm Standard @BBL X1C   |          |               |         | * 0.20mm Standard @BBL X1C |          |               |         |
|----------------------------|----------|---------------|---------|------------------------------|----------|---------------|---------|----------------------------|----------|---------------|---------|----------------------------|----------|---------------|---------|
| Quality                    | Strength | Speed         | Support | Quality                      | Strength | Speed         | Support | Quality                    | Strength | Speed         | Support | Quality                    | Strength | Speed         | Support |
| <b>Initial layer speed</b> |          |               |         | <b>Initial layer speed</b>   |          |               |         | <b>Initial layer speed</b> |          |               |         | <b>Initial layer speed</b> |          |               |         |
| Initial layer              |          | 50 mm/s       |         | Initial layer                |          | 50 mm/s       |         | Initial layer              |          | 50 mm/s       |         | Initial layer              |          | 50 mm/s       |         |
| Initial layer infill       |          | 105 mm/s      |         | Initial layer infill         |          | 105 mm/s      |         | Initial layer infill       |          | 105 mm/s      |         | Initial layer infill       |          | 105 mm/s      |         |
| <b>Other layers speed</b>  |          |               |         | <b>Other layers speed</b>    |          |               |         | <b>Other layers speed</b>  |          |               |         | <b>Other layers speed</b>  |          |               |         |
| Outer wall                 |          | 200 mm/s      |         | Outer wall                   |          | 60 mm/s       |         | Outer wall                 |          | 200 mm/s      |         | Outer wall                 |          | 60 mm/s       |         |
| Inner wall                 |          | 350 mm/s      |         | Inner wall                   |          | 150 mm/s      |         | Inner wall                 |          | 300 mm/s      |         | Inner wall                 |          | 150 mm/s      |         |
| Small perimeters           |          | 50% mm/s or % |         | Small perimeters             |          | 50% mm/s or % |         | Small perimeters           |          | 50% mm/s or % |         | Small perimeters           |          | 50% mm/s or % |         |
| Small perimeter threshold  |          | 0 mm          |         | Small perimeter threshold    |          | 0 mm          |         | Small perimeter threshold  |          | 0 mm          |         | Small perimeter threshold  |          | 0 mm          |         |
| Sparse infill              |          | 430 mm/s      |         | Sparse infill                |          | 180 mm/s      |         | Sparse infill              |          | 270 mm/s      |         | Sparse infill              |          | 180 mm/s      |         |
| Internal solid infill      |          | 350 mm/s      |         | Internal solid infill        |          | 180 mm/s      |         | Internal solid infill      |          | 250 mm/s      |         | Internal solid infill      |          | 180 mm/s      |         |
| Top surface                |          | 200 mm/s      |         | Top surface                  |          | 150 mm/s      |         | Top surface                |          | 200 mm/s      |         | Top surface                |          | 150 mm/s      |         |

**Εικόνα 4: 0.12 mm ύψος στρώσης με υψηλές ταχύτητες**

**Εικόνα 5: 0.12 mm ύψος στρώσης με χαμηλές ταχύτητες**

**Εικόνα 6: 0.20 mm ύψος στρώσης με υψηλές ταχύτητες**

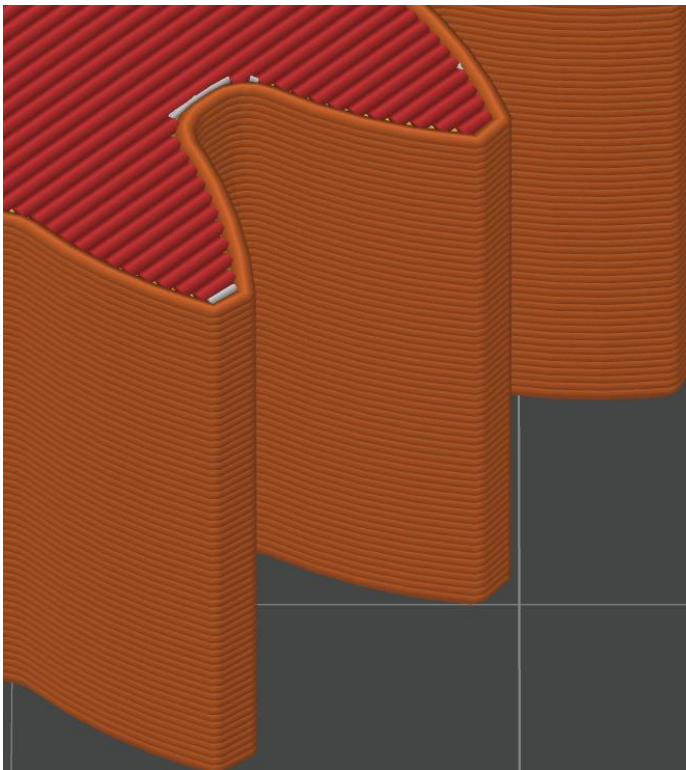
**Εικόνα 7: 0.20 mm ύψος στρώσης με χαμηλές ταχύτητες**

Επειδή στα προεπιλεγμένα προφίλ του Bambu Studio δεν υπήρχε για ύψος στρώσης 0.20 mm, προφίλ με χαμηλές ταχύτητες, δημιουργήθηκε ένα νέο προφίλ με ύψος στρώσης 0.20 mm και τις χαμηλές ταχύτητες του προφίλ με ύψος στρώσης 0.12 mm.

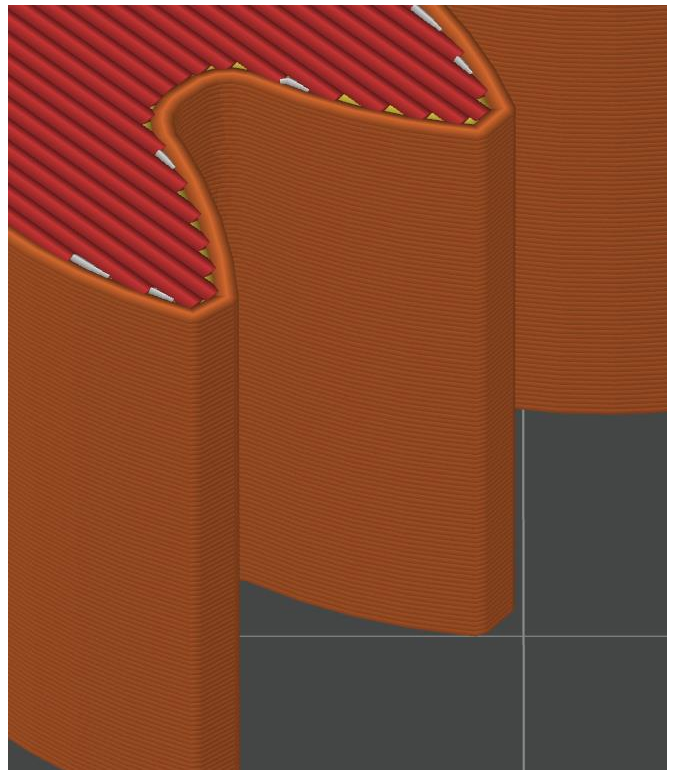
Οι υπόλοιπες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αμετάβλητες για κάθε παραλλαγή της ταχύτητας εκτύπωσης και του ύψους στρώματος είναι:

- Υλικό: PLA
- Θερμοκρασία κλίνης εκτύπωσης (bed temperature): 55 °C
- Θερμοκρασία ακροφυσίου (nozzle temperature): 220 °C
- Χωροπλήρωση (infill): 15%
- Διάμετρος ακροφυσίου (nozzle diameter): 0.4mm
- Πάχος τοιχώματος (wall thickness): 0.8 mm
- Πάνω – κάτω στρώσεις (top – bottom layer number): 2

Στην **Εικόνα 8** και **Εικόνα 9**, φαίνονται τα διαφορετικά ύψη στρώματος που επιλέχθηκαν να διερευνηθούν, στο λογισμικό Bambu Studio.

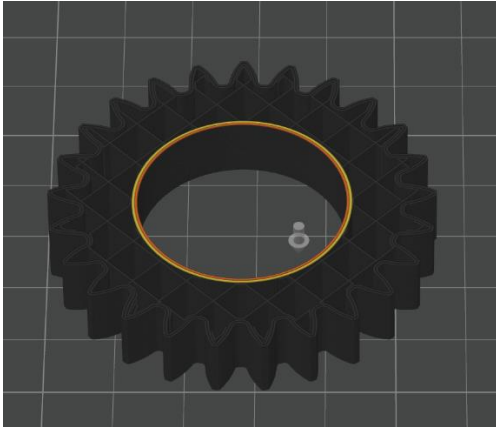


**Εικόνα 8: Οδόντας τροχού με ύψος στρώσης 0.20 mm**

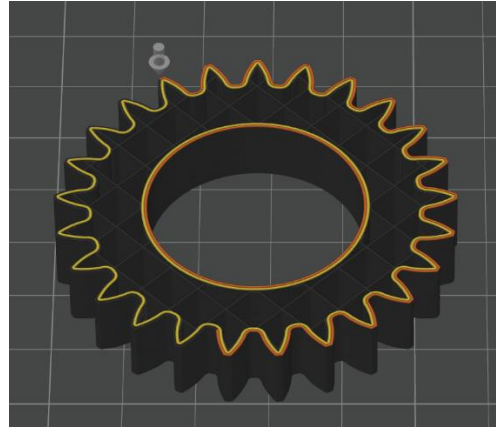


**Εικόνα 9: Οδόντας τροχού με ύψος στρώσης 0.12 mm**

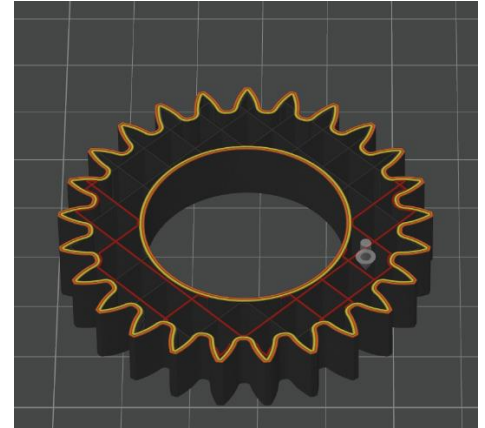
Στις παρακάτω εικόνες, φαίνεται η διαδικασία εκτύπωσης μίας στρώσης του πλαστικού οδοντωτού τροχού. Στην **Εικόνα 10** τοποθετούνται το εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα στην εσωτερική διάμετρο του τροχού. Στην **Εικόνα 11** τοποθετούνται το εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα των οδόντων του τροχού. Τέλος, στην **Εικόνα 12**, τοποθετείται το γέμισμα με βάση το επιλεγμένο ποσοστό γεμίσματος.



**Εικόνα 10:** Εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα στην εσωτερική διάμετρο του τροχού



**Εικόνα 11:** Εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα των οδόντων του τροχού

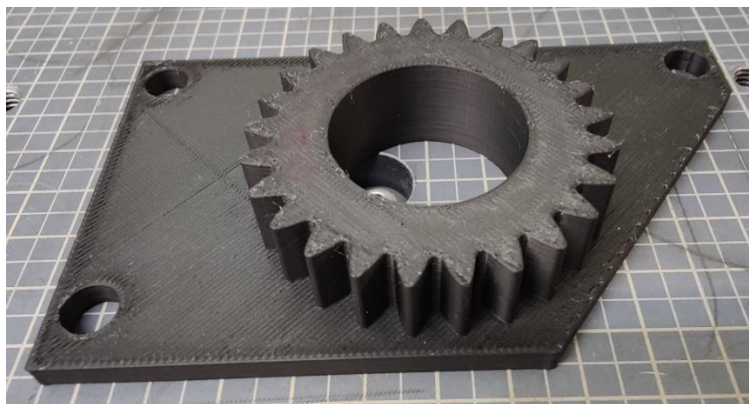


**Εικόνα 12:** Χωροπλήρωση (infill) του τροχού

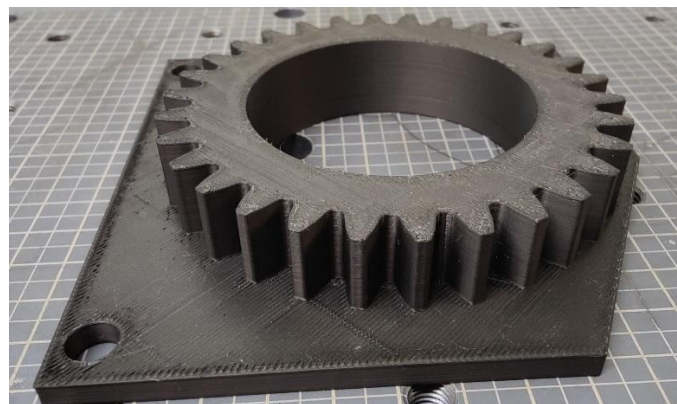
Για τους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς, επιλέχθηκε να εκτυπωθούν 6 τροχοί. Προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ όμοιων μεταλλικών και πλαστικών οδοντωτών τροχών, οι 4 έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τον μεταλλικό τροχό με 25 οδόντες και module 2, με τις παραμέτρους εκτύπωσης να είναι αυτές που διαφέρουν από τροχό σε τροχό. Οι άλλοι 2 έχουν 30 οδόντες και module 3, με τις παραμέτρους εκτύπωσης να διαφέρουν και πάλι, όμως αυτή τη φορά με σκοπό να διερευνηθεί κατά πόσο το διαφορετικό module επηρεάζει την ποιότητα της κατατομής. Στους 4 πρώτους μετρήθηκαν όλοι οι οδόντες και μελετήθηκαν όλες οι διαφορετικές παράμετροι εκτύπωσης που παρουσιάστηκαν πιο πάνω, ενώ στους άλλους 2 μετρήθηκαν 5 οδόντες και μελετήθηκαν οι παράμετροι εκτύπωσης για ύψος στρώσης 0.2 mm και χαμηλές-υψηλές ταχύτητες.

Στην **Εικόνα 13** και **Εικόνα 14** φαίνονται 2 από τους πλαστικούς τροχούς που εκτυπώθηκαν





**Εικόνα 13: Πλαστικός οδοντωτός τροχός με 25 οδόντες**



**Εικόνα 14: Πλαστικός οδοντωτός τροχός με 30 οδόντες**

## 5. Μετρήσεις

### 5.1 Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine – CMM)

Οι μετρήσεις των κατατομών των οδοντωτών τροχών πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine – CMM) που διαθέτει το εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων Ε.Μ.Π. Είναι μια μηχανή που μετράει στους τρεις άξονες και είναι εξαιρετικά ακριβής, της τάξεως του μικρομέτρου. Είναι κατάλληλη για την μέτρηση γεωμετρικών μορφών όπως επίσης και για τη μέτρηση γεωμετρικών ανοχών. Η CMM του εργαστηρίου, είναι της εταιρίας HEXAGON και είναι τύπου κινητής γέφυρας. Η μηχανή αυτή, μετράει τη γεωμετρία ενός τεμαχίου λαμβάνοντας τις συντεταγμένες από ένα πλήθος σημείων πάνω στο τεμάχιο, το οποίο γίνεται είτε χειροκίνητα μέσω ενός χειριστηρίου είτε αυτόματα μέσω προκαθορισμένων σημείων που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο λογισμικό της CMM.

Για τα σημεία των μετρήσεων πάνω στις κατατομές, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας που παρέχεται από το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών Ε.Μ.Π. Ο κώδικας δίνει ως έξοδο 56 ισαπέχοντα σημεία κατά μήκος της εξελιγμένης, κάθε κατατομής, και συνολικά 112 για κάθε δόντι. Τα σημεία αυτά αργότερα χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στο λογισμικό λειτουργίας της CMM, προκειμένου να ληφθούν οι μετρήσεις σημείο-σημείο.

#### 5.1.1 Εξοπλισμός

Η κατασκευή μιας CMM τύπου κινητής γέφυρας, αποτελείται από διάφορα κρίσιμα εξαρτήματα, ξεκινώντας από την ίδια τη δομή της γέφυρας, η οποία εκτείνεται πάνω από το τραπέζι μέτρησης και παρέχει σταθερότητα και ακρίβεια. Αυτή η γέφυρα κινείται κατά μήκος του άξονα X, ενώ η κεφαλή μέτρησης (probe) που είναι προσαρτημένη σε αυτήν κινείται κατά μήκος των αξόνων Y και Z, επιτρέποντας πλήρεις τρισδιάστατες μετρήσεις. Η κεφαλή μέτρησης είναι εξοπλισμένη με αισθητήρα (probe tip) σε μορφή σφαίρας. Η σφαίρα αυτή είναι που έρχεται σε επαφή με το μετρούμενο τεμάχιο και είναι διαμέτρου 1 mm. Το τραπέζι από γρανίτη χρησιμεύει ως βάση για το αντικείμενο που μετριέται, παρέχοντας μια σταθερή και επίπεδη επιφάνεια για να διασφαλιστεί η ακρίβεια, ενώ με το ειδικό χειριστήριο που είναι πάνω στο τραπέζι όπως φαίνεται στην **Εικόνα 15**, πραγματοποιείται ο έλεγχος της ταχύτητας κίνησης καθώς και η χειροκίνητη λήψη μετρήσεων. Επιπλέον, υψηλής ανάλυσης γραμμικοί κανόνες και αερορουλεμάν ενσωματώνονται στις κινήσεις των αξόνων, ελαχιστοποιώντας την τριβή και εξασφαλίζοντας ομαλή και ακριβή τοποθέτηση. Η κίνηση των αξόνων πραγματοποιείται μέσω πνευματικού κυκλώματος, ενώ ο εξοπλισμός της μηχανής CMM βρίσκεται σε ελεγχόμενο περιβάλλον για να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία, ενισχύοντας περαιτέρω την ακρίβεια της μέτρησης.

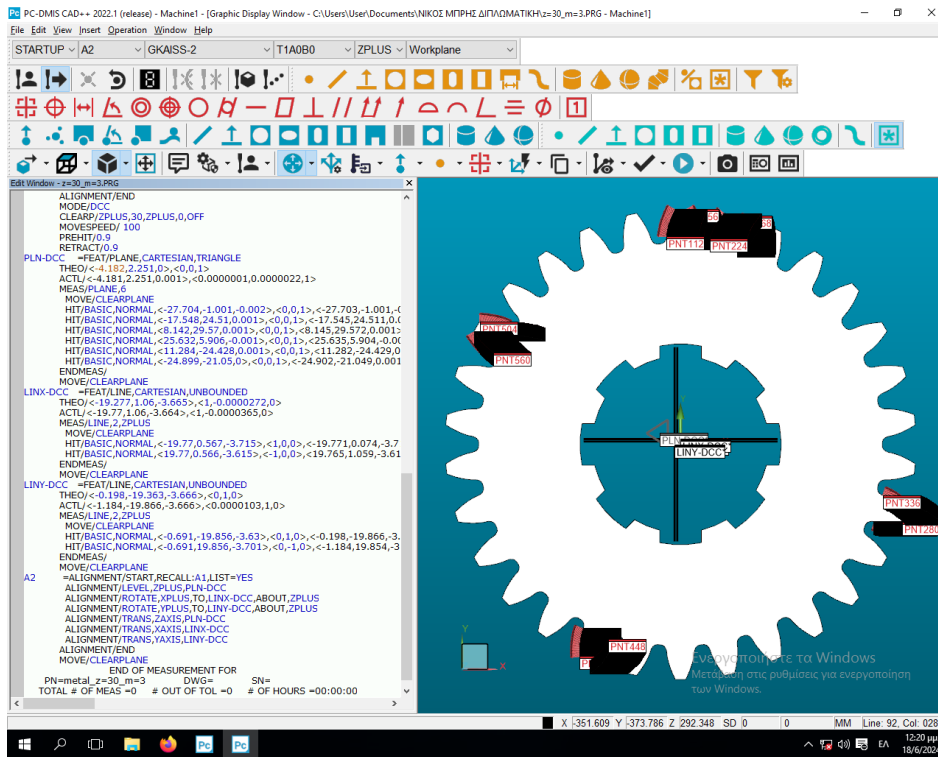


**Εικόνα 15:** Η CMM στο εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων Ε.Μ.Π.

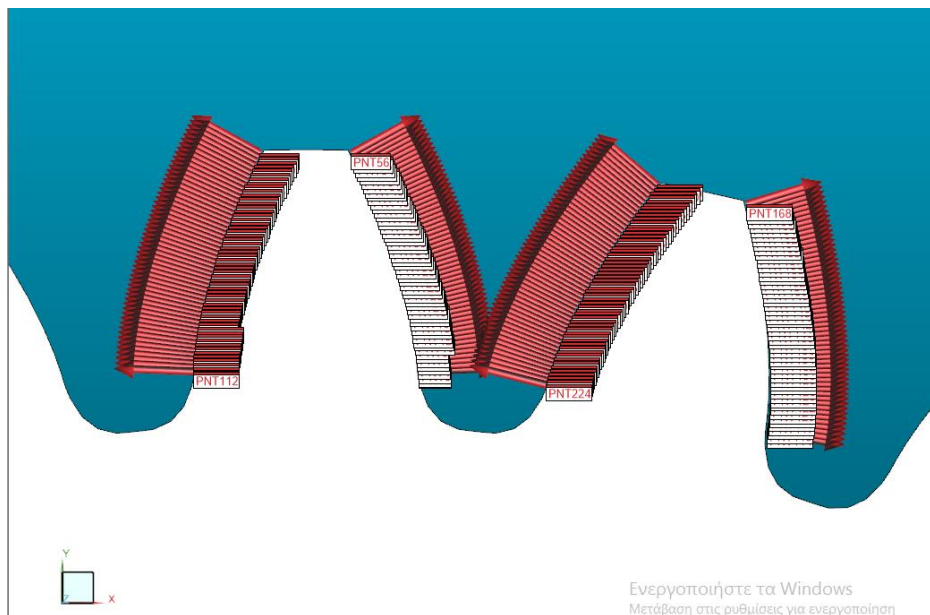
### 5.1.2 Λογισμικό

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και λήψη των μετρήσεων από την CMM, είναι το PC-DMIS. Αυτό το λογισμικό παρέχει μια πληθώρα εργαλείων για τον προγραμματισμό, την εκτέλεση και την ανάλυση ρουτινών μέτρησης. Το PC-DMIS επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν λεπτομερή προγράμματα μέτρησης, ορίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα επιθεωρηθούν, όπως σημεία, γραμμές, κύκλους και επιφάνειες. Το λογισμικό αυτό, διαθέτει προηγμένους αλγόριθμους για την ευθυγράμμιση των εξαρτημάτων, την αντιστάθμιση των αποκλίσεων των αισθητήρων και την παραγωγή ακριβών δεδομένων μέτρησης. Επιπλέον, το PC-DMIS περιλαμβάνει ισχυρά εργαλεία αναφοράς που μπορούν να δημιουργήσουν λεπτομερείς αναφορές επιθεώρησης, πλήρεις με γραφικές απεικονίσεις και στατιστική ανάλυση.

Στην παρούσα εργασία, λήφθηκε ως είσοδος στο PC-DMIS, το πλήθος σημείων των κατατομών των οδόντων από τους οδοντωτούς τροχούς προς μέτρηση, όπως επίσης και το CAD αρχείο του οδοντωτού τροχού όπως φαίνεται στην **Εικόνα 16** και **Εικόνα 17**. Με βάση τα δεδομένα αυτά, το λογισμικό αντιστοιχεί που βρίσκονται τα σημεία πάνω στον οδοντωτό τροχό και μέσα από ανάπτυξη απλού κώδικα, προχωράει στη λήψη των μετρήσεων.



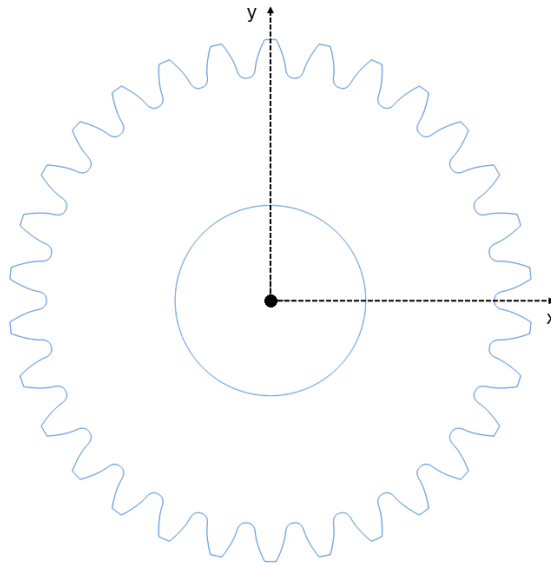
Εικόνα 16: Λογισμικό PC-DMIS



Εικόνα 17: Σημεία μετρήσεων στους οδόντες μέσα από το λογισμικό PC-DMIS

## 5.2 Σύστημα Συντεταγμένων

Βασική αρχή ήταν να οριστεί το σύστημα συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε αρχικά να είναι κοινό σε κάθε υπολογιστικό ή σχεδιαστικό πρόγραμμα στο οποίο θα αναλυθεί ο οδοντωτός τροχός και επιπλέον να είναι βολικό για την λήψη και ανάλυση των μετρήσεων από την CMM. Έτσι επιλέχθηκε η αρχή των αξόνων του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων να βρίσκεται στο κέντρο του οδοντωτού τροχού, με την ευθεία  $x=0$  να περνάει από το μέσο του οδόντος (**Εικόνα 18**). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό ώστε να πραγματοποιούνται σωστά οι περιστροφές των κατατομών των οδόντων γύρω από το κέντρο του οδοντωτού τροχού αλλά και για την ανάπτυξη πιο απλών κωδίκων.



**Εικόνα 18: Σύστημα συντεταγμένων**

## 5.3 Βάσεις στήριξης (Jigs)

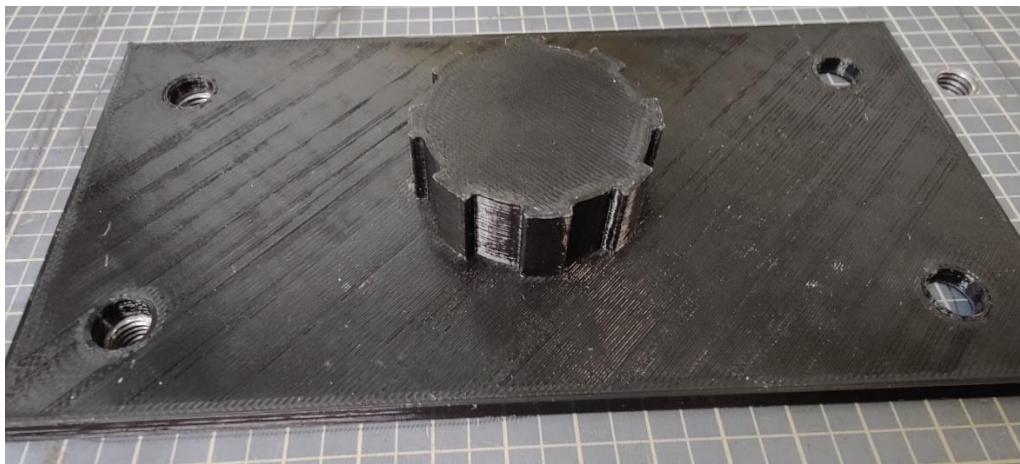
Ιδιαίτερα σημαντικό για την σωστή λήψη των μετρήσεων, ήταν η δημιουργία βάσεων στήριξης για τους οδοντωτούς τροχούς.

Λόγω της απαίτησης που κάναμε προηγουμένως για το σύστημα συντεταγμένων, θα πρέπει πάντα ο άξονας  $x=0$  να διέρχεται από το μέσο του οδόντα. Για να διασφαλιστεί αυτό, κατά την τοποθέτηση του οδοντωτού τροχού στο τραπέζι της CMM, αναγκαία ήταν η τρισδιάστατη εκτύπωση βάσεων στήριξης που βιδώνονται στο τραπέζι και εξασφαλίζουν τον σωστό προσανατολισμό του τροχού. Οι βάσεις αυτές, πρέπει να δεσμεύουν όλους τους βαθμούς ελευθερίας του τροχού πάνω στο τραπέζι και να είναι όσο πιο ακριβείς γίνεται ως προς την γεωμετρία τους, καθώς για οποιαδήποτε κίνηση του τροχού, όσο μικρή κι αν είναι, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να εμφανιστούν σφάλματα και αποκλίσεις κατά τη λήψη των μετρήσεων, ή ακόμα και πρόκληση βλάβης στον εξοπλισμό της CMM.

Για τους οδοντωτούς τροχούς της παρούσας εργασίας, δημιουργήθηκαν 3 τύποι βάσεων στήριξης.

- Οδοντωτοί τροχοί με πολύσφηνο

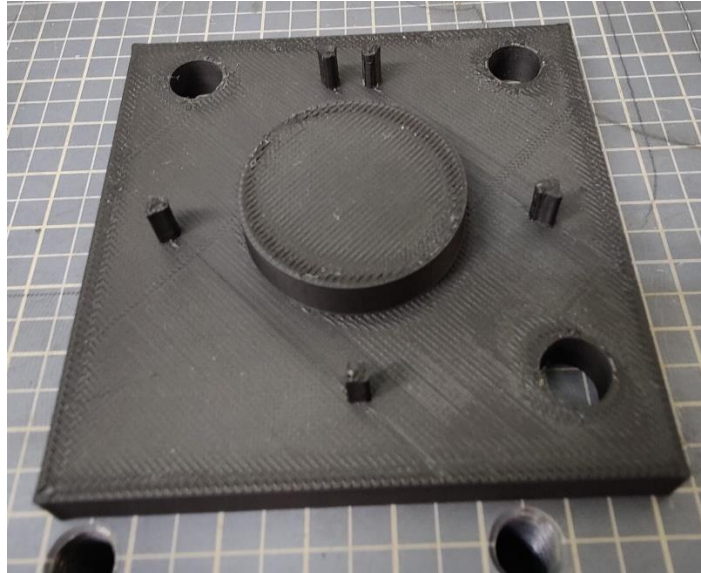
Η οπή στο κέντρο αυτών των τροχών διαθέτει σφηνόδρομους, ώστε να μπορούν να τοποθετούνται σε άξονες με πολύσφηνα. Έτσι η βάση στήριξής τους, θα αποτελείται από έναν άξονα με πολύσφηνα, με διαστάσεις ελαφρώς μικρότερες από τις πραγματικές λόγω των σφαλμάτων της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 19**. Ως αποτέλεσμα, πραγματοποιείται η τοποθέτηση του τροχού στη βάση στήριξης, με σφιχτή συναρμογή, και να δεν επιτρέπεται η περιστροφή του τροχού λόγω των σφηνών.



**Εικόνα 19: Βάση στήριξης για τροχό με πολύσφηνο**

- Οδοντωτοί τροχοί χωρίς πολύσφηνο

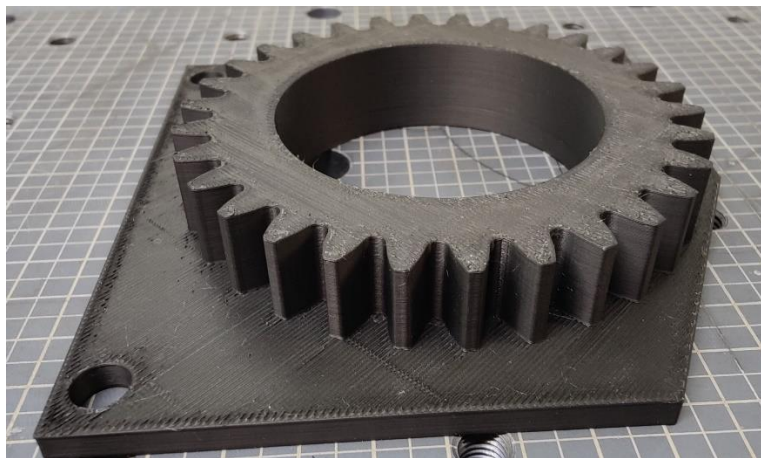
Η οπή στο κέντρο αυτών των τροχών είναι κυκλική, χωρίς κάποια διαμόρφωση. Σε αυτή τη περίπτωση, εκτυπώθηκε ένας κυλινδρικός άξονας πάνω στη βάση ώστε να επιτυγχάνεται η σφιχτή συναρμογή κατά την τοποθέτηση. Προκειμένου να μην περιστρέφεται ο τροχός, εκτυπώθηκαν επιπλέον πάνω στη βάση κάποιες τρισδιάστατες μορφές (4-6 ανάλογα το μέγεθος του τροχού) στο σχήμα που έχει το κενό ανάμεσα στους οδόντες, έτσι ώστε κατά την τοποθέτηση, αυτές οι μορφές να τοποθετούνται σφιχτά ανάμεσα στους οδόντες και να δεσμεύουν την κίνηση της περιστροφής, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 20**. Οι μορφές αυτές, βρίσκονται σε απόσταση  $\sim 90^\circ$ , κάθε 1 ή 2 μορφές.



**Εικόνα 20:** Βάση στήριξης για τροχό χωρίς πολύσφηνο

- Πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί, εκτυπωμένοι με ενσωματωμένη βάση στήριξης

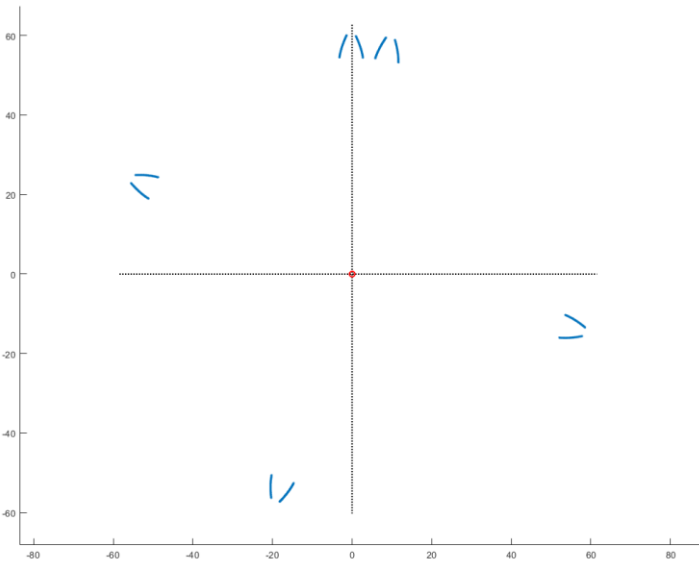
Οι παραπάνω 2 περιπτώσεις βάσεων στήριξης, παρουσιάζουν κάποια σφάλματα στις μετρήσεις που οφείλονται στην τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια. Έτσι λοιπόν, αφού οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί δεν πρόκειται να λειτουργήσουν και θα χρησιμοποιηθούν μόνο για την μελέτη των κατατομών τους, οι βάσεις στήριξης εκτυπώθηκαν ενσωματωμένες με τους τροχούς, προκειμένου να εξαλειφθούν τα σφάλματα εκτύπωσης που επηρεάζουν την τοποθέτηση και να εξασφαλιστεί ο σίγουρος προσανατολισμός των τροχών, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 21**.



