ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ



# Σχεδιασμός Διατάξεων για Αυτοέλεγχο Ακρίβειας Εκτύπωσης Τρισδιάστατων Εκτυπωτών

Κωνσταντίνος Καραγιάννης (mc14243)

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Νοέμβριος 2021



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ MACHINE DESIGN LABORATORY NTUA Διπλωματική Εργασία – Καραγιάννης Κωνσταντίνος

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή και σύμβουλο σπουδών μου κύριο Βασίλειο Σπιτά για την άριστη συνεργασία, επικοινωνία και βοήθεια καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Η παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του αγαπητού υποψήφιου διδάκτορα Χρίστου Καλλίγερου τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγηση και την επίβλεψη σε όλο το φάσμα της διπλωματικής εργασίας. Ακόμη η στήριξη της οικογένειας και των φίλων μου τόσο σε ψυχολογικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο σε κάθε τομέα της εργασίας ήταν ένας σημαντικός παράγοντας που συνετέλεσε στην ολοκλήρωση αυτού του έργου. Τέλος ιδιαιτέρως θέλω να ευχαριστήσω τους συνεργάτες του εργαστηρίου, για την άρτια δουλειά όσων αφορά το κομμάτι των μετρήσεων και των εκτυπώσεων, κύριο Γεώργιο Καϊσαρλή και τους φοιτητές Erasmus από την Γαλλία Dorian Boivin και Thibault Hourcadet που έκαναν την πρακτική τους άσκηση στο εργαστήριο στοιχείων μηχανών της σχολής μας. Διπλωματική Εργασία – Καραγιάννης Κωνσταντίνος

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη διατάξεων για τον αυτοέλεγχο των αποκλίσεων εκτύπωσης τρισδιάστατων εκτυπωτών. Οι διατάξεις αυτές θα μπορούν να εκτυπώνονται από τους χρήστες τρισδιάστατων εκτυπωτών, οι οποίοι θα μπορούν εύκολα και γρήγορα να πραγματοποιούν έναν ποσοτικό προσδιορισμό των αντισταθμίσεων που πρέπει να κάνουν στις ονομαστικές διαστάσεις του ηλεκτρονικού σχεδίου των εξαρτημάτων ενός συναρμολογήματος έτσι ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές συναρμογές. Για τον σκοπό αρχικά γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για την μελέτη των διαστασιολογικών και γεωμετρικών αποκλίσεων που παρατηρούνται σε τρισδιάστατους εκτυπωτές. Παρόμοια μελέτη γίνεται και στα πλαίσια της εργασίας με την εκτύπωση δοκιμίων και την μέτρησή τους σε μηχανή CMM. Με βάση αυτά αναπτύσσονται δύο γενικότερες κατηγορίες δοκιμίων η μία για τον προσδιορισμού του συγκεντρωτικού σφάλματος κατά την συναρμογή μιας αρσενικής με μια θηλυκή γεωμετρία μεμονωμένα ή συνδυαστικά με κάποια άλλη, ενώ η άλλη αφορά ιδιαίτερα τον ποσοτικό προσδιορισμό του σφάλματος μορφής κυλινδρικών δοκιμίων. Τα δοκίμια που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της πρώτης κατηγορίας αφορούν μια πληθώρα διατομών, από πιο απλές μέχρι πιο σύνθετες, και η πρακτική τους αξία φάνηκε μέσα από την ολοκλήρωση περιπτώσεων εφαρμογής τόσο ευθέως όσο και αντίστροφου σχεδιασμού. Οι διατάξεις της δεύτερης κατηγορίας αποδείχθηκαν ιδιαίτερα ακριβείς, μετά την σύγκριση των μετρήσεων που πρόσφεραν σε σχέση με εκείνες που πραγματοποιήθηκαν σε CMM. Χρησιμοποιώντας και τις δύο κατηγορίες διατάξεων, ένας χρήστης μπορεί εύκολα και γρήγορα να εκτιμήσει τα σφάλματα που θα προκύψουν στο εξάρτημα του για τον συνδυασμό της μηχανής τρισδιάστατης εκτύπωσης και του υλικού που διαθέτει και των συνθήκων εκτύπωσης που επικρατούν.

Διπλωματική Εργασία – Καραγιάννης Κωνσταντίνος

## Abstract

This diploma thesis is concerned with the design and development of devices for selfmonitoring of 3D printing discrepancies. These layouts will be printable by users of 3D printers, who will be able to easily and quickly quantify the compensations they need to make on the nominal dimensions of the computer-aided design (CAD) of the components of an assembly in order to achieve the desired joints. For this purpose, an extensive literature review is initially made to study the dimensional and geometric deviations observed in 3D printers. A similar study is done in the context of this thesis with the printing of samples and their measurement on a CMM. Based on these, two general categories of samples are developed; one for the determination of the cumulative error in the assembly of a male with a female geometry individually or in combination with another, while the other is particularly concerned with the quantification of the error of cylindrical samples. The samples developed in the first category cover a variety of sections, from simplest to most complex, and their practical value was seen through the completion of application cases of both direct and reverse engineering. The provisions of the second category proved to be particularly accurate, after comparing the measurements they offered in relation to those performed in CMM. Using both categories of devices, a user can easily and quickly estimate the errors that will occur in his component for the combination of the 3D printing machine and its material and the prevailing printing conditions.

Διπλωματική Εργασία – Καραγιάννης Κωνσταντίνος

## Περιεχόμενα

| Περίληψ  | η      |   | 5   |
|----------|--------|---|-----|
| Abstract |        |   | 7   |
| Περιεχόμ | ιενα.  |   | 9   |
| Κατάλογ  | ος Πιν | νάκων   | .11 |
| Κατάλογ  | ος Δια | αγραμμάτων  | .11 |
| Κατάλογ  | ος Εικ | κόνων   | .12 |
| 1. Εισα  | αγωγr  | ή   | .15 |
| 1.1.     | Ορια   | σμός  | .15 |
| Ιστορι   | κή Αν  | αδρομή  | .15 |
| 1.2.     | Υλικ   | ά εκτύπωσης   | .16 |
| 1.3.     | Εκτυ   | υπωτές και Λογισμικό                                  | .19 |
| 1.3.     | 1.     | Εκτυπωτές   | .19 |
| 1.3.     | 2.     | Λογισμικό   | .21 |
| 2. Βιβλ  | ιογρ   | αφική Ανασκόπηση                                      | .24 |
| 2.1.     | Avo    | χές   | .24 |
| 2.2.     | Παρ    | άγοντες   | .28 |
| 2.3.     | Πάχ    | ος στρώματος  | .31 |
| 2.4.     | Θέσ    | η και προσανατολισμός στην πλάκα εκτύπωσης            | .32 |
| 2.5.     | Σφά    | λματα Μορφής στην Τρισδιάστατη εκτύπωση               | .33 |
| 2.6.     | Βελτ   | τίωση Μοντελοποιήσης μέσω Διατάξεων μελέτης Ακρίβειας | .35 |
| 3. Про   | σδιορ  | ρισμός συγκεντρωτικών σφαλμάτων εκτύπωσης             | .37 |
| 3.1.     | Διερ   | ρεύνηση σφαλμάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης             | .37 |
| 3.1.     | 1.     | Μελέτη μεμονωμένων δοκιμίων                           | .37 |
| 3.1.     | 2.     | Έλεγχος Συναρμογής Δοκιμίων                           | .41 |
| 3.2.     | Пοσ    | οτικός προσδιορισμός σφαλμάτων εκτύπωσης              | .43 |
| 3.2.     | 1.     | Στόχος  | .43 |
| 3.2.     | 2.     | Πρώτη γενιά δοκιμίων                                  | .44 |
| 3.2.     | 3.     | Δεύτερη Γενιά Δοκιμίων                                | .45 |
| 3.2.     | 4.     | Τρίτη Γενιά Δοκιμίων                                  | .47 |
| 3.2.     | 5.     | Τέταρτη Γενιά Δοκιμίων                                | .48 |
| 3.2.     | 6.     | Πέμπτη Γενιά Δοκιμίων                                 | .49 |
| 3.2.     | 7.     | Περαιτέρω αλλαγές και τροποποιήσεις                   | .49 |

| Μετρήσεις                                     | 51  |  |  |
|---|---|--|--|
| Ανάλυση των μετρήσεων                         | 52  |  |  |
| Επισκόπηση όλων των μετρήσεων                 | 54  |  |  |
| Συμπεράσματα                                  | 55  |  |  |
| λέτη περίπτωσης                               | 56  |  |  |
| Στόχος της μελέτης                            | 56  |  |  |
| Σχεδιασμός Συστήματος                         | 56  |  |  |
| Δοκίμιο πρόβλεψης και αντιστάθμιση            | 56  |  |  |
| Αποτελέσματα και συμπεράσματα                 | 58  |  |  |
| Μηχανή Stirling                               | 59  |  |  |
| ορισμός σφάλματος μορφής εκτυπωτών            | 60  |  |  |
| σαγωγή  | 60  |  |  |
| <b>ι</b> θηματικό Μοντέλο Υπολογισμών         | 61  |  |  |
| ώτη & Δεύτερη Γενιά Διάταξης                  | 65  |  |  |
| Πρώτη Γενιά                                   | 65  |  |  |
| Δεύτερη Γενιά                                 | 67  |  |  |
| τη Γενιά Διάταξης                             | 68  |  |  |
| αρτη Γενιά Διάταξης                           | 69  |  |  |
| ατρήσεις - Αποτελέσματα                       | 71  |  |  |
| Μετρήσεις τρίτης Γενιάς                       | 71  |  |  |
| Μετρήσεις τέταρτης Γενιάς                     | 73  |  |  |
| ωτόκολλο Μετρήσεων - Σχολιασμός Αποτελεσμάτων | 75  |  |  |
| Πρωτόκολλο Μετρήσεων                          | 75  |  |  |
| Σχολιασμός Αποτελεσμάτων                      | 76  |  |  |
| άσματα  | 80  |  |  |
| οοπτικές για το μέλλον                        |   |  |  |
| α   | 83  |  |  |
|   | 86  |  |  |
| λαιο 3.1.1                                    | 86  |  |  |
| Από κεφάλαιο 3.1.2                            |   |  |  |
| Από κεφάλαιο 3.2.10                           |   |  |  |
| λαιο 4.6.1                                    |   |  |  |
| λαιο 4.6.2                                    |   |  |  |
|   | Μετρήσεις   Ανάλυση των μετρήσεων   Επισκόπηση όλων των μετρήσεων   Συμπεράσματα   Σκότη περίπτωσης   Στόχος της μελέτης   Σχεδιασμός Συστήματος   Δοκίμιο πρόβλεψης και αντιστάθμιση   Αποτελέσματα και συμπεράσματα   Μηχανή Stirling   οορισμός σφάλματος μορφής εκτυπωτών   σαφματικό Μοντέλο Υπολογισμών   μάτη ξενιά   Δεύτερη Γενιά Διάταξης   Πρώτη Γενιά   Δεύτερη Γενιά   Δοκίης Αποτελέσματα   Μετρήσεις τρίτης Γενιάς   Μετρήσεις τρίτης Γενιάς   Δεύτολλο Μετρήσεων - Σχολιασμός Αποτελεσμάτων   Γρωτόκολλο Μετρήσεων   Σχολιασμός Αποτελεσμάτων   άσματα   οοπτικές για το μέλλον   α   λαιο 3.1.1.   λαιο 3.1.2.   λαιο 3.1.2.   λαιο 4.6.1. |  |  |

## Κατάλογος Πινάκων

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

| Διάγραμμα | 3.1 Διαφορά Διαμέτρων Πείρων ανά Διάμετρο   | .39 |
|-----------|---|-----|
| Διάγραμμα | 3.2 Διαφορά Διαμέτρων Πίρων ανά Εκτύπωση    | .39 |
| Διάγραμμα | 3.3 Διαφορά Διαμέτρων Πίρων ανά Εκτύπωση    | .39 |
| Διάγραμμα | 3.4 Ποσοστό Σφάλματος ανά Διάσταση          | .40 |
| Διάγραμμα | 3.5 Ποσοστό Σφάλματος ανά Εκτυπωτή          | .40 |
| Διάγραμμα | 3.6 Σύγκριση Διαστάσεων για ποιότητα 0,12mm | .42 |
| Διάγραμμα | 3.7 Διαφορά τιμών Αρσενικού Θηλυκού         | .42 |
| Διάγραμμα | 3.8 Σύγκριση Διαφορών ανά Μέθοδο Εκτύπωσης  | .43 |
| Διάγραμμα | 4.1 Απόλυτη Διαφορά                         | .73 |
|           |   |     |