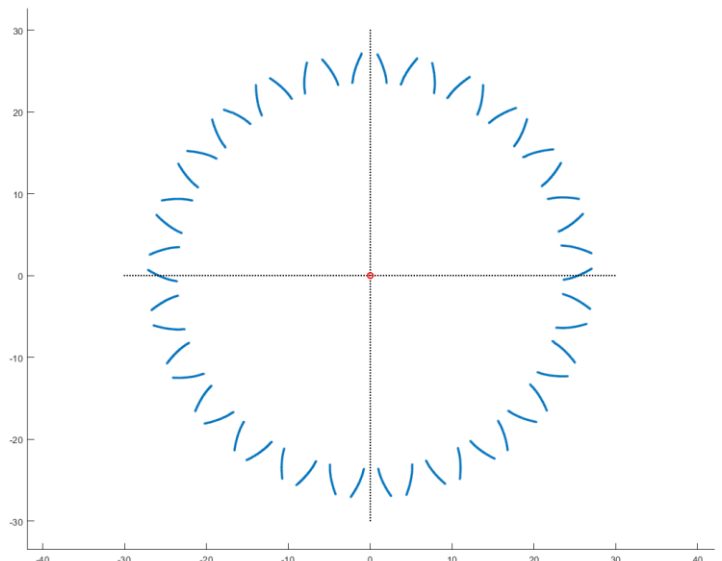
**Εικόνα 21:** Τροχός με ενσωματωμένη τη βάση στήριξης

## 5.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

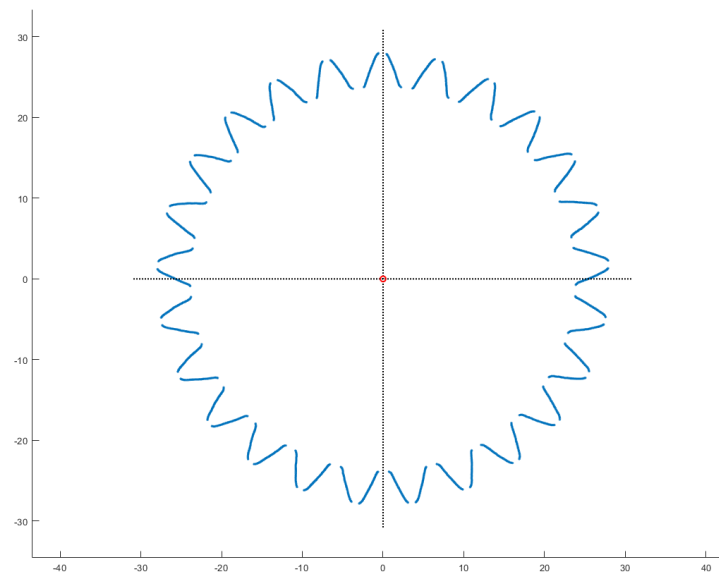
Με βάση όλα τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στις επιλεγμένες κατατομές των οδοντωτών τροχών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι περιπτώσεις των μετρήσεων για τροχούς που μετρήθηκαν είτε 5 είτε όλοι οι οδόντες, όπως φαίνονται και στην **Εικόνα 22**, **Εικόνα 23** και **Εικόνα 24**



**Εικόνα 22:** Μεταλλικός οδοντωτός τροχός με 5 μετρημένους οδόντες



**Εικόνα 23:** Μεταλλικός οδοντωτός τροχός με όλους τους οδόντες μετρημένους



**Εικόνα 24:** Πλαστικός οδοντωτός τροχός με όλους τους οδόντες μετρημένους



## 6. Βαθμοί ποιότητας οδοντωτών τροχών κατά ISO

### 6.1 Γενικά

Η κατηγοριοποίηση των οδοντωτών τροχών σε βαθμούς ποιότητας για τα σφάλματα του βήματος και της κατατομής πραγματοποιήθηκε με βάση το πρότυπο ISO 1328-1. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό υπάρχουν 11 βαθμοί ποιότητας, με τον εντέκατο να είναι αυτός με τη μικρότερη ακρίβεια ενώ ο πρώτος έχει τη μεγαλύτερη. Προκειμένου ένας οδοντωτός τροχός να κατηγοριοποιηθεί σε έναν από αυτούς τους βαθμούς ποιότητας, έγινε υπολογισμός και ανάλυση 4 παραμέτρων: Συνολική απόκλιση κατατομής – Total profile deviation ( $F_a$ ), Απόκλιση μορφής κατατομής – Profile form deviation ( $f_{fa}$ ), Απόκλιση κλίσης κατατομής – Profile slope deviation ( $f_{H\alpha}$ ), Απλό σφάλμα βήματος – Individual single pitch deviation ( $f_{pi}$ ).

### 6.2 Ορισμοί

Παρακάτω παρατίθενται οι ορισμοί σύμφωνα με το ISO 1328-1, για μεγέθη τα οποία είναι απαραίτητα για τον ορισμό των αποκλίσεων στη συνέχεια.

- *Αρχή ενεργής κατατομής  $N_f$  (Start of active profile)* : ορίζεται ως το σημείο στο οποίο ξεκινάει η επαφή δύο συνεργαζόμενων οδόντων πάνω στην εξελεγμένη
- *Έλεγχος κατατομής  $C_f$  (Profile Control)* : ορίζεται ως το σημείο της κατατομής από το οποίο και έπειτα ξεκινάει η αξιολόγηση των μετρήσεων. Το σημείο αυτό μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε ανάμεσα από το σημείο όπου ξεκινάει η εξελεγμένη έως και την αρχή ενεργής κατατομής.
- *Μορφή κεφαλής  $F_a$  (Tip Form)* : ορίζεται ως το σημείο όπου τελειώνει η εξελεγμένη και ξεκινάει η μορφή της κεφαλής του οδόντος. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάποια μορφή κεφαλής (π.χ. chamfer), τότε ξεκινάει απευθείας η διάμετρος κεφαλής.
- *Μήκος κατατομής προς αξιολόγηση  $L_a$  (Profile evaluation length)* : ορίζεται ως το μήκος της εξελεγμένης στο οποίο πραγματοποιείται η αξιολόγηση των μετρήσεων. Δηλαδή ξεκινάει από το σημείο ελέγχου κατατομής και τελειώνει στο 95% του μήκους μέχρι τη μορφή κεφαλής.

Το μήκος αυτό αποτελεί επίσης και το 95% του μήκους της τροχιάς επαφής.

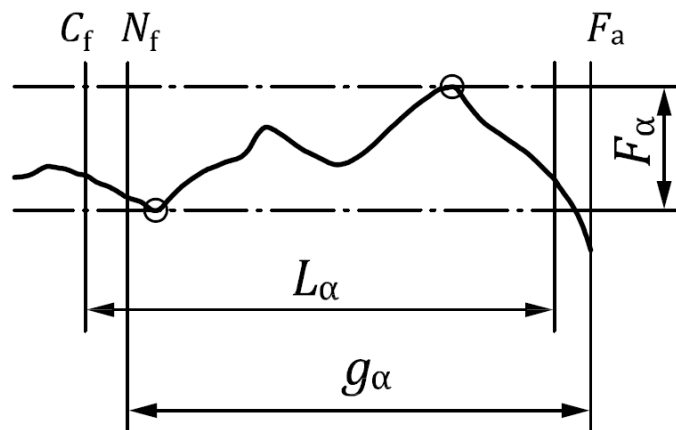
- *Μήκος τροχιάς επαφής  $g_a$  (Length of path of contact)* : ορίζεται ως το μήκος από την αρχή ενεργής κατατομής έως και το σημείο στο οποίο σταματάει η επαφή, δηλαδή το τέλος ενεργής κατατομής.

- *Σφάλματα κατατομής (Profile deviation)* : ορίζεται ως η ποσότητα κατά την οποία αποκλίνει η πραγματική μετρούμενη κατατομή από την θεωρητική. Στα διαγράμματα αντιστοιχεί σε μια καμπύλη με συνεχόμενη γραμμή.
- *Γραμμή θεωρητικής κατατομής (Design profile line)* : ορίζεται ως το μήκος της θεωρητικής κατατομής και αντιστοιχεί σε μία ευθεία αξονική γραμμή στα διαγράμματα των σφαλμάτων.
- *Γραμμή μέσης κατατομής (Mean profile line)* : ορίζεται ως μια ευθεία γραμμή η οποία ακολουθεί το ίχνος της καμπύλης των σφαλμάτων και την έχει κλίση είτε θετική είτε αρνητική. Στα διαγράμματα αντιστοιχεί σε μια διακεκομμένη γραμμή.

Με βάση τους ορισμούς αυτούς, ορίζονται και οι αποκλίσεις των κατατομών και του βήματος.

#### Συνολική απόκλιση κατατομής – Total profile deviation ( $F_\alpha$ )

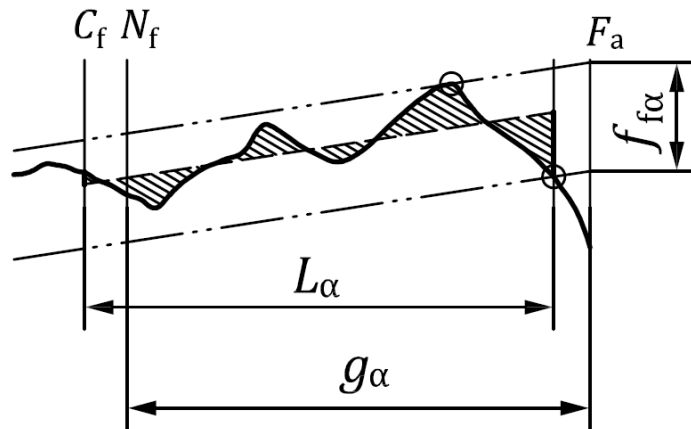
Η συνολική απόκλιση κατατομής ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα σε 2 παράλληλες, στη γραμμή θεωρητικής κατατομής, ευθείες, οι οποίες περικλείουν την καμπύλη του σφάλματος. Είναι δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στο μέγιστο και στο ελάχιστο σημείο της καμπύλης του σφάλματος της κατατομής.



**Εικόνα 25: Συνολική απόκλιση κατατομής  $F_\alpha$**

#### Απόκλιση μορφής κατατομής – Profile form deviation ( $f_{f\alpha}$ )

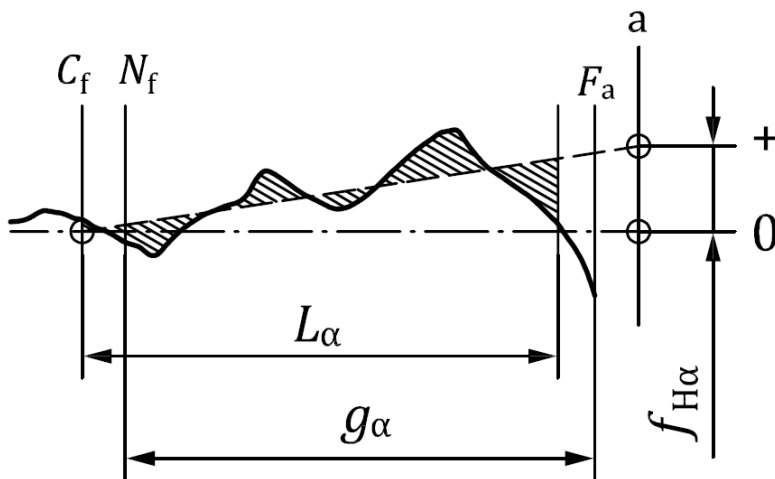
Η απόκλιση μορφής κατατομής ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα σε 2 παράλληλες, στη γραμμή μέσης κατατομής, ευθείες, οι οποίες περικλείουν την καμπύλη του σφάλματος.



Εικόνα 26: Απόκλιση μορφής κατατομής  $f_{fa}$

Απόκλιση κλίσης κατατομής – Profile slope deviation ( $f_{H\alpha}$ )

Η απόκλιση κλίσης κατατομής ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα σε 2 παράλληλες, στη γραμμή θεωρητικής κατατομής, ευθείες, οι οποίες τέμνουν την γραμμή μέσης κατατομής στο σημείο ελέγχου κατατομής και στο σημείο που αντιστοιχεί στη διάμετρο κεφαλής (a). Η απόκλιση αυτή μπορεί να έχει είτε θετικό είτε αρνητικό πρόσημο με βάση την κλίση της γραμμής μέσης κατατομής.



Εικόνα 27: Απόκλιση κλίσης κατατομής  $f_{H\alpha}$

|            |                                |  |  |
|------------|--------------------------------|--|--|
| <b>Key</b> |                                |  | <b>Points on line of action</b>        |
| —————      | measured profile               |  | $C_f$ profile control                  |
| .....      | facsimile of design profile    |  | $N_f$ start of active profile          |
| -----      | mean profile line              |  | $F_a$ tip form, where tip break starts |
| .....      | facsimile of mean profile line |  | a tip                                  |

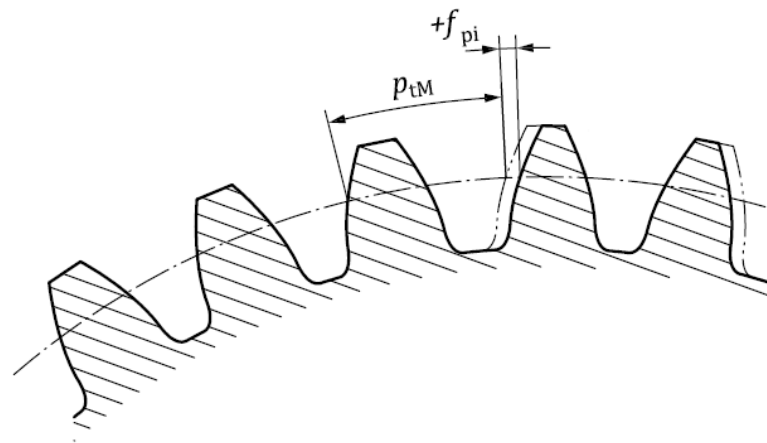
**Εικόνα 28: Ορολογία για τις αποκλίσεις κατατομής**

Απλό σφάλμα βήματος – Single pitch deviation ( $f_p$ )

Για να οριστεί το απλό σφάλμα βήματος, χρειάζεται πρώτα να οριστεί το μεμονωμένο απλό σφάλμα βήματος ( $f_{pi}$ ).

Το μεμονωμένο απλό σφάλμα βήματος ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά μεταξύ του πραγματικού (μετρούμενου) βήματος και του θεωρητικού βήματος στον αρχικό κύκλο του οδοντωτού τροχού.

Υπάρχουν τόσες τιμές για το μεμονωμένο απλό σφάλμα βήματος για τις αριστερές και δεξιές κατατομές, όσοι είναι και οι οδόντες του τροχού.



|            |             |
|------------|-------------|
| <b>Key</b> |             |
| .....      | theoretical |
| —————      | actual      |

**Εικόνα 29: Απλό σφάλμα βήματος  $f_{pi}$**

Έτσι, ως απλό σφάλμα βήματος, ορίζεται το μεγαλύτερο μεμονωμένο απλό σφάλμα βήματος όλων των οδόντων, για κάθε πλευρά, σε απόλυτη τιμή.

### 6.3 Επεξεργασία μετρήσεων

Η επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων για τους οδόντες που επιλέχθηκαν να μετρηθούν, πραγματοποιήθηκε σε σχέση με τον πρώτο οδόντα του τροχού ο οποίος είναι συμμετρικός ως προς την ευθεία  $x=0$ , με σκοπό την ανάπτυξη ενός απλούστερου και πιο αξιόπιστου κώδικα.

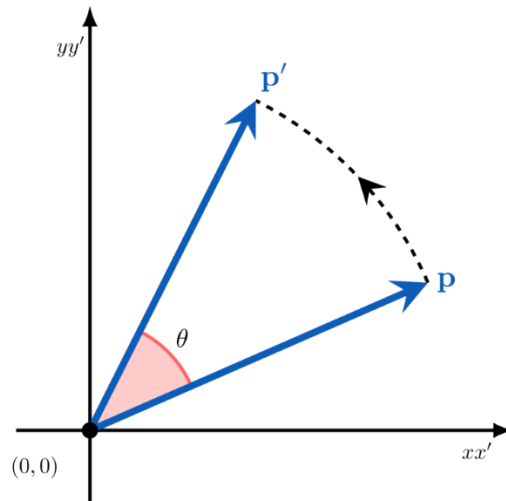
#### 6.3.1 Περιστροφή μετρήσεων

Προκειμένου να αναχθεί κάθε οδόντας που μας ενδιαφέρει, ως προς τον πρώτο οδόντα του τροχού, χρησιμοποιούμε το παρακάτω μητρώο περιστροφής :

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Το μητρώο αυτό περιστρέφει ένα σημείο  $p$  (ή ένα σύνολο σημείων), αριστερόστροφα, ως προς την αρχή των αξόνων  $(0, 0)$ , κατά γωνία  $\theta$  (**Εικόνα 30**) και συνεπώς ισχύει :

$$p' = p \cdot R(\theta)$$



**Εικόνα 30: Περιστροφή σημείου κατά γωνία  $\theta$**

Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rotation\\_matrix](https://en.wikipedia.org/wiki/Rotation_matrix)

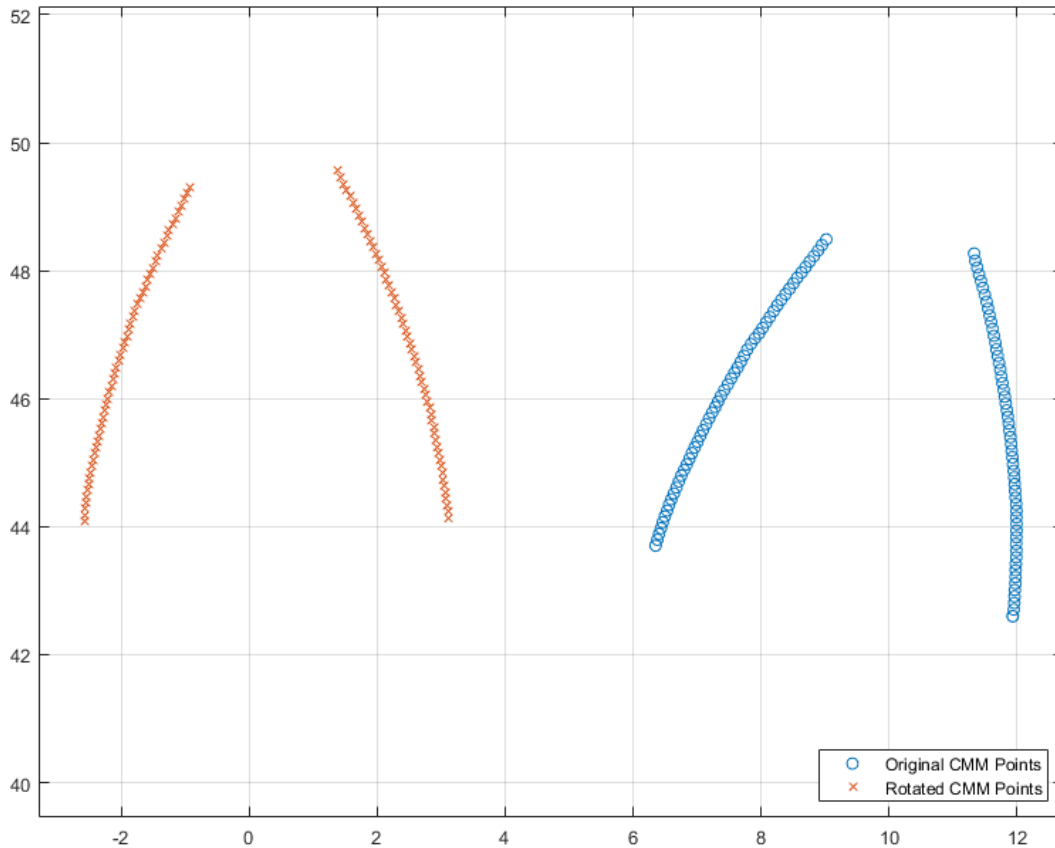
Στην περίπτωση των μετρήσεών μας, με κάθε κατατομή να αποτελείται από 56 σημεία, η γωνία για το μητρώο περιστροφής είναι η εξής :

$$\theta = \frac{360}{Z} \cdot (k - 1)$$

όπου,

$Z$  : ο συνολικός αριθμός των οδόντων του τροχού

$k$  : ο αριθμός του οδόντος που πρόκειται να περιστραφεί



**Εικόνα 31: Στροφή σημείων 2<sup>ου</sup> οδόντος**

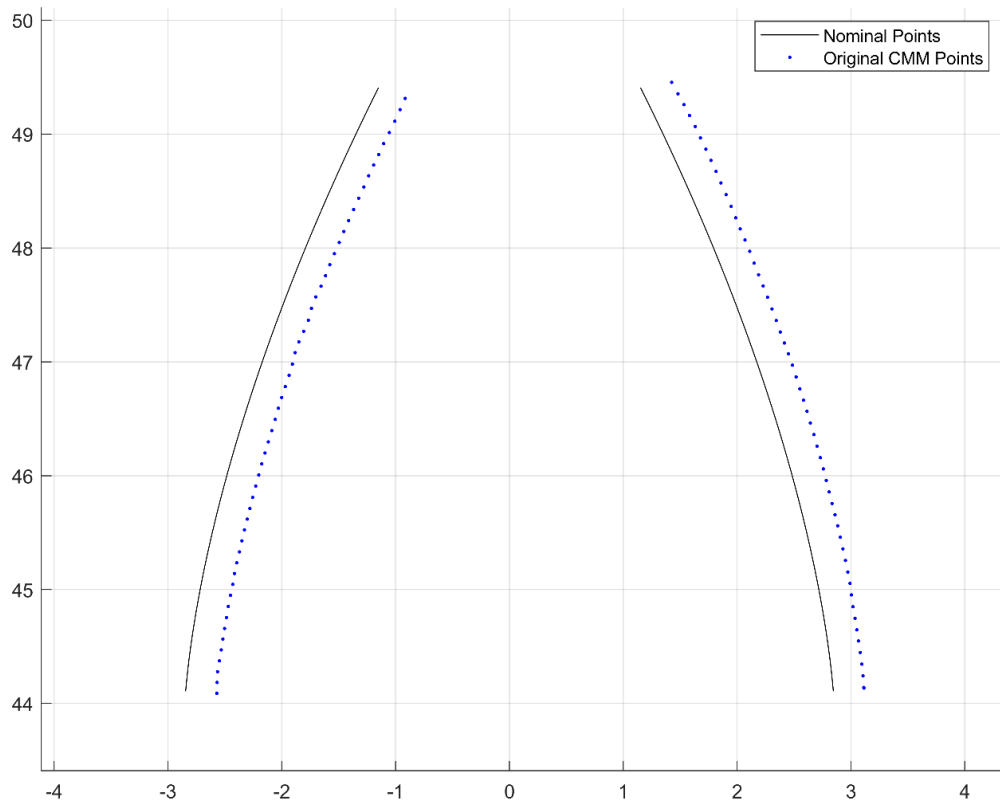
### 6.3.2 Διόρθωση σημείων

Στις μετρήσεις των κατατομών των οδόντων, παρατηρήθηκε μια απόκλιση σε σχέση με τις θεωρητικές κατατομές. Αυτή η απόκλιση δεν είναι το σφάλμα βήματος καθότι είναι σημαντικά πιο μεγάλη.

Όπως παρατηρείται και στην **Εικόνα 32**, ο οδόντας του τροχού που μετρήθηκε, δεν είναι συμμετρικός ως προς την ευθεία  $x=0$ . Αυτό υποδεικνύει ότι υπάρχει ένα σφάλμα περιστροφής του οδοντωτού τροχού κατά την τοποθέτησή του στην βάση στήριξης. Το σφάλμα αυτό, οφείλεται στις γεωμετρικές αποκλίσεις της βάσης σε σχέση με την θεωρητική της γεωμετρία από το CAD αρχείο, λόγω της τρισδιάστατης εκτύπωσης

και παρατηρείται σε κάθε τροχό που χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατα εκτυπωμένη βάση για την στήριξή του.

Επιπλέον παρατηρείται ότι αυτό το σφάλμα από την εκτύπωση επηρεάζει μόνο την περιστροφή του τροχού γύρω από το κέντρο του και όχι την ακτινική του μετατόπιση, καθώς όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 32**, η διάμετρος κεφαλής (tip diameter) και η διάμετρος στο σημείο που ξεκινάει η εξελιγμένη (root form diameter), είναι ίδιες με τις θεωρητικές.

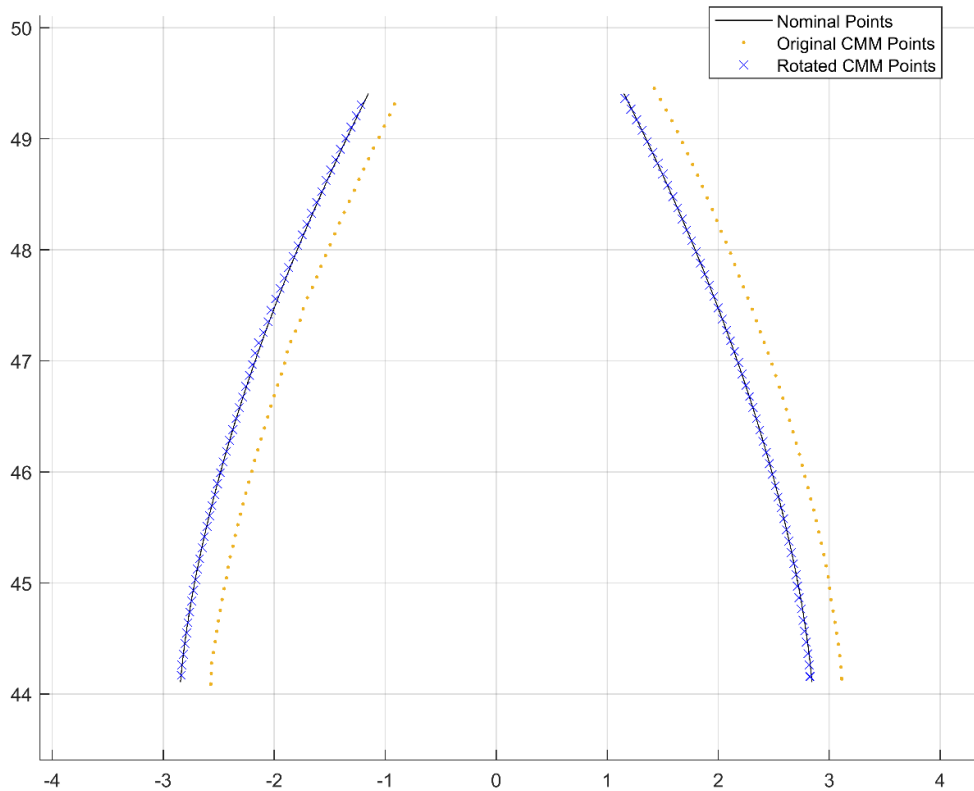


**Εικόνα 32: Απόκλιση κατατομών σε σχέση με τη θεωρητική γεωμετρία**

Για την αντιμετώπιση αυτής της απόκλισης, ο πρώτος οδόντας από κάθε τροχό θεωρήθηκε ότι έχει μηδενικό σφάλμα βήματος, δηλαδή ότι οι θεωρητικές κατατομές με τις κατατομές που μετρήθηκαν, ταυτίζονται.

Έχοντας ως γνώμονα αυτή τη θεώρηση, δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης μέσα από τον οποίο υπολογίζεται η γωνία  $\theta$  με την οποία πρέπει να στραφούν τα σημεία της κατατομής που μετρήθηκαν στη CMM, για να υπάρχει μηδενικό σφάλμα βήματος στην αριστερή και δεξιά κατατομή του πρώτου οδόντος κάθε τροχού. Αυτή η γωνία στροφής χρησιμοποιείται αργότερα σε ένα μητρώο περιστροφής ώστε να στραφούν όλα τα σημεία όλων των μετρούμενων κατατομών, γύρω από το κέντρο του οδοντωτού

τροχού (**Εικόνα 33**). Συνεπώς και το σφάλμα βήματος σε κάθε οδόντα, πέρα από των πρώτο που θα είναι ο οδόντας αναφοράς, θα έχει διορθωθεί.



**Εικόνα 33: Διόρθωση απόκλισης**

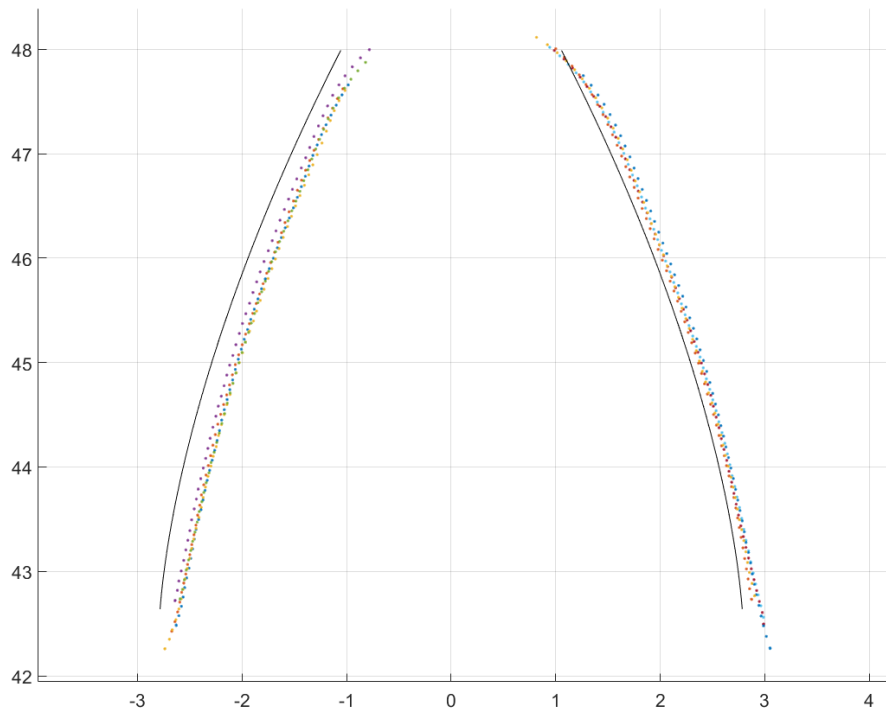
### 6.3.3 Σημεία τροχοειδούς και κεφαλής

Σε πολλές από τις μετρήσεις των κατατομών, είχαν συμπεριληφθεί και σημεία είτε του τροχοειδούς είτε της κεφαλής του οδόντος. Αυτό παρατηρήθηκε κυρίως στους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς και οφείλεται σε σφάλματα κατά την εκτύπωση. Τα σημεία αυτά δεν έπρεπε να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό των σφαλμάτων οπότε και αφαιρέθηκαν.

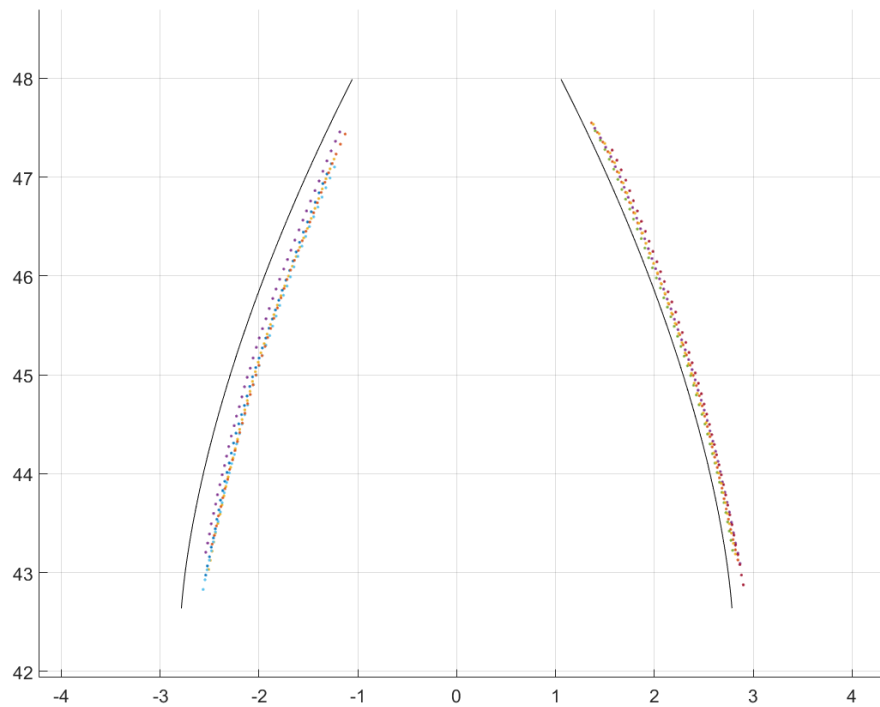
Οι τρόποι με τους οποίους έγινε αυτό ήταν δύο. Αρχικά αφαιρέθηκαν αυτόματα όλα τα σημεία τα οποία ήταν είτε πιο πάνω είτε πιο κάτω από την θεωρητική εξελιγμένη καμπύλη. Σε περίπτωση που παρέμεναν σημεία του τροχοειδούς ή της κεφαλής, μετά την αυτόματη αφαίρεση, έγινε χειροκίνητη αφαίρεση όσων σημείων χρειαζόντουσαν ώστε στο τέλος να μείνουν μόνο τα σημεία της εξελιγμένης.

Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 34** και **Εικόνα 35**) φαίνονται τα σημεία που αφαιρέθηκαν από την κεφαλή και το τροχοειδές και από τις 5 κατατομές του τροχού (ανηγμένες ως προς τον πρώτο οδόντα).





**Εικόνα 34: Μετρήσεις με σημεία τροχοειδούς και κεφαλής**



**Εικόνα 35: Αφαίρεση σημείων τροχοειδούς και κεφαλής**

## 6.4 Υπολογισμός σφαλμάτων

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων, ώστε τα σημεία που αποτελούν τις κατατομές των οδόντων να έρθουν στην τελική τους μορφή, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των σφαλμάτων.

Τα σφάλματα υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$e = \pm \sqrt{(x_{meas} - x_{inv})^2 + (y_{meas} - y_{inv})^2}$$

όπου,

$e$  : το σφάλμα

$x_{meas}$  και  $y_{meas}$  : η τετμημένη και η τεταγμένη αντίστοιχα του σημείου της μετρούμενης εξελιγμένης

$x_{inv}$  και  $y_{inv}$  : η τετμημένη και η τεταγμένη αντίστοιχα του σημείου της θεωρητικής εξελιγμένης

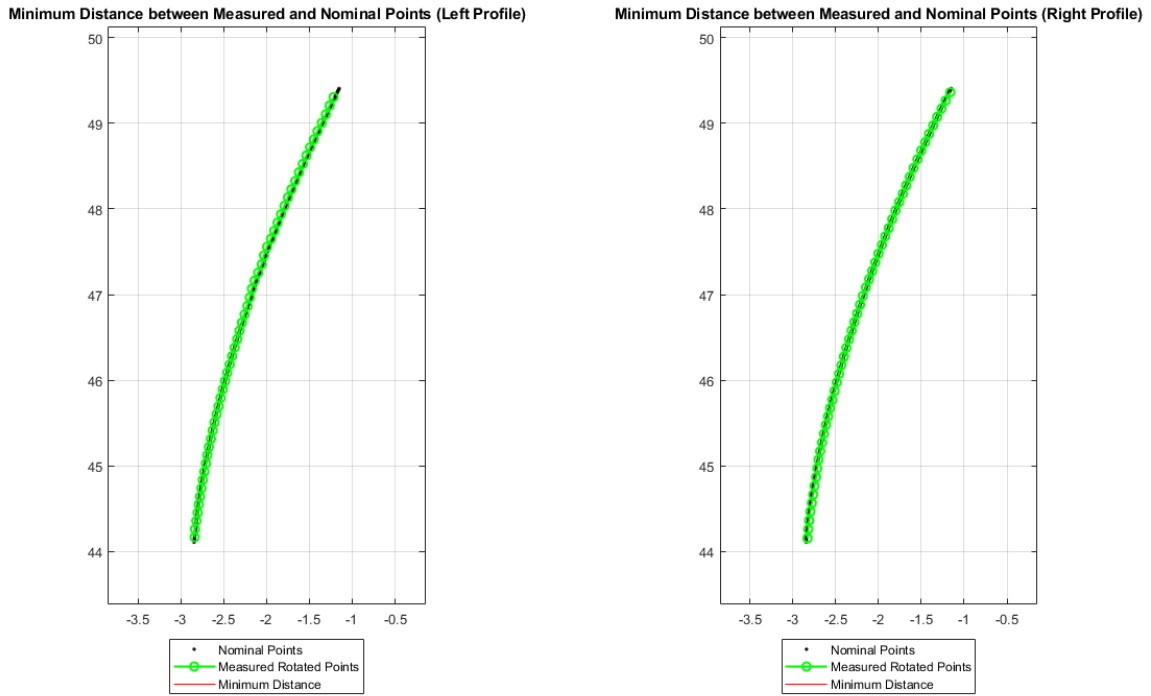
Ο τύπος αυτός, δίνει την απόσταση μεταξύ 2 σημείων ( $x_{meas}, y_{meas}$ ) και ( $x_{inv}, y_{inv}$ ). Συνεπώς, η ελάχιστη απόσταση κάθε σημείου της μετρούμενης εξελιγμένης από την θεωρητική, θα αποτελεί το σφάλμα που υπάρχει στο σημείο αυτό.

Το πρόσημο του σφάλματος, εξαρτάται από το την θέση που έχει η μετρούμενη εξελιγμένη σε σχέση με την θεωρητική, κατά μήκος του άξονα των  $x$ . Ισχύει δηλαδή :

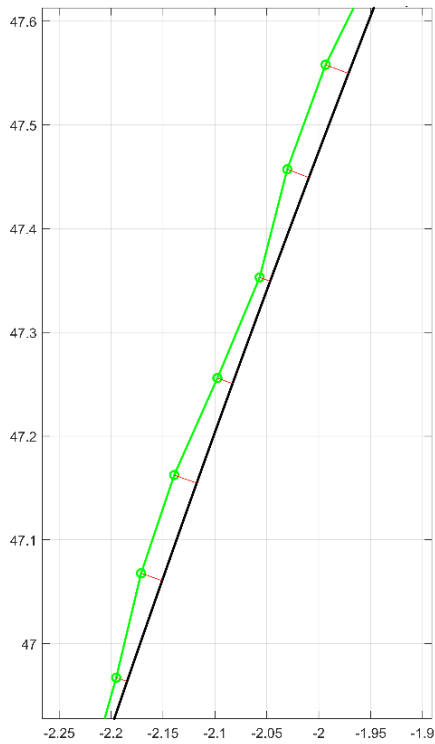
$$e < 0, \text{ αν } x_{meas} > x_{inv}$$

$$e \geq 0, \text{ αν } x_{meas} \leq x_{inv}$$

Επιπλέον, χάρη στη συμμετρία ως προς την ευθεία  $x=0$ , ο υπολογισμός του σφάλματος για τις δεξιές κατατομές, μπορεί να γίνει από το ίδιο κομμάτι κώδικα που υπολογίζει τις αριστερές κατατομές, βάζοντας 'πλην' στις τετμημένες των σημείων τις μετρούμενης εξελιγμένης. Έτσι στα παρακάτω διαγράμματα θα φαίνονται και η δεξιά και η αριστερή κατατομή από την ίδια πλευρά. Αυτό συμβαίνει ώστε να είναι ομοιόμορφη η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

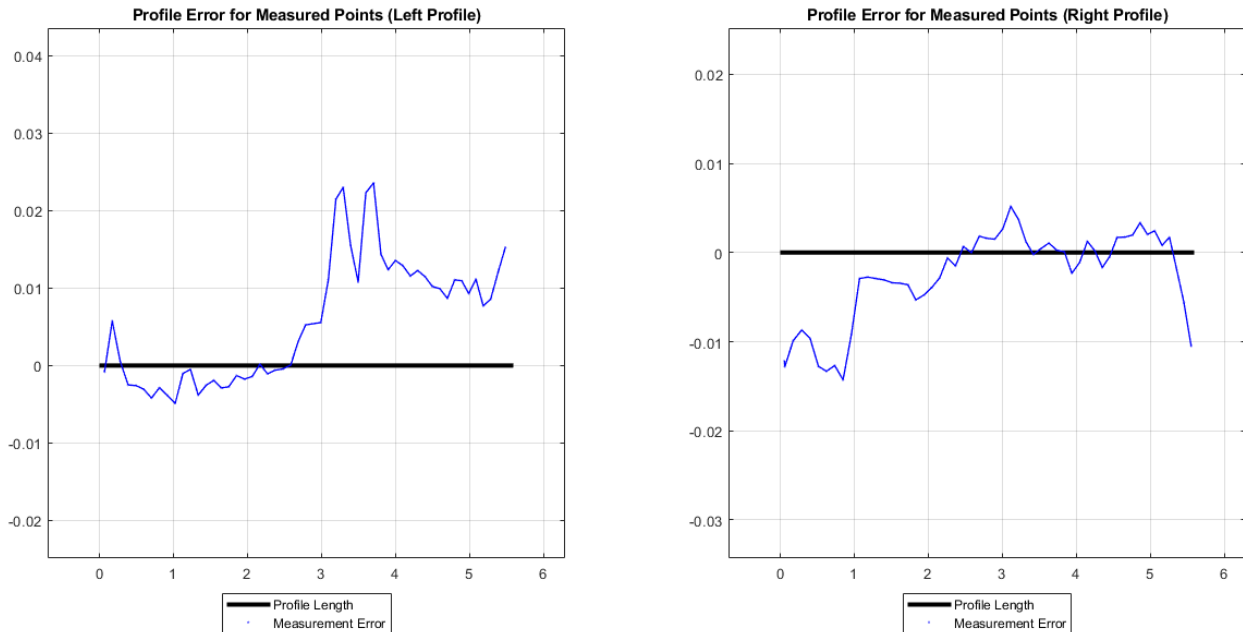


**Εικόνα 36: Σφάλματα κατατομής**



**Εικόνα 37: Σφάλματα κατατομής σε μεγέθυνση**

Έχοντας υπολογίσει τα σφάλματα των σημείων της μετρούμενης εξελιγμένης, σε σχέση με την θεωρητική, μπορούμε να εξάγουμε το παρακάτω διάγραμμα σφαλμάτων που φαίνεται στην **Εικόνα 38**, όπου στον γ-άξονα περιλαμβάνονται τα σφάλματα και στον x-άξονα το μήκος της θεωρητικής εξελιγμένης.



**Εικόνα 38: Διάγραμμα σφαλμάτων κατατομών**

### 6.5 Υπολογισμός αποκλίσεων κατατομής και βήματος

Για τον υπολογισμό των αποκλίσεων της κατατομής, κύρια προϋπόθεση ήταν υπολογιστεί η γραμμή μέσης κατατομής. Ο υπολογισμός αυτός, έγινε κάνοντας αριθμητική παρεμβολή στα σημεία των σφαλμάτων. Η μέθοδος αριθμητικής παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε, είναι αυτή της γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων και πραγματοποιήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Παρακάτω δίνονται οι εξισώσεις για την γραμμική προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων :

$$y(x) = a_0 + a_1 \cdot x \tag{1}$$

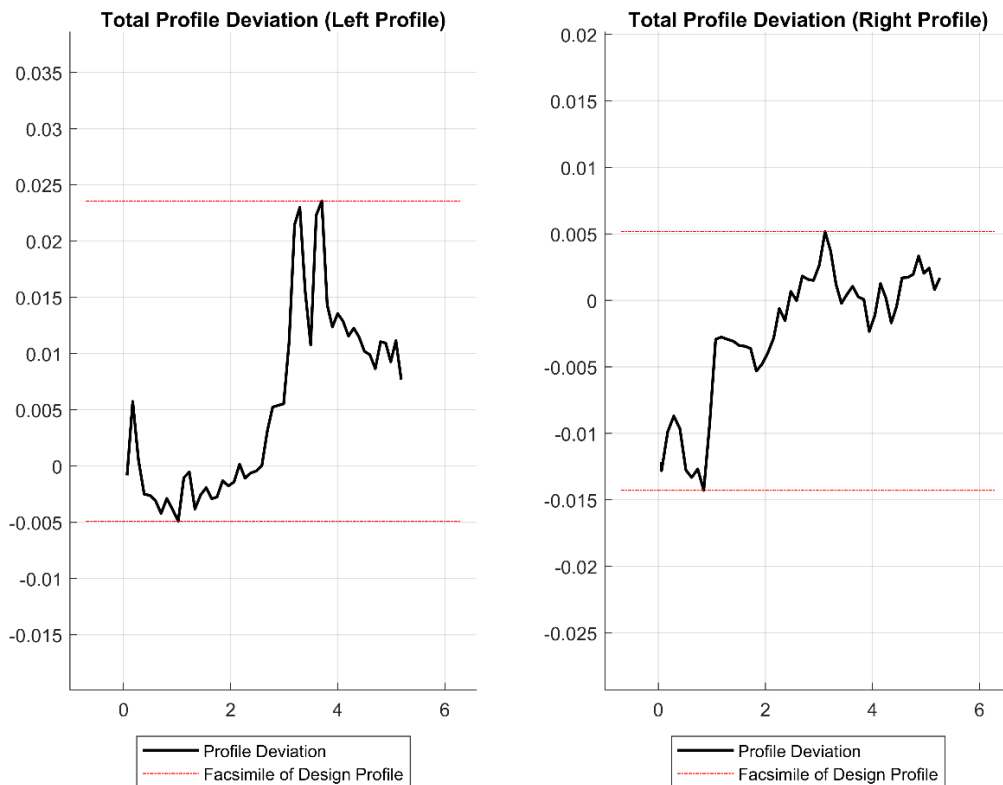
$$\begin{bmatrix} N + 1 & \sum_{i=0}^N x_i \\ \sum_{i=0}^N x_i & \sum_{i=0}^N x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^N y_i \\ \sum_{i=0}^N y_i \cdot x_i \end{bmatrix} \tag{2}$$

Για την συνολική απόκλιση κατατομής  $F_\alpha$  και την απόκλιση μορφής κατατομής  $f_{f\alpha}$ , έχουν ληφθεί υπόψη τα σημεία των σφαλμάτων που αντιστοιχούν μήκος κατατομής προς αξιολόγηση  $L_\alpha$ , δηλαδή στο 95% του μήκους της τροχιάς επαφής. Για την απόκλιση κλίσης κατατομής  $f_{H\alpha}$  έχει ληφθεί υπόψη όλο το μήκος τροχιάς επαφής  $g_\alpha$ .

### 6.5.1 Συνολική απόκλιση κατατομής – Total profile deviation ( $F_\alpha$ )

Η συνολική απόκλιση κατατομής  $F_\alpha$  υπολογίστηκε ως η διαφορά του μέγιστου σημείου της καμπύλης των σφαλμάτων από το ελάχιστο σημείο. Είναι δηλαδή η απόσταση των 2 παράλληλων, κόκκινων, διακεκομμένων ευθειών όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 39**. Οι ευθείες αυτές εφάπτονται στο μέγιστο και στο ελάχιστο σημείο της καμπύλης και είναι πάντα παράλληλες στην γραμμή θεωρητικής κατατομής.

Τα αποτελέσματα αυτής της απόκλισης, δίνονται σε [mm].



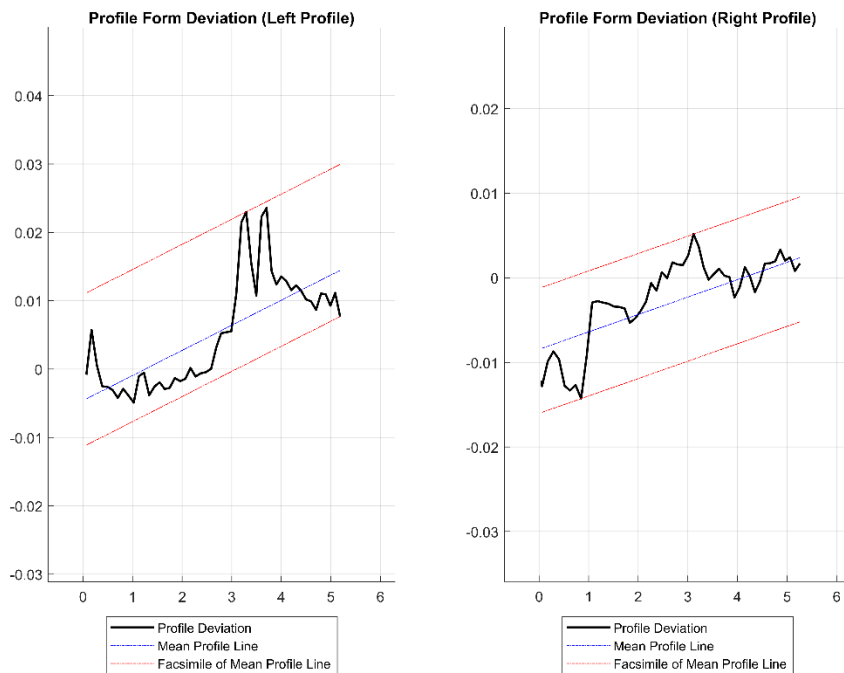
**Εικόνα 39: Διάγραμμα συνολικής απόκλισης κατατομής  $F_\alpha$**

### 6.5.2 Απόκλιση μορφής κατατομής – Profile form deviation ( $f_{fa}$ )

Η απόκλιση μορφής κατατομής  $f_{fa}$  υπολογίστηκε ως η απόσταση των 2 παράλληλων, κόκκινων, διακεκομμένων ευθειών όπως φαίνεται στην **Εικόνα 40**. Οι ευθείες αυτές είναι παράλληλες στην γραμμή μέσης κατατομής, η οποία φαίνεται με μπλε διακεκομμένη γραμμή.

Επιπλέον οι ευθείες αυτές εφάπτονται στα σημεία της καμπύλης του σφάλματος με την μεγαλύτερη απόσταση από την γραμμή μέσης κατατομής, στην διεύθυνση του κάθετου διανύσματος και από τις 2 πλευρές.

Τα αποτελέσματα αυτής της απόκλισης, δίνονται σε [mm].

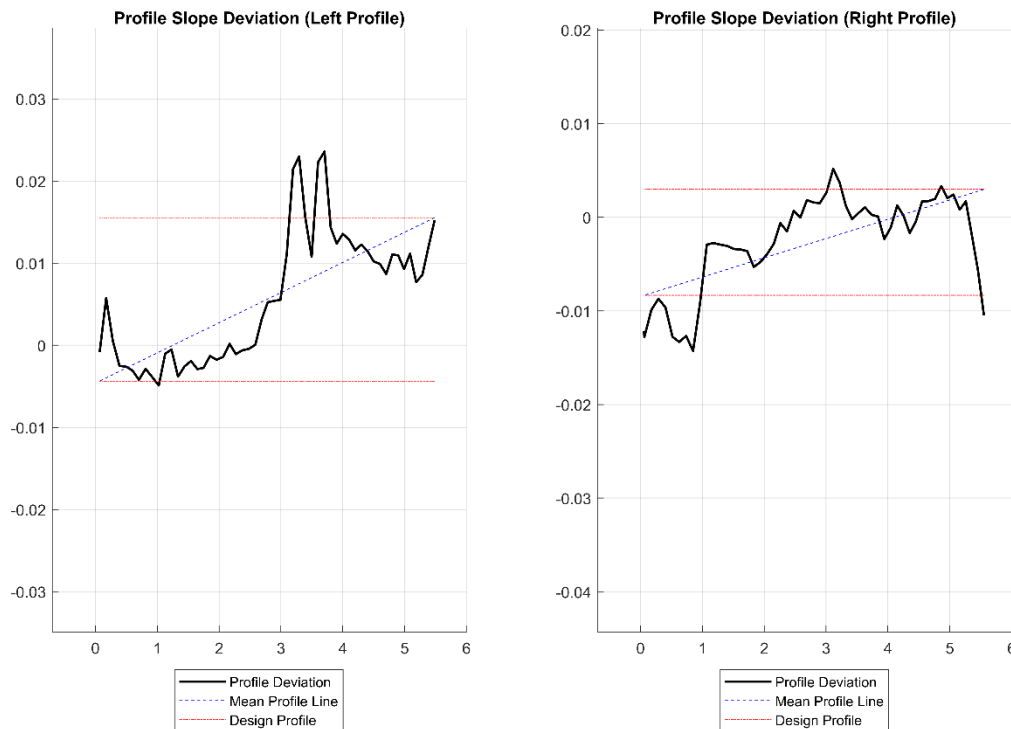


**Εικόνα 40: Διάγραμμα απόκλισης μορφής κατατομής  $f_{fa}$**

### 6.5.3 Απόκλιση κλίσης κατατομής – Profile slope deviation ( $f_{H\alpha}$ )

Η απόκλιση κλίσης κατατομής  $f_{H\alpha}$  υπολογίστηκε ως η απόσταση μεταξύ των 2 παραλλήλων, κόκκινων, διακεκομμένων ευθειών όπως φαίνεται στην **Εικόνα 41**, οι οποίες τέμνουν τη γραμμή μέσης κατατομής στο σημείο αρχής ενεργής κατατομής και στο σημείο που αντιστοιχεί στη διάμετρο κεφαλής, δηλαδή στην αρχή και στο τέλος των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα αυτής της απόκλισης, δίνονται σε [mm].



**Εικόνα 41: Διάγραμμα απόκλισης κλίσης κατατομής  $f_{H\alpha}$**

### 6.5.4 Απλό σφάλμα βήματος – Single pitch deviation ( $f_p$ )

Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός του μεμονωμένου απλού σφάλματος βήματος ( $f_{pi}$ ).

Το μεμονωμένο απλό σφάλμα βήματος υπολογίστηκε ως η απόσταση του σημείου της μετρούμενης κατατομής που βρίσκεται πάνω στον αρχικό κύκλο από το σημείο της θεωρητικής κατατομής που βρίσκεται πάνω στον αρχικό κύκλο. Επειδή όμως η μετρούμενη κατατομή χωρίζεται σε 56 ή λιγότερα διακριτά σημεία, ποτέ δεν θα υπάρχει σημείο της μετρούμενης κατατομής ακριβώς πάνω στον αρχικό κύκλο. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν 2 σημεία, ένα ακριβώς πάνω και ένα ακριβώς κάτω από τον αρχικό κύκλο. Για αυτά τα 2 σημεία υπολογίζεται, για το καθένα ξεχωριστά, η ελάχιστη απόσταση από την θεωρητική κατατομή. Στη συνέχεια υπολογίζεται ένας σταθμισμένος μέσος όρος αυτών των 2 αποστάσεων, ο οποίος θα αποτελεί και το τελικό απλό σφάλμα βήματος.

Παρακάτω δίνεται ο τύπος που περιγράφει το σταθμισμένο μέσο όρο:

$$f_{pi} = \frac{d_{r2}}{d_{r1} + d_{r2}} \varepsilon_1 + \frac{d_{r1}}{d_{r1} + d_{r2}} \varepsilon_2 \tag{3}$$

όπου,

$\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  : οι αποστάσεις των σημείων (πάνω και κάτω αντίστοιχα από τον αρχικό κύκλο) από την θεωρητική εξελιγμένη

$d_{r1}$  και  $d_{r2}$  : οι αποστάσεις των σημείων (πάνω και κάτω αντίστοιχα από τον αρχικό κύκλο) από τον αρχικό κύκλο.

Το πρόσημο του μεμονωμένου απλού σφάλματος βήματος, εξαρτάται από το την θέση που έχει η μετρούμενη εξελιγμένη σε σχέση με την θεωρητική, κατά μήκος του άξονα των  $x$ . Ισχύει δηλαδή,

Για τις αριστερές κατατομές :

$$f_{pi} < 0, \text{ αν } x_{meas} < x_{inv}$$

$$f_{pi} \geq 0, \text{ αν } x_{meas} \geq x_{inv}$$

Για τις δεξιές κατατομές :

$$f_{pi} > 0, \text{ αν } x_{meas} < x_{inv}$$

$$f_{pi} \leq 0, \text{ αν } x_{meas} \geq x_{inv}$$

Έτσι, πραγματοποιείται και ο υπολογισμός του απλού σφάλματος βήματος για το οποίο ισχύει :

$$f_p = \max |f_{pi}| \quad (4)$$

Τα αποτελέσματα αυτής της απόκλισης, δίνονται σε [mm].

## 6.6 Κατηγοριοποίηση οδοντωτών τροχών σε βαθμούς ποιότητας

Έχοντας υπολογίσει προηγουμένως όλες τις αποκλίσεις κατατομής και βήματος, μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του βαθμού ποιότητας ξεχωριστά για κάθε μία απόκλιση.

Αρχικά, υπολογίστηκε ο μέσος όρος της συνολικής απόκλισης κατατομής, της απόκλισης μορφής κατατομής και της απόκλισης κλίσης κατατομής για τις αριστερές και τις δεξιές κατατομές.

Σύμφωνα με το ISO 1328-1, η τελική τιμή για κάθε μία από αυτές τις τρεις αποκλίσεις κατατομής, θα είναι το μέγιστο από τους δύο μέσους όρους, αριστερής και δεξιάς κατατομής.

Για το απλό σφάλμα βήματος, η τελική τιμή θα είναι το μέγιστο από τις δύο τιμές του, για αριστερές και δεξιές κατατομές.



### 6.6.1 Τιμές ανοχών

Για κάθε βαθμό ποιότητας, υπάρχουν κάποιες τιμές ανοχών που αντιστοιχούν στις παραπάνω αποκλίσεις. Έτσι, όσο πιο κοντά είναι οι αποκλίσεις στις τιμές των ανοχών ενός συγκεκριμένου βαθμού ποιότητας, τότε αυτός ο βαθμός ποιότητας θα αντιπροσωπεύει τις αποκλίσεις αυτές.

Ως κοινός συντελεστής για τον προσδιορισμό των τιμών ανοχών σε δύο διαδοχικούς βαθμούς ορίζεται το  $\sqrt{2}$ . Για κάθε μεγαλύτερο (ή μικρότερο) βαθμό ποιότητας, οι τιμές των ανοχών, προκύπτουν με πολλαπλασιασμό (ή διαίρεση) με το  $\sqrt{2}$ .

Για οποιονδήποτε βαθμό ποιότητας, η απαιτούμενη τιμή προκύπτει με πολλαπλασιασμό, της μη στρογγυλοποιημένης τιμής για βαθμό 5, με τη σχέση  $\sqrt{2}^{(A-5)}$ , όπου A είναι ο αριθμός του απαιτούμενου βαθμού ποιότητας.

### 6.6.2 Κανόνες στρογγυλοποίησης

Παρακάτω δίνονται κάποιοι κανόνες στρογγυλοποίησης, σύμφωνα με τους οποίους θα πρέπει να υπολογίζονται οι τιμές των ανοχών (σε  $\mu\text{m}$ ).

Για τιμή  $>10$  [ $\mu\text{m}$ ] η στρογγυλοποίηση πραγματοποιείται στον πλησιέστερο ακέραιο.

Για τιμή  $\geq 5.0$  [ $\mu\text{m}$ ] και  $\leq 10$  [ $\mu\text{m}$ ] η στρογγυλοποίηση πραγματοποιείται στο πλησιέστερο 0.5 [ $\mu\text{m}$ ].

Για τιμή  $< 5,0$  [ $\mu\text{m}$ ] η στρογγυλοποίηση πραγματοποιείται στο πλησιέστερο 0.1 [ $\mu\text{m}$ ].

### 6.6.3 Εξισώσεις ανοχών

- Ανοχή απλού βήματος,  $f_{pT}$

$$f_{pT} = (0.001 \cdot d + 0.4 \cdot m + 5) \cdot \sqrt{2}^{(A-5)} \quad (5)$$

- Ανοχή κλίσης κατατομής,  $f_{H\alpha T}$

$$f_{H\alpha T} = \pm (0.4 \cdot m + 0.001 \cdot d + 4) \cdot \sqrt{2}^{(A-5)} \quad (6)$$

Το πρόσημο αυτής της ανοχής εξαρτάται από το πρόσημο της τελικής τιμής της απόκλισης.

- Ανοχή μορφής κατατομής,  $f_{f\alpha T}$

$$f_{f\alpha T} = (0.55 \cdot m + 5) \cdot \sqrt{2}^{(A-5)} \quad (7)$$

- Ανοχή κατατομής, Συνολική,  $F_{\alpha T}$

$$F_{\alpha T} = \sqrt{f_{H\alpha T}^2 + f_{f\alpha T}^2} \quad (8)$$

Για να υπολογιστεί η ανοχή της συνολικής απόκλισης, χρησιμοποιούνται οι μη στρογγυλοποιημένες τιμές των ανοχών απόκλισης μορφής και απόκλισης κλίσης.

Όπου,

m : το module

d : η αρχική διάμετρος.

Για κάθε ανοχή υπολογίζονται όλες οι τιμές τους, για καθέναν από τους 11 βαθμούς ποιότητας, δηλαδή για A=1:11. Στη συνέχεια, και αφότου έχουν μετατραπεί οι τιμές των τελικών αποκλίσεων από [mm] σε [μm] πολλαπλασιάζοντας επί 1000, αντιστοιχίζουμε τις τιμές των αποκλίσεων με αυτές που είναι πιο κοντά στις τιμές των ανοχών.

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται ο βαθμός ποιότητας της κάθε απόκλισης, ανάλογα δηλαδή με το πόσο κοντά είναι στην τιμή της ανοχής για κάποιον από τους 11 βαθμούς. Σε περίπτωση που η τιμή της απόκλισης είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή που έχει η ανοχή στον βαθμό 11, τότε η απόκλιση αυτή είναι βαθμού 11. Ομοίως σε περίπτωση που είναι πολύ μικρότερη από το βαθμό 1 και μεγαλύτερη του μηδενός τότε η ανοχή αυτή θα είναι βαθμού 1.

Τέλος, ο τελικός βαθμός ποιότητας κατατομών του οδοντωτού τροχού, υπολογίζεται ως ο μεγαλύτερος από τους τρεις βαθμούς ποιότητας, των τριών αποκλίσεων των κατατομών, ενώ για το βήμα ο βαθμός ποιότητας αντιστοιχεί στο βαθμό ποιότητας του απλού σφάλματος βήματος.

Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω, παρατίθεται οι **Πίνακας 2** και **Πίνακας 3**, στους οποίους αποτυπώνονται οι αποκλίσεις των κατατομών, τα σφάλματα βήματος καθώς και οι βαθμοί ποιότητας για κάθε μετρούμενο οδοντωτό τροχό. Επιπλέον για τις παραμέτρους εκτύπωσης ισχύει:

LH: Layer Height

LS: Low Speeds

HS: High Speeds

Πίνακας 2: Τιμές αποκλίσεων οδοντωτών τροχών

| Υλικό     | Παράμετροι εκτύπωσης | Αριθμός Οδόντων | Module | Αποκλίσεις κατατομών [ $\mu\text{m}$ ] |               |               | Σφάλμα βήματος $f_p$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|-----------|----------------------|-----------------|--------|--|---------------|---------------|--|
|           |                      |                 |        | $F_\alpha$                             | $f_{f\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ |  |
| Μεταλλικό | -                    | 38              | 3      | 13.299                                 | 13.005        | 9.246         | 2.724                                  |
| Μεταλλικό | -                    | 31              | 3      | 33.985                                 | 20.399        | 15.130        | 113.0855                               |
| Μεταλλικό | -                    | 26              | 3      | 52.927                                 | 40.829        | -7.153        | 249.438                                |
| Μεταλλικό | -                    | 25              | 2      | 10.681                                 | 9.822         | 3.461         | 15.859                                 |
| Μεταλλικό | -                    | 75              | 2      | 13.169                                 | 12.467        | 1.748         | 55.411                                 |
| Πλαστικό  | L.H: 0.12 mm, H.S.   | 25              | 2      | 131.565                                | 137.083       | -71.788       | 62.775                                 |
| Πλαστικό  | L.H: 0.12 mm, L.S.   | 25              | 2      | 80.706                                 | 77.354        | -50.2418      | 126.035                                |
| Πλαστικό  | L.H: 0.2 mm, H.S.    | 25              | 2      | 187.642                                | 205.138       | -128.264      | 58.397                                 |
| Πλαστικό  | L.H: 0.2 mm, L.S.    | 25              | 2      | 102.259                                | 104.693       | 49.913        | 122.131                                |
| Πλαστικό  | L.H: 0.2 mm, H.S.    | 30              | 3      | 67.403                                 | 49.659        | 43.079        | 63.421                                 |
| Πλαστικό  | L.H: 0.2 mm, L.S.    | 30              | 3      | 49.939                                 | 47.358        | 40.866        | 47.287                                 |

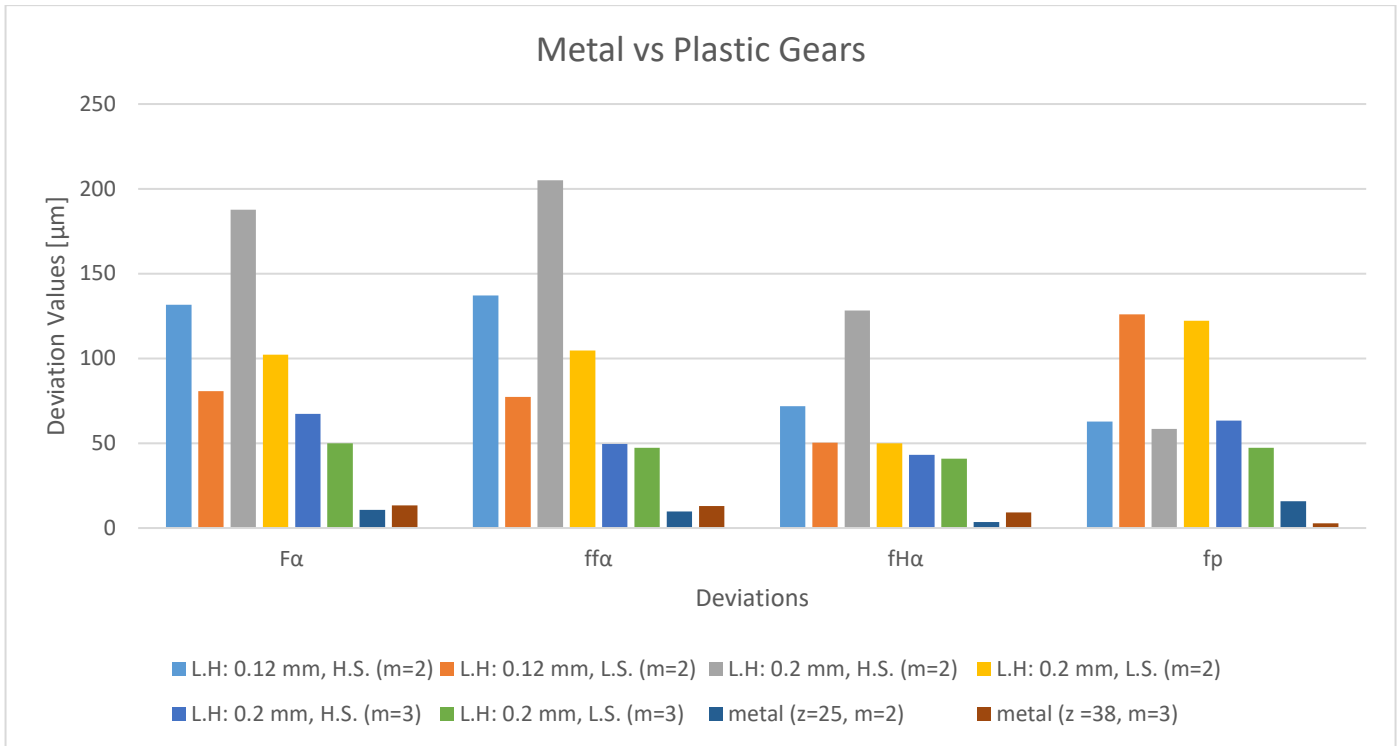
Πίνακας 3: Βαθμοί ποιότητας κατατομών και βήματος

| Υλικό     | Παράμετροι εκτύπωσης | Αριθμός Οδόντων | Module | Βαθμοί ποιότητας κατατομών |               |               | Συνολικός βαθμός ποιότητας κατατομών | Βαθμός ποιότητας βήματος $f_p$ |
|-----------|----------------------|-----------------|--------|----------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------|
|           |                      |                 |        | $F_\alpha$                 | $f_{f\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ |                                      |                                |
| Μεταλλικό | -                    | 38              | 3      | 6                          | 7             | 6             | 7                                    | 2                              |
| Μεταλλικό | -                    | 31              | 3      | 9                          | 8             | 8             | 9                                    | >> 11                          |
| Μεταλλικό | -                    | 26              | 3      | 10                         | 10            | 6             | 10                                   | >>> 11                         |
| Μεταλλικό | -                    | 25              | 2      | 6                          | 6             | 4             | 6                                    | 8                              |
| Μεταλλικό | -                    | 75              | 2      | 6                          | 7             | 2             | 7                                    | > 11                           |
| Πλαστικό  | L.H: 0.12 mm, H.S.   | 25              | 2      | >> 11                      | >> 11         | > 11          | >> 11                                | > 11                           |
| Πλαστικό  | L.H: 0.12 mm, L.S.   | 25              | 2      | >> 11                      | >> 11         | > 11          | >> 11                                | >> 11                          |
| Πλαστικό  | L.H: 0.2 mm, H.S.    | 25              | 2      | >>> 11                     | >>> 11        | >> 11         | >>> 11                               | > 11                           |
| Πλαστικό  | L.H: 0.2 mm, L.S.    | 25              | 2      | >>> 11                     | >>> 11        | > 11          | >>> 11                               | >> 11                          |
| Πλαστικό  | L.H: 0.2 mm, H.S.    | 30              | 3      | > 11                       | > 11          | > 11          | > 11                                 | > 11                           |
| Πλαστικό  | L.H: 0.2 mm, L.S.    | 30              | 3      | > 11                       | > 11          | > 11          | > 11                                 | > 11                           |

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι σαφές ότι η ακρίβεια των μεταλλικών οδοντωτών τροχών είναι μεγαλύτερη από εκείνη των τρισδιάστατα εκτυπωμένων.

Οι μεταλλικοί οδοντωτοί τροχοί, παρόλο που έχουν λειτουργήσει και έχουν δεχτεί φορτίσεις, έχουν διατηρήσει τον βαθμό ποιότητάς τους σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (από 6 – 10 για τις αποκλίσεις κατατομών). Αντίθετα, οι πλαστικοί τροχοί, χωρίς να έχουν λειτουργήσει, παρουσιάζουν βαθμό ποιότητας 11 για κάθε απόκλιση. Επιπλέον, ο βαθμός ποιότητας των πλαστικών τροχών με 25 οδόντες, είναι σημαντικά χειρότερος από τον βαθμό ποιότητας του μεταλλικού τροχού με 25 οδόντες, ανεξαρτήτως των παραμέτρων εκτύπωσης.

Στην **Εικόνα 42** παρουσιάζεται αναλυτικά η σύγκριση των μεταλλικών και των πλαστικών οδοντωτών τροχών με βάση τις παραμέτρους εκτύπωσης και το module.



**Εικόνα 42: Αποκλίσεις κατατομής και βήματος μεταλλικών και πλαστικών τροχών**

Οι αποκλίσεις στις κατατομές διαφοροποιούνται αρκετά με βάση τις παραμέτρους εκτύπωσης. Για το ίδιο ύψος στρώσης, οι υψηλές ταχύτητες θα δώσουν μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τις χαμηλές. Ειδικότερα, για module 2 οι αποκλίσεις αυτές είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες για module 3. Τα σφάλματα αυτά στις μεγάλες ταχύτητες οφείλονται στις ταλαντώσεις που προκαλούνται στο ακροφύσιο του εκτυπωτή. Για την ίδια ταχύτητα εκτύπωσης, το μικρότερο ύψος στρώσης θα δώσει μικρότερες αποκλίσεις σε σχέση με το μεγαλύτερο, καθώς μικρότερο ύψος στρώσης αντιστοιχεί σε περισσότερες στρώσεις και συνεπώς σε καλύτερη ποιότητα κατατομής. Επιπλέον, στους τροχούς με module 3, οι κατατομές είναι καλύτερης ποιότητας από αυτούς με module 2 για κάθε διαφορετική παράμετρο εκτύπωσης. Αυτό σημαίνει ότι ο τρισδιάστατος εκτυπωτής μπορεί να αποτυπώσει καλύτερα τη γεωμετρία μιας μεγαλύτερης κατατομής (module 3) και συνεπώς να έχει μικρότερες αποκλίσεις κατατομής. Πιο συγκεκριμένα, οι κατατομές του τροχού με module 3 με χαμηλή ταχύτητα, δίνουν την καλύτερη ποιότητα κατατομών από όλους τους πλαστικούς τροχούς. Αντίστοιχα την χειρότερη ποιότητα κατατομής την έχει ο τροχός με το μεγαλύτερο ύψος στρώσης, τη μεγαλύτερη ταχύτητα εκτύπωσης και το μικρότερο module.

Όσον αφορά το σφάλμα βήματος, τα αποτελέσματα διαφέρουν σε σχέση με αυτά των κατατομών. Στο μικρότερο module, οι χαμηλές ταχύτητες προκαλούν ένα σημαντικά μεγαλύτερο σφάλμα βήματος σε σχέση με τις υψηλές, ανεξαρτήτως του ύψους στρώσης. Δεν συμβαίνει το ίδιο όμως στο μεγαλύτερο module, καθώς εκεί φαίνεται ότι οι υψηλότερες ταχύτητες δίνουν ένα ελαφρώς μεγαλύτερο σφάλμα

βήματος. Τόσο οι υψηλές, όσο και οι χαμηλές ταχύτητες του module 3, είναι συγκρίσιμες με αυτές των υψηλών ταχυτήτων των τροχών με χαμηλότερο module 2.