## Κατάλογος Εικόνων

| Εικόνα 1.1 Μέθοδος Fussed Material Extrusion, FDM                                  | 16    |
|--|-------|
| Εικόνα 1.2 Υλικό Κατασκευής PLA  | 17    |
| Εικόνα 1.3 Υλικό Κατασκευής ABS  | 17    |
| Εικόνα 1.4 Υλικό Κατασκευής PETG   | 18    |
| Εικόνα 1.5 Οποτικές Διαφορές Υλικών κατα την Εκτύπωση                              | 18    |
| Εικόνα 1.6 Creality CR-10S5 printer  | 19    |
| Εικόνα 1.7 Creality Ender 3 Pro printer  | 19    |
| Εικόνα 1.8 Stratasys Fortus 360mc  | 20    |
| Εικόνα 1.9 XYZ Printing Nobel 1.0A printer   | 20    |
| Εικόνα 1.10 XYZ Printing da Vinci Jr. 2.0 Mix printer                              | 21    |
| Εικόνα 1.11 Γραφικό Περιβάλλον SOLIDWORKS  | 21    |
| Εικόνα 1.12 Γραφικό Περιβάλλον CATIA V5  | 22    |
| Εικόνα 1.13 Γραφικό Περιβάλλον Ultimaker CUR                                       | 22    |
| Εικόνα 1.14 Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων CMM                                     | 23    |
| Εικόνα 2.1 Σύγκριση Ακρίβειας Μεθόδων Κατεργασίας [25]                             | 25    |
| Εικόνα 2.2 Μετρητική Διάταξη Μελέτης   | 26    |
| Εικόνα 2.3 Διατάξεις Εύρεσης Ακρίβειας   | 26    |
| Εικόνα 2.4 Διαγραμματική Απεικόνιση Πίνακα 2.1                                     | 28    |
| Εικόνα 2.5 Μετρητική Διάταξη Μελέτης   | 28    |
| Εικόνα 2.6 Αρχείο CAD μελετώμενου δοκιμίου   | 32    |
| Εικόνα 2.7 Διάταξη Μελέτης   | 34    |
| Εικόνα 2.8 Σχέδιο Δοκιμίων Αριστερά: Κύλινδροι, Δεξιά: Οπές                        | 35    |
| Εικόνα 2.9 Διαγραμματική Απεικόνιση Ευρημάτων                                      | 36    |
| Εικόνα 3.1 Αριστερά το αρσενικό δοκίμιο τεσσάρων πείρων. Δεξιά το θηλυκό δοκίμιο   |       |
| τεσσάρων οπών  | 38    |
| Εικόνα 3.2 Διάμετροι Αρσενικών και Θηλυκών δοκιμίων 9mm, 6mm και 3mm               | 44    |
| Εικόνα 3.3 Αρσενικά και Θηλυκά δοκίμια. Από αριστερά προς τα δεξιά, Χαμηλή, Κανονι | кή,   |
| Υψηλή ποιότητα PLA (κόκκινο)   | 45    |
| Εικόνα 3.4 Αρσενικό Δοκίμιο Διαμέτρων 9mm και 3mm. Θηλυκό Δοκίμιο Διαμέτρων 9m     | ۱m    |
| και 3mm με +0,1mm προστιθέμενα σε κάθε ζευγάρι οπών από 0,0 έως +0,6 χιλιοστά      | 45    |
| Εικόνα 3.5 Τροποποιημένο Θηλυκό Δοκίμιο  | 46    |
| Εικόνα 3.6 Τυπική Ποιότητα Αρσενικού Θηλυκού σε PLA. Τροποποιημένο Θηλυκό, Αρσε    | ενικό |
| Υψηλή Ποιότητα   | 46    |
| Εικόνα 3.7 Μετρήσεις Μεμονωμένων Διατομών  | 47    |
| Εικόνα 3.8 Διάταξη Κυκλικής και Τετραγωνικής Διατομής, Θηλυκό με αύξηση διαστάσει  | νu    |
| έως +0.6mm   | 47    |
| Εικόνα 3.9 Τυπική Ποιότητα, Κόκκινο: Ζεύγος δοκιμίων σε PLA, Μαύρο: Ζεύγος δοκιμίω | ν σε  |
| PETG   | 48    |

| Εικόνα 3.10 Ζεύγος δοκιμίων με διατομή Κύκλου με την Επικάλυψη Τετραγώνου            | 48  |
|--|-----|
| Εικόνα 3.11 Τυπική Εκτύπωση σε PLA διατομής Κύκλου με Επικάλυψη Τετραγώνου           | 48  |
| Εικόνα 3.12 Ζεύγος δοκιμίων με Αστεροειδής διατομή                                   | 49  |
| Εικόνα 3.13 Αριστερά: Θηλυκό με αστεροειδείς διατομή, Φυσικό PLA. Δεξιά: Ζεύγος      |     |
| δοκιμίων με Αστεροειδής διατομή κόκκινο PLA  | 49  |
| Εικόνα 3.14 Αρσενικό: Πανομοιότυπο με την δεύτερη γενιά. Θηλυκό: Τροποποιημένο,      |     |
| αύξηση διαστάσεων  | .50 |
| Εικόνα 3.15 Ζεύγος Δοκιμίων σε Υψηλή Ποιότητα, Τροποποιημένο Θηλυκό, Φυσικό PLA.     | .50 |
| Εικόνα 3.16 Ζεύγος Τροποποιημένων Δοκιμίων Τριών Διαμέτρων                           | .51 |
| Εικόνα 3.17 Ζεύγος Τροποποιημένων Δοκιμίων Τριών Διαμέτρων, Υψηλή Ποιότητα, Κόκκι    | ινο |
| PLA  | .51 |
| Εικόνα 3.18 Επισκόπηση του πίνακα μετρήσεων του Excel για τα δείγματα από τη γενιά 1 |     |
| έως 4. Αναλυτικά οι Πίνακες παρουσιάζονται στο Παράρτημα                             | .52 |
| Εικόνα 3.19 Μετρήσεις για το Ζεύγος δοκιμίων με διατομή Κύκλου με την Επικάλυψη      |     |
| Τετραγώνου   | .52 |
| Εικόνα 3.20 Μέθοδος δειγματοληψίας για το Ζεύγος δοκιμίων με διατομή Κύκλου με την   | /   |
| Επικάλυψη Τετραγώνου   | .53 |
| Εικόνα 3.21 Μέσος όρος αποκλίσεων μέτρησης για κυλίνδρους                            | .54 |
| Εικόνα 3.22 Μέσος όρος αποκλίσεων μέτρησης για τετράγωνα                             | .54 |
| Εικόνα 3.23 Αναπαράσταση του αρσενικού τελικού δοκιμίου με CATIA V5 (μεγέθυνση x5    | 0)  |
|  | .55 |
| Εικόνα 3.24 Αναπαράσταση του θηλυκού δοκιμίου με CATIA V5 (μεγέθυνση x40)            | .55 |
| Εικόνα 3.25 Εξεταζόμενο Δοκίμιο Μελέτης  | .56 |
| Εικόνα 3.26 Δοκιμαστικό Δοκίμιο πρόβλεψης  | .57 |
| Εικόνα 3.27 Δοκίμιο Μελέτης προ Συναρμολόγησης                                       | .57 |
| Εικόνα 3.28 Τελικό συναρμολογημένο εξεταζόμενο δοκίμιο                               | .58 |
| Εικόνα 3.29 Αρχικό Μοντέλο & Σχέδια μηχανής Stirling                                 | .59 |
| Εικόνα 3.30 Εκτυπωμένο Μοντέλο Μηχανής Stirling                                      | .59 |
| Εικόνα 4.1 Σχέδιο Μετρητικής Διάταξης  | .61 |
| Εικόνα 4.2 Σχέδιο Διάταξης με Όλες τις Διαστάσεις                                    | .62 |
| Εικόνα 4.3 Σχέδιο Διάταξης με Απαραίτητες Διαστάσεις                                 | .63 |
| Εικόνα 4.4 Σχέδιο Διάταξης Πρώτη Γενιά   | .66 |
| Εικόνα 4.5 Προσομοίωση Εκτυπώσεις Διάταξης Πρώτης Γενιάς                             | .66 |
| Εικόνα 4.6 Εκτυπωμένη Διάταξης Πρώτης Γενιάς   | .67 |
| Εικόνα 4.7 Σχέδιο Διάταξης, Δεύτερη Γενιά  | .67 |
| Εικόνα 4.8 Σύγκριση Πεώτης - Δέυτερης Γενιάς   | .67 |
| Εικόνα 4.9 Προσομοίωση Εκτυπώσεις Διάταξης Δεύτερης Γενιάς                           | .68 |
| Εικόνα 4.10 Εκτυπωμένη Διάταξης Δεύτερης Γενιάς                                      | .68 |
| Εικόνα 4.11 Σχέδιο Διάταξης, Τρίτη Γενιά   | .69 |
| Εικόνα 4.12 Εκτυπωμένη Διάταξης Τρήτης Γενιάς  | .69 |
| Εικόνα 4.13 Σχέδιο Διάταξης, Τέταρτη Γενιά   | .70 |
| Εικόνα 4.14 Προσομοίωση Εκτυπώσεις Διάταξης Τέταρτης Γενιάς                          | .70 |
| Εικόνα 4.15 Μετρήσεις Δοκιμίων CMM   | .70 |
| Εικόνα 4.16 Δυσμορφίες Επιφανίας - Τέταρτη Γενιά                                     | .71 |
| Εικόνα 4.17 Προσάρτηση Χάρακα στην Διάταξη   | .76 |

| Εικόνα 4.18 Παράδειγμα Μετρήσεις                                     | .76 |
|--|-----|
| Εικόνα 4.19 Σφάλματα μορφής στο κυλινδρικό δοκίμιο                   | .77 |
| Εικόνα 4.20 Επαφή προεξοχών δοκιμίου κατά τη διαδικασία της μέτρησης | .79 |

## 1. Εισαγωγή

## 1.1. Ορισμός

Η μέθοδος προσθετικής κατασκευής είναι μια διαδικασία για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων από ένα ψηφιακό αρχείο. Ονομάζεται μέθοδος προσθετικής κατασκευής επειδή η διαδικασία κατασκευής βασίζεται στην υπέρθεση λεπτών στρωμάτων υλικού, ένα προς ένα. Η τεχνολογία μπορεί να παράγει πολύπλοκα σχήματα με σύνθετες γεωμετρίες που δεν είναι δυνατά με παραδοσιακές μεθόδους χύτευσης και κατεργασίας ή με αφαιρετικές κατεργασίες [1].

## Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη δημοσίευση σχετικά με την προσθετική κατασκευή μπορεί να θεωρηθεί ότι έγινε το 1981 από τον Hideo Kodama από το Ινστιτούτο Βιομηχανικών Ερευνών της Ναγκόγια, η οποία έκανε λόγο για τις δυνατότητες ενός συστήματος ταχείας πρωτοτυποποίησης που θα χρησιμοποιούσε φωτοπολυμερή για να οικοδομήσει ένα σταθερό εκτυπωμένο αντικείμενο, χτισμένο πάνω σε στρώματα, καθένα από τα οποία θα αντιστοιχούσε σε μία διατομή ενός μοντέλου.

Στις επόμενες δεκαετίες που ακολούθησαν πολλοί άνθρωποι ασχολήθηκαν με την εξέλιξη και την ανάπτυξη των 3D printer. Σημαντικοί σταθμοί για την βελτείωση της εν λόγω τεχνολογίας υπήρξαν ο Charles Hull το 1986 ιδρυτής της εταιρίας 3D Systems, ο οποίος εφηύρε τη Στερεολιθογραφία (stereolithography). Το 1987 ο Carl Deckard, ο οποίος εργαζόταν στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, δημοσίευσε μία πατέντα ευρεσιτεχνίας μεθόδου 3D εκτύπωσης, την επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτίνων λέιζερ (Selective Laser Sintering, SLS). Στην συνέχεια μια τεχνολογική εφεύρεση μιας άλλης τεχνολογίας 3D εκτύπωσης έγινε από τον Scott Crump το 1988 η οποία αφορούσε την εναπόθεση τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling), η οποία αποτέλεσε το θεμέλιο για την εταιρία που ίδρυσαν από κοινού με τη σύζυγό του, τη Λίζα Crump, ένα χρόνο αργότερα, τη Stratasys. Η πατέντα εκδόθηκε το 1992.

Η ανάγκη για τρισδιάστατη εκτύπωση διαφόρων αντικειμένων ώθησε στη εξέλιξη των διαφόρων μεθόδων όσο και στην εύρεση νέων. Μέχρι και σήμερα ερευνητές και επιστήμονες εργάζονταν και εργάζονται εντατικά με σκοπό την βελτίωση και την ελάττωση των σφαλμάτων μεθόδων και μηχανών. [2],[3],[4]

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών τύπων τεχνολογιών 3D εκτύπωσης, τα οποία επεξεργάζονται διαφορετικά υλικά με διαφορετικούς τρόπους για τη δημιουργία του τελικού αντικειμένου και υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να πραγματοποιηθεί η κατάταξη τους. Σύμφωνα με την Αμερικανική Κοινωνία Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials-ASTM), ομάδα "ASTM F42 – Additive Manufacturing" οι διάφορες τεχνολογίες χωρίζονται σε επτά (7) μεθόδους – πρότυπα. [5] Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Binder Jetting, (BJ)
- Directed Energy Deposition, (DED)
- Material Extrusion, FDM, FFF

- Material Jetting, (MJ)
- Powder Bed Fusion (PBF)
- Sheet Lamination, SL
- Vat Photopolymerisation, DLP

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μέθοδο προσθετικής κατασκευής FDM, η οποία αποτελεί μία από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες τρισδιάστατης

εκτύπωσης παγκοσμίως. Η FDM είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής κατά την οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής εναπόθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Μπορεί να εκτυπώσει σε πολλά διαφορετικά χρώματα και με πληθώρα υλικών που βρίσκονται σε μορφή νήματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Με αυτή τη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τύποι υλικού, όπως πλαστικό, μέταλλο, κεραμικά και πολυμερή, σκόνες, υγρά, ή ακόμη και ζωντανά κύτταρα.



Η FDM είναι μια σχετικά απλή διαδικασία κατά την οποία το υλικό, που βρίσκεται σε μορφή νήματος, περνά από έναν

Εικόνα 1.1 Μέθοδος Fussed Material Extrusion, FDM

εξωθητή (extruder), ο οποίος έχει τέτοια υπολογισμένη ροπή ώστε να περνάει μια συγκεκριμένη ποσότητα υλικού. Στην συνέχεια, το υλικό περνάει σε ένα χώρο στον οποίο θερμαίνεται μέχρι να λιώσει και εξέρχεται μέσω μιας κεφαλής. Μόλις ολοκληρωθεί το πρώτο στρώμα, είτε η κεφαλή εκτύπωσης κινείται προς τα πάνω είτε η βάση στην οποία είναι τοποθετημένο το μοντέλο κινείται προς το κάτω, ώστε πάνω από το υπάρχον στρώμα να δημιουργηθεί ένα νέο. Καθώς κάθε στρώση υλικού ψύχεται, σκληραίνει, δημιουργώντας σταδιακά το στερεό αντικείμενο καθώς δημιουργούνται τα στρώματα. [6],[7],[8]

Οι εκτυπωτές FDM είναι πολύ πιο συνηθισμένοι και φθηνοί. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα και το κόστος ενός εκτυπωτή FDM, μπορεί να έχει βελτιωμένες δυνατότητες όπως πολλές κεφαλές εκτύπωσης. Οι εκτυπωτές FDM μπορούν να χρησιμοποιούν ποικιλία πλαστικών. Στην πραγματικότητα, τα 3D FDM τυπωμένα τμήματα συχνά κατασκευάζονται από τα ίδια θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται στην παραδοσιακή χύτευση με έγχυση ή με μηχανουργική κατεργασία, έτσι ώστε να έχουν παρόμοια σταθερότητα, αντοχή, και μηχανικές ιδιότητες. [9], [10]

### 1.2. Υλικά εκτύπωσης

Το Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρόλιο (Acrylonitrile Butadiene Styrene - ABS) και το Πολυγαλακτικό Οξύ (Polylactic Acid - PLA) είναι από τα πιο διαδεδομένα εμπορικά υλικά. Μπορούνε να επεξεργαστούν με ακετόνη μετά την εκτύπωση για να επιτυγχάνεται ένα γυαλιστερό φινίρισμα.