Τέλος, παρατηρείται ότι σε όλους τους πλαστικούς τροχούς, ο βαθμός ποιότητας των κατατομών και του βήματος παραμένει μεγαλύτερος του 11 για κάθε περίπτωση. Οι καλύτερες παράμετροι εκτύπωσης και το μεγαλύτερο module, δίνουν μικρότερες τιμές αποκλίσεων, ωστόσο αυτό δεν είναι αρκετό ώστε η ποιότητα των πλαστικών τροχών να είναι συγκρίσιμη με τους μεταλλικούς.

## 7. Μορφολογία σφαλμάτων κατατομών

### 7.1 Στατιστική ανάλυση

Μέχρι στιγμής τα σφάλματα των κατατομών των οδοντωτών τροχών έχουν αναλυθεί μεμονωμένα για κάθε οδόντα. Προκειμένου να αποκτήσουμε εικόνα για τα σφάλματα κατατομών ολόκληρου του οδοντωτού τροχού, τόσο για τις αριστερές όσο και για τις δεξιές κατατομές, απαραίτητος είναι ο υπολογισμός της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης αυτών των σφαλμάτων. Έπειτα πραγματοποιείται ο υπολογισμός της μορφής της γεωμετρίας των σφαλμάτων, ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ μεταλλικών και τρισδιάστατα εκτυπωμένων οδοντωτών τροχών.

Τα σφάλματα όλων των αριστερών και όλων των δεξιών κατατομών, συνδυάζονται σε 2 σύνολα δεδομένων που αντιπροσωπεύουν ολόκληρο τον οδοντωτό τροχό, τα οποία είναι ταξινομημένα με βάση το μήκος της κατατομής, από την αρχή της κατατομής μέχρι το τέλος της.

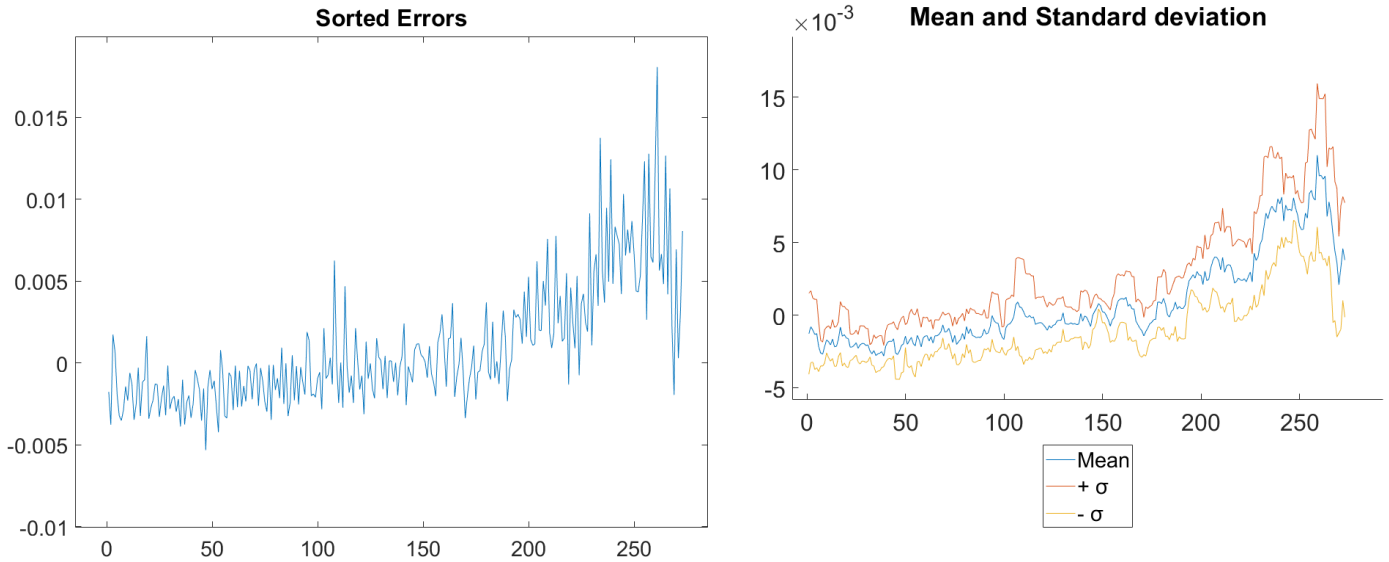
Για την ανάλυση των δεδομένων αυτών, η κατανόηση των υποκείμενων τάσεων και της μεταβλητότητας εντός των δεδομένων είναι κρίσιμη. Δύο στατιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται συχνά για αυτόν τον σκοπό είναι ο κινούμενος μέσος όρος και η κινούμενη τυπική απόκλιση. Αυτά τα εργαλεία βοηθούν στην εξομάλυνση των δεδομένων και στην ταυτοποίηση μορφών που μπορεί να μην είναι αμέσως εμφανή στα ακατέργαστα δεδομένα, λειτουργώντας δηλαδή ως ένα φίλτρο.

Ο κινούμενος μέσος όρος είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων και την ανάδειξη των μακροπρόθεσμων τάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του μέσου όρου των δεδομένων εντός ενός καθορισμένου παραθύρου που κινείται κατά μήκος του συνόλου δεδομένων. Η τιμή για το παράθυρο αυτό, ορίζεται να είναι το νούμερο των οδόντων που έχουν μετρηθεί σε κάθε τροχό.

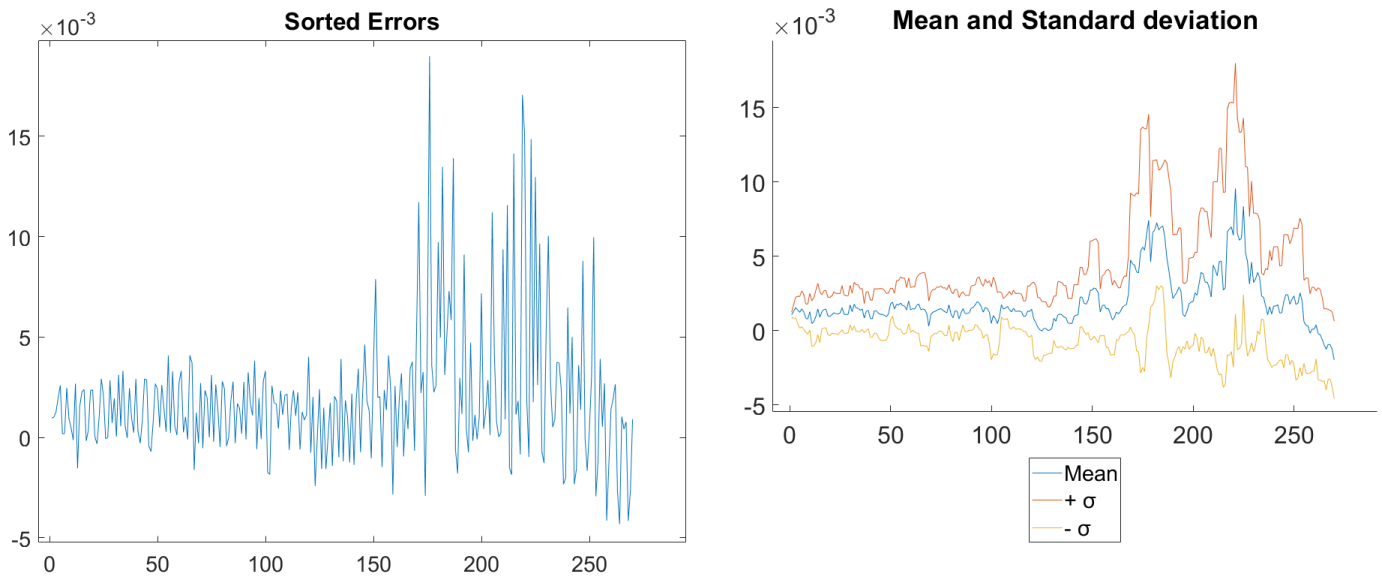
Η κινούμενη τυπική απόκλιση μετρά τη μεταβλητότητα ή τη διασπορά των σημείων των δεδομένων εντός του ίδιου παραθύρου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συνολικών σφαλμάτων, των μέσων τιμών και των τυπικών αποκλίσεων για τις δεξιές και αριστερές κατατομές του κάθε τροχού.

- Μεταλλικός οδοντωτός τροχός  $z = 38$ ,  $m = 3$ , μετρούμενοι οδόντες: 5



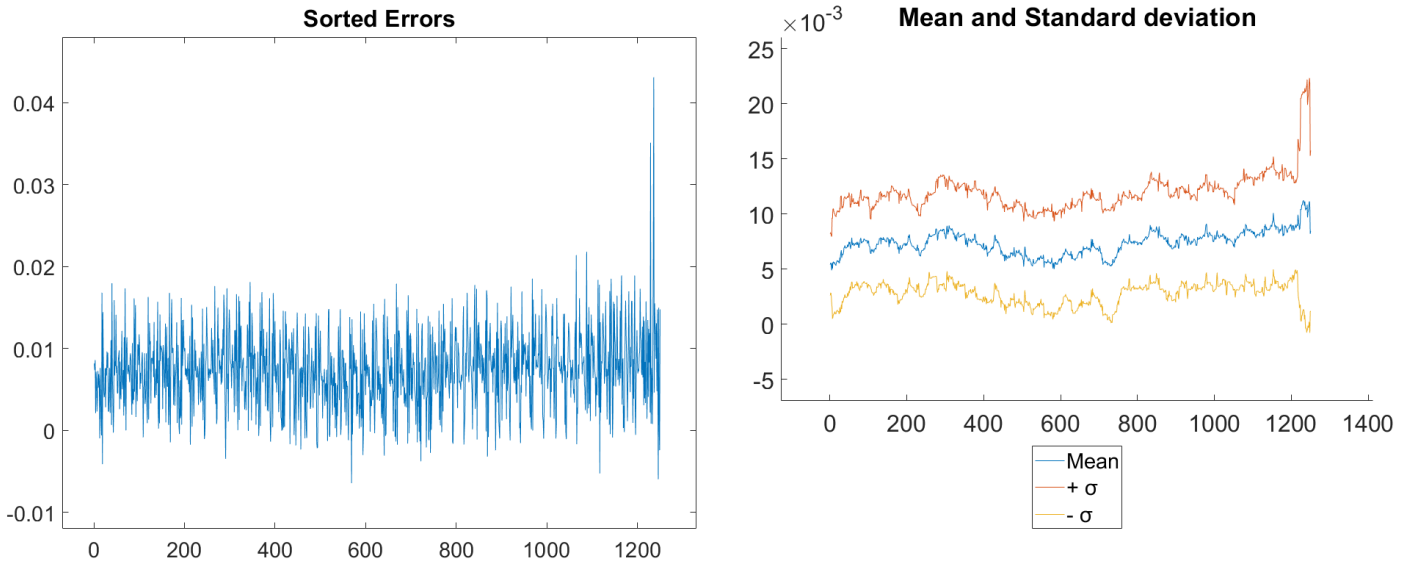
**Εικόνα 43:** Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=38$ ,  $m=3$ )



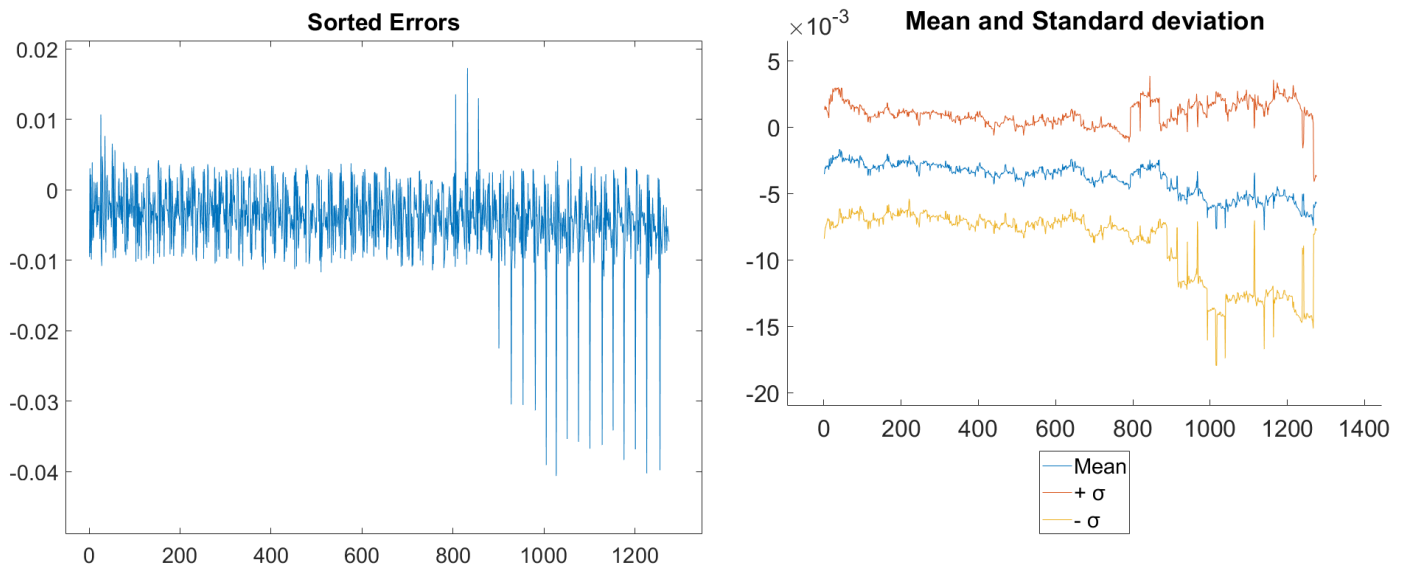
**Εικόνα 44:** Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=38$ ,  $m=3$ )



- Μεταλλικός οδοντωτός τροχός  $z = 25$ ,  $m = 2$ , μετρούμενοι οδόντες: όλοι

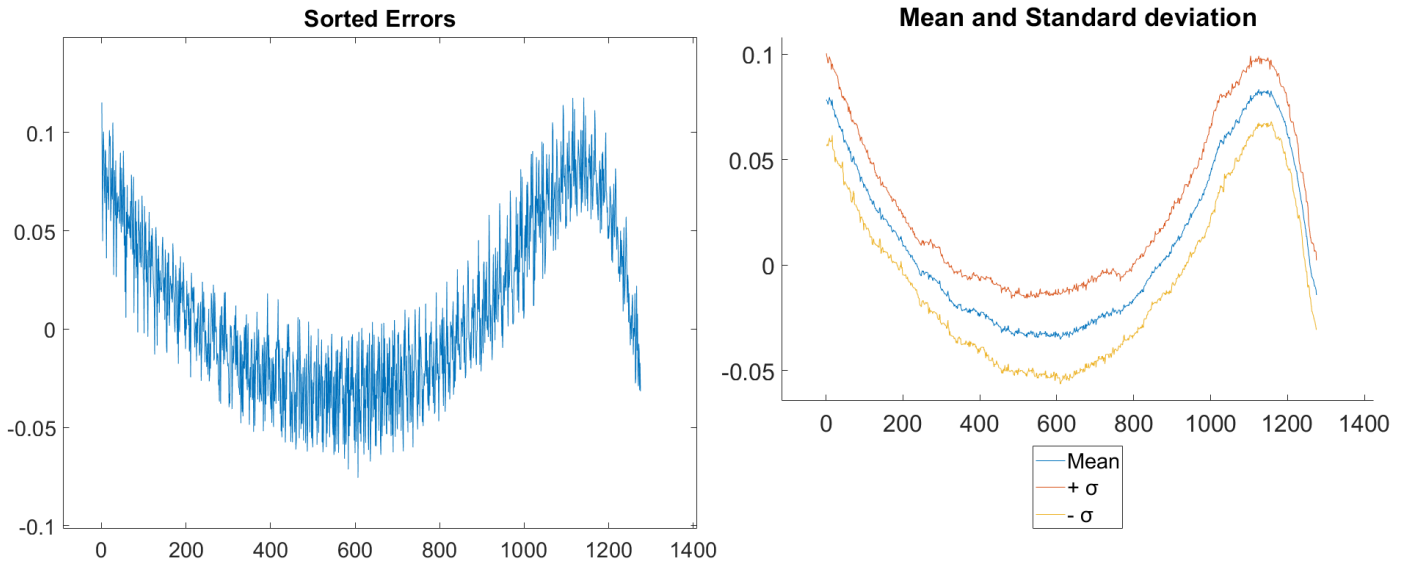


**Εικόνα 45: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ )**

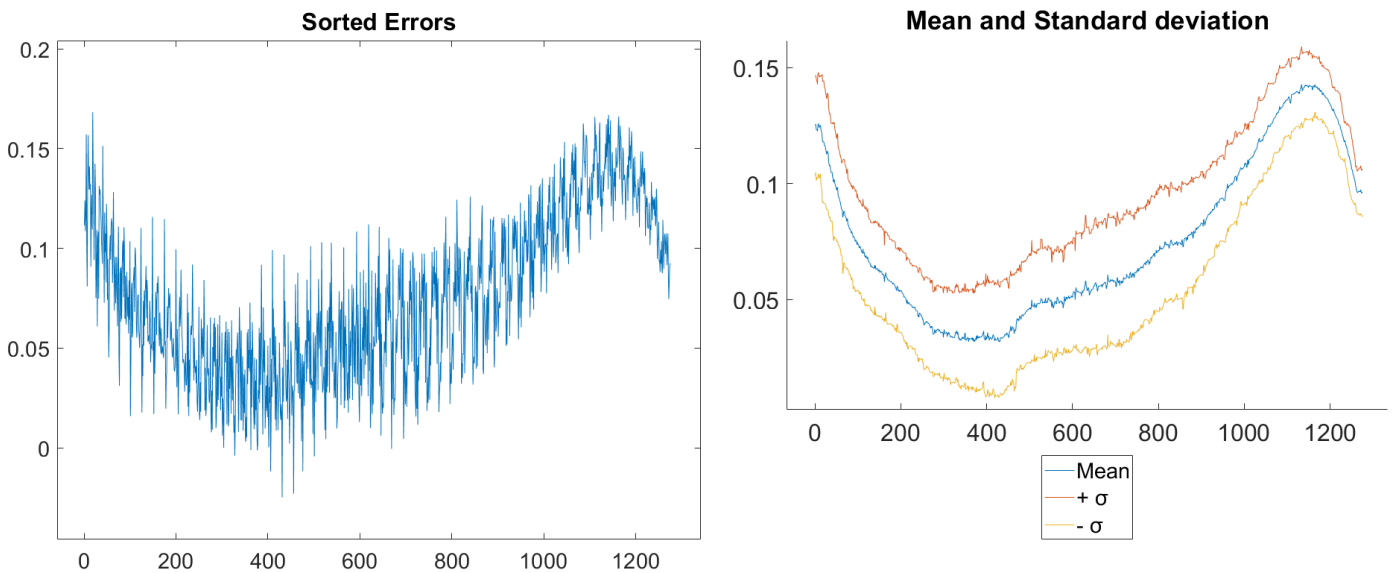


**Εικόνα 46: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ )**

- Πλαστικός οδοντωτός τροχός  $z = 25$ ,  $m = 2$ , μετρούμενοι οδόντες: όλοι, LH: 0.12 mm, HS

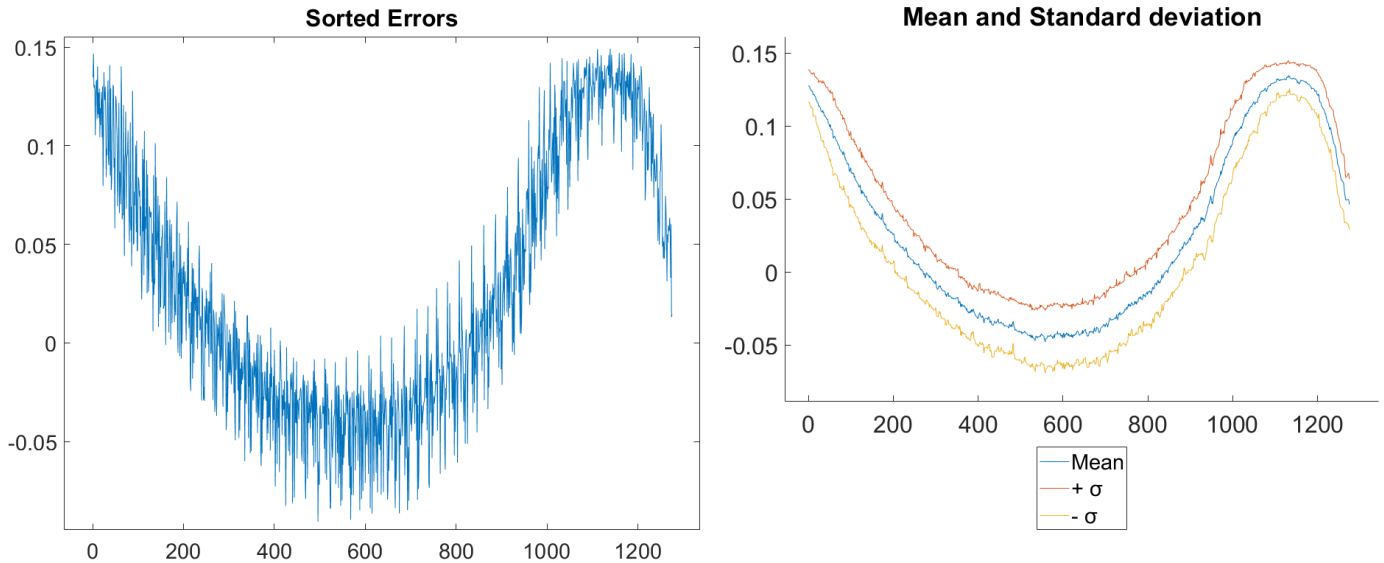


**Εικόνα 47: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, HS)**

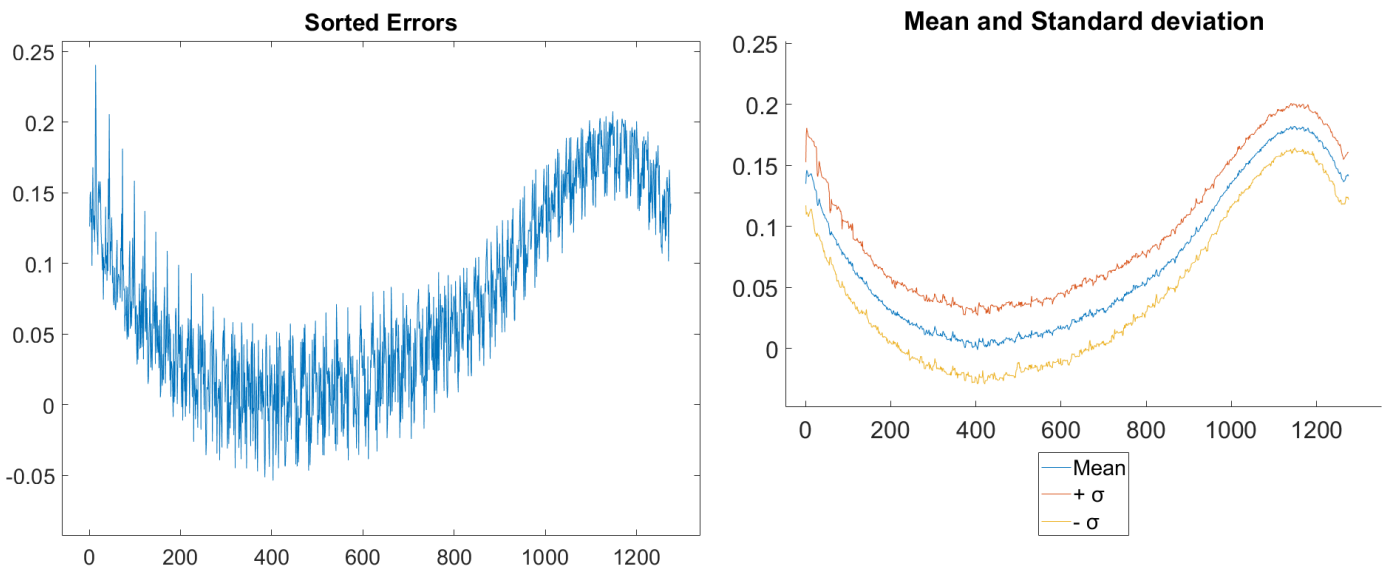


**Εικόνα 48: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, HS)**

- Πλαστικός οδοντωτός τροχός  $z = 25$ ,  $m = 2$ , μετρούμενοι οδόντες: όλοι, LH: 0.2 mm, HS

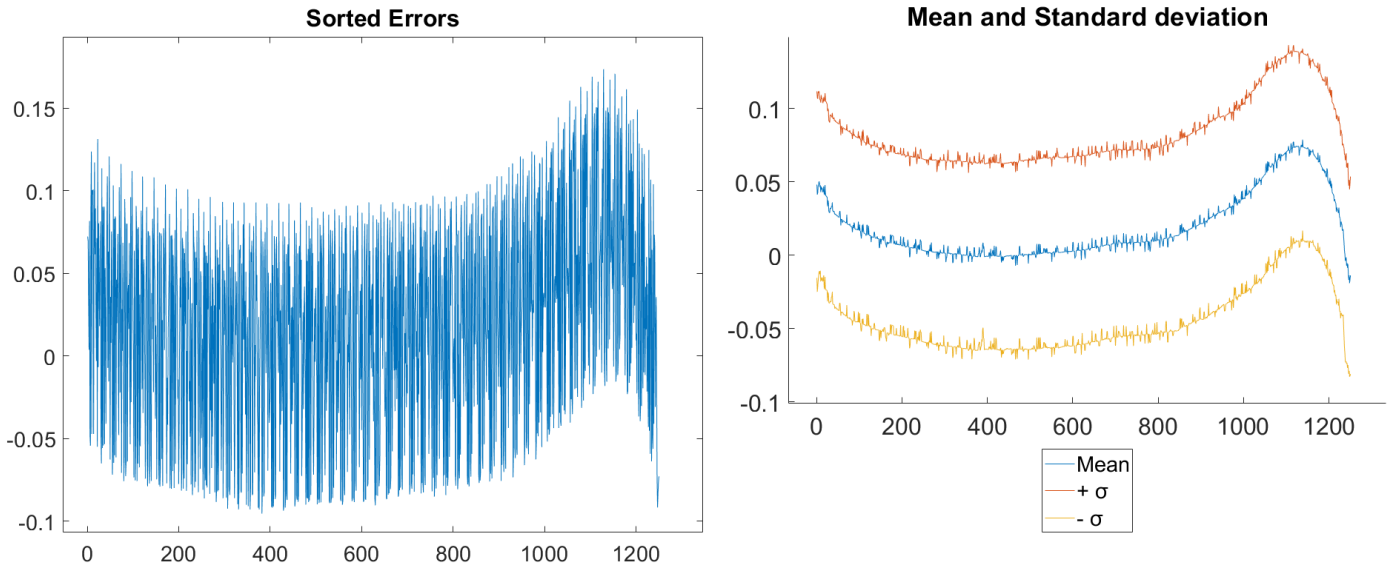


**Εικόνα 49: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.20mm, HS)**

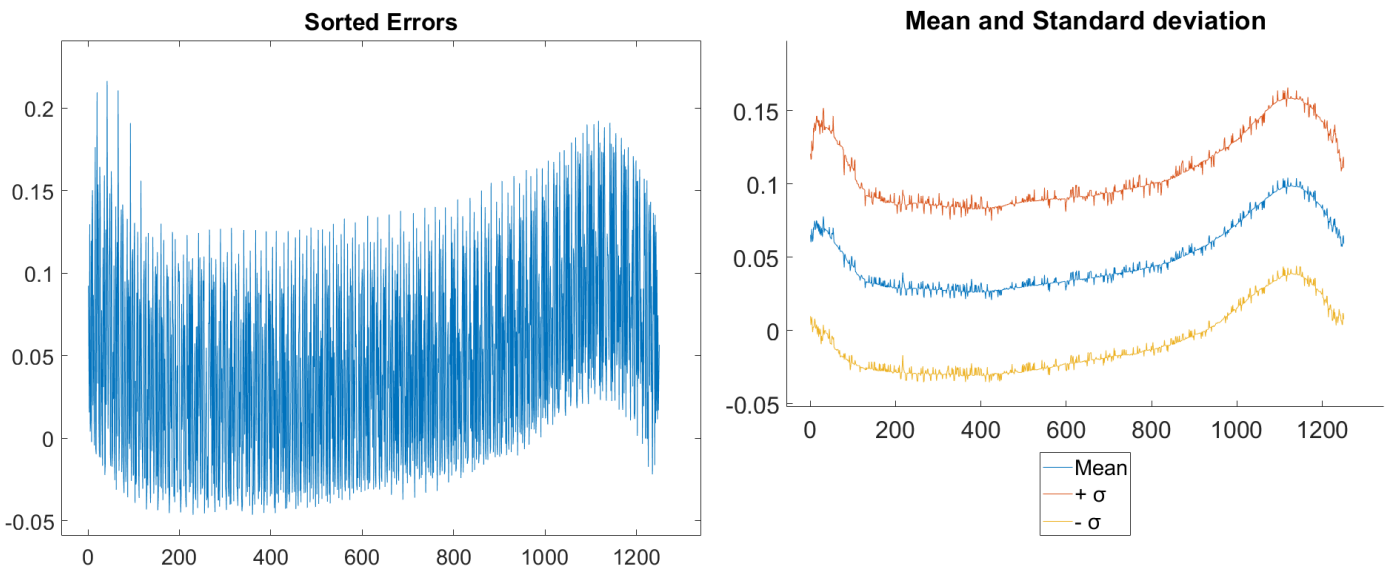


**Εικόνα 50: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, HS)**

- Πλαστικός οδοντωτός τροχός  $z = 25$ ,  $m = 2$ , μετρούμενοι οδόντες: όλοι, LH: 0.12 mm, LS

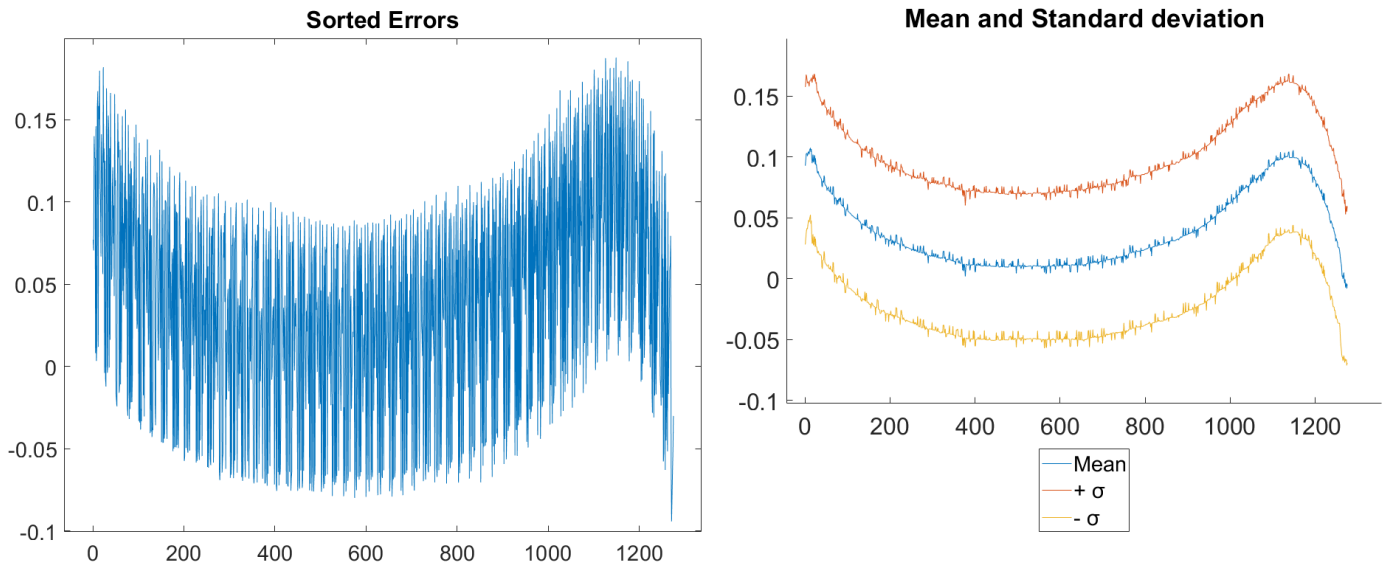


**Εικόνα 51: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, LS)**

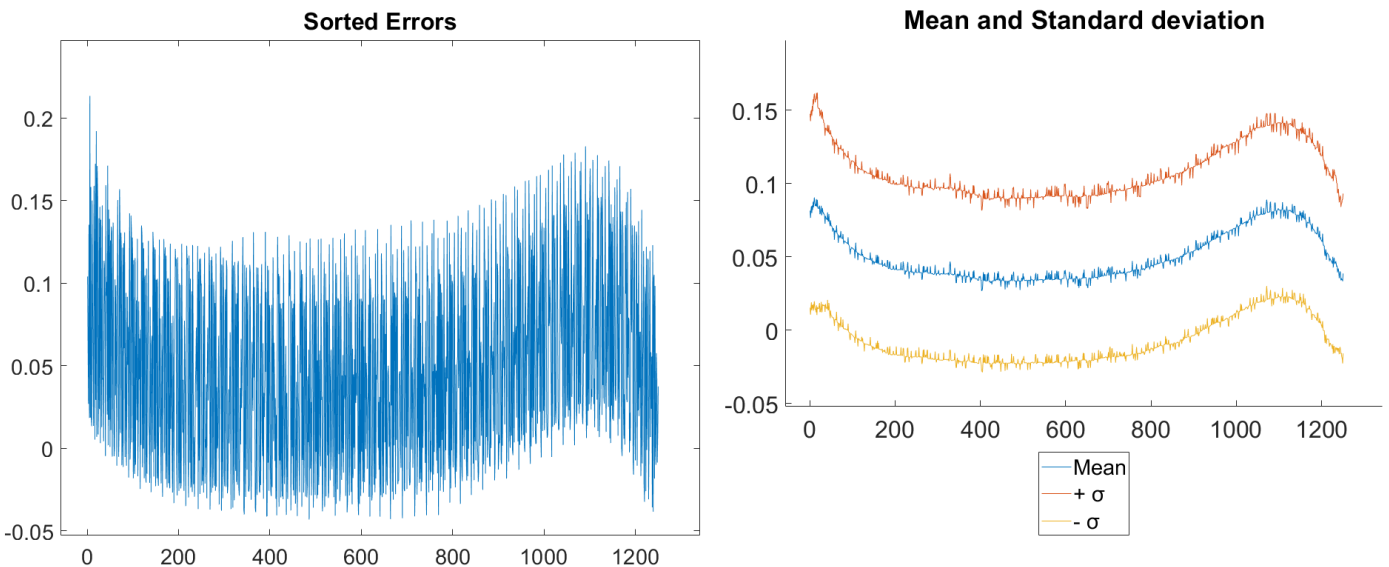


**Εικόνα 52: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, LS)**

- Πλαστικός οδοντωτός τροχός  $z = 25$ ,  $m = 2$ , μετρούμενοι οδόντες: όλοι, LH: 0.2 mm, LS

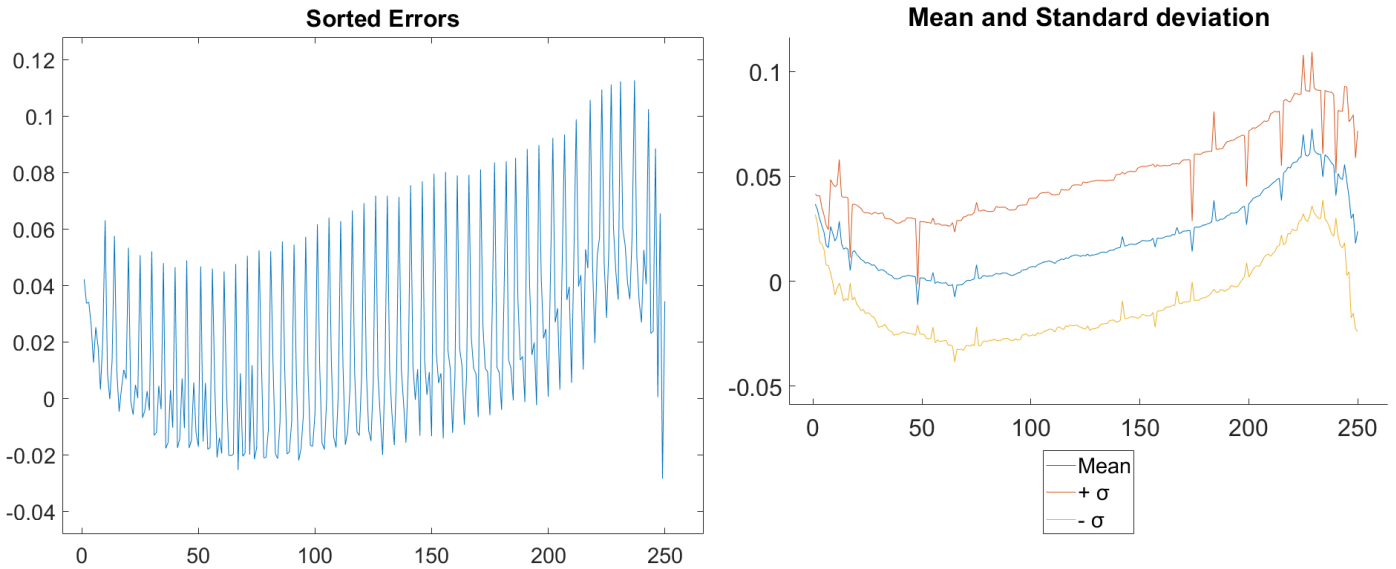


**Εικόνα 53: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.20mm, LS)**

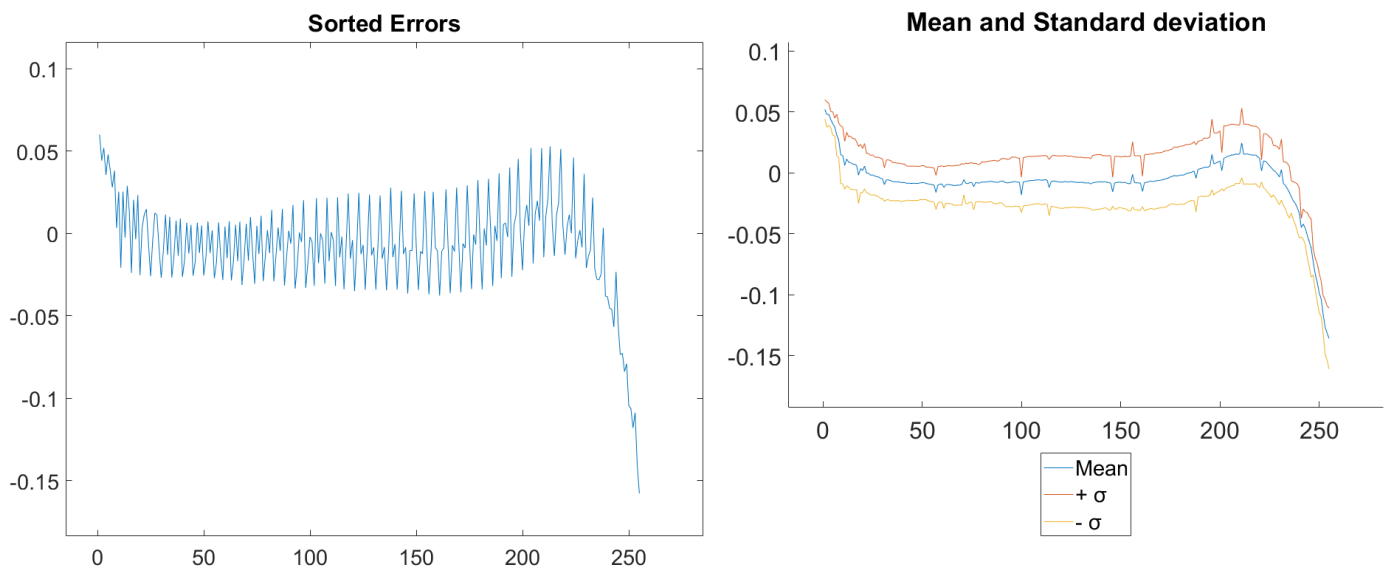


**Εικόνα 54: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.20mm, LS)**

- Πλαστικός οδοντωτός τροχός  $z = 30$ ,  $m = 3$ , μετρούμενοι οδόντες: 5, LH: 0.2 mm, HS

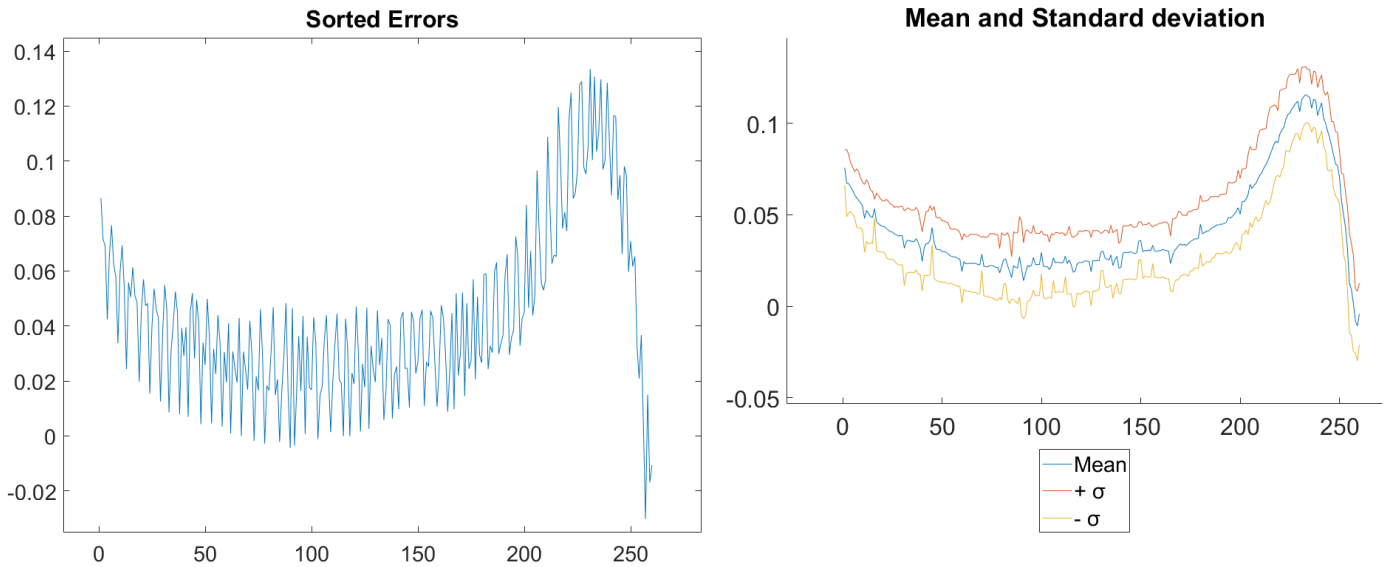


**Εικόνα 55: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=30$ ,  $m=3$ , LH: 0.20mm, HS)**

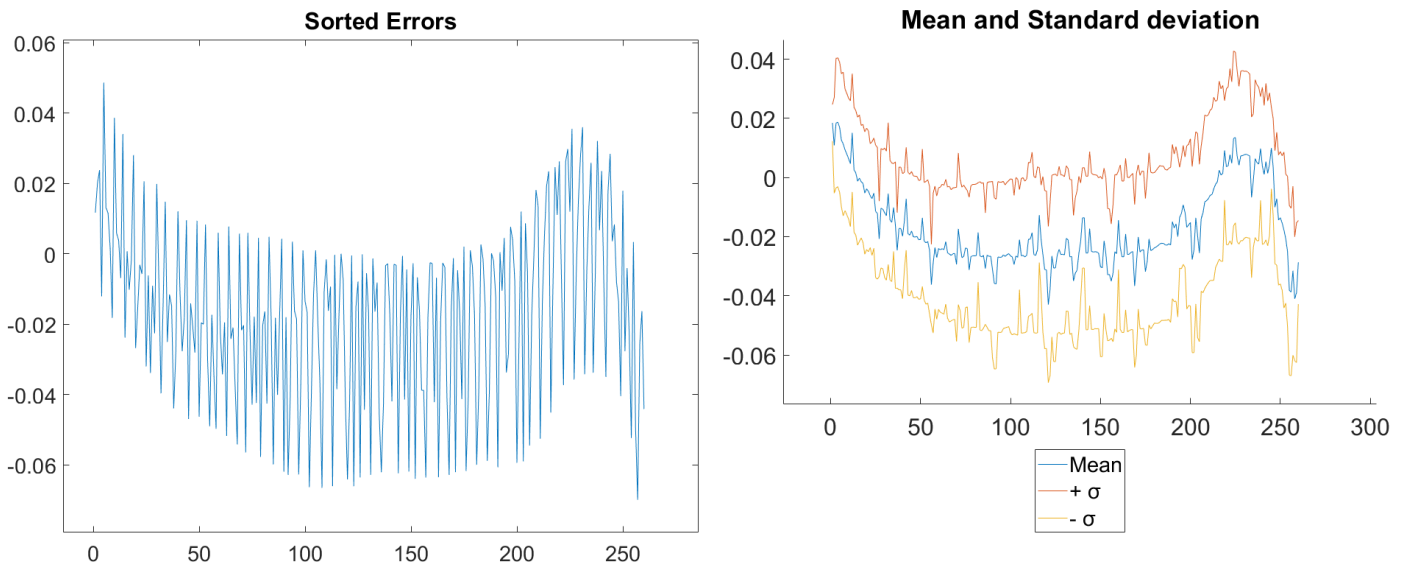


**Εικόνα 56: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω των τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=30$ ,  $m=3$ , LH: 0.20mm, HS)**

- Πλαστικός οδοντωτός τροχός  $z = 30$ ,  $m = 3$ , μετρούμενοι οδόντες: 5, LH: 0.2 mm, LS



**Εικόνα 57: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=30$ ,  $m=3$ , LH: 0.20mm, LS)**



**Εικόνα 58: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=30$ ,  $m=3$ , LH: 0.20mm, LS)**

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση εξαρτάται από το σφάλμα βήματος, δηλαδή όσο πιο μεγάλο είναι το σφάλμα αυτό, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τυπική απόκλιση. Όπως φαίνεται και από τον πρότυπο τροχό που έχει βαθμό ποιότητας 2 για το σφάλμα βήματος, η τυπική απόκλιση είναι πολύ μικρή. Επίσης για τον μεταλλικό τροχό με 25 οδόντες η τυπική απόκλιση είναι συγκριτικά μικρότερη σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους τροχούς (εκτός προτύπου), μεταλλικούς και πλαστικούς, καθώς έχει βαθμό ποιότητας 8 για το σφάλμα βήματος, ενώ όλοι οι υπόλοιποι τροχοί έχουν 11. Παρατηρείται επίσης ότι στα διαγράμματα με τα κατανεμημένα σφάλματα, υπάρχει σημαντικά λιγότερος θόρυβος στους τροχούς με χαμηλό βαθμό ποιότητας σε σχέση με αυτούς με υψηλότερο. Αυτό παρατηρείται ξανά στον πρότυπο τροχό κυρίως, καθώς ο βαθμός ποιότητας 2 για το σφάλμα βήματος, δίνει πιο συμπαγείς και συνεχείς μετρήσεις από κατατομή σε κατατομή. Τέλος παρατηρείται ότι τα διαγράμματα των μεταλλικών οδοντωτών τροχών είναι πιο υψίσυχνα σε σχέση με αυτά των πλαστικών. Στα μεταλλικά υπάρχουν πολλές κορυφές και κοιλάδες ενώ τα πλαστικά συνήθως αποτελούνται από μια κοιλάδα και μία κορυφή.

## 7.2 Ανάλυση σφαλμάτων κατατομών με χρήση της σειράς Fourier

Στην καλύτερη κατανόηση των παραπάνω, θα βοηθήσει η ανάλυση με τη χρήση της σειράς Fourier, όπου θα μπορέσουν να φανούν καλύτερα οι μορφές των κατατομών. Από τον μέσο όρο των σφαλμάτων των κατατομών, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την μορφή των σφαλμάτων, κάνοντας αριθμητική παρεμβολή στα δεδομένα σημεία της καμπύλης μέσα από την σειρά Fourier. Ο λόγος που χρησιμοποιείται η σειρά Fourier είναι επειδή τα δεδομένα των μετρήσεων παραπέμπουν σε καμπύλες αρμονικής μορφής που μπορούν να παραβληθούν από χαμηλής τάξεως σειρά Fourier. Αξίζει να σημειωθεί ότι και η πολυωνυμική παρεμβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όμως ο βαθμός του πολυωνύμου σε αυτή τη περίπτωση θα έπρεπε να ήταν αρκετά μεγάλος ώστε οι καμπύλες να ταιριάζουν στα δεδομένα. Παρακάτω παρατίθεται ο τύπος για την σειρά Fourier:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n [a_i \cdot \cos(iwx) + b_i \cdot \sin(iwx)] \quad (9)$$

Όπου,

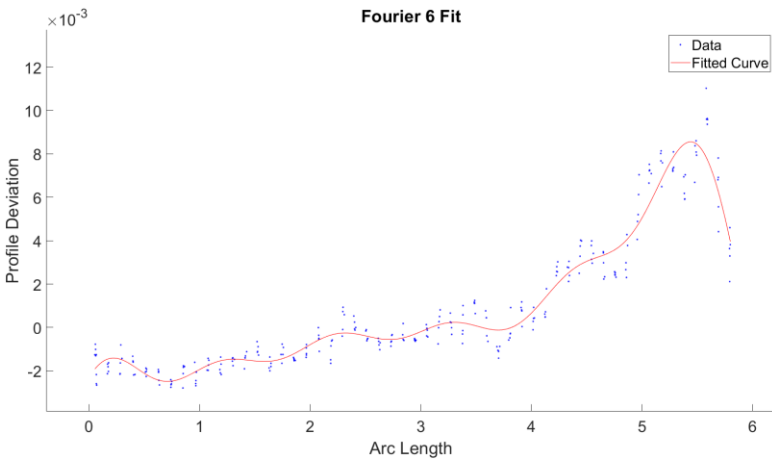
$a_0, a_i, b_i$  : οι σταθερές της σειράς Fourier

$w$  : η συχνότητα

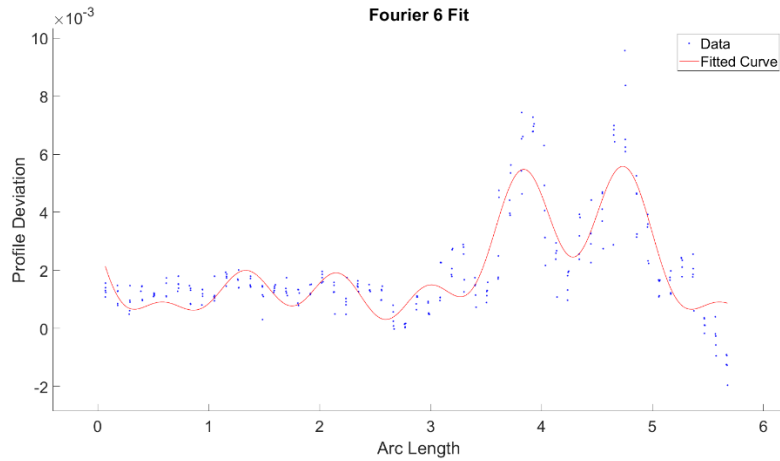
$n$  : η τάξη της σειράς Fourier

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκες βαθμός 6 για την σειρά Fourier, δηλαδή  $n = 6$ .

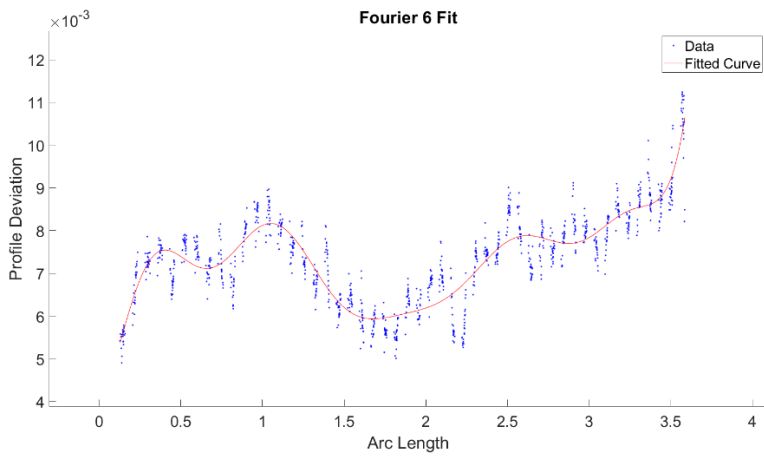




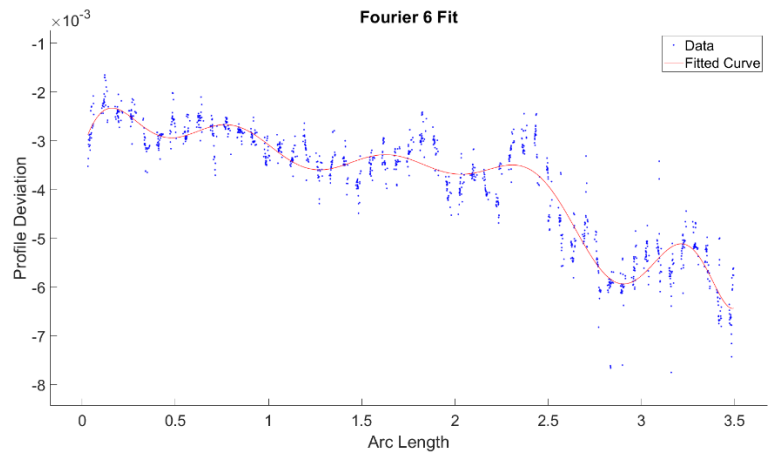
**Εικόνα 59: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (μεταλλικό,  $z=38$ ,  $m=3$ )**



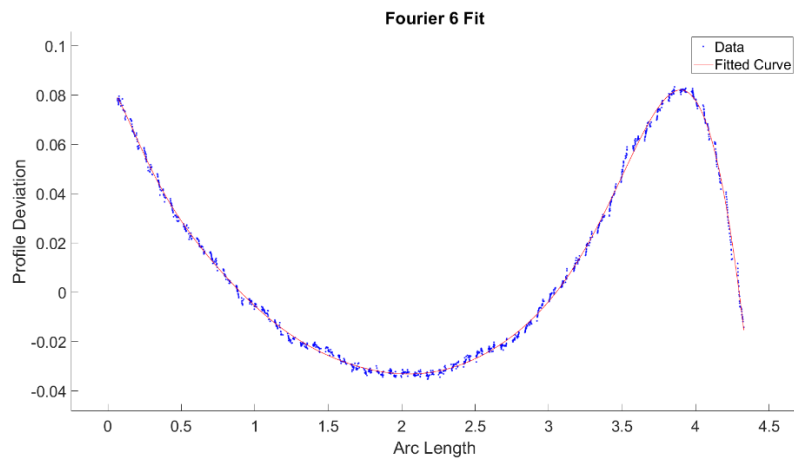
**Εικόνα 60: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (μεταλλικό,  $z=38$ ,  $m=3$ )**



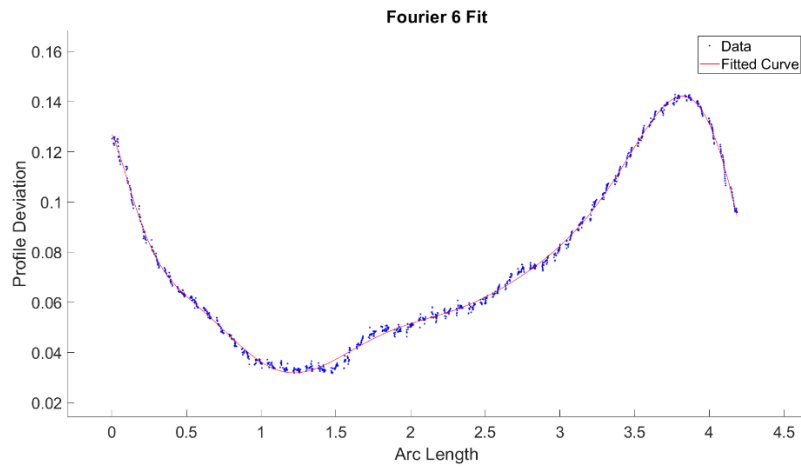
**Εικόνα 61: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (μεταλλικό,  $z=25$ ,  $m=2$ )**



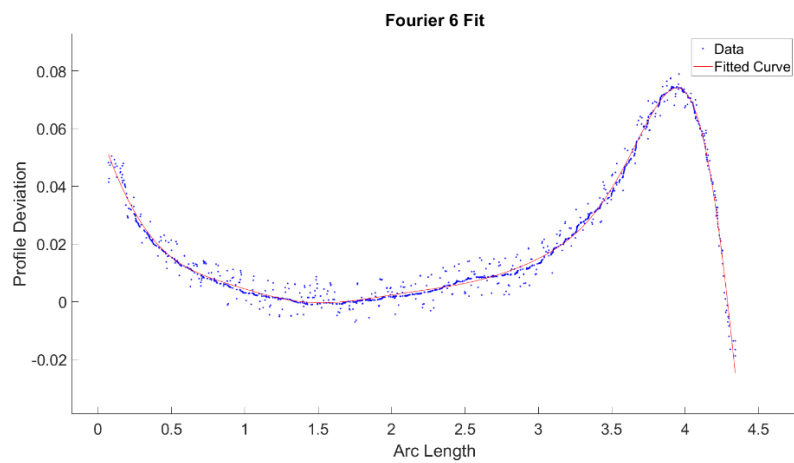
**Εικόνα 62: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (μεταλλικό,  $z=25$ ,  $m=2$ )**



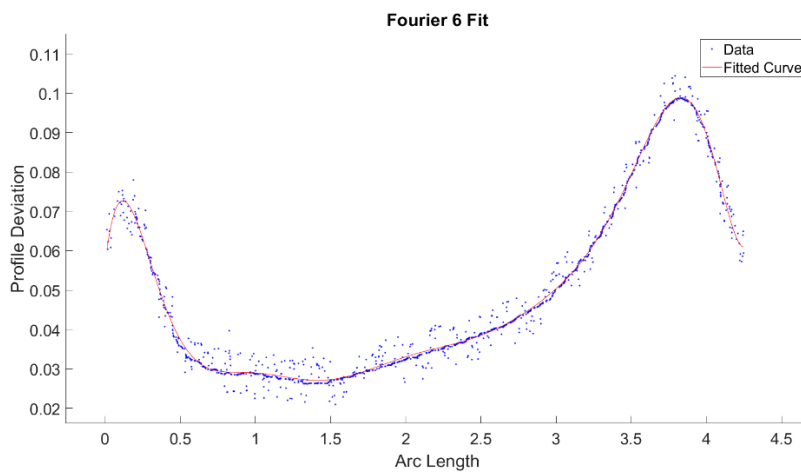
**Εικόνα 63: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό,  $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, HS)**



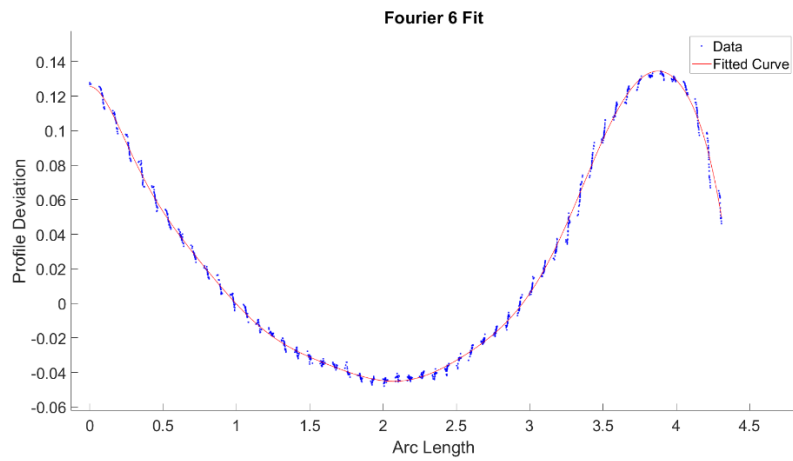
**Εικόνα 64: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό,  $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, HS)**



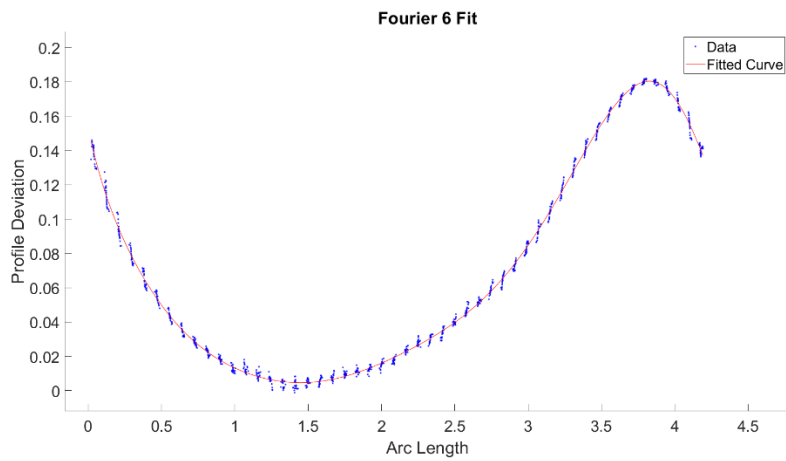
**Εικόνα 65: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό,  $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, LS)**



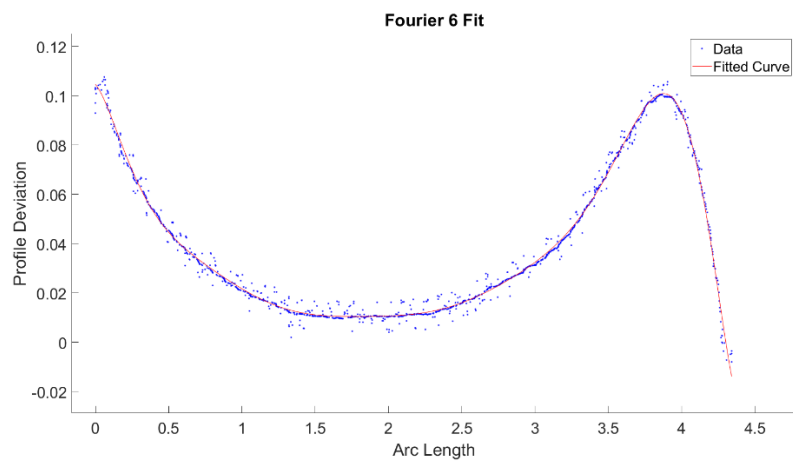
**Εικόνα 66: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό,  $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.12mm, LS)**



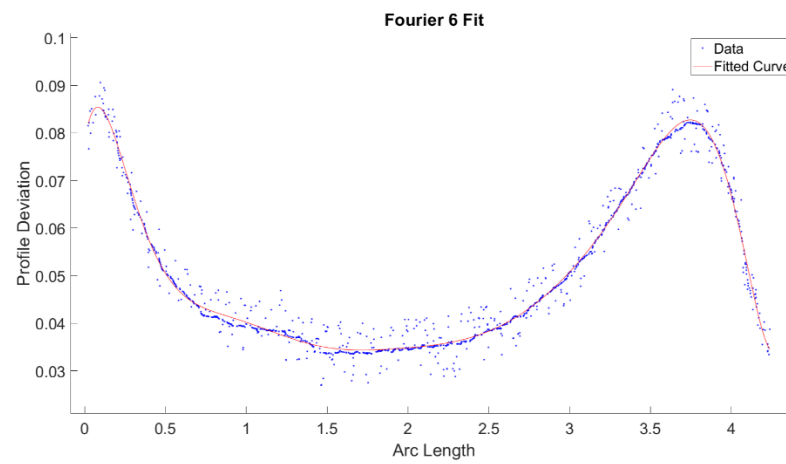
**Εικόνα 67: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό,  $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.20mm, HS)**



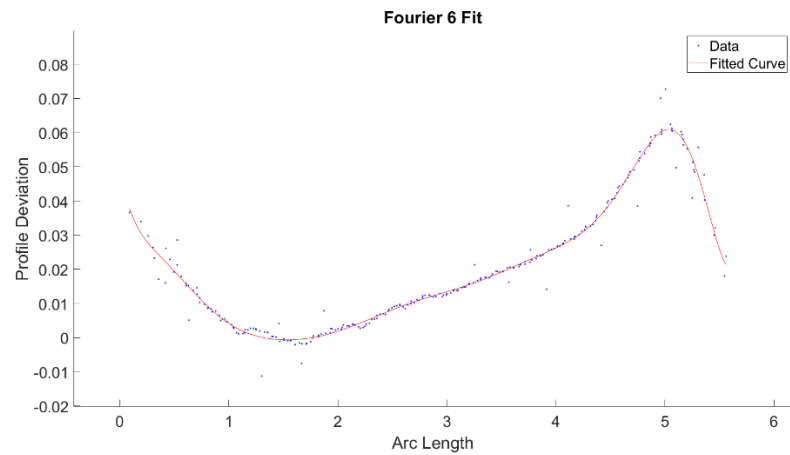
**Εικόνα 68: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό,  $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.20mm, HS)**



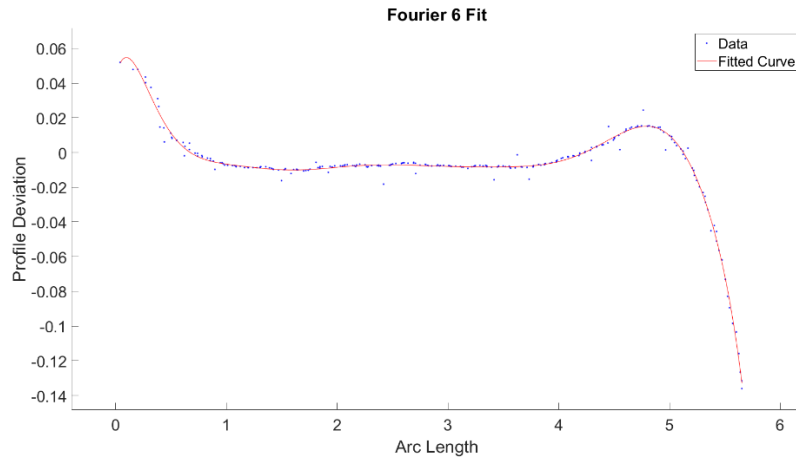
**Εικόνα 69: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό,  $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.20mm, LS)**



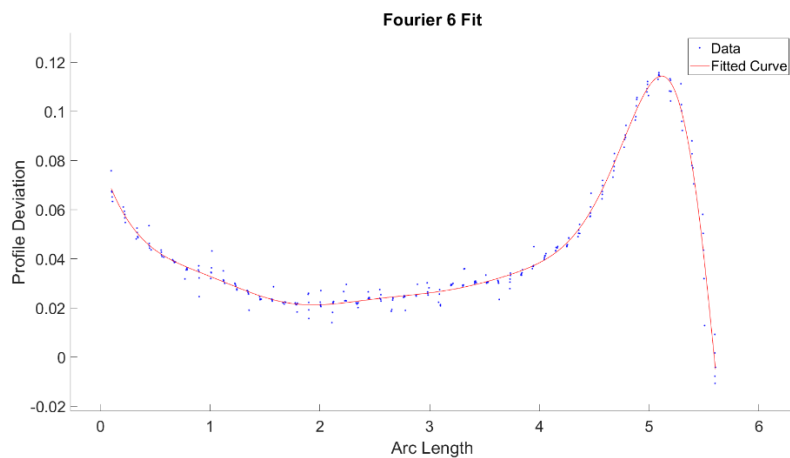
**Εικόνα 70: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό,  $z=25$ ,  $m=2$ , LH: 0.20mm, LS)**



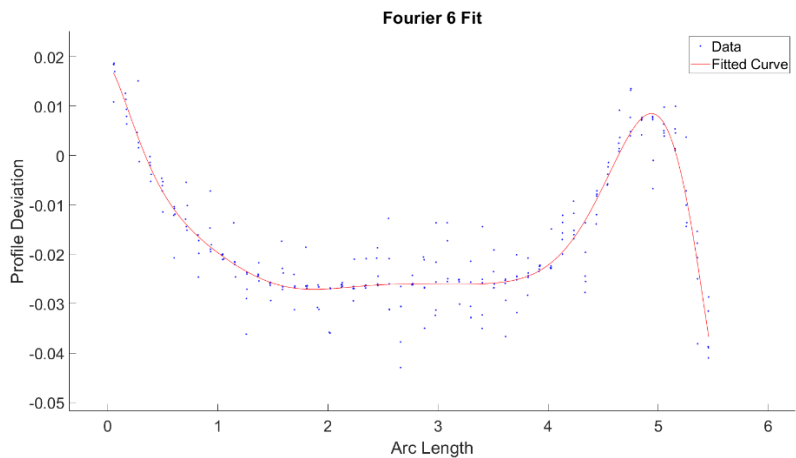
**Εικόνα 71: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό,  $z=30$ ,  $m=3$ , LH: 0.20mm, HS)**



**Εικόνα 72: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό,  $z=30$ ,  $m=3$ , LH: 0.20mm, HS)**



**Εικόνα 73: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό,  $z=30$ ,  $m=3$ , LH: 0.20mm, LS)**



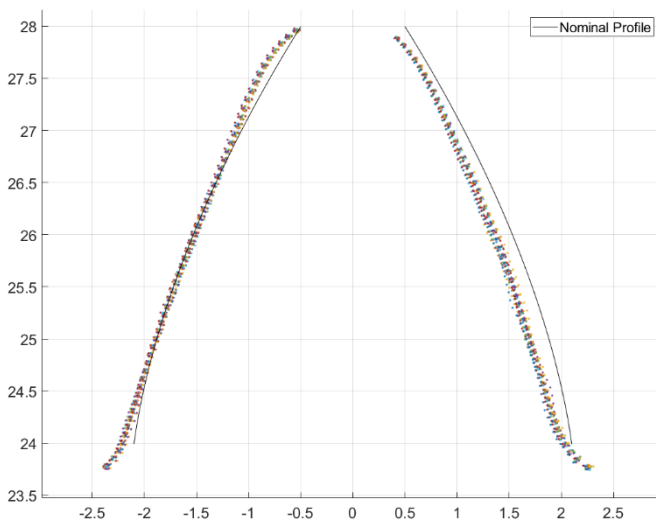
**Εικόνα 74: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό,  $z=30$ ,  $m=3$ , LH: 0.20mm, LS)**

Από τις παραπάνω εικόνες, επιβεβαιώνεται ότι η μορφή των σφαλμάτων των μεταλλικών τροχών είναι υψίσυχη, τόσο για 5 μετρημένους οδόντες, όσο και για 25. Αυτό σημαίνει ότι τα σφάλματα είναι ομοιόμορφα κατανομημένα, με διακυμάνσεις, κατά μήκος της κατατομής. Από την άλλη, επιβεβαιώνεται η παρουσία μίας κοιλάδας και μίας κορυφής στους πλαστικούς τροχούς, το οποίο υποδεικνύει την παρουσία μεγάλων σφαλμάτων στα άκρα των κατατομών και μικρότερων προς το κέντρο, με την κορυφή να οφείλεται στο ράδιο που υπάρχει, κοντά στην κεφαλή, σε όλους τους τροχούς.