Εικόνα 1.2 Υλικό Κατασκευής PLA

Το PLA αποτελεί το δημοφιλέστερο θερμοπλαστικό πολυμερές (Εικόνα 1.2) και παρασκευάζεται από ανανεώσιμες πηγές, πιο συγκεκριμένα από άμυλο καλαμποκιού ή ζαχαροκάλαμο. Έτσι, το υλικό αυτό διαχωρίζεται από άλλα ευρείας χρήσης πλαστικά, τα οποία παράγονται μέσω της απόσταξης και του πολυμερισμού μη ανανεώσιμων αποθεμάτων πετρελαίου. Είναι ένα βιοδιασπώμενο προϊόν, ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον, цε

δυνατότητα αποσύνθεσης σε περίπου τρεις έως έξι μήνες, σε αντίθεση με άλλα θερμοπλαστικά υλικά που μπορεί να χρειαστούν έως και χίλια χρόνια για να αποσυντεθούν. Δεν εκπέμπει δυσάρεστες οσμές κατά την εξώθηση, εκτυπώνεται εύκολα χωρίς προβλήματα στρέβλωσης και το εκτυπωμένο αντικείμενο παρουσιάζει υψηλής ποιότητας επιφάνεια λόγω χαμηλής θερμοκρασίας τήξης. Έτσι, εμφανίζει χαμηλή αντοχή στη θερμοκρασία, δεν θεωρείται ιδιαίτερα ανθεκτικό και είναι εύθραυστο. Το PLA χρησιμοποιείται για την παρασκευή ιατρικών εμφυτευμάτων, συσκευασιών τροφίμων, επιτραπέζιων σκευών μιας χρήσης και πολλών άλλων αντικειμένων, αν και δεν θεωρείται ασφαλές για τα τρόφιμα λόγω της μικρής διάρκειας ζωής του. Υποκατηγορίες του PLA, είναι τα Soft PLA ή το Flex EcoPLA τα οποία είναι πιο εύκαμπτα και ενεργούν σαν λάστιχο και το το PolyMax PLA το οποίο είναι ανασχεδιασμένο με εξαιρετική μηχανική αντοχή. [11]

То ABS θεωρείται δεύτερο το δημοφιλέστερο νήμα 3D εκτυπωτή (Εικόνα 1.3), ενώ παρουσιάζεται ελαφρώς ανώτερο από το PLA, παρά το γεγονός ότι είναι πιο δύσκολο να εκτυπωθεί. Τα προϊόντα που κατασκευάζονται από ABS, έχουν υψηλή ανθεκτικότητα και ικανότητα αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες. Πρέπει όμως να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης του



Εικόνα 1.3 Υλικό Κατασκευής ABS

νήματος, την τάση να στρεβλώνει κατά τη διάρκεια της ψύξης και τους έντονους καπνούς κατά τη διάρκεια της τήξης. Έτσι, είναι απαραίτητο ο χώρος εκτύπωσης να είναι καλά αεριζόμενος και το κρεβάτι θερμαινόμενο. Το ABS πέρα από ανθεκτικό, είναι ελαφρύ, παρουσιάζει μέτρια ευκαμψία κι έχει χαμηλό κόστος. Για τους λόγους αυτούς κρίνεται ένα καλό νήμα γενικής χρήσης για 3D εκτύπωση που συναντάται σε πολλά κατασκευασμένα οικιακά και καταναλωτικά προϊόντα, όπως συσκευές τηλεφώνων, παιχνίδια υψηλής φθοράς (π.χ. Lego), λαβές εργαλείων, εξαρτήματα περιποίησης αυτοκινήτου και κράνη ποδηλάτων (Rohringer, 2019). [12]

Το Πολυαιθυλένιο (Polyethylene terephthalate - PET) (γνωστό από τη χρήση του στα πλαστικά μπουκάλια) είναι μια ευρέως γνωστή εναλλακτική λύση 3D εκτύπωσης νήματος. Αυτό συμβαίνει διότι συνδυάζει την αντοχή του ABS με την ευκολία χρήσης του PLA. Είναι εγκεκριμένο από τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA) για την χρήση του σε δοχεία τροφίμων και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατανάλωση τροφίμων.

Σε αντίθεση με το ABS το PET δεν στρεβλώνει και δεν παράγει οσμές ή αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωση. Δεν είναι βιοδιασπώμενο, αλλά είναι 100% ανακυκλώσιμο. Είναι επίσης εύκολα διαχειρίσιμο στην εκτύπωση προσφέροντας κάποια χαρακτηριστικά στην απόδοση εκτύπωσης παρόμοια με το PLA. Στην αρχική του κατάσταση είναι ένα άχρωμο και πεντακάθαρο υλικό αλλά όταν θερμανθεί ή ψυχθεί το υλικό αλλάζει τη διαφάνειά του. Το υλικό έχει περισσότερο κρυσταλλική δομή όταν κρυώνει αργά μετά την εκτύπωση. Το νήμα είναι αρκετά σκληρό και ανθεκτικό στα χτυπήματα, έτσι ώστε να το καθιστά ιδανικό για ελαφριά αντικείμενα. Το PET είναι μια εξαιρετική επιλογή για θήκες τηλεφώνου ή μηχανικά μέρη που απαιτούν ελαστικότητα και αντίσταση κρούσης ή ανθεκτικότητα. Υποκατηγορίες του PET αποτελούν τα PETT/G/XT/N-Vent.

To «G» στο PETG σημαίνει «γλυκόλη». Ως υλικό για τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι φυσικά πιο καθαρό, λιγότερο εύθραυστο και το πιο σημαντικό, πιο εύκολο στην εκτύπωση από τη βασική του μορφή. Για αυτόν τον λόγο, το PETG θεωρείται συχνά μια καλή μέση λύση μεταξύ

ABS και PLA. Υπάρχουν τρία βασικά πράγματα που πρέπει να ελέγχονται κατά την χρήση του PETG. Αρχικά το ότι είναι υγροσκοπικό, δηλαδή απορροφά την υγρασία από τον αέρα. Αυτό έχει αρνητική επίδραση στην ικανότητα εκτύπωσης του υλικού. Το PETG είναι κολλώδες όταν εκτυπώνεται, καθιστώντας το νήμα του τρισδιάστατου εκτυπωτή κακή επιλογή για δομές στήριξης, αλλά καλό για πρόσφυση στο στρώμα. Τέλος αν και δεν είναι εύθραυστο, το PETG είναι πιο ευαίσθητο από το ABS σε επιφανειακές αστοχίες. [13], [14]



Εικόνα 1.4 Υλικό Κατασκευής PETG



Εικόνα 1.5 Οποτικές Διαφορές Υλικών κατα την Εκτύπωση

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε στην πλειονότητα των δοκιμίων το υλικό PLA σε διάφορους χρωματισμούς όπως κόκκινο, μαύρο και λευκό (φυσικό χρώμα). Το ABS-M30 είναι 25-75% ισχυρότερο από το τυπικό υλικό ABS. Παρέχει επίσης ρεαλιστικά αποτελέσματα δοκιμών, ομαλότερες επιφάνειες και μεγαλύτερη λεπτομέρεια χαρακτηριστικών. Το ABS χρησιμοποιήθηκε μόνο στα πρώτα δοκίμια, ενώ με PETG τυπώθηκε ένα μόνο δοκίμιο.

## 1.3. Εκτυπωτές και Λογισμικό

### 1.3.1. Εκτυπωτές

Το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών και Δυναμικής του ΕΜΠ διαθέτει τους εκτυπωτές που παρουσιάζονται στη συνέχεια προκειμένου να πραγματοποιεί την έρευνά του στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο. Στα πλαίσια της τρέχουσας ερευνητικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι τρείς από τους παρακάτω εκτυπωτές για την εκτύπωση όλων τον δοκιμίων. Επιγραμματικά είναι Creality CR-10S5, Creality Ender-3 pro και Stratasys Fortus 360mc.

| Creality CR-10S5 (FDM)  |                                     |  |  |  |  |
|---|-------------------------------------|--|--|--|--|
| Creality 3D Printer CR-10 S5 Filament Monitor<br>With Dual Z Lead Screws  |                                     |  |  |  |  |
| Ο εκτυπωτής αυτός έχει την δυνατότητα<br>επιστροφής στο σημείο που έχει σταματήσει σε<br>περίπτωση πρόωρης διακοπής της εκτύπωσης. Ο<br>ωφέλιμος όγκος εκτύπωσης είναι<br>(500x500x500mm). Η δομή του ακροφυσίου<br>εξώθησης MK10 είναι κατοχυρωμένη με δίπλωμα<br>ευρεσιτεχνίας και μπορεί να εκτυπώσει σχεδόν<br>οποιοδήποτε υλικό εκτύπωσης στην αγορά χωρίς<br>να πραγματοποιηθεί κάποια αλλαγή. Ο<br>συνεχόμενος χρόνος εκτύπωσης μπορεί να φτάσει<br>έως και τις 200 ώρες. [15] | Εικόνα 1.6 Creality CR-1055 printer |  |  |  |  |

Πίνακας 1.1 Creality CR-10S5 (FDM)

#### Creality Ender-3 pro (FDM) Creality3D Ender-3 pro High Precision 3D Printer 0 εκτυπωτής αυτός είναι εύκολο να συναρμολογεί, επιτρέπει την συνέχιση της εκτύπωσης μετά από κάποια διακοπή. Ο εκτύπωσης ωφέλιμος όγκος είναι (220x220x250mm). Η πλάκα εκτύπωσης μπορεί να θερμανθεί σε θερμοκρασία 110° κελσίου πολύ γρήγορα (5 λεπτά). Προσφέρει καλή ποιότητα εκτύπωσης και προτείνεται και για ερασιτεχνική Εικόνα 1.7 Creality Ender 3 Pro χρήση. [15]

Πίνακας 1.2 Creality Ender-3 pro (FDM)

#### Stratasys Fortus 360mc (FDM)

To Fortus 360mc έχει σχεδιαστεί για απαιτητικές εφαρμογές, εκτύπωση υψηλής ακρίβειας και άμεση κατασκευή. Χρησιμοποιώντας ψηφιακή πολλά θερμοπλαστικά, το Fortus 360mc υπερέχει σε επαναληψιμότητα, ακρίβεια και δύναμη. Αυτός ο εκτυπωτής είναι κατάλληλος για παραγωγής μικρού όγκου, γρήγορη πρωτοτυπία, τελικών λειτουργικών προϊόντων τα οποία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο πεδίου της μορφής, της προσαρμογής και της λειτουργίας. Ο ωφέλιμος όγκος εκτύπωσης είναι (355x254x254mm). Στη Fortus 360mc υπάρχουν δύο όγκοι δοχείων υλικών, ένα για το μοντέλο και ένα για την υποστήριξη. Η ακρίβεια που δίνει ο κατασκευαστής είναι (+/-0.127mm ή +/-0.0015mm ανά mm) Σημείωση: Η ακρίβεια εξαρτάται από τη γεωμετρία. Εφικτή προδιαγραφή ακρίβειας που προέρχεται από στατιστικά δεδομένα σε απόδοση 95% διαστάσεων. [16], [17]



Εικόνα 1.8 Stratasys Fortus 360mc

#### Πίνακας 1.3 Stratasys Fortus 360mc (FDM)







## 1.3.2. Λογισμικό

Για την σχεδίαση και την εκτύπωση των δοκιμίων απαιτείται η χρήση κατάλληλου λογισμικού. Το προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής: SolidWorks 2020, CatiaV5 και Ultimaker CURA.



Εικόνα 1.11 Γραφικό Περιβάλλον SOLIDWORKS

To Solidworks χρησιμοποιείτε ευρέως από την ακαδημαϊκή κοινότητα στα πλαίσια ερευνών. Παρέχει δυνατότητες σχεδίασης και ανάπτυξης προϊόντων 3D καθώς επίσης και κατάστρωσης 2D σχεδίων πολύπλοκων τμημάτων και συγκροτημάτων. Τα πακέτα SOLIDWORKS CAD καλύπτουν τον σχεδιασμό, την προσομοίωση, την εκτίμηση κόστους, τους ελέγχους κατασκευής, το CAM, τον βιώσιμο σχεδιασμό και τη διαχείριση δεδομένων. Εταιρία διάθεσης του λογισμικού είναι η Dassault Systèmes. [20]



Εικόνα 1.12 Γραφικό Περιβάλλον CATIA V5

Το CATIA είναι μια ευρέως διαδεδομένη λύση για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων. Χρησιμοποιείται από κορυφαίους οργανισμούς σε πολλούς κλάδους για την ανάπτυξη των προϊόντων που υπάρχουν διαδεδομένα στην καθημερινότητά. Το CATIA προσφέρει από τη μοντελοποίηση του προϊόντος την πρόβλεψη της πραγματικής του συμπεριφοράς στο λειτουργικό του περιβάλλον. Είναι μια πλατφόρμα ανάπτυξης προϊόντων που ενσωματώνεται εύκολα με υπάρχουσες διαδικασίες και εργαλεία. Το CATIA τροφοδοτείται από την πλατφόρμα 3DEXPERIENCE της Dassault Systèmes. [21]



Εικόνα 1.13 Γραφικό Περιβάλλον Ultimaker CUR

To Ultimaker Cura είναι το πιο δημοφιλές λογισμικό τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κόσμο με εκατομμύρια χρήστες, με την προετοιμασία εκτύπωσης να γίνεται πολύ γρήγορα. Το αρχείο CAD είναι ενσωματωμένο σε μορφή stl ή 3mf και οι προσαρμοσμένες ρυθμίσεις έχουν άμεση πρόσβαση στο Advanced control της διαδικασίας εκτύπωσης και κοπής. Αυτό το λογισμικό έχει πολλά επίπεδα πολυπλοκότητας για τη χρήση των παραμέτρων του: Basic, Advanced, Expert, Custom Selection και All selection. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν οι προηγμένες και εξειδικευμένες ρυθμίσεις ανάλογα με τα μοντέλα που έπρεπε να εκτυπωθούν. Αυτό το λογισμικό χρησιμοποιείται για τους εκτυπωτές Creality CR-10S5 και Creality Ender-3 pro. [22] Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της σταθερής Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων – (Coordinate Measuring Machine – CMM) τύπου γέφυρας (gantry type) που είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Εργαλείων & Αντίστροφου Σχεδιασμού του Τομέα ΜΚ&ΑΕ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Η εν λόγω CMM είναι τύπου Mistral 070705 (s/n 00808) του οίκου DEA – Brown & Sharpe Inc. με αβεβαιότητα μέτρησης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360 – 2:

# $U3 (\mu m) = MPEE = 3 + L(mm)/250$ (Volumetric length measuring uncertainty)

 $R(\mu m) = MPEP = 3$  (Volumetric probing uncertainty)



Εικόνα 1.14 Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων CMM

όπου L (σε mm) η μετρούμενη διάσταση και U3, R (σε μm) η αβεβαιότητα στο χώρο μέτρησης, ανεξαρτήτως

διευθύνσεως, κατά τη μέτρηση διαστάσεων και σφάλματος μορφής αντίστοιχα.

Για την καταγραφή των σημείων χρησιμοποιήθηκε κεφαλή τύπου PH10M (s/n L96618) του οίκου Renishaw Ltd. σε συνδυασμό με εργαλείο αποτελούμενο από στέλεχος τύπου TP200 (s/n Z85454) του οίκου Renishaw Ltd. με απόληξη τύπου "ruby–ball tip" μήκους 20 mm και διαμέτρου 4mm.

Κατά τη συνολική διεξαγωγή και επεξεργασία των μετρήσεων με την παραπάνω μηχανή CMM χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PC - DMIS v. 3.7 της Wilcox Assoc. Inc. στο οποίο οι αλγόριθμοι μαθηματικής προσαρμογής των μετρούμενων σημείων σε γεωμετρικά στοιχεία (features) είναι πιστοποιημένοι σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360-5 από το ινστιτούτο PTB (PhysicalishTechnishe Bundesanstalt).

Η τεχνολογία των εκτυπώσεων 3D έχει ευρύ πεδίο εφαρμογών. Είναι διαρκώς εξελισσόμενη και βρίσκει συνεχώς νέες εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς. Ενδεικτικά βρίσκει στην Αρχιτεκτονική, στο Διάστημα, στην Αεροναυπηγική, στη Μηχανολογία, στην Αυτοκινητοβιομηχανία, στην Ιατρική, στη Βιοϊατρική, στην Οδοντιατρική, στην Φαρμακευτική, στην Εκπαίδευση, στην παραγωγή καταναλωτικών υλικών, στη Ψυχαγωγία, στην Αρχαιολογία, στην Τέχνη, στα Κοσμήματα, στη Μόδα, στα Είδη Υπόδησης, στην Μαγειρική και στη Ζαχαροπλαστική. Για αυτό το λόγο η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια επαναστατική αλλαγή στην διαδικασία της βιομηχανικής αλυσίδας.

## 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

## 2.1. Ανοχές

Είναι αλήθεια ότι οι κατεργασίες προσθετικής κατασκευής παρέχουν τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις καθιερωμένες διαδικασίες. Ωστόσο, οι υφιστάμενοι περιορισμοί που οφείλονται στις αρχές της διαδικασίας πρέπει να ερευνηθούν λεπτομερώς για να εξασφαλιστεί η αξιόπιστη εφαρμογή της. Ειδικότερα, αυτό ισχύει για τις υψηλές γεωμετρικές αποκλίσεις που παρατηρούνται σε εξαρτήματα που έχουν παραχθεί μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Έτσι, οι ρεαλιστικές διαστασιολογικές ανοχές αναπτύσσονται μεθοδικά για την παραγωγή προσθέτων. Ως εκ τούτου, σχετικοί παράγοντες με επιρροή καθορίστηκαν από μια βιβλιογραφική έρευνα. Τα αποτελέσματα συζητήθηκαν και επεκτάθηκαν από ειδικούς τεχνολογίας από την επιστήμη και τη βιομηχανία. Για τις πειραματικές έρευνες, επιλέχθηκαν όρια και βήματα παραλλαγής. Οι πειραματικές έρευνες τεκμηριώνουν ότι οι υπάρχουσες αποκλίσεις διαστάσεων εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Οι γεωμετρικοί παράγοντες της χωρικής ευθυγράμμισης και της ονομαστικής διάστασης δείχνουν ισχυρή επιρροή στις τυχόν αποκλίσεις. Επιπλέον, η θέση του εξαρτήματος είναι σχετική όσον αφορά τη γεωμετρική ακρίβεια στο Laser Sintering. Ωστόσο, μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ θέσης και απόκλισης διαστάσεων δεν είναι αναγνωρίσιμη. Οι παραγόμενες ανοχές ταξινομούν την παραγωγή προσθέτων σε σύγκριση με τις καθιερωμένες διαδικασίες στις κλάσεις ΙΤ 11 έως 16 σύμφωνα με το DIN EN ISO 286-1. Η διαίρεση καταδεικνύει ότι η πρόσθετη κατασκευή είναι συγκρίσιμη με τις διαδικασίες χύτευσης, πτώσης, διάτρησης και κοπής σε σχέση με τις επιτεύξιμες ανοχές. Μέχρι στιγμής, έχουν διερευνηθεί μόνο μερικές παραλλαγές γεωμετρικών παραγόντων. Για την παραγωγή ρεαλιστικών ανοχών, περαιτέρω πειραματικές έρευνες με διαδοχική αλλαγή των γεωμετρικών παραγόντων είναι απαραίτητες. Περαιτέρω έρευνες πρέπει να λάβουν υπόψη διαφορετικές ομάδες διαστάσεων (π.χ. εσωτερικές διαστάσεις), γεωμετρίες (π.χ. καμπύλα στοιχεία [23]) ή υψηλότερη πολυπλοκότητα δομής (Εικόνα 2.1). Στο πλαίσιο του δεύτερου στόχου, εκτελούνται έρευνες των παραγόντων διεργασίας και των επιρροών της κατασκευής σε σχέση με τη γεωμετρική ακρίβεια. Σε αυτό το πλαίσιο, θα πρέπει να αναπτύσσονται συνεχώς προσεγγίσεις και μέτρα για την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων των διαστάσεων. Για το σκοπό αυτό, προσδιορίστηκαν οι σχετικοί παράγοντες της διαδικασίας. Πειραματικές έρευνες παραγόντων διεργασίας αποδεικνύουν ότι οι αποκλίσεις διαστάσεων θα μπορούσαν να μειωθούν με τη βέλτιστη επιλογή διαφορετικών παραγόντων. Αυτό τονίζεται επίσης από πηγές βιβλιογραφίας, οι οποίες έχουν τεράστια επίδραση στους παράγοντες συρρίκνωσης στη γεωμετρική ακρίβεια. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται περαιτέρω πειραματικές μελέτες σχετικά με την επίδραση των παραγόντων της διαδικασίας. Οι παραγόμενες προσεγγίσεις θα πρέπει να μειώσουν τις διαστασιακές αποκλίσεις, οι οποίες επιτρέπουν τη μείωση των κλάσεων για την παραγωγή προσθέτων. [24]



Table 2. Overview of IT classes for various manufacturing processes [34]



Η προσπάθεια εύρεσης των ανοχών είναι ένα ζητούμενο που ερευνάται από όσου χρησιμοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση. Έρευνες έχουν δήξει ότι κατά το στάδιο του σχεδιασμού, το νέο παράδειγμα της πρόσθετης κατασκευής απαιτεί τη διαχείριση των κατασκευαστικών ατελειών. Η αξιολόγηση του επιπέδου ποιότητας μίας συναρμογής είναι ένα βασικό στοιχείο που επιτρέπει τη βελτίωση της λειτουργικής ποιότητας της. Για να εκτιμηθεί αυτό το επίπεδο ποιότητας, απαιτούνται ορισμένα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία πρέπει να αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις κατασκευαστικές ανακρίβειες και τη συμπεριφορά συναρμογής. Έρευνες διαστασιολογικής ακρίβειας από διάφορες μεθόδους προσθετικής κατασκευής έχουν λάβει σημαντική προσοχή στη βιβλιογραφία. Η κλίμακα των διαστασιολογικών ανοχών αναπτύσσονται για την παραγωγή μοντέλων με μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Οι περισσότερες από αυτές τις έρευνες επικεντρώνονται στη γραμμική διάσταση. Για να βελτιωθεί η διαχείριση των γεωμετρικών δυσμορφιών του τελικού προϊόντος που παράγεται, είναι απαραίτητο να αυξηθεί η ακρίβεια των σφαλμάτων μορφής. Στην πραγματικότητα, η ταξινόμηση των διαστασιολογικών ανοχών δεν επαρκούν για να προσομοιώσουν την επίδραση των περισσότερων σφαλμάτων που εμφανίζονται στο προϊόν. Για να γίνει αυτό, πραγματοποιήθηκε το διακριτό σχέδιο μοντέλου επιφανείας σε συνδυασμό με τον ορισμό μιας μορφικής αναπαράστασης γεωμετρικών σφαλμάτων. Για τον λόγο αυτόν οι ερευνητές προτείναν μια μέθοδος αναπαράστασης των σφαλμάτων βασίζεται στα χαρακτηριστικά των μεθόδων προσθετικής κατασκευής. Τα αποτελέσματα επισημαίνουν ότι τα ελαττώματα της μορφής που πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη. Η προτεινόμενη μέθοδος αναπαράστασης περιλαμβάνει ορισμένα συστηματικά στοιχεία και ορισμένα εξαρτήματα που στοχεύουν στη μοντελοποίηση πραγματικών δοκιμίων. Καθώς το σφάλμα της μορφής δεν μπορεί να αγνοηθεί, προτάθηκε και δοκιμαστεί μία τεχνική γεωμετρικής προσομοίωσης με αποκλίσεις. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη σημασία του σφάλματος της μορφής. Για τη βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος κατά τη φάση σχεδιασμού, η προτεινόμενη προσέγγιση επιτρέπει τον βέλτιστο χαρακτηρισμό των γεωμετρικών αποκλίσεων και την ανάλυση του σχεδιασμού του προϊόντος στην ποιότητα. [26]

Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν γίνει προσπάθειες εύρεσης διατάξεων που εντοπίζουν γρήγορα και αξιόπιστα τα σφάλματα μορφής ενός εκτυπωτή FDM. Η προσέγγιση των ερευνητών βασίζεται σε μια απλή δομή που ενσωματώνει γεωμετρικά πρωτότυπα συμβατά με το πρότυπο ISO 1101:2012 για την προσομοίωση των κυλινδρικών και επίπεδων

ζευγαριών, που χρησιμοποιούνται συχνά σε μηχανικά συστήματα με σχετιζόμενες διαστάσεις και γεωμετρικές ανοχές.



Figure 3: Printed test components, from left to right, (a) 64 x 56 mm (Level 1), (b) 80 x 70 mm (Level 2) and (c) 96 x 84 (Level 3).

#### Εικόνα 2.2 Μετρητική Διάταξη Μελέτης

Η έρευνα υπογραμμίζει την ισότροπη φύση των αποκλίσεων, που εξαρτάται από μια ολοκληρωμένη λίστα παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου μέρους της γεωμετρίας, του μεγέθους και των συγκεκριμένων παραμέτρων της διαδικασίας. Οποιεσδήποτε παραλλαγές στις τέσσερις από τις πέντε πρώτες κοινές παραμέτρους που εντοπίστηκαν (μέγεθος εξαρτήματος, θερμοκρασία στην μύτη του εκτυπωτή, προσανατολισμός εκτύπωσης και πάχος στρώματος) επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των διαστάσεων των τυπωμένων τμημάτων (37,6% και 37,5% της αναλογίας αθροιστικού σήματος προς θόρυβο), ενώ η θερμοκρασία και ο αριθμός πλατφόρμας των κελυφών επηρεάζει μόνο την ακρίβεια των διαστάσεων και τη γεωμετρική ανοχή αντίστοιχα.

Στην βιβλιογραφία παρουσιάζεται επίσης τα εύρη απόκλισης διαστάσεων καθώς και εύρη γεωμετρικής ανοχής για τους εκτυπωτές FDM. Χρησιμοποιώντας αυτά τα εύρη, μπορεί να γίνει εκτίμηση των ανοχών και προσαρμογών σύμφωνα με το ISO268-1: 2010 [27]. Τα εύρη αποκλίσεων διαστάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντιστάθμιση κατά τη φάση σχεδιασμού (CAD) για την επίτευξη των απαιτούμενων κατασκευασμένων διαστάσεων.



Εικόνα 2.3 Διατάξεις Εύρεσης Ακρίβειας

Η διασφάλιση ποιότητας ενός τυπωμένου δοκιμίου με FDM είναι ένα πολύ συζευγμένο πρόβλημα, μεταξύ παραμέτρων διεργασίας και μηχανικών και γεωμετρικών ιδιοτήτων. Απαιτείται από ενσωματωμένη διαδικασία μοντελοποίησης για να προσομοιωθούν οι επιδράσεις που έχουν αυτές οι παράμετροι στη συμπεριφορά του μέρους. Ένα

απλοποιημένο μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη τις τέσσερις πρώτες παραμέτρους διαδικασίας όπως παρουσιάζεται σε αυτή τη δημοσίευση μπορεί να σχηματίσει το αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με πιθανό να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στη μηχανική και γεωμετρική συμπεριφορά. [28]

Από την πειραματική εργασία άλλων ερευνητών και την επακόλουθη ανάλυση, παρατηρήθηκαν κάποιες σαφείς τάσεις, οι οποίες παρατίθενται ως εξής:

- Οι διαστάσεις στο επίπεδο x-y είναι πάντα μικρότερες, ενώ η διάσταση στην κατεύθυνση z είναι υπερμεγέθη.
- Οι οπές είναι πάντα μικρότερες και το σχήμα «καμπάνας» εμφανίζεται σε όλες τις οπές.
- Το επίπεδο ακριβείας της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι παρόμοιο με το WEDM, αλλά η τελική διαδικασία φρεζαρίσματος CNC έχει μεγαλύτερη ακρίβεια.