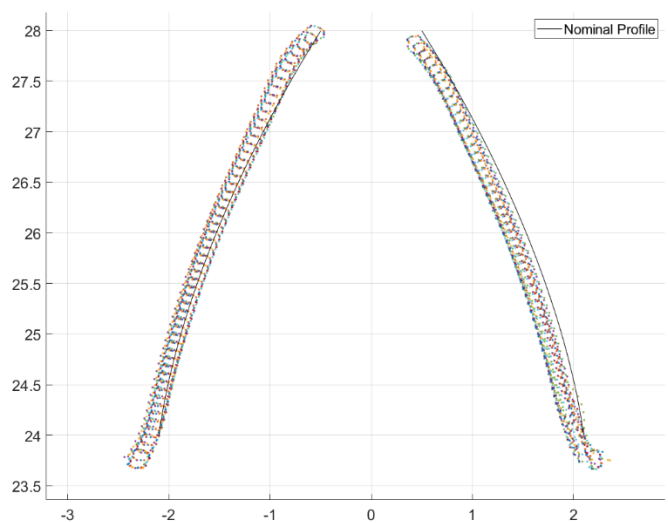
### 7.3 Γεωμετρικά σφάλματα τρισδιάστατα εκτυπωμένων οδοντωτών τροχών

Στους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς, παρόλο που εκτυπώθηκαν με ενσωματωμένες βάσεις στήριξης, παρατηρούνται αποκλίσεις στην θέση των κατατομών σε σχέση με την θεωρητική τους γεωμετρία. Προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο αυτό, οι κατατομές περιστράφηκαν κατάλληλα ώστε να αναχθούν ως προς τον πρώτο οδόντα του κάθε μετρούμενου τροχού και να είναι εύκολη η ταυτόχρονη σύγκριση για όλους τους οδόντες.

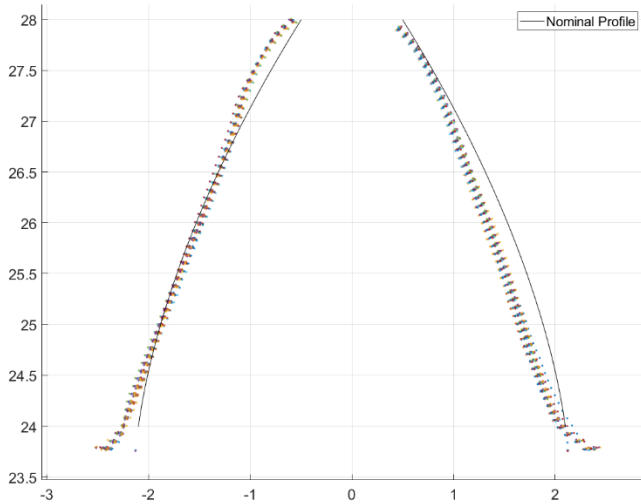
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις κατατομές όλων των μετρημένων πλαστικών οδοντωτών τροχών.



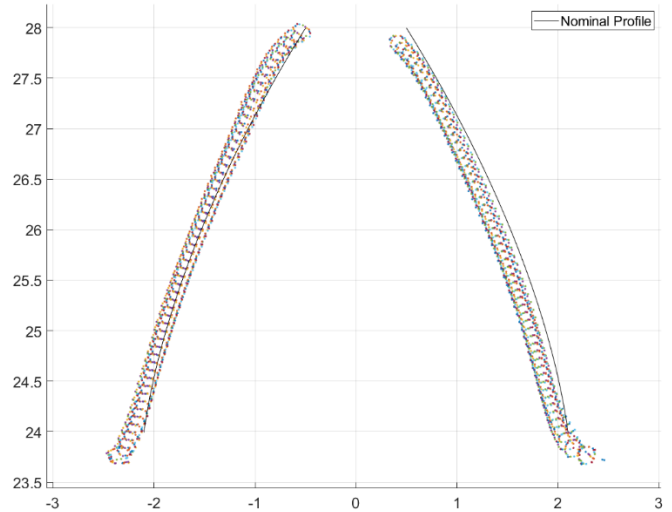
**Εικόνα 75: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=25$ ,  $m=2$ ,  $LH: 0.12mm$ ,  $HS$ )**



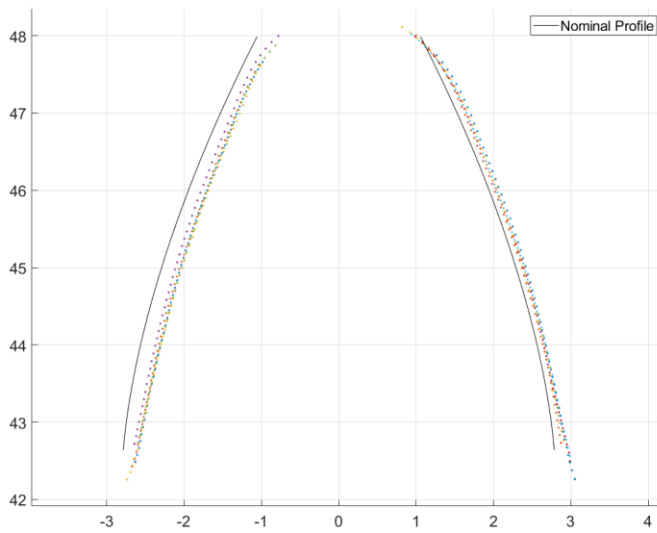
**Εικόνα 76: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=25$ ,  $m=2$ ,  $LH: 0.12mm$ ,  $LS$ )**



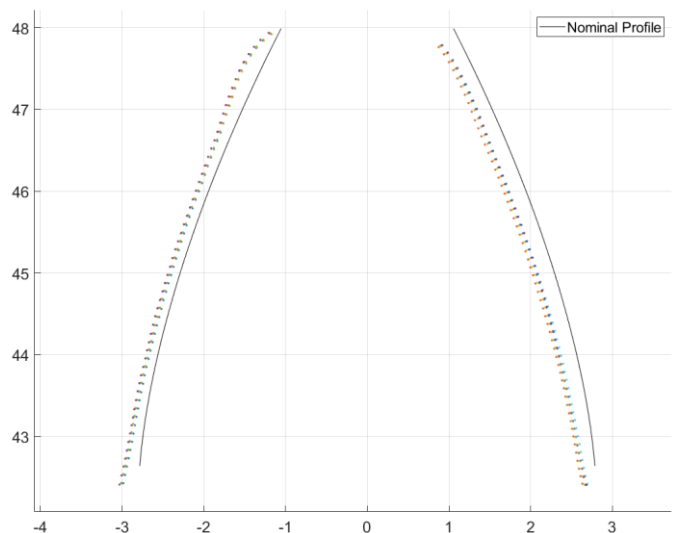
**Εικόνα 77: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=25$ ,  $m=2$ ,  $LH: 0.20mm$ ,  $HS$ )**



**Εικόνα 78: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=25$ ,  $m=2$ ,  $LH: 0.20mm$ ,  $LS$ )**



**Εικόνα 79: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=30$ ,  $m=3$ ,  $LH: 0.20mm$ ,  $HS$ )**

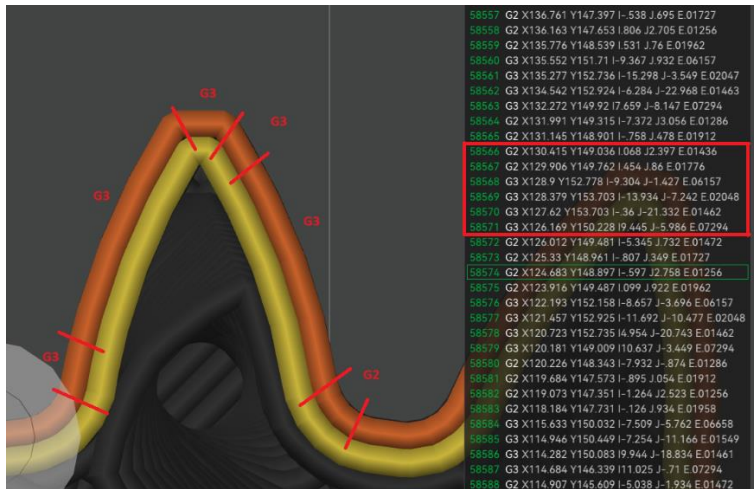


**Εικόνα 80: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=30$ ,  $m=3$ ,  $LH: 0.20mm$ ,  $LS$ )**

Η απόκλιση που φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, οφείλεται στη διαστασιολογική ακρίβεια του εκτυπωτή, η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι της τάξης των  $0.1mm - 0.3mm$ . Οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της συρρίκνωσης του πλαστικού υλικού που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση, αλλά και στην περιορισμένη διαστασιολογική ακρίβεια των βηματικών κινητήρων, υπεύθυνων για την κίνηση του θερμού ακροφυσίου του εκτυπωτή. Επιπλέον, λόγω των μεγάλων ταχυτήτων εκτύπωσης σε συνδυασμό με την

καλωδιωτή τροφοδοσία υλικού (bowden), υπάρχουν σημαντικές αυξομειώσεις στην παροχή υλικού που προκαλούν περαιτέρω μείωση της διαστασιολογικής ακρίβειας.

Επίσης, η μορφή των κατατομών προς το ύψος κεφαλής οδόντος, παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τη θεωρητική. Αυτό οφείλεται στον τρόπο που επιλέγει το λογισμικό του εκτυπωτή να μεταφράσει τη γεωμετρία του STEP αρχείου, σε G κώδικα. Οι εντολές που χρησιμοποιούνται για όλη τη γεωμετρία του οδόντος είναι οι G2, G3 οι οποίες αντιπροσωπεύουν τόξο κύκλου με τη φορά ή αντίστροφα της φοράς του ρολογιού. Έτσι, στο ύψος κεφαλής, υπάρχουν 2 ράδια στις άκρες του οδόντος αντί για γωνίες, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 81** και **Εικόνα 82**.

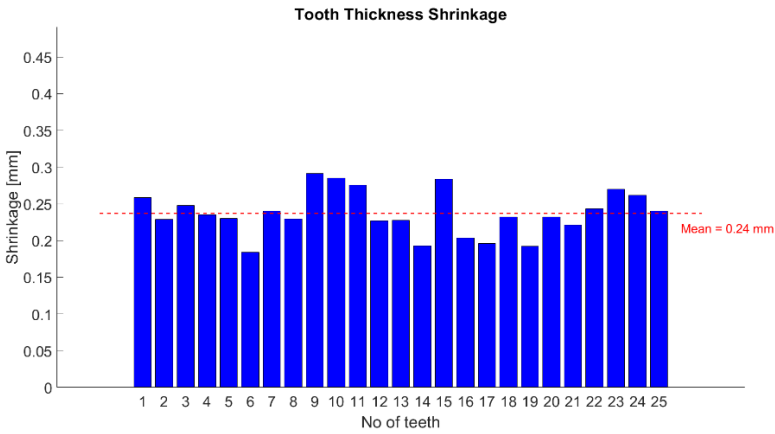


**Εικόνα 81: G-Κώδικας για module 2**

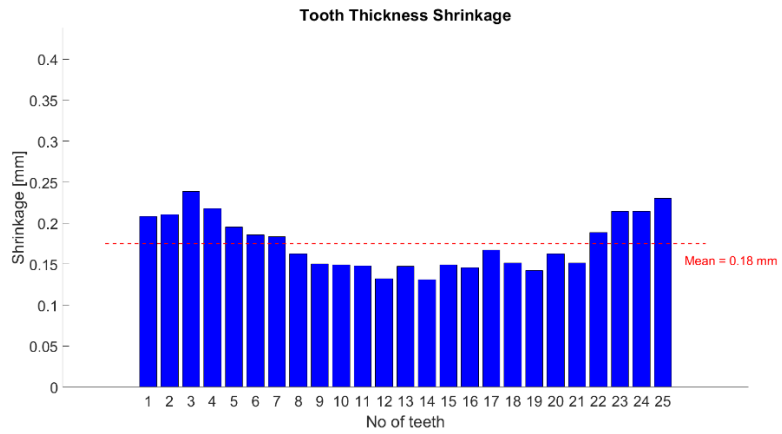


**Εικόνα 82: G-Κώδικας για module 3**

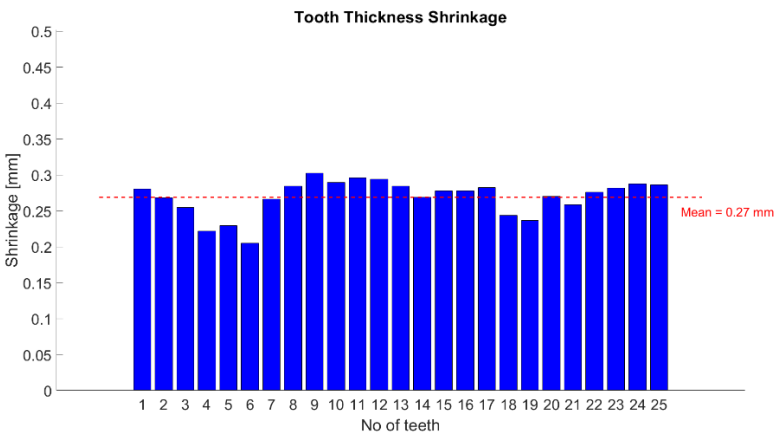
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα συρρίκνωσης ανά οδόντα αλλά κατά μήκος της κατατομής, που οφείλονται στην απόκλιση που περιεγράφηκε προηγουμένως.



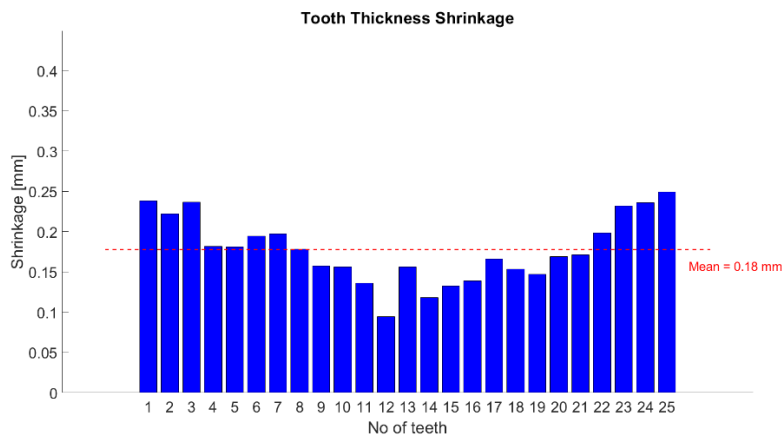
**Εικόνα 83: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=25$ ,  $m=2$ ,  $LH: 0.12mm$ ,  $HS$ )**



**Εικόνα 84: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=25$ ,  $m=2$ ,  $LH: 0.12mm$ ,  $LS$ )**

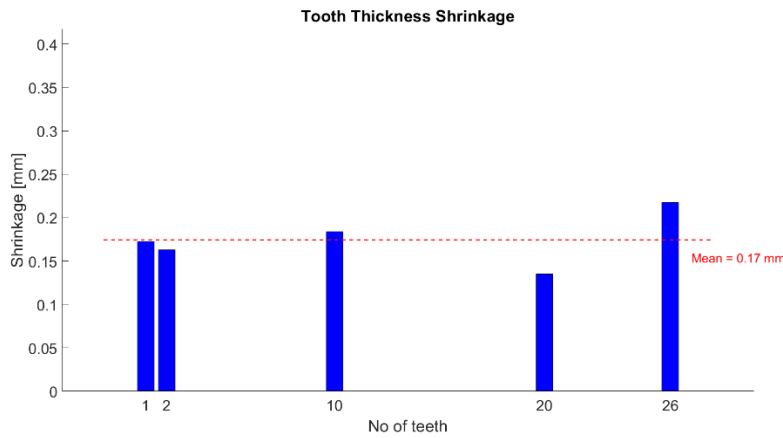


**Εικόνα 85: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=25$ ,  $m=2$ ,  $LH: 0.20mm$ ,  $HS$ )**

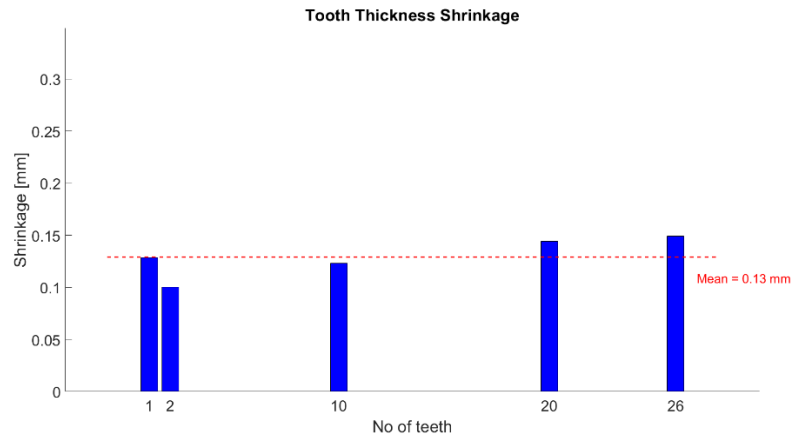


**Εικόνα 86: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=25$ ,  $m=2$ ,  $LH: 0.20mm$ ,  $LS$ )**

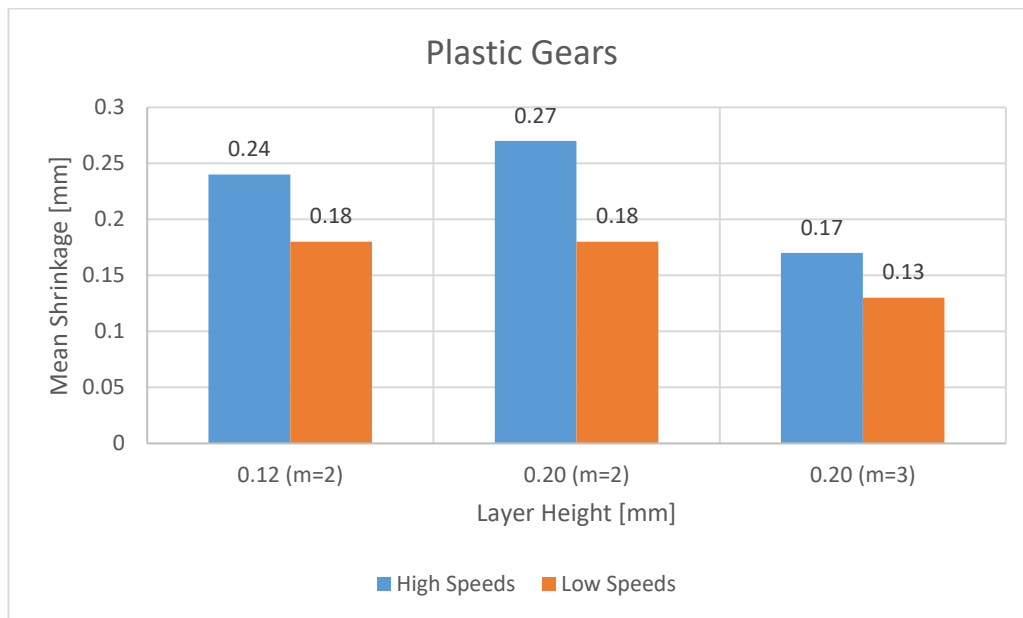




**Εικόνα 87: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα (z=30, m=3, LH: 0.20mm, HS)**



**Εικόνα 88: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα (z=30, m=3, LH: 0.20mm, LS)**

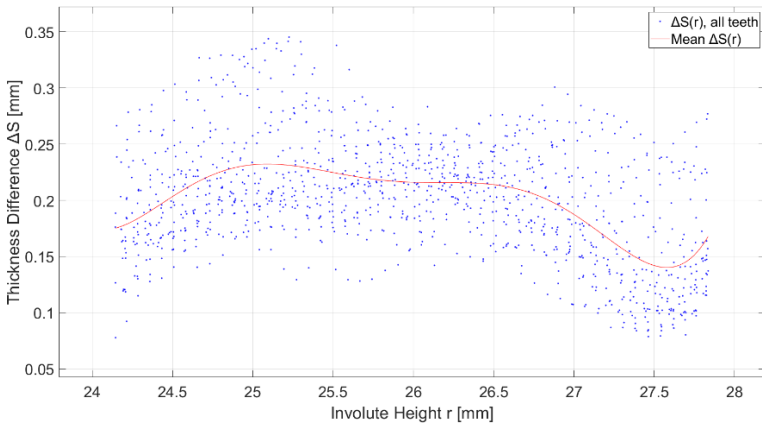


**Εικόνα 89: Διάγραμμα μέσης συρρίκνωσης σε σχέση με τις παραμέτρους εκτύπωσης και το module**

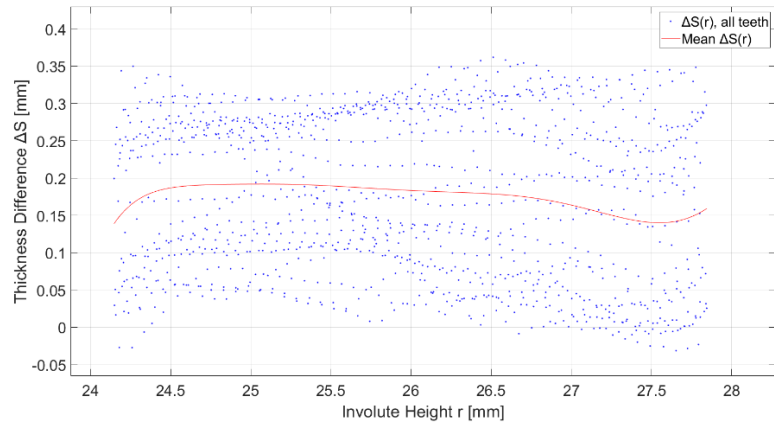
Η συρρίκνωση ορίστηκε ως η διαφορά του πραγματικού πάχους οδόντος από το θεωρητικό. Από την **Εικόνα 89**, προκύπτει ως συμπέρασμα ότι η μέση συρρίκνωση της γεωμετρίας των κατατομών στους πλαστικούς τροχούς, εξαρτάται και από τις παραμέτρους εκτύπωσης. Οι χαμηλές ταχύτητες, πάντα έχουν μικρότερη συρρίκνωση σε σχέση με τις υψηλές, για το ίδιο ύψος στρώσης. Αντίθετα παρατηρείται ότι για διαφορετικά ύψη στρώσης, στις ίδιες ταχύτητες, η διαφορά της μέσης συρρίκνωσης είναι πολύ μικρή ή σχεδόν αμελητέα, στους τροχούς με module 2. Στους τροχούς με module 3 φαίνεται να μειώνεται

σημαντικά η μέση συρρίκνωση, το οποίο σημαίνει ότι τα σφάλματα στη γεωμετρία μειώνονται, όσο αυξάνεται το module και συνεπώς το μέγεθος του οδόντα. Γενικά η μέση συρρίκνωση, βρίσκεται εντός των ορίων του κατασκευαστή.

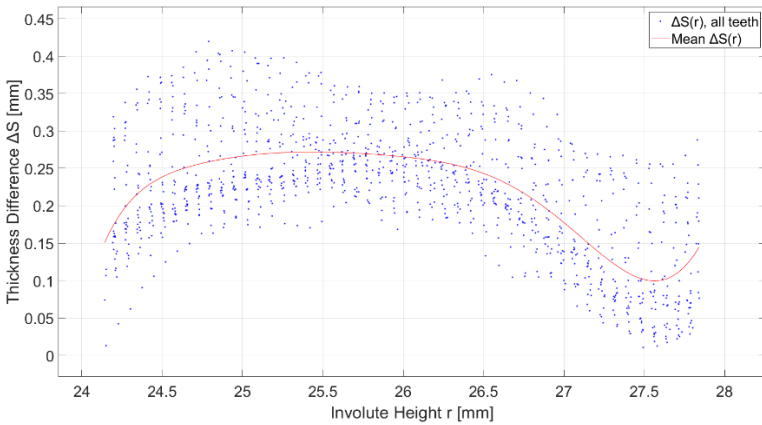
Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα συρρίκνωσης του οδόντος κατά μήκος της κατατομής.



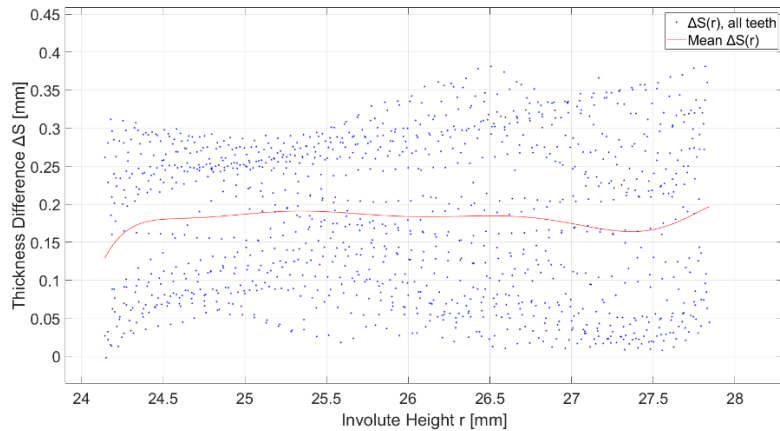
**Εικόνα 90: Διάγραμμα  $\Delta S(r)$  ( $z=25, m=2, LH: 0.12mm, HS$ )**



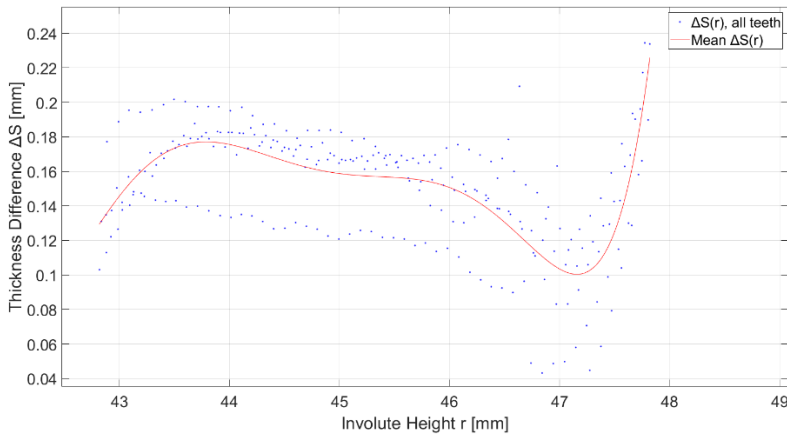
**Εικόνα 91: Διάγραμμα  $\Delta S(r)$  ( $z=25, m=2, LH: 0.12mm, LS$ )**



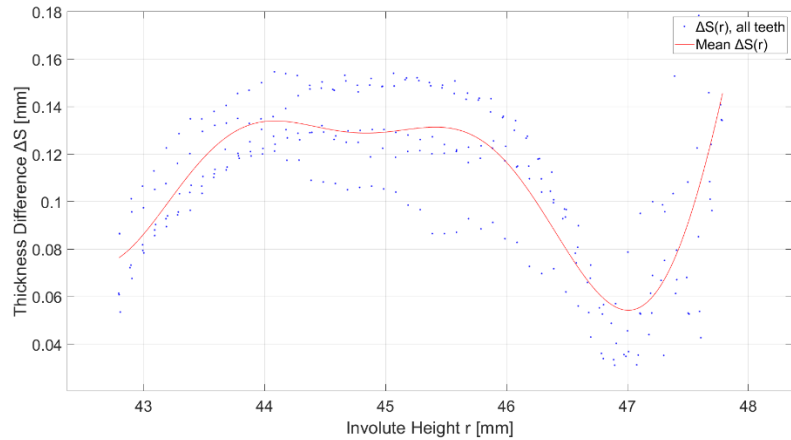
**Εικόνα 92: Διάγραμμα  $\Delta S(r)$  ( $z=25, m=2, LH: 0.20mm, HS$ )**



**Εικόνα 93: Διάγραμμα  $\Delta S(r)$  ( $z=25, m=2, LH: 0.20mm, LS$ )**



**Εικόνα 94: Διάγραμμα  $\Delta S(r)$  ( $z=30, m=3, LH: 0.20mm, HS$ )**



**Εικόνα 95: Διάγραμμα  $\Delta S(r)$  ( $z=30, m=3, LH: 0.20mm, LS$ )**

Τα άνω και κάτω όρια των διαγραμμάτων, σέβονται τα όρια που τέθηκαν από τον κατασκευαστή και αναλύθηκαν προηγουμένως. Επιπλέον παρατηρείται, για το module 2, μία ομοιόμορφη κατανομή της συρρίκνωσης κατά μήκος της κατατομής, για τις χαμηλές ταχύτητες ενώ για τις υψηλές φαίνεται να μειώνεται η συρρίκνωση κοντά στην κεφαλή λόγω των ραδίων που είναι πιο έντονα. Δεν ισχύει το ίδιο όμως για το module 3, όπου παρόλο που υπάρχουν τα ράδια, η κατανομή της συρρίκνωσης έχει ακανόνιστη μορφή.

## 8. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα έρευνα διαπιστώθηκε και επαληθεύθηκε ότι οι μεταλλικοί οδοντωτοί τροχοί που μετρήθηκαν, έχουν καλύτερη ποιότητα κατατομής σε σχέση με τους τρισδιάστατα εκτυπωμένους. Ο βαθμός ποιότητας κατατομών των μεταλλικών τροχών είναι σταθερά καλύτερος από των πλαστικών. Οι μεταλλικοί τροχοί, παρόλο που έχουν λειτουργήσει και έχουν δεχθεί φορτίσεις, διατηρούν σε καλή ποιότητα τις κατατομές τους, σε αντίθεση με τους πλαστικούς οι οποίοι χωρίς να έχουν λειτουργήσει, έχουν ήδη πολύ κακής ποιότητας κατατομές. Έτσι, φαίνεται ότι οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασιών για τη δημιουργία οδοντωτών τροχών, υπερέχουν των προσθετικών κατεργασιών όσον αφορά την ποιότητα του τροχού.

Πιο συγκεκριμένα, για τους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς αποδείχθηκε ότι οι παράμετροι εκτύπωσης επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των κατατομών, καθώς με καλύτερες τιμές στο ύψος στρώσης και στην ταχύτητα εκτύπωσης, η ποιότητα των κατατομών γίνεται καλύτερη. Όσον αφορά την μορφή των κατατομών, ο τρισδιάστατος εκτυπωτής υστερεί στο να την αποδώσει με μεγάλη ακρίβεια. Σε όλους τους εκτυπωμένους τροχούς υπάρχει γεωμετρική απόκλιση στις κατατομές, η οποία όμως βρίσκεται εντός των ορίων που έχει θέσει ο κατασκευαστής, δηλαδή της τάξεως του 0.1mm – 0.3mm. Αυτή η γεωμετρική απόκλιση είναι που επηρεάζει τον βαθμό ποιότητας, η οποία όμως φαίνεται να μικραίνει όσο μεγαλύτερο είναι το module των τροχών, καθώς η μεγαλύτερη γεωμετρία είναι πιο εύκολο να αποτυπωθεί από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Τέλος διαπιστώθηκε ότι αυτή η γεωμετρική απόκλιση, οφείλεται στο γεγονός ότι ο G-κώδικας του λογισμικού εκτύπωσης, αποτυπώνει τη μορφή των οδόντων με εντολές G2 και G3, δηλαδή σε τόξα κύκλου.

Όσον αφορά την μελλοντική έρευνα, μπορούν να διερευνηθούν τα σφάλματα των κατατομών σε πλαστικούς τροχούς με μεγαλύτερα module και να συγκριθούν με αντίστοιχους συμβατικούς. Επιπλέον, θα μπορούσε να ελεγχθεί ένα μεγαλύτερο εύρος παραμέτρων εκτύπωσης ώστε να υπολογιστεί σε βάθος ο αντίκτυπος που έχουν οι παράμετροι αυτοί, στην διαστασιολογική ακρίβεια των οδοντωτών τροχών. Ακόμα, θα μπορούσαν να διερευνηθούν τα διαφορετικά είδη πλαστικών υλικών εκτύπωσης αλλά και οι διαφορετικές μέθοδοι εκτύπωσης, προκειμένου να βρεθεί ο ιδανικότερος τρόπος εκτύπωσης πλαστικών οδοντωτών τροχών με τη καλύτερη ποιότητα κατατομής. Τέλος, μια βαθύτερη εξερεύνηση και μετατροπή του G-κώδικα της εκτύπωσης, θα μπορούσε να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω όπως η συρρίκνωση του πλαστικού υλικού και η εμφάνιση των ραδίων στο ύψος κεφαλής. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε να ερευνηθεί ένας τρόπος με τον οποίο η γεωμετρία των οδόντων των τροχών, θα αποτυπώνεται από εντολές G1 (πολλά, μικρά, συνεχή ευθύγραμμα τμήματα) στον G-κώδικα.