Συνοψίζοντας, πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική μελέτη σχετικά με τα εγγενή σφάλματα μεγέθους που σχετίζονται με τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Παρουσιάστηκε μια υπόθεση που εξηγεί αυτό το φαινόμενο. Αυτή η υπόθεση μπορεί να δοκιμαστεί περαιτέρω με την εκχώρηση κάθε δομικού στρώματος σε ξεχωριστό χρώμα, επιτρέποντας τη λήψη μεμονωμένων μετρήσεων στρώματος [29].

|                          |      | End Milling [21] |        | WEDM [22] |        | <b>3D</b> Printing |        |
|--------------------------|------|------------------|--------|-----------|--------|--------------------|--------|
| Input parameters         | Unit | Length           | Width  | Length    | Width  | Length             | Width  |
| Design size              | mm   | 200              | 75     | 20        | 10     | 50                 | 50     |
| Measured mean size       | mm   | 199.966          | 74.963 | 19.787    | 9.902  | 49.847             | 49.861 |
| Linear dimensional error | μm   | -34              | -37    | -213      | -98    | -153               | -139   |
| Range of measurement     | μm   | 36               | 35     | 97        | 193    | 104                | 101    |
| 6 x Standard deviation   | μm   | 51               | 53     | 146       | 136    | 202                | 210    |
| Calculated IT grade      |      | 7.277            | 8.146  | 11.352    | 11.713 | 11.365             | 11.365 |

COMPARISON OF LINEAR DIMENSIONAL ERRORS

Πίνακας 2.1 Σύγκριση Γραμμικών Διαστασιολογικών Σφαλμάτων

#### Διπλωματική Εργασία - Καραγιάννης Κωνσταντίνος



Εικόνα 2.4 Διαγραμματική Απεικόνιση Πίνακα 2.1

2.2. Παράγοντες



Εικόνα 2.5 Μετρητική Διάταξη Μελέτης

Το αποτέλεσμα, τελικό προϊόν, της τρισδιάστατης εκτύπωσης επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες. Ύστερα από εκτενής μελέτη οι ερευνητές καταδεικνύουν μια συστηματική μεθοδολογία αξιολόγησης της επιτεύξιμης διαστασιακής ακρίβειας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας μηχανής FDM. Για την έρευνα αυτή εξετάστηκε ένας ολοκληρωμένος κατάλογος 13 παραμέτρων. Ένα πειραματικό σχέδιο αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τον σχεδιασμό της πειραματικής μεθόδου του Taguchi και σχεδιάστηκε ένα προσαρμοσμένο στοιχείο αναφοράς. Είκοσι επτά στοιχεία αναφοράς εκτυπώθηκαν με βάση το πειραματικό σχέδιο και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα εξαρτήματα. Η σημασία και η κατάταξη αυτών των παραμέτρων καθορίστηκε.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι, για ακρίβεια των διαστάσεων, η απόκλιση από τις ονομαστικές τιμές αυξάνεται με την αύξηση των μεγεθών χαρακτηριστικών για όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η απόκλιση από τις ονομαστικές διαστάσεις είναι μεγαλύτερη για τις εσοχές (οπές) σε σύγκριση με τα εξωθημένα χαρακτηριστικά (προεξοχές) στο X-Y επίπεδο. Επιπλέον, τα αποτελέσματα μέτρησης για τα χωνευτά χαρακτηριστικά ήταν όλα μικρότερα, ενώ για τα εξωθημένα χαρακτηριστικά τα αποτελέσματα κυμάνθηκαν από μικρό έως μεγάλο μέγεθος.

Η ερευνητική εργασία που παρουσιάζεται παρέχει τα βελτιστοποιημένα αποτελέσματα τόσο για την ακρίβεια των διαστάσεων όσο και για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, περιορίζεται μόνο σε γραμμικά και κυκλικά χαρακτηριστικά. Αυτή η εργασία μπορεί να διερευνήσει περαιτέρω τις επιπτώσεις σε πιο πολύπλοκα χαρακτηριστικά όπως προεξοχές, κλίσεις και καμπυλότητα. Με βάση τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος, οι μελλοντικές μελέτες μπορούν να ενσωματώσουν πολύπλοκα χαρακτηριστικά όπως προεξοχές, κλίσεις και καμπυλότητες. Το στοιχείο αναφοράς έχει σχεδιαστεί για να παρέχει επαναλαμβανόμενες μετρήσεις μόνο σε X-Y επίπεδο. Αυτό οδηγεί σε διεπίπεδη επαναληψιμότητα. Ωστόσο, για να επιτευχθεί τριεπίπεδη επαναληψιμότητα, θα πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω δοκιμές με το δείγμα να περιστρέφεται κατά 90 ° στο επίπεδο X-Y. Επιπλέον, η εφαρμογή της τρέχουσας εργασίας περιορίζεται στο φάκελο παραμέτρων του Πίνακα 2.2 και τυχόν αλλαγές σε τιμές πέρα από αυτούς τους φακέλους θα πρέπει να διερευνώνται μέσω ξεχωριστού σχεδιασμού πειραμάτων (DOE) [30].

| Parameters |                                 | Level 1   | Level 2 | Level 3  |
|------------|---------------------------------|-----------|---------|----------|
| A:         | Chamber temperature (°C)        | 35        | 45      | 55       |
| B:         | Layer thickness (mm)            | 0.16      | 0.2     | 0.24     |
| C:         | Extruder temperature (°C)       | 207       | 218     | 230      |
| D:         | Platform temperature (°C)       | 110       | 121     | 132      |
| E:         | Number of shells                | 1         | 2       | 3        |
| F:         | Infill shell spacing multiplier | 0.56      | 0.7     | 0.84     |
| G:         | Inset distance multiplier       | 0.8       | 1.0     | 1.2      |
| H:         | Floor/roof thickness (mm)       | 0.64      | 0.8     | 0.94     |
| J:         | Infill pattern                  | hexagonal | linear  | diagonal |
| K:         | Infill density (%)              | 25        | 50      | 75       |
| L:         | Infill speed (mm/s)             | 72        | 90      | 108      |
| M:         | Outline speed (mm/s)            | 24        | 32      | 40       |
| N:         | Inset speed (mm/s)              | 54        | 72      | 90       |
|            |                                 |           |         |          |

Parameters and the assigned control levels.

Πίνακας 2.2 Παράμετροι και καθορισμένα επίπεδα ελέγχου

Ενδιαφέρων παρουσιάζει μια έρευνα στην οποία αναλύθηκαν η μηχανική απόδοση, η ακρίβεια των διαστάσεων και η επιφανειακή τραχύτητα ανάλυσης των τρισδιάστατων εκτυπωμένων με βάση PLA και νανοδομές γραφενίου (GNPs) που κατασκευάζονται με την τεχνική FFF. Ειδικότερα μελετήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού της κατασκευής και της ενίσχυσης του γραφενίου. Διεξήχθησαν δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης τριών σημείων, κρούσης Charpy και ενδιάμεσης αντοχής διάτμησης για να προσδιοριστεί η μηχανική απόκριση των τρισδιάστατων τυπωμένων δειγμάτων ακολουθώντας τις τυπικές συστάσεις ASTM. Οι εικόνες SEM του ILSS των δειγμάτων που απέτυχαν αξιολογήθηκαν για να προσδιοριστούν οι επιδράσεις των GNPs στην απόδοση συγκόλλησης. Έχει αποδειχθεί ότι η επίδραση του προσανατολισμού της κατασκευής είχε ιδιαίτερη σημασία στη μηχανική απόδοση των υλικών με βάση το PLA. Οι ακραίοι και οι επίπεδοι προσανατολισμοί παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές για μέγιστες αντοχές και ακαμψία σε εφελκυσμό και κάμψη, ενώ ο κατακόρυφος προσανατολισμός είχε ως αποτέλεσμα τις χαμηλότερες. Δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ PLA και PLA3D850 όσον αφορά την εφελκυστική και την καμπτική συμπεριφορά. Επιπλέον, τα σύνθετα δείγματα PLA-Graphene έδειξαν την καλύτερη απόδοση όσον αφορά την εφελκυστική και καμπτική τάση και ακαμψία, εκτός από την περίπτωση του ακραίου προσανατολισμού. Τα GNP προσέφεραν υψηλότερη ακαμψία σε σχέση με τη μήτρα PLA, αποτρέποντας τη διάτμηση. Πιο συγκεκριμένα, το σύνθετο PLA-Graphene έδειξε σημαντική βελτίωση της εφελκυστικής συμπεριφοράς σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά στην περίπτωση του κατακόρυφου προσανατολισμού. Ωστόσο, η προσθήκη GNP τείνει να μειώσει την αντοχή σε κρούση των σύνθετων δειγμάτων PLA. Τέλος, τα σύνθετα δείγματα PLA-Graphene έδειξαν την υψηλότερη ενδιάμεση διατμητική αντοχή. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν σύμφωνα με την ενισχυμένη ενδιάμεση πρόσφυση και απόδοση που έδειξαν τα δείγματα PLA-Graphene υπό εφελκυστική και καμπτική φόρτιση. Επιπλέον, η προσθήκη νανοδομές γραφενίου δεν επηρέασε, σε γενικές γραμμές, την ακρίβεια των διαστάσεων των σύνθετων δειγμάτων PLA-Graphene. Έδειξαν, σε γενικές γραμμές, την καλύτερη ακρίβεια διαστάσεων στον z άξονα λόγω της ενισχυμένης ενδιάμεσης απόδοσης. Τέλος, τα δείγματα PLA-Graphene έδειξαν, σε γενικές γραμμές, την καλύτερη απόδοση σε ό, τι αφορά την υφή της επιφάνειας, ιδιαίτερα όταν τα μέρη εκτυπώθηκαν σε επίπεδους και ακραίους προσανατολισμούς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση η αύξηση της μηχανικής απόδοσης των τρισδιάστατων εκτυπωμένων ενισχυμένων σύνθετων υλικών σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας πολυμερών όπως η συμπίεση ή η χύτευση με έγχυση. Ένα στάδιο συμπύκνωσης μετά την εναπόθεση του νήματος θα ήταν επιθυμητό για τη μείωση του πορώδους. Παρ 'όλα αυτά, οι ιδιότητες που αποκτώνται από τρισδιάστατα τυπωμένα ενισχυμένα σύνθετα υλικά με FFF είναι, σε γενικές γραμμές, υψηλότερες από τα συνηθισμένα 3D FFF θερμοπλαστικά. Συμπερασματικά, η χρήση του FFF για την κατασκευή τρισδιάστατων εκτυπωμένων σύνθετων υλικών με πολύ υψηλότερη μηχανική απόδοση έχει γίνει ένα τελευταίο και διεπιστημονικό ερευνητικό θέμα τα τελευταία χρόνια. Φαίνεται ότι είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία με δυνατότητες για μελλοντική ανάπτυξη. Είναι μια σχετικά νέα τεχνική και υπάρχει έλλειψη πειραματικών δεδομένων σχετικά με τη μηχανική απόδοση των κατασκευών που κατασκευάζονται από αυτή τη διαδικασία, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα για να βελτιώσουμε την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των τρισδιάστατων εκτυπωμένων σύνθετων υλικών [31].

Ο προσδιορισμός των παράμετρών που επηρέασαν περισσότερο τους εξεταζόμενους δείκτες ποιότητας βρέθηκαν πειραματικά. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της επιρροής των παραμέτρων στην διαδικασία με τον χρόνο εκτύπωσης και το μέγεθος της απόκλισης της διαμέτρου του κυλίνδρου, διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος της απόκλισης επηρεάζεται σημαντικά από παραμέτρους που δεν σημειώθηκαν ως παράμετροι που έχουν σημαντική επίδραση στον χρόνο εκτύπωσης. Αυτό θα βοηθήσει στην βελτίωση την απόκλιση της διαμέτρου του κυλίνδρου χωρίς να χρειαστεί η ουσιαστική αλλαγή στον χρόνο εκτύπωσης. Έτσι, η τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί επίσης να επηρεαστεί. Μια σειρά πειραμάτων έθεσε τις ρυθμίσεις για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Οι πιο σημαντικές παράμετροι στην τραχύτητα της επιφάνειας του πάνω στρώματος ήταν το πάχος του στρώματος, το σχήμα του ανώτερου στρώματος και η ταχύτητα εκτύπωσης πλήρωσης. Η τραχύτητα της επιφάνειας του πλευρικού τοιχώματος επηρεάστηκε περισσότερο από το ύψος του στρώματος, την ταχύτητα εκτύπωσης τοίχων και τον προσανατολισμό του τμήματος στη βάση. Ένα άλλο πλεονέκτημα των πειραμάτων είναι ένα σύνολο πραγματικών δειγμάτων. Σε αυτούς τους τύπους, ένας μη ειδικός στην τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να παρουσιάσει ποια αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν [32].

## 2.3. Πάχος στρώματος

Μετά από πειραματική μελέτη, που έγινε από τους ερευνητές, διαπιστώθηκαν πειραματικά οι σημαντικές επιδράσεις του πάχους του στρώματος και του επιπέδου κορεσμού του συνδετικού στις μηχανικές ιδιότητες, στην ακεραιότητα και στην ακρίβεια διαστάσεων της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πρακτικά ευρήματα στη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης με τη χρήση εμπορικής σκόνης ZP102 και συνδετικού υλικού Zb56 έδειξαν ότι:

- Όλα τα δείγματα δομής δικτύου με πάχος τοιχώματος 0,7 mm είχαν μεγάλη διάσταση απόκλισης περίπου +0,5 mm.
- Κάτω από το ίδιο πάχος στρώματος, τα δείγματα με 90% κορεσμό συνδετικού είχαν χαμηλότερη αντοχή και ακεραιότητα από τα δείγματα με 125% κορεσμού συνδετικού, αλλά, λόγω του χαμηλότερου όγκου συνδετικού, είχαν πιο ομοιόμορφη επιφάνεια.
- Κάτω από τον ίδιο κορεσμό συνδετικού υλικού, μια μείωση του πάχους του στρώματος από 0,1 σε 0,087 mm αύξησε την αντοχή εφελκυσμού στα δείγματα και μείωσε την αντοχή σε κάμψη ενώ έδωσε χειρότερη ποιότητα και ομοιομορφία επιφάνειας [33].

Άλλοι ερευνητές επέλεξαν τις γραμμικές εξωτερικές διαστάσεις και οι διαμετρικές εσωτερικές ως δείκτες ποιότητας για τη διερεύνηση των παραμέτρων της διαδικασίας PJD-3DP χρησιμοποιώντας σχεδιασμό πειραμάτων και στατιστική ανάλυση. Τα πειραματικά τους αποτελέσματα δείχνουν ότι:

Οι γραμμικές εξωτερικές διαστάσεις:

- Η Χ διεύθυνση όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 2.6 συμπίπτει με την κατεύθυνση της κίνησης της λεπίδας. Όλοι οι παράγοντες είναι σημαντικοί. Το παραγοντικό βάρος του πάχους στρώματος, (Layer thickness, Lt) διαπιστώνεται ότι είναι ίσο με 44%, ακολουθούμενο από το (Build Style, BS) με βάρος 38%, και την κλίμακα (SC) με βάρος 18%.
- Στην ανάλυση κατά την Υ διεύθυνση υποδεικνύεται ότι ο κυρίαρχος παράγοντας είναι το Πάχος Στρώματος (Lt) που βρέθηκε ίσο με 97%. Η κίνηση της λεπίδας δεν

επηρεάζει την τρέχουσα διάσταση. Το προαναφερθέν συμπέρασμα συμφωνεί με προηγούμενες μελέτες [34].

3. Για την κάθετη, όπως υποδεικνύεται στο σχ. 2, κατά τη Ζ διεύθυνση όλες οι παράμετροι είναι σημαντικές με κυρίαρχη την κλίμακα (SC) με βάρος 37%, ακολουθούμενη από το Build Style (BS) με βάρος 23% και το πάχος στρώματος (Lt) με βάρος 14%.

Οι διαμετρικές εσωτερικές διαστάσεις

 Το πάχος του στρώματος (Lt) και ο συντελεστής κλίμακας (SC) πρέπει να θεωρούνται οι πιο σημαντικοί παράγοντες για όλες τις κατευθύνσεις, με στάθμιση 50% αντίστοιχα.



Εικόνα 2.6 Αρχείο CAD μελετώμενου δοκιμίου

Μετά την ανάλυση για όλες τις διαστάσεις που ερευνήθηκαν, θα μπορούσε να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η ακρίβεια των διαστάσεων των εξωτερικών διαστάσεων επηρεάζεται καταρχήν από την κίνηση της λεπίδας και το πάχος του στρώματος. Όσον αφορά τις εσωτερικές διαμετρικές διαστάσεις, επηρεάζονται προς την ίδια κατεύθυνση και πρωτεύοντα από το πάχος του στρώματος και τους παράγοντες κλίμακας [35].

### 2.4. Θέση και προσανατολισμός στην πλάκα εκτύπωσης

Η θέση και ο προσανατολισμός πάνω στην πλάκα, ενώ αρχικά φαίνεται να μην επηρεάζουν, είναι ένας παράγοντας που μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα. Αρκετές μελέτες που έχουν σκοπό να διευκρινίσουν την επίδραση του πάχους του δοκιμίου και να προσανατολίσει την κατασκευή του πάνω στον τύπο και το μέγεθος της παραμόρφωσης στην FDM. Έτσι οι ερευνητές κατασκεύασαν μια μεθοδολογία που περιλαμβάνει τον σχεδιασμό δειγμάτων με υψηλή αναλογία διαστάσεων (10: 1) που εκτυπώθηκαν σε δύο προσανατολισμούς (XY και YX) και τρεις τιμές πάχους (1, 3 και 6 mm) και σαρώθηκαν με προφίλμετρο λευκού φωτός για ποσοτικοποίηση της παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα αυτής της δημοσίευσης υποδεικνύουν ότι τα δείγματα πάχους 1 mm παραμορφώνονταν πάντα μετά από έναν κυματιστό τύπο ακμής, ενώ τα παχύτερα δείγματα (3 και 6 mm) πάντα παραμορφώνονταν μετά από ένα σετ αντίστροφης σπείρας. Το πάχος του συντελεστή, όταν μετρήθηκε με το ύψος των δεικτών της υψηλότερης κορυφής (Η) και της ακτίνας προφίλ (R), αποδείχθηκε ότι ήταν στατιστικά σημαντικό. Τα δείγματα των 3 mm να παρουσιάζουν μεγαλύτερες στρεβλώσεις κατά 57% και 51 % αντίστοιχα, σε σχέση με τα δείγματα των 6 mm. Η επίδραση πάχους αποδίδεται στο ποσοστό των στρωμάτων δομής που λαμβάνουν μέγιστη ενεργειακή έκθεση (61-72 % σε 1 mm, 87-91 % σε 3 mm και 93-95 % στα δείγματα των 6 mm). Όσον αφορά τα λεπτότερα δείγματα του 1 mm, ο προσανατολισμός του παράγοντα βρέθηκε να είναι στατιστικά σημαντικός με παραμόρφωση 114 % μικρότερη στον ΥΧ προσανατολισμό όταν μετρήθηκε με τον δείκτη Η. Αυτή η δημοσίευση παρέχει την πρώτη γνωστή περιγραφή του προσανατολισμού της κατασκευής και των επιπτώσεων του πάχους σκλήρυνσης στο φωτοπολυμερισμό και διερευνά ένα από τα πιο κοινά ελαττώματα που συναντώνται στην κατασκευή πρόσθετων. Εκτός από τον χαρακτηρισμό του τύπου και του μεγέθους της παραμόρφωσης, οι συνεισφορές αυτής της δημοσίευσης περιλαμβάνουν επίσης τη δημιουργία των θεμελίων για κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης στην εκτόξευση υλικών [36].

## 2.5. Σφάλματα Μορφής στην Τρισδιάστατη εκτύπωση

Ένα βασικό κεφάλαιο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των σφαλμάτων μορφής. Για αυτό το ερευνητικό αντικείμενο αυτό βρέθηκαν μερικά πολύ ενδιαφέροντα ευρήματα από την βιβλιογραφία. Μια μελέτη έχει παρουσιάσει μια νέα μεθοδολογία για γεωμετρική προσομοίωση παραλλαγών και οπτικοποίηση για το συμμορφούμενο μέρος στο αρχικό στάδιο σχεδιασμού. Η προτεινόμενη προσέγγιση παρέχει έναν συστηματικό και αποτελεσματικό τρόπο για τους σχεδιαστές να πραγματοποιήσουν ανάλυση προσομοίωσης παραλλαγών στο πολύπλοκο συμμορφούμενο μέρος. Η μέθοδος επιτρέπει επίσης στο χρήστη να δει το παραμορφωμένο τμήμα μέσω τρισδιάστατης απεικόνισης πολύ πριν από το στάδιο της κατασκευής πρωτοτύπου (Prototyping Stage). Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε είναι ευέλικτη και μπορεί να ενσωματωθεί σε υπάρχοντα συστήματα CAD/CAM. Αυξάνει την ικανότητα των σχεδιαστών προϊόντων, παρέχει πολύτιμη υποστήριξη για τον βιομηχανικό σχεδιασμό, μειώνει την ανάγκη για πολλαπλά πρωτότυπα και επιταχύνει την παράδοση νέων προϊόντων, μειώνοντας τη χρονική περίοδο από τον αρχικό σχεδιασμό έως την πλήρη παραγωγή. Φέρνει τους σχεδιαστές ένα βήμα πιο κοντά στο σημείο των σχεδίων έτοιμων για παραγωγή με αυξημένη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Οι αρχές της φυσικής διέπουν τις δυναμικές συμπεριφορές αντικειμένων στον φυσικό κόσμο. Στην αναπτυγμένη γεωμετρική μέθοδο, οι ιδιότητες υλικών του συμβατού τμήματος δεν λαμβάνονται ρητά υπόψη. Προστίθενται φυσικοί περιορισμοί [37] στη μέθοδο που αναπτύχθηκε και λαμβάνεται υπόψη η μεταβαλλόμενη τοπική ακαμψία (π.χ. αλλαγή πάχους και σκληρυντικών), προς την κατεύθυνση της περαιτέρω ενίσχυσης της μεθοδολογίας που θα αναπτυχθεί σε μελλοντική έρευνα [38].

Η γεωμετρική λειτουργικότητα και η συναρμολόγηση των μεταλλικών εξαρτημάτων από μεθόδους προσθετικής κατασκευής (AM) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ανοχές στη μορφή και τη θέση μαζί με τις αποκλίσεις των διαστάσεων. Ένα άρθρο παρουσιάζει μια εικονική μελέτη γεωμετρικής ανοχής και συναρμολόγησης βασισμένη σε τεχνήματα δοκιμής

συγκριτικής συγκρότησης και σχήματα μοντέλου επιφανείας. Η επιλογή γεωμετρίας για το σημείο αναφοράς συναρμολόγησης βασίζεται στη μεθοδολογία σχεδιασμού αναφοράς βάσει χαρακτηριστικών, στην οποία τα χαρακτηριστικά επιλέγονται σύμφωνα με τον απαιτούμενο γεωμετρικό ποσοτικοποιητή. Ένα ζεύγος δοκιμίων δύο ακίδων και δύο οπών επιλέγεται ως μελέτη περίπτωσης στην οποία καθορίζονται γεωμετρικές ανοχές για να εξασφαλιστεί η συναρμολόγηση όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



#### Εικόνα 2.7 Διάταξη Μελέτης

Για τη φάση παρατήρησης στα σχήματα της επιφάνειας , πραγματοποιούνται θερμομηχανικές προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων της διαδικασίας LPBF και για συστηματικές αποκλίσεις στη φάση πρόβλεψης, χρησιμοποιείται η συρρίκνωση του υλικού. Οι μεταβλητές κατά την φάση πρόβλεψης ενημερώνονται σύμφωνα με τα αποτελέσματα της φάσης παρατήρησης και στη συνέχεια δημιουργούνται δείγματα. Αυτά τα δείγματα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την εξαγωγή γεωμετρικών ανοχών όπως επιπεδότητα, κυλινδρικότητα, καθετότητα και πραγματική θέση. Η μέθοδος επικυρώνεται με σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η στενή συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα και η πραγματική συναρμολόγηση των τυπωμένων δειγμάτων επιβεβαιώνουν την εφαρμογή της μεθόδου και την περαιτέρω χρήση σε άλλες κατεργασίες μεταλλικών υλικών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ποικιλία παραμέτρων και υλικών διαδικασίας διόρθωσης του μοντέλου, χρησιμοποιώντας θερμομηχανικές προσομοιώσεις, για να καταγραφουν οι πληροφορίες απόκλισης από νέα δεδομένα και να παρέχει πληροφορίες γεωμετρικής ανοχής και συναρμολόγησης. Ωστόσο, η χρήση ενός καλύτερου μοντέλου συστηματικής απόκλισης θα μπορούσε να βελτιώσει τα αποτελέσματα κατά τη φάση πρόβλεψης σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η προσαρμογή θα μπορούσε επίσης να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένες μεθόδους βελτιστοποίησης για μεταβλητή ενημέρωση. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορούν να διερευνηθούν για να αυτοματοποιήσουν τη διαδικασία παραγωγής δειγμάτων είτε από προσομοίωση είτε από πειραματικά δεδομένα με παραμετρικές παραλλαγές. Οι συγγραφείς έχουν αναλύσει τη συναρμολόγηση μόνο βάσει των γεωμετρικών ανοχών. Ωστόσο, οι επιφανειακές μέθοδοι πρέπει επίσης να μελετηθούν. Επιπλέον, αυτή η εργασία υποδεικνύει μια κατεύθυνση για περισσότερη έρευνα για την ανάπτυξη νέων μεθόδων και τη βελτίωση των υφιστάμενων μεθόδων για τη διεξαγωγή μιας εικονικής μελέτης γεωμετρικής ανοχής και συναρμολόγησης. Η γεωμετρικά βελτιστοποιημένη μέθοδος προσθετικής κατασκευής για μέταλλά όχι μόνο θα μειώσει τα απόβλητα υλικών αλλά θα αυξήσει την εφαρμογή του και σε περιοχές κατασκευής ακριβείας [39].

### 2.6. Βελτίωση Μοντελοποιήσης μέσω Διατάξεων μελέτης Ακρίβειας

Η ανάγκη των χρηστών της τρισδιάστατης εκτύπωσης για εκτύπωση μοντέλων με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια, χωρίς να υπάρχει μεγάλη απόκλιση από τις ονομαστικές διαστάσεις, οδηγεί στην ανάπτυξη μιας μεθόδου που προβλέπει τις ατέλειες τις εκτύπωσης και προτείνει τις αλλαγές που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν στο CAD μοντέλο. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μια μοναδική αναπαράσταση της συρρίκνωσης σχήματος και στη συνέχεια βέλτιστη στρατηγική αντιστάθμισης. Αυτό το μοντέλο συρρίκνωσης σχήματος έχει προγνωστική δύναμη για διάφορα μεγέθη προϊόντων και το αναλυτικό σχήμα αντιστάθμισης επιτρέπει αποτελεσματικές αλλαγές στο αρχικό σχέδιο CAD με ευκολία. Το μοντέλο συνέλαβε επίσης αποτελεσματικά το πρόβλημα υπερβολικής έκθεσης των μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης και μείωσε την προδιάθεση της αντιστάθμισης σχήματος που προκαλείται από αυτό το φαινόμενο. Πειράματα επικύρωσης πέτυχαν βελτίωση μιας τάξης μεγέθους στη μείωση των γεωμετρικών σφαλμάτων για κυλινδρικά προϊόντα. Παρόλο που η τελική συρρίκνωση έχει πρωταρχικό ενδιαφέρον σε αυτή τη μελέτη, οι πληροφορίες και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν την έρευνα μπορούν να επεκταθούν για να ληφθούν υπόψη λάθη εκτός πλαισίου στην κατεύθυνση z. Μια τέτοια επέκταση συνεπάγεται μια επίπεδη συρρίκνωση μοντελοποίησης και ανάλυσης και μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ σφαλμάτων εντός και εκτός επιπέδου. Εκτός από τη διερεύνηση της αντιστάθμισης συρρίκνωσης προς την κατεύθυνση z, σε μελλοντική εργασία οι ερευνητές πρόκριτε να επικεντρωθούν στην επέκταση της προτεινόμενης μεθόδου σε προϊόντα με πολύπλοκα σχήματα [40].