## 9. Κατάλογος Πινάκων

|  |    |
|--|----|
| Πίνακας 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μετρηθέντων οδοντωτών τροχών..... | 12 |
| Πίνακας 2: Τιμές αποκλίσεων οδοντωτών τροχών .....                     | 43 |
| Πίνακας 3: Βαθμοί ποιότητας κατατομών και βήματος .....                | 44 |

## 10. Κατάλογος Εικόνων

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 1: Μεταλλικός οδοντωτός τροχός με 38 οδόντες .....                             | 13 |
| Εικόνα 2: Μεταλλικός οδοντωτός τροχός με 25 οδόντες .....                             | 13 |
| Εικόνα 3: Προκαθορισμένα προφίλ του λογισμικού Bambu Studio.....                      | 14 |
| Εικόνα 4: 0.12 mm ύψος στρώσης με υψηλές ταχύτητες.....                               | 14 |
| Εικόνα 5: 0.12 mm ύψος στρώσης με χαμηλές ταχύτητες .....                             | 14 |
| Εικόνα 6: 0.20 mm ύψος στρώσης με υψηλές ταχύτητες.....                               | 14 |
| Εικόνα 7: 0.20 mm ύψος στρώσης με χαμηλές ταχύτητες .....                             | 14 |
| Εικόνα 8: Οδόντας τροχού με ύψος στρώσης 0.20 mm .....                                | 15 |
| Εικόνα 9: Οδόντας τροχού με ύψος στρώσης 0.12 mm.....                                 | 15 |
| Εικόνα 10: Εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα στην εσωτερική διάμετρο του τροχού .....   | 16 |
| Εικόνα 11: Εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα των οδόντων του τροχού.....                | 16 |
| Εικόνα 12: Χωροπλήρωση (infill) του τροχού .....                                      | 16 |
| Εικόνα 13: Πλαστικός οδοντωτός τροχός με 25 οδόντες.....                              | 17 |
| Εικόνα 14: Πλαστικός οδοντωτός τροχός με 30 οδόντες.....                              | 17 |
| Εικόνα 15: Η CMM στο εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων Ε.Μ.Π. .... | 19 |
| Εικόνα 16: Λογισμικό PC-DMIS.....   | 20 |
| Εικόνα 17: Σημεία μετρήσεων στους οδόντες μέσα από το λογισμικό PC-DMIS.....          | 20 |
| Εικόνα 21: Σύστημα συντεταγμένων .....  | 21 |
| Εικόνα 18: Βάση στήριξης για τροχό με πολύσφηνο .....                                 | 22 |
| Εικόνα 19: Βάση στήριξης για τροχό χωρίς πολύσφηνο .....                              | 23 |
| Εικόνα 20: Τροχός με ενσωματωμένη τη βάση στήριξης .....                              | 23 |
| Εικόνα 22: Μεταλλικός οδοντωτός τροχός με 5 μετρημένους οδόντες .....                 | 24 |
| Εικόνα 23: Μεταλλικός οδοντωτός τροχός με όλους τους οδόντες μετρημένους.....         | 24 |
| Εικόνα 24: Πλαστικός οδοντωτός τροχός με όλους τους οδόντες μετρημένους .....         | 24 |
| Εικόνα 25: Συνολική απόκλιση κατατομής $F_{\alpha}$ .....                             | 26 |
| Εικόνα 26: Απόκλιση μορφής κατατομής $f_{\alpha}$ .....                               | 27 |
| Εικόνα 27: Απόκλιση κλίσης κατατομής $f_{H\alpha}$ .....                              | 27 |
| Εικόνα 28: Ορολογία για τις αποκλίσεις κατατομής .....                                | 28 |
| Εικόνα 29: Απλό σφάλμα βήματος $f_{pi}$ .....   | 28 |
| Εικόνα 30: Περιστροφή σημείου κατά γωνία $\theta$ .....                               | 29 |
| Εικόνα 31: Στροφή σημείων 2 <sup>ου</sup> οδόντος .....                               | 30 |
| Εικόνα 32: Απόκλιση κατατομών σε σχέση με τη θεωρητική γεωμετρία.....                 | 31 |
| Εικόνα 33: Διόρθωση απόκλισης.....  | 32 |
| Εικόνα 34: Μετρήσεις με σημεία τροχοειδούς και κεφαλής.....                           | 33 |
| Εικόνα 35: Αφαίρεση σημείων τροχοειδούς και κεφαλής.....                              | 33 |
| Εικόνα 36: Σφάλματα κατατομής .....   | 35 |
| Εικόνα 37: Σφάλματα κατατομής σε μεγέθυνση .....                                      | 35 |
| Εικόνα 38: Διάγραμμα σφαλμάτων κατατομών .....  | 36 |
| Εικόνα 39: Διάγραμμα συνολικής απόκλισης κατατομής $F_{\alpha}$ .....                 | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 40: Διάγραμμα απόκλισης μορφής κατατομής $f_{f\alpha}$ .....   | 38 |
| Εικόνα 41: Διάγραμμα απόκλισης κλίσης κατατομής $f_{H\alpha}$ .....   | 39 |
| Εικόνα 42: Αποκλίσεις κατατομής και βήματος μεταλλικών και πλαστικών τροχών.....  | 45 |
| Εικόνα 43: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=38, m=3$ ) .....                 | 48 |
| Εικόνα 44: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=38, m=3$ ) .....                    | 48 |
| Εικόνα 45: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25, m=2$ ) .....                 | 49 |
| Εικόνα 46: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25, m=2$ ) .....                    | 49 |
| Εικόνα 47: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25, m=2, LH: 0.12mm, HS$ ) ..... | 50 |
| Εικόνα 48: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25, m=2, LH: 0.12mm, HS$ ).....     | 50 |
| Εικόνα 49: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25, m=2, LH: 0.20mm, HS$ ) ..... | 51 |
| Εικόνα 50: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25, m=2, LH: 0.12mm, HS$ ).....     | 51 |
| Εικόνα 51: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25, m=2, LH: 0.12mm, LS$ ) ..... | 52 |
| Εικόνα 52: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25, m=2, LH: 0.12mm, LS$ ) .....    | 52 |
| Εικόνα 53: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=25, m=2, LH: 0.20mm, LS$ ) ..... | 53 |
| Εικόνα 54: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=25, m=2, LH: 0.20mm, LS$ ) .....    | 53 |
| Εικόνα 55: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=30, m=3, LH: 0.20mm, HS$ ) ..... | 54 |
| Εικόνα 56: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=30, m=3, LH: 0.20mm, HS$ ).....     | 54 |
| Εικόνα 57: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων αριστερών κατατομών ( $z=30, m=3, LH: 0.20mm, LS$ ) ..... | 55 |
| Εικόνα 58: Διαγράμματα συνολικών σφαλμάτων, μέσω τιμών και τυπικών αποκλίσεων δεξιών κατατομών ( $z=30, m=3, LH: 0.20mm, LS$ ) .....    | 55 |
| Εικόνα 59: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (μεταλλικό, $z=38, m=3$ ).....  | 57 |
| Εικόνα 60: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (μεταλλικό, $z=38, m=3$ ) .....  | 57 |
| Εικόνα 61: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (μεταλλικό, $z=25, m=2$ ).....  | 57 |
| Εικόνα 62: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (μεταλλικό, $z=25, m=2$ ) .....  | 57 |
| Εικόνα 63: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό, $z=25, m=2, LH: 0.12mm, HS$ ) .....                                      | 58 |
| Εικόνα 64: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό, $z=25, m=2, LH: 0.12mm, HS$ ) .....   | 58 |
| Εικόνα 65: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό, $z=25, m=2, LH: 0.12mm, LS$ ) .....                                      | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 66: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό, $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.12mm, LS).....     | 58 |
| Εικόνα 67: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό, $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, HS) ..... | 59 |
| Εικόνα 68: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό, $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, HS) .....    | 59 |
| Εικόνα 69: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό, $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, LS) ..... | 59 |
| Εικόνα 70: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό, $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, LS).....     | 59 |
| Εικόνα 71: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό, $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, HS) ..... | 60 |
| Εικόνα 72: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό, $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, HS) .....    | 60 |
| Εικόνα 73: Παρεμβολή με Fourier αριστερών κατατομών (πλαστικό, $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, LS) ..... | 60 |
| Εικόνα 74: Παρεμβολή με Fourier δεξιών κατατομών (πλαστικό, $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, LS).....     | 60 |
| Εικόνα 75: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.12mm, HS) .....              | 61 |
| Εικόνα 76: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.12mm, LS) .....              | 61 |
| Εικόνα 77: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, HS) .....              | 62 |
| Εικόνα 78: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, LS) .....              | 62 |
| Εικόνα 79: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, HS) .....              | 62 |
| Εικόνα 80: Διάγραμμα κατατομών οδοντωτού τροχού ( $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, LS) .....              | 62 |
| Εικόνα 81: G-Κώδικας για module 2.....  | 63 |
| Εικόνα 82: G-Κώδικας για module 3.....  | 63 |
| Εικόνα 83: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.12mm, HS) .....                  | 64 |
| Εικόνα 84: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.12mm, LS) .....                  | 64 |
| Εικόνα 85: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, HS) .....                  | 64 |
| Εικόνα 86: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, LS) .....                  | 64 |
| Εικόνα 87: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, HS) .....                  | 65 |
| Εικόνα 88: Διάγραμμα συρρίκνωσης ανά οδόντα ( $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, LS) .....                  | 65 |
| Εικόνα 89: Διάγραμμα μέσης συρρίκνωσης σε σχέση με τις παραμέτρους εκτύπωσης και το module .....      | 65 |
| Εικόνα 90: Διάγραμμα $\Delta S(r)$ ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.12mm, HS) .....                           | 66 |
| Εικόνα 91: Διάγραμμα $\Delta S(r)$ ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.12mm, LS) .....                           | 66 |
| Εικόνα 92: Διάγραμμα $\Delta S(r)$ ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, HS) .....                           | 66 |
| Εικόνα 93: Διάγραμμα $\Delta S(r)$ ( $z=25$ , $m=2$ , LH: 0.20mm, LS) .....                           | 66 |
| Εικόνα 94: Διάγραμμα $\Delta S(r)$ ( $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, HS) .....                           | 67 |
| Εικόνα 95: Διάγραμμα $\Delta S(r)$ ( $z=30$ , $m=3$ , LH: 0.20mm, LS) .....                           | 67 |



## 11. Κατάλογος Αναφορών

- Γιαννάκογλου, Κ. Χ., Αναγνωστόπουλος, Ι. & Μπεργελές, Γ. (2003). *Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς*, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Ε.Μ.Π. Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα.
- Καραχάλιου, Χ. & Μανσούρ, Γ. (2017). *Διαστατική Μετρολογία*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Κωστόπουλος, Θ. Ν. (2010). *Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών*, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- Παπαδόπουλος, Χ. Α. (2017). *Στοιχεία Μηχανών*, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα.
- Παπαλέξης, Χ. (2019). *Εκτίμηση κλάσης ακρίβειας οδοντώσεων κατά AGMA μέσω ανάλυσης φάσματος με αριθμητική μοντελοποίηση των γεωμετρικών αποκλίσεων και της τραχύτητας. Διπλωματική Εργασία* (Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών).
- International Organization for Standardization [ISO] (2006). ISO/TR 10064-1:1992/Cor.1:2006(E), *Code of inspection practice — Part 1: Inspection of corresponding flanks of gear teeth*, ISO.
- International Organization for Standardization [ISO] (2013). ISO 1328-1:2013(E), *Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth*, ISO.
- Diegel, O., Nordin, A. and Motte, D. (2019). *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, Singapore: Springer Nature, Cop.
- Pueo, M., Santolaria, J., Acero, R. and Gracia, A. (2017). *A review of tangential composite and radial composite gear inspection*, *Precision Engineering*, [online] 50, pp.522–537.
- Redwood, B., Schöffner, F. and Garret, B. (2018). *The 3D printing handbook : Technologies, design and applications*, Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs B.V.

## 12. Παράρτημα

Στο παράρτημα παρατίθενται οι υπολογιστικοί κώδικες που αναπτύχθηκαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB και χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της εργασίας, καθώς επίσης και εικόνες των οδοντωτών τροχών που μετρήθηκαν αλλά δεν αναλύθηκαν στα πλαίσια της εργασίας.

### pointmove

Η συνάρτηση αυτή περιστρέφει και μετακινεί τα επιλεγμένα σημεία

```
function [final_points]=pointmove(x_rotated,y_rotated,angleDegrees,x_d,y_d)

points = [x_rotated; y_rotated];

rotationMatrix = [cos(deg2rad(angleDegrees)) -sin(deg2rad(angleDegrees));
sin(deg2rad(angleDegrees)) cos(deg2rad(angleDegrees))]; %rotation matrix
rotatedPoints = rotationMatrix*points;

x_points = rotatedPoints(1,:) + x_d; % Point translation in the x-axis
y_points = rotatedPoints(2,:) + y_d; % Point translation in the y-axis

final_points = [x_points', y_points']; % Translate the points back to their original
position

end
```

### error\_calculator

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει τα σφάλματα και τις αποκλίσεις κατατομής και βήματος

```
function [Fa,fFa,fHa,fpi] = error_calculator(x_rotated,y_rotated,x_inv,y_inv,d,side)

%% Error calculation for rotated points

%rotated(measured) points
for ii=1:length(y_rotated)
    for j=1:length(y_inv)
        if x_rotated(ii) > x_inv(j)
            e(j,ii)= -sqrt((x_rotated(ii) - x_inv(j)).^2 + (y_rotated(ii) - y_inv(j)).^2);
        else
            e(j,ii)= sqrt((x_rotated(ii) - x_inv(j)).^2 + (y_rotated(ii) - y_inv(j)).^2);
        end
    end
end
end
```

```

%% Minimum distance for rotated points plot

figure(1);

if strcmp(side, 'left')
    subplot(1, 2, 1);
else strcmp(side, 'right');
    subplot(1, 2, 2);
end

plot(x_inv, y_inv, '.k', 'DisplayName', 'Nominal Points')
hold on
plot(x_rotated, y_rotated, '-og', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Measured Rotated Points')

for i = 1:length(y_rotated)
    [~, idx] = min(abs(e(:, i)));
    plot([x_inv(idx), x_rotated(i)], [y_inv(idx), y_rotated(i)], '-r', 'DisplayName',
'Minimum Distance')
end

if strcmp(side, 'left')
    title('Minimum Distance between Measured and Nominal Points (Left Profile)')
else strcmp(side, 'right');
    title('Minimum Distance between Measured and Nominal Points (Right Profile)')
end

xlim([x_inv(end)-1, x_inv(1)+1])
ylim([y_inv(end)-0.5, y_inv(1)+0.5])
grid on
axis('equal')
legend('Nominal Points', 'Measured Rotated Points', 'Minimum Distance', 'Location',
'southoutside')
hold off

%% Profile deviation for measured geometry

figure(2);

if strcmp(side, 'left')
    subplot(1, 2, 1);
else strcmp(side, 'right');
    subplot(1, 2, 2);
end

arc_length = cumsum([0, sqrt(diff(x_inv).^2 + diff(y_inv).^2)]); % Tooth involute turned
into length
arc_length = flip(arc_length);

plot(arc_length, zeros(size(arc_length)), 'k', 'LineWidth', 3, 'DisplayName', 'Profile
Length'); % Plot the arc length along the x-axis

```

```

hold on

for j = 1:length(y_rotated)
    [~, idx] = min(abs(e(:, j)));
    min_value(:,j) = [arc_length(idx); e(idx, j)];

    plot(arc_length(idx), e(idx,j), '.', 'MarkerSize', 2.5, 'MarkerFaceColor', 'blue',
'MarkerEdgeColor', 'blue', 'DisplayName', 'Measurement Error');
    if j < length(y_rotated)
        [~, idx3] = min(abs(e(:, j+1)));
        line([arc_length(idx), arc_length(idx3)], [e(idx, j), e(idx3, j+1)], 'Color',
'blue', 'LineWidth', 1);
    end
end

profile_deviation = transpose(min_value);
min_error = min(profile_deviation(:, 2));
max_error = max(profile_deviation(:, 2));

if strcmp(side, 'left')
    title('Profile Error for Measured Points (Left Profile)');
else strcmp(side, 'right');
    title('Profile Error for Measured Points (Right Profile)');
end

xlim([arc_length(end)-0.7, arc_length(1)+0.7])
ylim([min(min_error-0.02, -0.02), max(max_error+0.02, 0.02)])
legend('Profile Length', 'Measurement Error', 'Location', 'southoutside')
grid on;
hold off

%% Mean Profile Line

coefficients = polyfit(profile_deviation(:,1), profile_deviation(:,2), 1); % Fit the data to
a straight line (first-degree polynomial)

mm = coefficients(1); % Get the slope and y-intercept from the coefficients
bb = coefficients(2);

fitted_line = mm * profile_deviation(:,1) +bb; %fitted line using y = mx + b

maxLength = max(profile_deviation(:, 1));
length95 = 0.95*maxLength; % Calculating 95% of the total involute length
length_indices = profile_deviation(:,1)<= length95;
profile_deviation1 = profile_deviation(length_indices,:);
%% Profile Slope Deviation

figure(3);

```

```

if strcmp(side, 'left')
    subplot(1, 2, 1);
    title('Profile Slope Deviation (Left Profile)');
else strcmp(side, 'right');
    subplot(1, 2, 2);
    title('Profile Slope Deviation (Right Profile)');
end

hold on
plot(profile_deviation(:,1), profile_deviation(:,2),'-k','LineWidth',1.5);
plot(profile_deviation(:,1), fitted_line, '--b');
line([profile_deviation(1,1), profile_deviation(end,1)], [fitted_line(end),
fitted_line(end)], 'LineStyle', '-.','Color', 'r');
line([profile_deviation(1,1), profile_deviation(end,1)], [fitted_line(1), fitted_line(1)],
'LineStyle', '-.','Color', 'r');

legend('Profile Deviation', 'Mean Profile Line','Design Profile','Location',
'southoutside');
xlim([-0.7 6])
ylim([min([fitted_line(1),fitted_line(end),min_error])-0.03,
max([fitted_line(1),fitted_line(end),max_error])+0.015])
grid on
hold off

fHa = fitted_line(1)-fitted_line(end);

%% Profile Form Deviation

minError = Inf;
maxError = Inf;

x_fitted = profile_deviation1(:,1);
y_fitted = fitted_line(length_indices);
fitted_x_y_points = [x_fitted, y_fitted];

% Compute direction vector of the line
direction_vector = fitted_x_y_points(end, :) - fitted_x_y_points(1, :);

% Compute normal vector of the line (rotated 90 degrees counterclockwise)
normal_vector = [-direction_vector(2), direction_vector(1)];

% Distance to move the line perpendicular to itself
distance = abs(max_error-min_error);

% Translate each point on the line by distance along the normal vector
help_up = fitted_x_y_points - distance * repmat(normal_vector, size(fitted_x_y_points, 1),
1);
help_low = fitted_x_y_points + distance * repmat(normal_vector, size(fitted_x_y_points, 1),
1);

```

```

%low points
for ii = 1:length(profile_deviation1(:,2))
    for j = 1:length(help_low(:,2))
        lowError = abs(sqrt((help_low(j,1) - profile_deviation1(ii,1)).^2 + (help_low(j,2) -
profile_deviation1(ii,2)).^2));

        if lowError < minError
            minError = lowError;
            minErrorIndex = [j,ii];

        end

    end
end

%upper points
for iii = 1:length(profile_deviation1(:,2))
    for jj = 1:length(help_up(:,2))
        upperError = abs(sqrt((help_up(jj,1) - profile_deviation1(iii,1)).^2 +
(help_up(jj,2) - profile_deviation1(iii,2)).^2));

        if upperError < maxError
            maxError = upperError;
            maxErrorIndex = [jj,iii];

        end

    end
end

fitted_line1 = fitted_line(length_indices);

fitted_upper_line = fitted_line1 + abs(fitted_line1(maxErrorIndex(1))-
profile_deviation1(maxErrorIndex(2), 2));
fitted_lower_line = fitted_line1 - abs(fitted_line1(minErrorIndex(1))-
profile_deviation1(minErrorIndex(2), 2));

figure(4);

if strcmp(side, 'left')
    subplot(1, 2, 1);
    title('Profile Form Deviation (Left Profile)');
else strcmp(side, 'right');
    subplot(1, 2, 2);
    title('Profile Form Deviation (Right Profile)');
end

```

```

hold on
plot(profile_deviation1(:,1), profile_deviation1(:,2), '-k', 'LineWidth',1.5);
plot(profile_deviation1(:,1), fitted_line1, 'b-.');
plot(profile_deviation1(:,1), fitted_lower_line, 'r-.');
plot(profile_deviation1(:,1), fitted_upper_line, 'r-.');

legend('Profile Deviation', 'Mean Profile Line', 'Facsimile of Mean Profile Line', 'Location',
'southoutside');
xlim([arc_length(end)-0.7, arc_length(1)+0.7])
ylim([min(fitted_lower_line(1),fitted_lower_line(end))-0.02,
max(fitted_upper_line(1),fitted_upper_line(end))+0.02])
grid on
hold off

% Define the points for each line
x_line1 = [profile_deviation1(1,1), profile_deviation1(end,1)];
y_line1 = [fitted_lower_line(1), fitted_lower_line(end)]; % Points for line 1

x_line2 = [profile_deviation1(1,1), profile_deviation1(end,1)];
y_line2 = [fitted_upper_line(1), fitted_upper_line(end)]; % Points for line 2

% Calculate slopes for each line
slope_line1 = (y_line1(2) - y_line1(1)) / (x_line1(2) - x_line1(1));
slope_line2 = (y_line2(2) - y_line2(1)) / (x_line2(2) - x_line2(1));

% Calculate y-intercepts for each line
intercept_line1 = y_line1(1) - slope_line1 * x_line1(1);
intercept_line2 = y_line2(1) - slope_line2 * x_line2(1);

% Calculate the distance between the lines
fFa = abs(intercept_line2 - intercept_line1) / sqrt(slope_line1^2 + 1);

%fFa = abs(fitted_upper_line(1) - fitted_lower_line(1));

%% Total profile deviation

figure(5);

if strcmp(side, 'left')
    subplot(1, 2, 1);
    title('Total Profile Deviation (Left Profile)');
else strcmp(side, 'right');
    subplot(1, 2, 2);
    title('Total Profile Deviation (Right Profile)');
end

min_error1 = min(profile_deviation1(:, 2));
max_error1 = max(profile_deviation1(:, 2));

```

```

hold on
plot(profile_deviation1(:,1), profile_deviation1(:,2),'-k','LineWidth',1.5);
line([arc_length(end)-0.7, arc_length(1)+0.7], [max_error1, max_error1], 'LineStyle', '-
.', 'Color', 'r');
line([arc_length(end)-0.7, arc_length(1)+0.7], [min_error1, min_error1], 'LineStyle', '-
.', 'Color', 'r');

legend('Profile Deviation','Facsimile of Design Profile','Location', 'southoutside');
xlim([arc_length(end)-1, arc_length(1)+1])
ylim([min_error1-0.015, max_error1+0.015])
grid on
hold off

Fa = abs(max_error1 - min_error1);

%% Individual single pitch deviation

circle_center = [0, 0]; % Center coordinates
circle_radius = d/2; % Radius
theta11 = linspace(0, 2*pi, 100000); % Angle parameter
circle_points = [circle_radius * cos(theta11); circle_radius * sin(theta11)] +
circle_center.'; % Example circle points

minError_p1 = Inf;

for iv = 1:length(y_rotated)
    for jv = 1:length(circle_points(2, :))
        Error_c(jv,iv) = abs(sqrt((x_rotated(iv) - circle_points(1, jv)).^2 + (y_rotated(iv)
- circle_points(2, jv)).^2));

        if Error_c(jv,iv) < minError_p1
            minError_p1 = Error_c(jv,iv);
            minErrorIndex_p1 = iv;
            minErrorIndex_c = jv;
        end
    end
end

if y_rotated(minErrorIndex_p1) > circle_points(2,minErrorIndex_c)
    minError_p2 = min(abs(Error_c(:,minErrorIndex_p1 + 1)));
    fpi_value2 = min(abs(e(:,minErrorIndex_p1 + 1)));
else
    minError_p2 = min(abs(Error_c(:,minErrorIndex_p1 - 1)));
    fpi_value2 = min(abs(e(:,minErrorIndex_p1 - 1)));
end

```



```
[fpi_value1, inv_idx]= min(abs(e(:,minErrorIndex_p1)));

if strcmp(side, 'left')
    if x_rotated(minErrorIndex_p1) > x_inv(inv_idx)
        fpi = ((minError_p2/(minError_p2 + minError_p1))*fpi_value1) +
        ((minError_p1/(minError_p2 + minError_p1))*fpi_value2);
    else
        fpi = -(((minError_p2/(minError_p2 + minError_p1))*fpi_value1) +
        ((minError_p1/(minError_p2 + minError_p1))*fpi_value2));
    end
else strcmp(side, 'right');
    if x_rotated(minErrorIndex_p1) > x_inv(inv_idx)
        fpi = -(((minError_p2/(minError_p2 + minError_p1))*fpi_value1) +
        ((minError_p1/(minError_p2 + minError_p1))*fpi_value2));
    else
        fpi = (((minError_p2/(minError_p2 + minError_p1))*fpi_value1) +
        ((minError_p1/(minError_p2 + minError_p1))*fpi_value2));
    end
end

end
```

### roundvalues

Η συνάρτηση αυτή στρογγυλοποιεί τις τιμές των ανοχών σύμφωνα με τους κανόνες στρογγυλοποίησης του ISO 1328-1

```
function [roundedValue] = roundvalues(value)

% If greater than 10 µm, round to the nearest integer micrometre
if value > 10
    roundedValue = round(value);
% If 5.0 µm or greater but less than or equal to 10 µm, round to the nearest 0.5 µm
elseif value >= 5.0
    roundedValue = round(value * 2) / 2;
% If less than 5.0 µm, round to the nearest 0.1 µm
else
    roundedValue = round(value * 10) / 10;
end
end
```

**classMatch**

Η συνάρτηση αυτή συγκρίνει τις τιμές των θεωρητικών ανοχών με τις τιμές των αποκλίσεων και κατατάσει τις αποκλίσεις στους ανάλογους βαθμούς ποιότητας

```
function [closestClass]=classMatch(tolerance,deviation)

    stepFactor = sqrt(2);
    Classes = 1:11;

    % Calculate the values for each class
    if Classes-5 <0
        classValues = tolerance.*(1./(stepFactor .^ (5-Classes)));
    else
        classValues = tolerance.*(stepFactor .^ (Classes - 5));
    end

    % Find the class that is closest to the tolerance
    [~, closestClassIndex] = min(abs(classValues - abs(deviation)));

    closestClass = Classes(closestClassIndex);

    % Display the result
    fprintf('Deviation %s is closest to ISO Class %d\n', inputname(2), closestClass);
end
```

**Gear ISO\_Classification**

Ο κώδικας αυτός υπολογίζει τις τιμές των αποκλίσεων των κατατομών και του βήματος και κατηγοριοποιεί τις αποκλίσεις αυτές σε βαθμούς ποιότητας.

```
clc
clear all
close all

Gear_No = 9; % INPUT % No of gear to study that is
saved in an excel file

excelFile = 'Gear_Info.xlsx';
sheetName = 'Sheet1';

% Import data from Excel
excel_data = readcell(excelFile, 'Sheet', sheetName);

% Gear Geometry

Z = excel_data{Gear_No+1, 3}; % teeth number
```

```

Cc = excel_data{Gear_No+1, 5};           % trochoid coefficient
Ck = excel_data{Gear_No+1, 6};           % addendum coefficient
Cf = excel_data{Gear_No+1, 7};           % dedendum coefficient
Cs0 = excel_data{Gear_No+1, 8};          % tooth thickness coeffiecient
m = excel_data{Gear_No+1, 4};            % module0
ao = deg2rad(20); % pressure angle
x = excel_data{Gear_No+1, 9};            % profile shift

d=m*Z;

[x_inv,y_inv] = geometry(Z,Cc,Ck,Cf,Cs0,m,ao,x);

% Measured geometry

file_name = sprintf('measured_%s_z=%d_m=%d.txt', excel_data{Gear_No+1, 2}, Z, m);
measurements = fopen(file_name,'r'); %open file to read
data = textscan(measurements, '%s %f %f %f %f %f %f', 'Delimiter', ','); %data format
numeric_values = cell2mat(data(2:end)); %keeps the numeric values from the file
pointstart = excel_data{Gear_No+1, 13};
meas_geo0 = numeric_values(pointstart:end, :); %keeps only the point-measurments from the
data
fclose(measurements); %close file

meas_teeth = str2num(excel_data{Gear_No+1, 12}); % Teeth that are chosen to be measured

angleDegrees_left = excel_data{Gear_No+1, 10}; % Rotation around gear center
angleDegrees_right = excel_data{Gear_No+1, 11};

point_tr_lim_left = excel_data{Gear_No+1, 14};
point_tr_lim_right = excel_data{Gear_No+1, 15};
point_tip_lim_left = excel_data{Gear_No+1, 16};
point_tip_lim_right = excel_data{Gear_No+1, 17};

if length(meas_geo0) > length(meas_teeth)*112
    meas_geo = meas_geo0(1:2:end,:);
else length(meas_geo0) <= length(meas_teeth)*112;
    meas_geo = meas_geo0;
end

Fa_left_values = zeros(5, 1);
fFa_left_values = zeros(5, 1);
fHa_left_values = zeros(5, 1);
fpi_left_values = zeros(5, 1);

Fa_right_values = zeros(5, 1);
fFa_right_values = zeros(5, 1);
fHa_right_values = zeros(5, 1);

```

```

fpi_right_values = zeros(5, 1);

tn = length(meas_teeth);

for k=1:tn % Tooth number

i = 1+(k-1)*112;
j = k*112;
tooth_geo = [meas_geo(i:j,1), meas_geo(i:j,2)];

x_meas = tooth_geo(:,1);
y_meas = tooth_geo(:,2);

% Tooth rotation

angle_turn = (360/Z) * (meas_teeth(k)-1); % Rotation angle in radians for each tooth profile

x1 = transpose(x_meas);
y1 = transpose(y_meas);
theta = deg2rad(angle_turn); % Rotation angle in radians
rotation_matrix = [cos(theta), -sin(theta); sin(theta), cos(theta)]; % Rotation matrix
points_matrix = [x1; y1];
rotated_points = rotation_matrix * points_matrix; % Rotation
x_rotated = rotated_points(1, :); % x and y coordinates
y_rotated = rotated_points(2, :);

% CMM Point Rotation around the center of the gear

x_d = 0; % Μετατόπισι κατά x
y_d = 0; % Μετατόπισι κατά y

[points_left] =
pointmove(x_rotated(:,57:112),y_rotated(:,57:112),angleDegrees_left,x_d,y_d);
[points_right] = pointmove(x_rotated(:,1:56),y_rotated(:,1:56),angleDegrees_right,x_d,y_d);

% Remove trochoid points and over the tip points
indices_left = points_left(:, 2) >= y_inv(end) & points_left(:, 2) <= y_inv(1);
final_points_left1 = points_left(indices_left, :);

indices_right = points_right(:, 2) >= y_inv(end) & points_right(:, 2) <= y_inv(1);
final_points_right1 = flipud(points_right(indices_right, :));

trochoid_lim_left = final_points_left1(point_tr_lim_left,2);
trochoid_lim_right = final_points_right1(point_tr_lim_right,2);

indices_ytr_left = final_points_left1(:,2) >= trochoid_lim_left;
indices_ytr_right = final_points_right1(:,2) >= trochoid_lim_right;

final_points_left2 = final_points_left1(indices_ytr_left, :);

```

```

final_points_right2 = final_points_right1(indices_ytr_right, :);

tip_lim_left = final_points_left2(point_tip_lim_left,2);
tip_lim_right = final_points_right2(point_tip_lim_right,2);

indices_ytip_left = final_points_left2(:,2) <= tip_lim_left;
indices_ytip_right = final_points_right2(:,2) <= tip_lim_right;

final_points_left = final_points_left1(indices_ytip_left, :);
final_points_right = final_points_right1(indices_ytip_right, :);

% Profile deviations
[Fa_left, fFa_left, fHa_left, fpi_left] =
error_calculator(final_points_left(:,1), final_points_left(:,2), x_inv, y_inv, d, 'left'); % left
profile

[Fa_right, fFa_right, fHa_right, fpi_right] = error_calculator(flip(-
final_points_right(:,1)), flip(final_points_right(:,2)), x_inv, y_inv, d, 'right'); % right
profile

close all

Fa_left_values(k) = Fa_left;
fFa_left_values(k) = fFa_left;
fHa_left_values(k) = fHa_left;
fpi_left_values(k) = fpi_left;

Fa_right_values(k) = Fa_right;
fFa_right_values(k) = fFa_right;
fHa_right_values(k) = fHa_right;
fpi_right_values(k) = fpi_right;

end

average_Fa_left = mean(Fa_left_values);
average_fFa_left = mean(fFa_left_values);
average_fHa_left = mean(fHa_left_values);
max_fp_left = max(abs(fpi_left_values));

average_Fa_right = mean(Fa_right_values);
average_fFa_right = mean(fFa_right_values);
average_fHa_right = mean(fHa_right_values);
max_fp_right = max(abs(fpi_right_values));

max_Fa = max(average_Fa_left, average_Fa_right);
max_fFa = max(average_fFa_left, average_fFa_right);
max_fHa = max(abs(average_fHa_left), abs(average_fHa_right));
max_fp = max(max_fp_left, max_fp_right);

```

```

disp(['Maximum Fa = ', num2str(max_Fa*1000), ' μm']);
disp(['Maximum fFa = ', num2str(max_fFa*1000), ' μm']);
if abs(average_fHa_left) > abs(average_fHa_right)
    disp(['Maximum fHa = ', num2str(max_fHa*sign(average_fHa_left)*1000), ' μm']); %
Sign of the larger absolute value
else
    disp(['Maximum fHa = ', num2str(max_fHa*sign(average_fHa_right)*1000), ' μm']); %
Sign of the larger absolute value
end
disp(['Maximum fp = ', num2str(max_fp*1000), ' μm']);

%% Tolerance formulae and ISO Class

A=5; % ISO Class 5

% Results in micrometers
fHa_T = (0.4*m+0.001*d+4)*((sqrt(2)).^(A-5));
fFa_T = (0.55*m+5)*((sqrt(2)).^(A-5));
Fa_T = sqrt((fHa_T).^2+(fFa_T).^2);
fp_T = (0.001*d + 0.4*m+5)*((sqrt(2)).^(A-5));

% Rounded values according to ISO rules in micrometers
fHa_T_r = roundvalues(fHa_T);
fFa_T_r = roundvalues(fFa_T);
Fa_T_r = roundvalues(Fa_T);
fp_T_r = roundvalues(fp_T);

disp(' ')

% Devide by 1000 to turn micrometers to mm

Fa_Class = classMatch(Fa_T_r/1000,max_Fa);
fFa_Class = classMatch(fFa_T_r/1000,max_fFa);
fHa_Class = classMatch(fHa_T_r/1000,max_fHa);
fp_Class = classMatch(fp_T_r/1000,max_fp);
disp(' ')
disp(['Gear ISO Class for profile deviation is ', num2str(max([Fa_Class, fFa_Class,
fHa_Class]))]);
disp(['Gear ISO Class for pitch deviation is ', num2str(fp_Class)]);

```

#### Data fit

Ο κώδικας αυτός υπολογίζει τις μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των κατατομών και πραγματοποιεί την παρεμβολή με βάση τη σειρά Fourier

```

clc
clear all

```

```

close all

Gear_No = 9;                                %% INPUT %%

excelFile = 'Gear_Info.xlsx';
sheetName = 'Sheet1';

% Import data from Excel
excel_data = readcell(excelFile, 'Sheet', sheetName);

% Gear Geometry

Z = excel_data{Gear_No+1, 3};                % teeth number
Cc = excel_data{Gear_No+1, 5};                % trochoid coefficient
Ck = excel_data{Gear_No+1, 6};                % addendum coefficient
Cf = excel_data{Gear_No+1, 7};                % dedendum coefficient
Cs0 = excel_data{Gear_No+1, 8};               % tooth thickness coefficient
m = excel_data{Gear_No+1, 4};                 % module
ao = deg2rad(20); % pressure angle
x = excel_data{Gear_No+1, 9};                 % profile shift

d=m*Z;

[x_inv,y_inv] = geometry(Z,Cc,Ck,Cf,Cs0,m,ao,x);

% Measured geometry

file_name = sprintf('measured_%s_z=%d_m=%d.txt', excel_data{Gear_No+1, 2}, Z, m);
measurements = fopen(file_name,'r'); %open file to read
data = textscan(measurements, '%s %f %f %f %f %f', 'Delimiter', ','); %data format
numeric_values = cell2mat(data(2:end)); %keeps the numeric values from the file
pointstart = excel_data{Gear_No+1, 13};
meas_geo0 = numeric_values(pointstart:end, :); %keeps only the point-measuments from the
data
fclose(measurements); %close file

meas_teeth = str2num(excel_data{Gear_No+1, 12}); % Teeth that are chosen to be measured

angleDegrees_left = excel_data{Gear_No+1, 10}; % Peristrofi giro apo to kentro tou granaziou
angleDegrees_right = excel_data{Gear_No+1, 11};

point_tr_lim_left = excel_data{Gear_No+1, 14}; % Ari8mos simiou tis metavlitis
final_points_left1 opou ksekinaei h kampulh toy troxoeidous
point_tr_lim_right = excel_data{Gear_No+1, 15};
point_tip_lim_left = excel_data{Gear_No+1, 16};
point_tip_lim_right = excel_data{Gear_No+1, 17};

if length(meas_geo0) > length(meas_teeth)*112

```

```

meas_geo = meas_geo0(1:2:end,:);
else length(meas_geo0) <= length(meas_teeth)*112;
meas_geo = meas_geo0;
end

profile_deviation_save_left = cell(5, 1);
profile_deviation_save_right = cell(5, 1);

tn = length(meas_teeth);

for k=1:tn % Tooth number

i = 1+(k-1)*112;
j = k*112;
tooth_geo = [meas_geo(i:j,1), meas_geo(i:j,2)];

x_meas = tooth_geo(:,1);
y_meas = tooth_geo(:,2);

% Tooth rotation

angle_turn = (360/Z) * (meas_teeth(k)-1); % Rotation angle in radians for each tooth profile

x1 = transpose(x_meas);
y1 = transpose(y_meas);
theta = deg2rad(angle_turn); % Rotation angle in radians
rotation_matrix = [cos(theta), -sin(theta); sin(theta), cos(theta)]; % Rotation matrix
points_matrix = [x1; y1];
rotated_points = rotation_matrix * points_matrix; % Rotation
x_rotated = rotated_points(1, :); % x and y coordinates
y_rotated = rotated_points(2, :);

% CMM Point Rotation around the center of the gear

x_d = 0; % Metatopisi kata x
y_d = 0; % Metatopisi kata y

[points_left] =
pointmove(x_rotated(:,57:112),y_rotated(:,57:112),angleDegrees_left,x_d,y_d);
[points_right] = pointmove(x_rotated(:,1:56),y_rotated(:,1:56),angleDegrees_right,x_d,y_d);

% Remove trochoid points and over the tip points
indices_left = points_left(:, 2) >= y_inv(end) & points_left(:, 2) <= y_inv(1);
final_points_left1 = points_left(indices_left, :);

indices_right = points_right(:, 2) >= y_inv(end) & points_right(:, 2) <= y_inv(1);
final_points_right1 = flipud(points_right(indices_right, :));