Άλλοι ερευνητές μελέτησαν μια πιο απλή διάταξη με σκοπό την ανάλυση και η βελτιστοποίηση της διαστασιολογικής ακρίβειας των οπών και των κυλίνδρων που κατασκευάζονται με FDM και το υλικό ABS-M30. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκαν δείγματα που περιείχαν εξωτερική και εσωτερική διάμετρο μεταξύ 3 και 80 mm. Μέσω μιας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM), ήταν δυνατό να συγκεντρωθούν τόσο οι διαστάσεις όσο και τα σφάλματα μορφής. Λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές ευθυγραμμίσεις, ήταν δυνατό να διαπιστωθεί ότι εμφανίζονται διαφορετικές αποκλίσεις διαστάσεων ανάλογα με την ευθυγράμμιση. Επιπλέον, υπάρχουν διαφορετικές αποκλίσεις διαστάσεων για εσωτερικές (οπές) και εξωτερικές (κυλινδρικές) διαμέτρους.



Εικόνα 2.8 Σχέδιο Δοκιμίων Αριστερά: Κύλινδροι, Δεξιά: Οπές

Αυτά τα δείγματα έχουν ένα κοινό στοιχείο: η μετρημένη τιμή αυξάνεται με την αύξηση της ονομαστικής διαμέτρου. Ωστόσο, εάν υπάρχει μικρού μεγέθους ή υπερμεγέθες δείγμα εξαρτάται από την αντίστοιχη ονομαστική διάμετρο. Η κυλινδρικότητα των κυλινδρικών

στοιχείων που κατασκευάζονται στο x-y επίπεδο είναι πολύ σταθερή και χαμηλότερη από ό,τι για τα στοιχεία που κατασκευάζονται με ευθυγράμμιση κατά την z κατεύθυνση. Ένα άλλο μέρος αυτής της μελέτης ασχολείται με την επίδραση διαφορετικών παραμέτρων διαδικασίας, όπως το κενό αέρος ή ο παράγοντας συρρίκνωσης, στις αποκλίσεις διαστάσεων και μορφής που προκύπτουν. Προσαρμόζοντας αυτές τις παραμέτρους, ήταν δυνατή η βελτίωση της ακρίβειας των διαστάσεων. Οπτικοποιώντας τις τοπικές αποκλίσεις διαστάσεων στην περιφέρεια των δειγμάτων, ήταν δυνατό να διευκρινιστεί πώς η κατεύθυνση της απόθεσης του νήματος (raster angle) επηρεάζει τις αποκλίνουσες αποκλίσεις. Έχει αποδειχθεί ότι ένα μικρού μεγέθους δείγμα προκύπτει προς την κατεύθυνση της εναπόθεσης του νήματος. Οι λόγοι αυτής της συμπεριφοράς είναι τα αποτελέσματα συρρίκνωσης, τα οποία οδηγούν σε συστολή των νημάτων πολυμερούς. Επιπλέον, η χρήση υλικού υποστήριξης προκαλεί αποκλίσεις διαστάσεων σε κυλινδρικά στοιχεία που κατασκευάζονται με ευθυγράμμιση κατά την z κατεύθυνση. Τέλος, δεν θα μπορούσε να αποσαφηνιστεί οριστικά γιατί μια εναλλασσόμενη εναπόθεση νημάτων (δ-γωνία 90°) δεν οδηγεί σε απομάκρυνση των απεικονιζόμενων διαστασιολογικών σφαλμάτων. Σε περαιτέρω έρευνες, θα είναι απαραίτητο να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται διαστασιολογικά και μορφολογικά σφάλματα σε δοκίμια εκτυπωμένα από FDM, τα οποία δεν ευθυγραμμίζονται κατά μήκος των αξόνων της πλάκας εκτύπωσης. Είναι επίσης απαραίτητο να ελεγχθεί εάν ο σχηματισμός τοπικών διαστασιολογικών σφαλμάτων εξαρτάται από τη μηχανή ή όχι [41].



Εικόνα 2.9 Διαγραμματική Απεικόνιση Ευρημάτων
# 3. Προσδιορισμός συγκεντρωτικών σφαλμάτων εκτύπωσης

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν στην καθημερινότητά τους οι χρήστες εμπορικών 3D εκτυπωτών είναι η συναρμογή δύο ή περισσότερων εξαρτημάτων για την δημιουργία ενός μεγαλύτερου συναρμολογήματος. Λόγω των διαστασιολογικών και γεωμετρικών σφαλμάτων των εξαρτημάτων που παράγονται μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η συναρμογή αυτή γίνεται στην πράξη προβληματική. Όπως φάνηκε και από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάστηκε παραπάνω, για την επίτευξη μια επιθυμητής συναρμογής (π.χ. ελεύθερης ή σφικτής) είναι απαραίτητο ο χρήστης να κάνει κάποιες αλλαγές στις διαστάσεις στο τρισδιάστατο σχέδιο των εξαρτημάτων που πρόκειται να κατασκευαστούν (π.χ. αύξηση διαμέτρου οπής ή μείωση διαμέτρου άξονα). Οι αλλαγές που πρέπει όμως να κάνει, ανάλογα μάλιστα και με την συναρμογή που επιθυμεί να πετύχει, δεν έχουν ακόμα ποσοτικοποιηθεί και ενταχθεί σε κάποια αλγοριθμική διαδικασία που να μπορεί να ακολουθήσει για να πετύχει το σκοπό του. Η δυσκολία ανάπτυξης μιας τέτοιας διαδικασίας έγκειται στο γεγονός ότι κάθε εκτυπωτής είναι διαφορετικός και με ξεχωριστά χαρακτηριστικά, ενώ και τα υλικά ή/και οι συνθήκες εκτύπωσης διαφέρουν δραματικά ανά περίπτωση.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μία μέθοδος που μπορεί να ακολουθήσει ένας χρήστης και να εκτιμήσει τις αλλαγές που πρέπει να κάνει στις αρσενικές ή/και θηλυκές γεωμετρίες των εξαρτημάτων του έτσι ώστε αυτά μετά την εκτύπωση να μπορούν να συναρμόζουν κατά τον επιθυμητό τρόπο. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εκτύπωση από τον ίδιο τον χρήστη ενός δοκιμίου, με βάση το οποίο, για τον συγκεκριμένο συνδυασμό εκτυπωτή, υλικού και συνθηκών εκτύπωσης να μπορεί να κάνει μια ποσοτική εκτίμηση των σφαλμάτων της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η εκτίμηση των σφαλμάτων δεν περιορίζεται μόνο στα σφάλματα διαστάσεων, αλλά και στα γεωμετρικά σφάλματα, όπως σφάλματα κυλινδρικότητας και θέσης.

Στο τρέχων κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης του δοκιμίου αυτού, η οποία ξεκίνησε με τη μελέτη των σφαλμάτων που προκύπτουν κατά την εκτύπωση βασικών σχημάτων (κυλινδρικοί πείροι, κυκλικές οπές) από τρισδιάστατο εκτυπωτή, την δημιουργία και τον έλεγχο διαφόρων πιθανών δοκιμίων και φιλοσοφιών και την επιλογή του καταλληλότερου ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

### 3.1. Διερεύνηση σφαλμάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης

### 3.1.1. Μελέτη μεμονωμένων δοκιμίων

Ύστερα από την βιβλιογραφική έρευνα παρατηρήθηκε κατά κύριο λόγο η χρήση σύνθετων τεμαχίων με γνώμονα την εύρεση των αποκλίσεων σε περισσότερες διαστάσεις και γεωμετρίες. Για την πρώτη φάση των πειραμάτων επιλέχθηκε μια απλή γεωμετρία με την διαφορά ότι έπρεπε να συνεργαστούν δύο τεμάχια όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1. Αριστερά φαίνεται το αρσενικό δοκίμιο το οποίο αποτελείται από τέσσερεις πείρους διαφορετικών διαμέτρων. Οι διαστάσεις αυτών είναι κατά σειρά μεγέθους από την μεγαλύτερη στην μικρότερή (15mm, 10mm, 8mm, 4mm). Δεξιά φαίνεται το θηλυκό δοκίμιο που αποτελείται από τέσσερεις διαμπερείς οπές αντίστοιχων διαστάσεων με τους πείρους του αρσενικού.

#### Διπλωματική Εργασία – Καραγιάννης Κωνσταντίνος



Εικόνα 3.1 Αριστερά το αρσενικό δοκίμιο τεσσάρων πείρων. Δεξιά το θηλυκό δοκίμιο τεσσάρων οπών.

Η διάταξη αυτή έγινε επειδή η συναρμογή των δύο δοκιμίων επιτρέπει την εποπτεία για τα σφάλματα όσον αφορά τις διαστάσεις αλλά και τη θέση και το σχήμα των κυλινδρικών διατομών. Για παράδειγμα αν τα διαστασιολογικά σφάλματα δεν είναι σημαντικά έτσι ώστε να αποτρέπουν τη συναρμογή ενός μεμονωμένου συστήματος πείρου-οπής, αλλά υπάρχουν σφάλματα θέσης μεταξύ των πείρων ή των οπών, τα δύο δοκίμια (αρσενικό-θηλυκό) δεν θα μπορούν να συναρμοστούν. Άλλη μία σημαντική παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η εκτύπωση σε διαφορετικές μηχανές, ακρίβειες εκτύπωσης καθώς επίσης και διαφορετικούς προσανατολισμούς πάνω στην επιφάνια εκτύπωσης.

Τα ζευγάρια δοκιμίων που μελετήθηκαν εκτυπώθηκαν με πέντε διαφορετικούς τρόπους. Όλα τα δοκίμια έγιναν με την μέθοδο FDM. Τα πρώτα τρία δοκίμια εκτυπώθηκαν στον εκτυπωτή Creality Ender-3 pro. Το πρώτο εκτυπώθηκε με τυπική ακρίβεια εκτύπωσης (πάχος στρώματος απόθεσης υλικού στα 0,2mm). Το επόμενο εκτυπώθηκε με την υψηλή ακρίβεια (πάχος στρώματος απόθεσης υλικού στα 0,2mm), περίπου το μισό από πριν λόγο περιορισμού του μηχανήματος. Τέλος το τρίτο εκτυπώθηκαν με την ιψηλή ακρίβεια εκτύπωσης. Τα δύο επόμενα ζευγάρια δοκιμίων εκτυπώθηκαν με την μηχανή Fortus 360mc. Η διαφορά μεταξύ των δύο εκτυπώσεων ήταν ο προσανατολισμός με τον οποίο το μηχάνημα θα έφτιαχνε τα δοκίμια. Στο πρώτο δοκίμιο η μεγάλη διάσταση ήταν παράλληλη με τον άξονα (Χ) και στο άλλο ήταν κάθετη.

Η σύγκριση έγινε μεταξύ των όμοιων τεμαχίων (αρσενικά, θηλυκά ξεχωριστά) και ως προς την μεταβολή των παραγόντων καθώς αλλάζει η διάμετρος των πείρων (αρσενικά) ή των οπών (θηλυκά) ανάλογα με το ποιο είδος εξετάζεται. Οι παράγοντες που μελετήθηκαν ήταν η διάμετρος, η κυλινδρικότητα και η καθετότητα.

Οι διαστάσεις όλων των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πρώτη φάση των πειραμάτων μετρήθηκαν στην CMM. Αυτό έγινε για να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατόν το σφάλμα στις μετρήσεις, με σκοπό την καλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι τιμές της διαφοράς των διαμέτρων των πείρων των αρσενικών δοκιμίων σε σχέση με την ονομαστική διάμετρο τους, σύμφωνα με τις μετρήσεις της CMM. Στην πρώτη στήλη η γραμμή LOC1 αντιστοιχεί στην διάμετρο των 15mm. Αντίστοιχα η γραμμή LOC2 στα 10mm, η γραμμή LOC3 στα 8mm, η γραμμή LOC4 στα 4mm.

|      | 0.2mm  | 0.12mm | 0.12mm HORIZ | FORTUS HORIZ | FORT-VERTICAL |
|------|--------|--------|--------------|--------------|---------------|
| LOC1 | -0,172 | -0,108 | -0,101       | -0,106       | -0,128        |
| LOC2 | -0,162 | -0,136 | -0,109       | -0,143       | -0,132        |
| LOC3 | -0,183 | -0,126 | -0,129       | -0,154       | -0,124        |
| LOC4 | -0,139 | -0,176 | -0,149       | -0,135       | -0,080        |

Πίνακας 3.1 Διαφορά Διαμέτρων Πείρων Αρσενικών Δοκιμίων

Η διαγραμματική απεικόνιση του παραπάνω πίνακα παρατίθεται στα παρακάτω Διαγράμματα (3.1, 3.2).



Διάγραμμα 3.1 Διαφορά Διαμέτρων Πείρων ανά Διάμετρο



Διάγραμμα 3.2 Διαφορά Διαμέτρων Πίρων ανά Εκτύπωση

Με τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε κάποια προφανής συσχέτιση μεταξύ σφάλματος και διαμέτρου εκτύπωσης, ούτε και κάποια σαφής ταξινόμηση της ακρίβειας εκτύπωσης ανάλογα με την μέθοδο ή/και τον προσανατολισμό. Αυτό γίνεται περισσότερο εμφανές χρησιμοποιούμε το αδιάστατο μέγεθος α της Εξ. (3.1). Το α εκφράζει το ποσοστό του σφάλματος σε σχέση με την ονομαστική διάμετρο. Όπως γίνεται εμφανές από τον Πίνακα 3.2 και τα Διαγράμματα 3.3 και 3.4 το σφάλμα της διαμέτρου δεν είναι ποσοστιαία σταθέρο όσο αυξάνεται η ονομαστική τιμή της διαμέτρου αλλά μένει περισσότερο σταθερό γύρω από μία μέση τιμή όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 3.1 και 3.2. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και για γεωμετρικά σφάλματα, όπως η κυλινδρικότητα και η

καθετότητα, αλλά και για τα δοκίμια με τις οπές, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στο Παράρτημα.

$$\alpha = \frac{D_{nominal} - D_{actual}}{D_{nominal}}$$
(3.1)

|      | 0.2mm     | 0.12mm   | 0.12mm HORIZ | FORTUS HORIZ | FORT-VERTICAL |
|------|-----------|----------|--------------|--------------|---------------|
| LOC1 | -0,011467 | -0,0072  | -0,006733333 | -0,007066667 | -0,008533333  |
| LOC2 | -0,0162   | -0,0136  | -0,0109      | -0,0143      | -0,0132       |
| LOC3 | -0,022875 | -0,01575 | -0,016125    | -0,01925     | -0,0155       |
| LOC4 | -0,03475  | -0,044   | -0,03725     | -0,03375     | -0,02         |



Πίνακας 3.2 Συγκριτικού Μεγέθους Πίρων Αρσενικών Δοκιμίων

#### Διάγραμμα 3.4 Ποσοστό Σφάλματος ανά Διάσταση



Διάγραμμα 3.5 Ποσοστό Σφάλματος ανά Εκτυπωτή

### 3.1.2. Έλεγχος Συναρμογής Δοκιμίων

Σε επόμενο στάδιο τα ίδια δοκίμια εξετάστηκαν ως προς την συναρμογή τους. Σε αυτό το στάδιο τα ζευγάρια των δοκιμίων δοκιμάστηκαν αρχικά σε πρακτικό επίπεδο. Η συναρμογή κατέστη αδύνατη. Επομένως, φυσικά προκύπτει το ερώτημα ποια είναι η απόκλιση μεταξύ τους βάσει των μετρήσεων που έγιναν. Αφού επιβεβαιώθηκε και βάση των μετρήσεων ότι τα δύο τεμάχια δεν μπορούν να συναρμοστούν, υπολογίστηκαν οι διαφορές που υπήρχαν στις συναρμογές ανά τρόπο εκτύπωσης.