```



```

trochoid_lim_left = final_points_left1(point_tr_lim_left,2);
trochoid_lim_right = final_points_right1(point_tr_lim_right,2);

indices_ytr_left = final_points_left1(:,2) >= trochoid_lim_left;
indices_ytr_right = final_points_right1(:,2) >= trochoid_lim_right;

final_points_left2 = final_points_left1(indices_ytr_left, :);
final_points_right2 = final_points_right1(indices_ytr_right, :);

tip_lim_left = final_points_left2(point_tip_lim_left,2);
tip_lim_right = final_points_right2(point_tip_lim_right,2);

indices_ytip_left = final_points_left2(:,2) <= tip_lim_left;
indices_ytip_right = final_points_right2(:,2) <= tip_lim_right;

final_points_left = final_points_left1(indices_ytip_left, :);
final_points_right = final_points_right1(indices_ytip_right, :);

% Profile deviations
[profile_deviation_left] =
profile_deviation_calculator(final_points_left(:,1),final_points_left(:,2),x_inv,y_inv); %
left profile
[profile_deviation_right] = profile_deviation_calculator(flip(-
final_points_right(:,1)),flip(final_points_right(:,2)),x_inv,y_inv); % right profile

profile_deviation_save_left{k} = profile_deviation_left;
profile_deviation_save_right{k} = profile_deviation_right;

end

%% Mean and Standard deviation

side = 'left'; % Choose left or right involute

if strcmp(side, 'left')
    profile_deviation_save = profile_deviation_save_left;
else strcmp(side, 'right');
    profile_deviation_save = profile_deviation_save_right;
end

allErrors = vertcat(profile_deviation_save{:}); % puts all flank points in a column vector

sortedErrors = sortrows(allErrors,1); % Orders the deviations from the one at the
bottom of the involute, all the way to the top

mu = movmean(sortedErrors(:,2),tn);
std = movstd(sortedErrors(:,2),tn);

```

```

figure('Position', [100, 100, 1200, 500]);

subplot('Position', [0.05, 0.15, 0.45, 0.7]); % [left, bottom, width, height]
plot(sortedErrors(:,2))
title('Sorted Errors')
ax = gca; % Get current axes
ax.FontSize = 22; % Tick labels font size

subplot('Position', [0.56, 0.15, 0.42, 0.7]); % [left, bottom, width, height]
hold on
plot(mu,'DisplayName', 'Mean')
plot(mu+std,'DisplayName', '+ σ')
plot(mu-std,'DisplayName', '- σ')
legend('Mean','+ σ','- σ','Location', 'southoutside')
title('Mean and Standard deviation')
ax = gca; % Get current axes
ax.FontSize = 22; % Tick labels font size
hold off

%% Fourier Fit

clc
close all

f6 = fit(sortedErrors(:,1),mu,"fourier6");

figure(4)
hold on
plot(f6,sortedErrors(:,1),mu)
% plot(x,fourier2)
xlabel('Arc Length')
ylabel('Profile Deviation')
title('Fourier 6 Fit')
ax = gca; % Get current axes
ax.FontSize = 22; % Tick labels font size
legend('Data', 'Fitted Curve')

```

### objective function

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει την βέλτιστη γωνία με την οποία πρέπει να στραφούν οι κατατομές του πρώτου οδόντα ώστε να μηδενιστεί το σφάλμα βήματος

```

function total_error_tooth = objective_function(params, x_inv, y_inv, x_rotated_all,
y_rotated_all,d)

    angleDegrees = params;

```

```

[final_points] = pointmove(x_rotated_all, y_rotated_all, angleDegrees,  $\theta$ ,  $\theta$ );

[~, ~, ~, fpi] = error_calculator(final_points(:, 1), final_points(:, 2), x_inv, y_inv,
d, 'left');

% total_error is the sum of Fa, fHa, and fFa values (minimize this)
total_error_tooth = abs(fpi);
end

```

### Optimization Algorithm – Point Correction

Μέσα από τον κώδικα αυτόν, πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση που περιεγράφηκε στην προηγούμενη συνάρτηση, βγαίνουν τα διαγράμματα με όλες τις στραμμένες κατατομές του τροχού και επίσης πραγματοποιείται η χειροκίνητη αφαίρεση των σημείων του τροχοειδούς και της κεφαλής

```

clc
clear all
close all

Gear_No = 9;           %%INPUT%%

excelFile = 'Gear_Info.xlsx';
sheetName = 'Sheet1';

% Import data from Excel
excel_data = readcell(excelFile, 'Sheet', sheetName);

% Gear Geometry

Z = excel_data{Gear_No+1, 3};           % teeth number
Cc = excel_data{Gear_No+1, 5};         % trochoid coefficient
Ck = excel_data{Gear_No+1, 6};         % addendum coefficient
Cf = excel_data{Gear_No+1, 7};         % dedendum coefficient
Cs $\theta$  = excel_data{Gear_No+1, 8};     % tooth thickness coefficient
m = excel_data{Gear_No+1, 4};         % module $\theta$ 
ao = deg2rad(2 $\theta$ ); % pressure angle
x = excel_data{Gear_No+1, 9};         % profile shift

d=m*Z;

[x_inv,y_inv] = geometry(Z,Cc,Ck,Cf,Cs $\theta$ ,m,ao,x);

% Measured geometry

file_name = sprintf('measured %s_z=%d_m=%d.txt', excel_data{Gear_No+1, 2}, Z, m);

```

```

measurements = fopen(file_name, 'r'); %open file to read
data = textscan(measurements, '%s %f %f %f %f %f %f', 'Delimiter', ','); %data format
numeric_values = cell2mat(data(2:end)); %keeps the numeric values from the file
pointstart = excel_data{Gear_No+1, 13};
meas_geo0 = numeric_values(pointstart:end, :); %keeps only the point-measrments from the
data
fclose(measurements); %close file

meas_teeth = str2num(excel_data{Gear_No+1, 12}); % Teeth that are chosen to be measured

if length(meas_geo0) > length(meas_teeth)*112
    meas_geo = meas_geo0(1:2:end,:);
else length(meas_geo0) <= length(meas_teeth)*112;
    meas_geo = meas_geo0;
end

% Create a matrix to store rotated coordinates for all k values
x_rotated_all_left = [];
y_rotated_all_left = [];

tn = length(meas_teeth);

% Left Profile
for k = 1:tn % Tooth number for processing

    i = 57 + (k - 1) * 112;
    j = k * 112;
    tooth_geo = [meas_geo(i:j, 1), meas_geo(i:j, 2)];

    x_meas_left = tooth_geo(:, 1);
    y_meas_left = tooth_geo(:, 2);

    % Tooth rotation
    angle_turn = (360 / Z) * (meas_teeth(k) - 1); % Rotation angle in radians for each tooth
profile
    x1 = transpose(x_meas_left);
    y1 = transpose(y_meas_left);
    theta = deg2rad(angle_turn); % Rotation angle in radians
    rotation_matrix = [cos(theta), -sin(theta); sin(theta), cos(theta)]; % Rotation matrix
    points_matrix = [x1; y1];
    rotated_points = rotation_matrix * points_matrix; % Rotation
    x_rotated_left = rotated_points(1, :); % x and y coordinates
    y_rotated_left = rotated_points(2, :);

    % Store rotated coordinates for all k values
    x_rotated_all_left = [x_rotated_all_left, x_rotated_left];
    y_rotated_all_left = [y_rotated_all_left, y_rotated_left];

```

```

    hold on;
    plot(x_rotated_left, y_rotated_left, '.', 'HandleVisibility', 'off');

end

x_rotated_all_right = [];
y_rotated_all_right = [];

% Right Profile
for kk = 1:tn % Tooth number for processing

    ii = 1 + (kk - 1) * 112;
    jj = 56 + (kk - 1) * 112;
    tooth_geo = [meas_geo(ii:jj, 1), meas_geo(ii:jj, 2)];

    x_meas_right = flip(tooth_geo(:, 1));
    y_meas_right = flip(tooth_geo(:, 2));

    % Tooth rotation
    angle_turn = (360 / Z) * (meas_teeth(kk) - 1); % Rotation angle in radians for each
tooth profile
    x1 = transpose(x_meas_right);
    y1 = transpose(y_meas_right);
    theta = deg2rad(angle_turn); % Rotation angle in radians
    rotation_matrix = [cos(theta), -sin(theta); sin(theta), cos(theta)]; % Rotation matrix
    points_matrix = [x1; y1];
    rotated_points = rotation_matrix * points_matrix; % Rotation
    x_rotated_right = rotated_points(1, :); % x and y coordinates
    y_rotated_right = rotated_points(2, :);

    % Store rotated coordinates for all k values
    x_rotated_all_right = [x_rotated_all_right, x_rotated_right];
    y_rotated_all_right = [y_rotated_all_right, y_rotated_right];

    hold on;
    plot(x_rotated_right, y_rotated_right, '.', 'HandleVisibility', 'off');

end

axis equal;
grid on;
plot(x_inv, y_inv, 'k', 'DisplayName', 'Nominal Profile')
plot(-x_inv, y_inv, 'k', 'HandleVisibility', 'off')
% legend('Nominal Profile', 'Location', 'northeast')
hold off
ax = gca; % Get current axes
ax.FontSize = 16; % Tick labels font size

```

```

x_rotated1 = x_rotated_all_left(1:56);
y_rotated1 = y_rotated_all_left(1:56);

x_rotated2 = x_rotated_all_right(1:56);
y_rotated2 = y_rotated_all_right(1:56);

%%

close all

% Optimization function
total_error_tooth_left = @(params_left) objective_function(params_left, x_inv, y_inv,
x_rotated1, y_rotated1,d);
total_error_tooth_right = @(params_right) objective_function(params_right, x_inv, y_inv, -
x_rotated2, y_rotated2,d);

% Initial guess for optimization variables
initial_guess_left = 0; % [y_d, a, x_d]
initial_guess_right = 0; % [y_d, a, x_d]

% Start the timer
total_time_start = tic;

% Perform optimization
optimized_params_left = fminsearch(total_error_tooth_left, initial_guess_left);
optimized_params_right = fminsearch(total_error_tooth_right, initial_guess_right);

% Stop the timer
total_time_elapsed = toc(total_time_start);

% Extract optimized values
angleDegrees_optimized_left = optimized_params_left;
angleDegrees_optimized_right = -optimized_params_right;

disp(['Optimized angleDegrees_left = ', num2str(angleDegrees_optimized_left)]);
disp(['Optimized angleDegrees_right = ', num2str(angleDegrees_optimized_right)]);
disp(' ')
disp(['Total time elapsed: ', num2str(total_time_elapsed/60), ' minutes']);

%%
close all

x_d = 0; % 0.00033626; % Metatopisi kata x
y_d = 0; % -0.023878; % Metatopisi kata y

```

```

% angleDegrees_left = excel_data{Gear_No+1, 10}; %angleDegrees_optimized_left; % Peristrofi
giro apo to kentro tou granaziou          %% INPUT %%
% angleDegrees_right = excel_data{Gear_No+1, 11}; %angleDegrees_optimized_right; %
%
% % Remove trochoid points manually if they are over the theoretical profile
point_tr_lim_left = excel_data{Gear_No+1, 14}; % Ari8mos simiou tis metavlitis
final_points_left1 opou ksekinaei h kampulh toy troxoeidous          %% INPUT %%
point_tr_lim_right = excel_data{Gear_No+1, 15};
point_tip_lim_left = excel_data{Gear_No+1, 16};
point_tip_lim_right = excel_data{Gear_No+1, 17};

% MANUAL INPUT %

angleDegrees_left = angleDegrees_optimized_left; % Peristrofi giro apo to kentro tou
granaziou
angleDegrees_right = angleDegrees_optimized_right;
%
% %Remove trochoid points manually if they are over the theoretical profile
% point_tr_lim_left = 50; % Ari8mos simiou tis metavlitis final_points_left1 opou ksekinaei
h kampulh toy troxoeidous
% point_tr_lim_right = 51;
% point_tip_lim_left = 11;
% point_tip_lim_right = 3;

for k = 1:tn % Tooth number for processing

    io = 1 + (k - 1) * 56;
    jo = k * 56;

[points_left] =
pointmove(x_rotated_all_left(io:jo),y_rotated_all_left(io:jo),angleDegrees_left,x_d,y_d);
[points_right] =
pointmove(x_rotated_all_right(io:jo),y_rotated_all_right(io:jo),angleDegrees_right,x_d,y_d);

% Remove trochoid points and over the tip points
indices_left = points_left(:, 2) >= y_inv(end) & points_left(:, 2) <= y_inv(1);
final_points_left1 = points_left(indices_left, :);

indices_right = points_right(:, 2) >= y_inv(end) & points_right(:, 2) <= y_inv(1);
final_points_right1 = points_right(indices_right, :); %kano flip epeidi sti deksia katatomi
ta simia pane apo kato pros ta pano eno stin aristeri to anti8eto

trochoid_lim_left = final_points_left1(point_tr_lim_left,2);
trochoid_lim_right = final_points_right1(point_tr_lim_right,2);

indices_ytr_left = final_points_left1(:,2) >= trochoid_lim_left;
indices_ytr_right = final_points_right1(:,2) >= trochoid_lim_right;

```

```

final_points_left2 = final_points_left1(indices_ytr_left, :);
final_points_right2 = final_points_right1(indices_ytr_right, :);

tip_lim_left = final_points_left2(point_tip_lim_left,2);
tip_lim_right = final_points_right2(point_tip_lim_right,2);

indices_ytip_left = final_points_left2(:,2) <= tip_lim_left;
indices_ytip_right = final_points_right2(:,2) <= tip_lim_right;

final_points_left = final_points_left1(indices_ytip_left, :);
final_points_right = final_points_right1(indices_ytip_right, :);

hold on
plot(x_inv,y_inv,'k')
plot(-x_inv,y_inv,'k')
%plot(x_rotated, y_rotated, '.', 'DisplayName', 'Original CMM Points');
plot(final_points_left(:,1), final_points_left(:,2), '.');
plot(final_points_right(:,1), final_points_right(:,2), '.');
plot(0, 0, 'ro', 'DisplayName', 'Rotation Center');
axis equal
ylim([y_inv(end)-0.7, y_inv(1)+0.7])
grid on
ax = gca; % Get current axes
ax.FontSize = 16; % Tick labels font size
end

```

### shrinkage

Ο κώδικας αυτός υπολογίζει τα ποσοστά συρρίκνωσης ανά οδόντα καθώς επίσης και την μέση συρρίκνωση

```

clc
clear all
close all

Gear_No = 13;          %%INPUT%%

excelFile = 'Gear_Info.xlsx';
sheetName = 'Sheet1';

% Import data from Excel
excel_data = readcell(excelFile, 'Sheet', sheetName);

% Gear Geometry

Z = excel_data{Gear_No+1, 3};          % teeth number
Cc = excel_data{Gear_No+1, 5};        % trochoid coefficient
Ck = excel_data{Gear_No+1, 6};        % addendum coefficient
Cf = excel_data{Gear_No+1, 7};        % dedendum coefficient
Cs0 = excel_data{Gear_No+1, 8};       % tooth thickness coeffiecient
m = excel_data{Gear_No+1, 4};         % module0

```



```

ao = deg2rad(20); % pressure angle
x = excel_data{Gear_No+1, 9}; % profile shift

d=m*Z;

[x_inv,y_inv] = geometry(Z,Cc,Ck,Cf,Cs0,m,ao,x);

% Measured geometry

file_name = sprintf('measured_%s_z=%d_m=%d.txt', excel_data{Gear_No+1, 2}, Z, m);
measurements = fopen(file_name,'r'); %open file to read
data = textscan(measurements, '%s %f %f %f %f %f %f', 'Delimiter', ','); %data format
numeric_values = cell2mat(data(2:end)); %keeps the numeric values from the file
pointstart = excel_data{Gear_No+1, 13};
meas_geo0 = numeric_values(pointstart:end, :); %keeps only the point-measurments from the
data
fclose(measurements); %close file

meas_teeth = str2num(excel_data{Gear_No+1, 12}); % Teeth that are chosen to be measured

if length(meas_geo0) > length(meas_teeth)*112
    meas_geo = meas_geo0(1:2:end,:);
else length(meas_geo0) <= length(meas_teeth)*112;
    meas_geo = meas_geo0;
end

% Create a matrix to store rotated coordinates for all k values
x_rotated_all_left = [];
y_rotated_all_left = [];
indices_left = [];
theta_left_all = [];
r_left_all = [];

tn = length(meas_teeth);

% Left Profile
for k = 1:tn % Tooth number for processing

    i = 57 + (k - 1) * 112;
    j = k * 112;
    tooth_geo = [meas_geo(i:j, 1), meas_geo(i:j, 2)];

    x_meas_left = tooth_geo(:, 1);
    y_meas_left = tooth_geo(:, 2);

% Tooth rotation

```

```

    angle_turn = (360 / Z) * (meas_teeth(k) - 1); % Rotation angle in radians for each tooth
profile
    x1 = transpose(x_meas_left);
    y1 = transpose(y_meas_left);
    theta = deg2rad(angle_turn); % Rotation angle in radians
    rotation_matrix = [cos(theta), -sin(theta); sin(theta), cos(theta)]; % Rotation matrix
    points_matrix = [x1; y1];
    rotated_points = rotation_matrix * points_matrix; % Rotation
    x_rotated_left = rotated_points(1, :); % x and y coordinates
    y_rotated_left = rotated_points(2, :);

    differences_left = abs(y_rotated_left - d/2);
    [~, indexOfMin_left] = min(differences_left);
    indices_left = [indices_left, indexOfMin_left];
    [theta_left, r_left] =
cart2pol(x_rotated_left(indexOfMin_left), y_rotated_left(indexOfMin_left));
    [theta_left_all] = [theta_left_all, theta_left];
    [r_left_all] = [r_left_all, r_left];

    % Store rotated coordinates for all k values
    x_rotated_all_left = [x_rotated_all_left, x_rotated_left];
    y_rotated_all_left = [y_rotated_all_left, y_rotated_left];

    hold on;
    plot(x_rotated_left, y_rotated_left, '.', 'HandleVisibility', 'off');
end

x_rotated_all_right = [];
y_rotated_all_right = [];
indices_right = [];
theta_right_all = [];
r_right_all = [];

% Right Profile
for kk = 1:tn % Tooth number for processing

    ii = 1 + (kk - 1) * 112;
    jj = 56 + (kk - 1) * 112;
    tooth_geo = [meas_geo(ii:jj, 1), meas_geo(ii:jj, 2)];

    x_meas_right = flip(tooth_geo(:, 1));
    y_meas_right = flip(tooth_geo(:, 2));

    % Tooth rotation
    angle_turn = (360 / Z) * (meas_teeth(kk) - 1); % Rotation angle in radians for each
tooth profile
    x1 = transpose(x_meas_right);
    y1 = transpose(y_meas_right);

```

```

theta = deg2rad(angle_turn); % Rotation angle in radians
rotation_matrix = [cos(theta), -sin(theta); sin(theta), cos(theta)]; % Rotation matrix
points_matrix = [x1; y1];
rotated_points = rotation_matrix * points_matrix; % Rotation
x_rotated_right = rotated_points(1, :); % x and y coordinates
y_rotated_right = rotated_points(2, :);

differences_right = abs(y_rotated_right - d/2);
[~, indexOfMin_right] = min(differences_right);
indices_right = [indices_right, indexOfMin_right];
[theta_right, r_right] =
cart2pol(x_rotated_right(indexOfMin_right),y_rotated_right(indexOfMin_right));
[theta_right_all] = [theta_right_all,theta_right];
[r_right_all] = [r_right_all, r_right];

% Store rotated coordinates for all k values
x_rotated_all_right = [x_rotated_all_right, x_rotated_right];
y_rotated_all_right = [y_rotated_all_right, y_rotated_right];

hold on;
plot(x_rotated_right, y_rotated_right, '.', 'HandleVisibility', 'off');

end

axis equal;
grid on;
plot(x_inv, y_inv, 'k', 'DisplayName', 'Nominal Profile')
plot(-x_inv,y_inv,'k', 'HandleVisibility', 'off')
legend('Nominal Profile','Location', 'northeast')
ax = gca; % Get current axes
ax.FontSize = 22; % Tick labels font size
hold off

%% Shrinkage calculation

close all

measured_thickness = (d/2)*(abs(theta_left_all-theta_right_all));
nominal_thickness = (Cs0*pi()+2*x*tan(ao))*m;

shrinkage_value = abs(measured_thickness-nominal_thickness);
shrinkage_per = (abs(measured_thickness-nominal_thickness)/nominal_thickness)*100;

% disp(mean(shrinkage_value))

figure();
hold on
% plot(meas_teeth, shrinkage_per,'-r')
bar(meas_teeth, shrinkage_value,'b')

```

```

title('Tooth Thickness Shrinkage')
xlabel('No of teeth')
ylabel('Shrinkage [mm]')
xlim([min(meas_teeth)-4, max(meas_teeth)+4]);
ylim([0, max(shrinkage_value) + 0.2]);
ax = gca; % Get current axes
ax.FontSize = 22; % Tick labels font size
ax.XTick = meas_teeth; % Set XTick to the x values
ax.XTickLabel = arrayfun(@num2str, meas_teeth, 'UniformOutput', false); % Set XTickLabel to
show each number

plot([min(meas_teeth)-2, max(meas_teeth)+2], [mean(shrinkage_value), mean(shrinkage_value)],
'r--', 'LineWidth', 2); % Horizontal line for the mean
text(max(meas_teeth) + 1, mean(shrinkage_value)-0.02, sprintf('Mean = %.2f mm',
mean(shrinkage_value)), 'Color', 'r', 'FontSize', 20); % Display mean value as text

```

### shrinkage-involute length

Ο κώδικας αυτός υπολογίζει τη συρρίκνωση σε συνάρτηση με το ύψος της εξελιγμένης

```

clc
clear all
close all

Gear_No = 1;          %%INPUT%%

excelFile = 'Gear_Info.xlsx';
sheetName = 'Sheet1';

% Import data from Excel
excel_data = readcell(excelFile, 'Sheet', sheetName);

% Gear Geometry

Z = excel_data{Gear_No+1, 3};          % teeth number
Cc = excel_data{Gear_No+1, 5};         % trochoid coefficient
Ck = excel_data{Gear_No+1, 6};         % addendum coefficient
Cf = excel_data{Gear_No+1, 7};         % dedendum coefficient
Cs0 = excel_data{Gear_No+1, 8};        % tooth thickness coefficient
m = excel_data{Gear_No+1, 4};          % module
ao = deg2rad(20); % pressure angle
x = excel_data{Gear_No+1, 9};          % profile shift

d=m*Z;

[x_inv,y_inv] = geometry(Z,Cc,Ck,Cf,Cs0,m,ao,x);

% Measured geometry

file_name = sprintf('measured_%s_z=%d_m=%d.txt', excel_data{Gear_No+1, 2}, Z, m);

```

```

measurements = fopen(file_name, 'r'); %open file to read
data = textscan(measurements, '%s %f %f %f %f %f %f', 'Delimiter', ','); %data format
numeric_values = cell2mat(data(2:end)); %keeps the numeric values from the file
pointstart = excel_data{Gear_No+1, 13};
meas_geo0 = numeric_values(pointstart:end, :); %keeps only the point-measrments from the
data
fclose(measurements); %close file

meas_teeth = str2num(excel_data{Gear_No+1, 12}); % Teeth that are chosen to be measured

if length(meas_geo0) > length(meas_teeth)*112
    meas_geo = meas_geo0(1:2:end,:);
else length(meas_geo0) <= length(meas_teeth)*112;
    meas_geo = meas_geo0;
end

% Create a matrix to store rotated coordinates for all k values
x_rotated_all_left = [];
y_rotated_all_left = [];

tn = length(meas_teeth);

filtered_all_x_left = [];
filtered_all_y_left = [];

% Left Profile
for k = 1:tn % Tooth number for processing

    i = 57 + (k - 1) * 112;
    j = k * 112;
    tooth_geo = [meas_geo(i:j, 1), meas_geo(i:j, 2)];

    x_meas_left = tooth_geo(:, 1);
    y_meas_left = tooth_geo(:, 2);

    % Tooth rotation
    angle_turn = (360 / Z) * (meas_teeth(k) - 1); % Rotation angle in radians for each tooth
profile
    x1 = transpose(x_meas_left);
    y1 = transpose(y_meas_left);
    theta = deg2rad(angle_turn); % Rotation angle in radians
    rotation_matrix = [cos(theta), -sin(theta); sin(theta), cos(theta)]; % Rotation matrix
    points_matrix = [x1; y1];
    rotated_points = rotation_matrix * points_matrix; % Rotation
    x_rotated_left = rotated_points(1, :); % x and y coordinates
    y_rotated_left = rotated_points(2, :);

    % Determine the range of y-values for the nominal involute

```

```

min_nominal_y_left = min(y_inv);
max_nominal_y_left = max(y_inv);

% Filter the measured points to be within the range of the nominal involute
valid_indices_left = (y_rotated_left >= min_nominal_y_left) & (y_rotated_left <=
max_nominal_y_left);
filtered_measured_x_left = x_rotated_left(valid_indices_left);
filtered_measured_y_left = y_rotated_left(valid_indices_left);

filtered_all_x_left = [filtered_all_x_left, filtered_measured_x_left];
filtered_all_y_left = [filtered_all_y_left, filtered_measured_y_left];

% Initialize array to store horizontal distances
horizontal_distances_left = zeros(length(filtered_measured_x_left), 1);

% Initialize arrays to store the closest nominal points
closest_nominal_x_left = zeros(length(filtered_measured_x_left), 1);
closest_nominal_y_left = zeros(length(filtered_measured_x_left), 1);

% Find the closest nominal points in y for each filtered measured point
for i = 1:length(filtered_measured_y_left)
    [~, idx] = min(abs(y_inv - filtered_measured_y_left(i)));
    closest_nominal_x_left(i) = x_inv(idx);
    closest_nominal_y_left(i) = y_inv(idx);
    horizontal_distances_left(i) = abs(filtered_measured_x_left(i) - x_inv(idx));
end

% Store the horizontal distances for the current tooth
horizontal_distances_all_left{k} = [filtered_measured_y_left',
horizontal_distances_left];

%
% % Plot the measured and nominal involute curves for the current tooth
% figure;
% hold on;
% plot(x_rotated_left, y_rotated_left, 'bo-', 'DisplayName', sprintf('Measured Involute
(Tooth %d)', k));
% plot(x_inv, y_inv, 'ro-', 'DisplayName', sprintf('Nominal Involute (Tooth %d)', k));
% plot(closest_nominal_x_left, closest_nominal_y_left, 'gx-', 'DisplayName', 'Closest
Nominal Points');
%
% % Plot the horizontal distances for the filtered points
% for ij = 1:length(filtered_measured_x_left)
%     plot([filtered_measured_x_left(ij), closest_nominal_x_left(ij)],
[filtered_measured_y_left(ij), filtered_measured_y_left(ij)], 'k--
', 'HandleVisibility', 'Off');
% end
%
% legend show;
% title(sprintf('Tooth %d', k));
% hold off;
% grid on

```

```

% axis equal

% figure;
% plot(filtered_measured_y_left, horizontal_distances_left)
% title(sprintf('Tooth %d', k));
% grid on

% ax = gca; % Get current axes
% ax.FontSize = 16; % Tick labels font size

end

%% Right Profile

filtered_all_x_right = [];
filtered_all_y_right = [];

for kk = 1:tn % Tooth number for processing

    ii = 1 + (kk - 1) * 112;
    jj = 56 + (kk - 1) * 112;
    tooth_geo = [meas_geo(ii:jj, 1), meas_geo(ii:jj, 2)];

    x_meas_right = flip(tooth_geo(:, 1));
    y_meas_right = flip(tooth_geo(:, 2));

    % Tooth rotation
    angle_turn = (360 / Z) * (meas_teeth(kk) - 1); % Rotation angle in radians for each
tooth profile
    x1 = transpose(x_meas_right);
    y1 = transpose(y_meas_right);
    theta = deg2rad(angle_turn); % Rotation angle in radians
    rotation_matrix = [cos(theta), -sin(theta); sin(theta), cos(theta)]; % Rotation matrix
    points_matrix = [x1; y1];
    rotated_points = rotation_matrix * points_matrix; % Rotation
    x_rotated_right = rotated_points(1, :); % x and y coordinates
    y_rotated_right = rotated_points(2, :);

    nominal_x = -x_inv;

    % Determine the range of y-values for the nominal involute
    min_nominal_y_right = min(y_inv);
    max_nominal_y_right = max(y_inv);

    % Filter the measured points to be within the range of the nominal involute
    valid_indices_right = (y_rotated_right >= min_nominal_y_right+0.15) & (y_rotated_right
<= max_nominal_y_right-0.15);
    filtered_measured_x_right = x_rotated_right(valid_indices_right);
    filtered_measured_y_right = y_rotated_right(valid_indices_right);

    filtered_all_x_right = [filtered_all_x_right, filtered_measured_x_right];

```

```

filtered_all_y_right = [filtered_all_y_right, filtered_measured_y_right];

% Initialize array to store horizontal distances
horizontal_distances_right = zeros(length(filtered_measured_x_right), 1);

% Initialize arrays to store the closest nominal points
closest_nominal_x_right = zeros(length(filtered_measured_x_right), 1);
closest_nominal_y_right = zeros(length(filtered_measured_x_right), 1);

% Find the closest nominal points in y for each filtered measured point
for ii = 1:length(filtered_measured_y_right)
    [~, indx] = min(abs(y_inv - filtered_measured_y_right(ii)));
    closest_nominal_x_right(ii) = nominal_x(indx);
    closest_nominal_y_right(ii) = y_inv(indx);
    horizontal_distances_right(ii) = abs(filtered_measured_x_right(ii) -
nominal_x(indx));
end

% Store the horizontal distances for the current tooth
horizontal_distances_all_right{kk} = [filtered_measured_y_right',
horizontal_distances_right];

%% Plot the measured and nominal involute curves for the current tooth
% figure;
% hold on;
% plot(x_rotated_right, y_rotated_right, 'bo-', 'DisplayName', sprintf('Measured
Involute (Tooth %d)', kk));
% plot(nominal_x, y_inv, 'ro-', 'DisplayName', sprintf('Nominal Involute (Tooth %d)',
kk));
% plot(closest_nominal_x_right, closest_nominal_y_right, 'gx-', 'DisplayName', 'Closest
Nominal Points');
%
% % Plot the horizontal distances for the filtered points
% for j = 1:length(filtered_measured_x_right)
%     plot([filtered_measured_x_right(j), closest_nominal_x_right(j)],
[filtered_measured_y_right(j), filtered_measured_y_right(j)], 'k--',
'HandleVisibility','Off');
% end
%
% legend show;
% title(sprintf('Tooth %d', kk));
% hold off;
% grid on
% axis equal

% figure;
% plot(filtered_measured_y_right, horizontal_distances_right)
% title(sprintf('Tooth %d', kk));
% grid on
%
% ax = gca; % Get current axes
% ax.FontSize = 16; % Tick labels font size

```



```

end

%% Amount of tooth shrinkage as involute gets higher

combined_array_left = [];
combined_array_right = [];

% Loop through each cell and concatenate the 56x2 arrays vertically
for t = 1:tn
    combined_array_left = [combined_array_left; horizontal_distances_all_left{t}];
end

for tt = 1:tn
    combined_array_right = [combined_array_right; horizontal_distances_all_right{tt}];
end

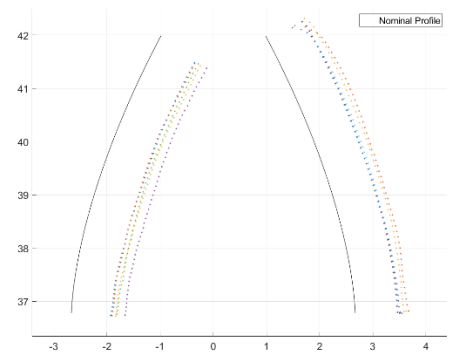
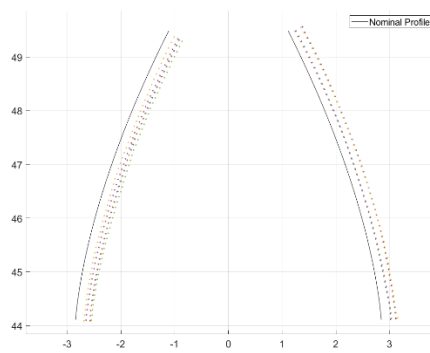
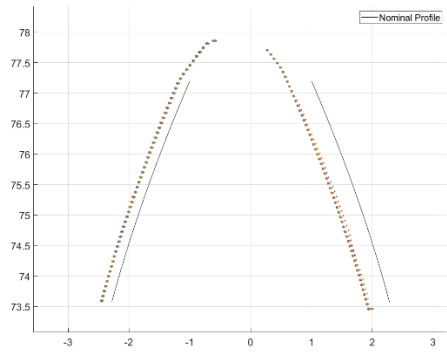
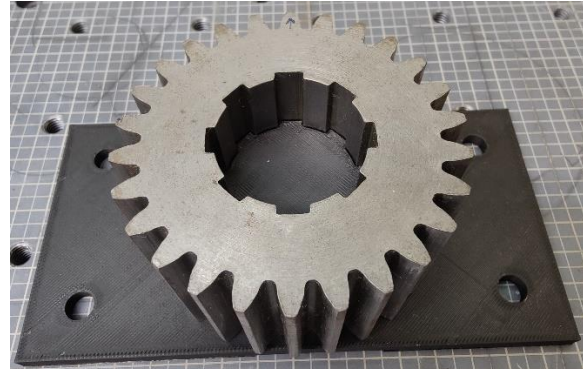
% Manually add or subtract to find  $\Delta S(r)$ 

f3 =
fit(combined_array_right(:,1),abs(combined_array_left(1:length(combined_array_right),2)+combined_array_right(:,2)), "fourier3");
% f3_right = fit(combined_array_right(:,1),combined_array_right(:,2), "fourier3");

plot(f3,combined_array_right(:,1),abs(combined_array_left(1:length(combined_array_right),2)+combined_array_right(:,2)))
ax = gca; % Get current axes
ax.FontSize = 16; % Tick labels font size
legend('ΔS(r), all teeth', 'Mean ΔS(r)')
xlabel('Involute Height r [mm]')
ylabel('Thickness Difference ΔS [mm]')
grid on
hold off

```

Φωτογραφίες μεταλλικών οδοντωτών τροχών που μετρήθηκαν αλλά δεν παρουσιάστηκαν στην εργασία, μαζί με τα διαγράμματα των μετρήσεων των κατατομών



Πίνακας με τις τιμές των διάφορων μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στους κώδικες Matlab

| Materia<br>l/Type | Te<br>eth<br>No | angleDegr<br>ees_left | angleDegr<br>ees_right | measure<br>d_teeth | Point<br>Start | point_tr_l<br>im_left | point_tr_li<br>m_right | point_tip_<br>lim_left | point_tip_l<br>im_right |
|-------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| plastic0<br>2SQ   | 30              | 0.31831               | 0.13831                | [1 2 10 20<br>26]  | 31             | 50                    | 51                     | 1                      | 1                       |
| master            | 38              | -0.25225              | -0.25039               | [1 2 12 22<br>32]  | 33             | 54                    | 54                     | 1                      | 1                       |
| metal             | 31              | 0.35068               | 0.36996                | [1 2 11 18<br>27]  | 31             | 54                    | 54                     | 1                      | 1                       |
| metal             | 26              | 1.26                  | 1.2632                 | [1 2 8 15<br>22]   | 31             | 52                    | 49                     | 1                      | 1                       |
| metal             | 25              | -0.7633               | -0.68052               | [1 2 8 15<br>21]   | 31             | 32                    | 32                     | 1                      | 1                       |
| metal             | 25              | -0.15671              | -0.27432               | 1:25               | 31             | 50                    | 51                     | 1                      | 1                       |
| metal             | 30              | 0.059438              | 0.11406                | [1 2 10 18<br>26]  | 31             | 47                    | 50                     | 1                      | 1                       |
| metal             | 75              | -0.13295              | -0.29727               | 1:75               | 31             | 45                    | 45                     | 1                      | 1                       |
| plastic0<br>12FQ  | 25              | -0.051188             | -0.5335                | 1:25               | 31             | 51                    | 51                     | 1                      | 1                       |
| plastic0<br>2SQ   | 25              | -0.026                | -0.51363               | 1:25               | 31             | 51                    | 51                     | 1                      | 1                       |
| plastic0<br>12HQ  | 25              | -0.085688             | -0.445                 | 1:25               | 31             | 50                    | 50                     | 1                      | 1                       |
| plastic0<br>2HQ   | 25              | -0.032875             | -0.46119               | 1:25               | 31             | 51                    | 50                     | 1                      | 1                       |
| plastic0<br>2HQ   | 30              | -0.13388              | -0.26363               | [1 2 10 20<br>26]  | 31             | 52                    | 52                     | 1                      | 1                       |

Κώδικας συντεταγμένων των σημείων προς μέτρηση στη CMM και κώδικας γεωμετρίας κατατομής του οδόντος

Η συνάρτηση geometry και ο κώδικας που δίνει τα σημεία στα οποία θα ληφθούν οι μετρήσεις από τη CMM, παρέχονται από το Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων Ε.Μ.Π.