Ενδεικτικά θα αναλυθεί ο τρόπος υπολογισμού της συναρμογής των δοκιμίων που τυπώθηκαν με υψηλή ακρίβεια (πάχος στρώματος απόθεσης υλικού στα 0,12mm) στον εκτυπωτή Creality Ender-3 pro.

| Θηλυκό Δοκί | μιο  | Κυλινδρικότητα | Καθετότητα | Διάμετρος | Προσέγγιση |
|-------------|------|----------------|------------|-----------|------------|
| 0.12mm      |      |                |            |           |            |
| 15          | LOC1 | 0,095          | 0,102      | 14,916    | 14,719     |
| 10          | LOC2 | 0,049          | 0,051      | 9,934     | 9,834      |
| 8           | LOC3 | 0,056          | 0,035      | 7,966     | 7,875      |
| 4           | LOC4 | 0,053          | 0,040      | 3,986     | 3,893      |

Πίνακας 3.3 Προσέγγιση Μέγιστης Πραγματικής Διαμέτρου Θηλυκού Δοκιμίου

| Αρσενικό Δοκ | ίμιο | Κυλινδρικότητα | Καθετότητα | Διάμετρος | Προσέγγιση |
|--------------|------|----------------|------------|-----------|------------|
| 0.12mm       |      |                |            |           |            |
| 15           | LOC1 | 0,058          | 0,065      | 14,916    | 15,039     |
| 10           | LOC2 | 0,086          | 0,031      | 9,934     | 10,051     |
| 8            | LOC3 | 0,049          | 0,011      | 7,966     | 8,026      |
| 4            | LOC4 | 0,125          | 0,083      | 3,986     | 4,194      |

Πίνακας 3.4 Προσέγγιση Μέγιστης Πραγματικής Διαμέτρου Αρσενικού Δοκιμίου

Όπως φαίνεται και στου Πίνακες 3.3 και 3.4 υπολογίστηκε μια προσεγγιστική τιμή της διαμέτρου με την επίδραση και των άλλων παραμέτρων που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.1.1 με σκοπό να βρεθεί το συγκεντρωτικό σφάλμα που έχουν τα δοκίμια όταν χρειάζεται να ενωθούν. Θεωρώντας τις πιο δυσμενείς περιπτώσεις για το συγκεντρωτικό σφάλμα, για το αρσενικό δοκίμιο προστίθενται στην τιμή του σφάλματος της διαμέτρου η τιμή του σφάλματος της κυλινδρικότητας και της καθετότητας, ενώ στην περίπτωση των οπών τοι τιμές αυτές αφαιρούνται. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των δύο τιμών για κάθε διάμετρο (Πίνακας (3.5)).

|      | Θηλυκό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Διαφορά |
|------|----------------|------------------|---------|
| LOC1 | 14,719         | 15,039           | -0,32   |
| LOC2 | 9,834          | 10,051           | -0,217  |
| LOC3 | 7,875          | 8,026            | -0,151  |
| LOC4 | 3,893          | 4,194            | -0,301  |

Πίνακας 3.5 Σύγκριση Διαστάσεων



Διάγραμμα 3.6 Σύγκριση Διαστάσεων για ποιότητα 0,12mm

Όπως ήταν αναμενόμενο το αρσενικό τεμάχιο εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε όλες τις διαμέτρους σε σχέση με το θηλυκό. Το ενδιαφέρον σημείο για την μελέτη της συναρμογής είναι η διαφορά η οποία παρατηρείται μεταξύ τους (Διάγραμμα 3.6).



Διάγραμμα 3.7 Διαφορά τιμών Αρσενικού Θηλυκού

Με ακριβώς τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκαν και τα υπόλοιπα ζευγάρια δοκιμίων, των οποίων τα διαγράμματα και οι πίνακες που τους αντιστοιχούν παρατίθενται στο Παράρτημα.

Βάση των αποτελεσμάτων που υπολογίστηκαν και για τις υπόλοιπες εκτυπώσεις προκύπτουν συνολικά τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 3.6.

| Διαφορά | 0.2mm  | 0.12mm | 0.12mm HORIZ | FORT-HORIZ | FORT-VERTICAL |
|---------|--------|--------|--------------|------------|---------------|
| LOC1    | -0,195 | -0,32  | -0,265       | -0,121     | -0,151        |
| LOC2    | -0,155 | -0,217 | -0,155       | -0,027     | -0,107        |
| LOC3    | -0,114 | -0,151 | -0,097       | -0,012     | -0,096        |
| LOC4    | -0,169 | -0,301 | -0,168       | -0,08      | -0,241        |

Πίνακας 3.6 Σύγκριση Διαφορών ανά Μέθοδο Εκτύπωσης



Διάγραμμα 3.8 Σύγκριση Διαφορών ανά Μέθοδο Εκτύπωσης

Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε ότι σε καμία περίπτωση δεν επετεύχθη η συναρμογή των αντίστοιχων δοκιμίων. Ακόμη όπως δείχνει το Διάγραμμα 3.7 οι διαφορές στην συναρμογή μειώνονται καθώς βελτιώνεται η ποιότητα της εκτύπωσης. Επίσης εκτιμάται ότι ο προσανατολισμός και θέση των αντικειμένων στην πλάκα εκτύπωσης επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα αλλά δεν υπάρχει ο ικανός αριθμός πειραμάτων για να δοθεί μια βέβαιη απάντηση ως προς αυτήν την παράμετρο.

#### 3.2. Ποσοτικός προσδιορισμός σφαλμάτων εκτύπωσης

#### 3.2.1. Στόχος

Ο στόχος του παρόντος Κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη μίας διαδικασίας, την οποία όταν ακολουθεί ένας χρήστης ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή να μπορεί να προσδιορίσει ποσοτικά τις αλλαγές που θα χρειαστεί να κάνει στο CAD μοντέλο ενός συναρμολογήματος έτσι ώστε να είναι δυνατή η συναρμογή των διαφόρων εξαρτημάτων του κατά τον επιθυμητό τρόπο. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα σφάλματα που προκύπτουν από την τρισδιάστατη εκτύπωση διαφέρουν σε μέγεθος ανάλογα με τον εκτυπωτή, το υλικό και γενικά τις συνθήκες εκτύπωσης. Μια από αυτές είναι και οι παράμετροι τις εκτύπωσης, οι οποίες στο ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό Ultimaker CURA είναι κατηγοριοποιημένες στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες ποιότητας:

- Low Χαμηλή (0.28mm πάχος στρώσης, 20% γέμιση)
- Standard Κανονική (0.20mm πάχος στρώσης, 20% γέμιση)
- Super Υψηλή (0.12mm πάχος στρώσης, 20% γέμιση)

Το πρόγραμμα έχει ακόμη μια επιλογή για ποιότητας (Dynamic) (0.16mm πάχος στρώσης, 20% γέμιση) η οποία παραλείφθηκε στην παρούσα εργασία καθώς το δοκίμια δεν επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν για λειτουργική χρήση, οπότε και είναι συνήθης η επιλογή αυτής της ποιότητας. Σημειώνεται ότι ο χρηστής μπορεί να επιλέξει και ανεξάρτητα τις επιθυμητές παραμέτρους εκτύπωσης, ωστόσο εδώ μελετώνται δοκίμια που εκτυπώνονται με τις τρεις παραπάνω ποιότητες (και επομένως σετ παραμέτρων) μιας και είναι πολύ διαδεδομένες

στους χρήστες τρισδιάστατων εκτυπωτών. Η μέθοδος όμως που θα αναπτυχθεί είναι ανεξάρτητη από αυτές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό σφαλμάτων για οποιαδήποτε συνδυασμό παραμέτρων και ποιότητας.

Αρχικά οι μετρήσεις των δοκιμίων έγιναν χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό παχύμετρο με ακρίβεια 0.01mm (10μm) και στη συνέχεια με τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) για να καθορίσει την ποιότητα του εκτυπωτή Creality CR-10S5, την ακρίβεια εκτύπωσης, τα διαστήματα ανοχής και τις γεωμετρικές ανοχές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαδοχικές γενιές δοκιμίων που αναπτύχθηκαν με σκοπό τον ποσοτικό προσδιορισμό των σφαλμάτων από την τρισδιάστατη εκτύπωση.

#### 3.2.2. Πρώτη γενιά δοκιμίων

Το πρώτο δοκίμιο που σχεδιάστηκε βασίστηκε στην φιλοσοφία των δοκιμίων που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 3.1. Πιο συγκεκριμένα κατασκευάστηκε ένα δοκίμιο με τρεις κυλίνδρους διαμέτρου 9mm, 6mm και 3mm ο καθένας και ένα δοκίμιο με τις αντίστοιχες οπές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Στόχος της διαδικασίας είναι να υπολογιστεί πόσο μεγαλύτερες πρέπει να γίνουν οι ονομαστικές τιμές της διαμέτρου των οπών ή/και πόσο μικρότερες πρέπει να γίνουν οι ονομαστικές τιμές των διαμέτρων των πείρων μέχρις ότου να μπορούν να συναρμοστούν. Σε αυτό το σημείο επιλέγεται και εφαρμόζεται σε όλες τις γενιές δοκιμίων οι αλλαγές των ονομαστικών διαστάσεων να γίνονται είτε στις αρσενικές είτε στις θηλυκές γεωμετρίες και όχι και στις δύο. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, επιλέγεται οι αλλαγές να γίνονται στις ονομαστικές των θηλυκών γεωμετριών.

Στα πλαίσια της πρώτης γενιάς δοκιμίων, τυπώνονται δύο δοκίμια (αρσενικό-θηλυκό) σε κάθε ποιότητα εκτύπωσης και για διάφορες τιμές διαμέτρου των οπών. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε ζευγάρι δοκιμίων οι οπές εκτυπώνονται με ονομαστική διάμετρο 0.1mm μεγαλύτερη κάθε φορά μέχρι το ανώτατο όριο των 0.6 επιπλέων χιλιοστών. Με αυτό τον τρόπο, όχι μόνο μπορεί να προσδιοριστεί μετά από ποιο σημείο μπορεί να επιτευχθεί συναρμογή, αλλά να προσδιοριστεί και πότε μπορεί να γίνει σφικτή, ενδιάμεση ή ελεύθερη.



Εικόνα 3.2 Διάμετροι Αρσενικών και Θηλυκών δοκιμίων 9mm, 6mm και 3mm

Στην Εικόνα 3.3 φαίνονται κάποια από τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν για διάφορες παραμέτρους του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Γίνεται σαφές που με μιας τέτοιας φιλοσοφίας

δοκίμια μπορούν να εκτιμηθεί το συγκεντρωτικό σφάλμα του εκτυπωτή, που συνυπολογίζει στα διαστασιολογικά σφάλματα και σφάλματα μορφής και θέσης με τρόπο που ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.1. Επίσης, τα δοκίμια αυτά είναι απλά και μπορούν να εκτυπωθούν γρήγορα από τον χρήστη.



Εικόνα 3.3 Αρσενικά και Θηλυκά δοκίμια. Από αριστερά προς τα δεξιά, Χαμηλή, Κανονική, Υψηλή ποιότητα PLA (κόκκινο)

#### 3.2.3. Δεύτερη Γενιά Δοκιμίων

Το πρόβλημα με την πρώτη γενιά δοκιμίων ήταν ότι έπρεπε για κάθε φορά που έπρεπε να ελεγχθεί η αυξημένη διάμετρος θα έπρεπε να εκτυπωθεί ένα νέο δοκίμιο. Το γεγονός αυτό καθυστερεί αρκετά την διαδικασία και συνεπάγεται μεγάλη σπατάλη υλικού. Γι' αυτό, στην δεύτερη γενιά το σχέδιο των αρσενικών και των θηλυκών δοκιμίων υπέστη κάποιες αλλαγές, ως συνεπεία των παραπάνω. Αρχικά αφαιρέθηκε ο κύλινδρος διαμέτρου 6mm από το αρσενικό και το θηλυκό δοκίμιο. Στην συνέχεια το θηλυκό τροποποιήθηκε έτσι ώστε να μπορεί, με ένα κομμάτι, να μελετηθεί η αλλαγή των διαμέτρων σύμφωνα με τα όσα είχαν παρατηρηθεί στην πρώτη γένια. Στην ουσία στο θηλυκό δοκίμιο είναι ενοποιημένες όλες οι διαστάσεις ελέγχου.



Εικόνα 3.4 Αρσενικό Δοκίμιο Διαμέτρων 9mm και 3mm. Θηλυκό Δοκίμιο Διαμέτρων 9mm και 3mm με +0,1mm προστιθέμενα σε κάθε ζευγάρι οπών από 0,0 έως +0,6 χιλιοστά.

Μετά την εκτύπωση των δοκιμίων, σε κανονική ποιότητα εκτύπωσης, διαπιστώθηκε ότι μερικές θέσεις στο θηλυκό δοκίμιο δεν ήταν πρακτικά χρήσιμες καθώς για τις διαμέτρους (9mm,3mm), (9.1mm,3.1mm) και (9.2mm,3.2mm), δηλαδή για +0.0, +0.1 και +0.2mm από την ονομαστική διάμετρο, το αρσενικό δοκίμιο δεν συναρμοζόταν σε καμία περίπτωση. Ως αποτέλεσμα, το θηλυκό τροποποιήθηκε περεταίρω όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5 Η συγκεκριμένη τροποποίηση έγινε για την εξοικονόμηση υλικού και χρόνου εκτύπωσης.



Εικόνα 3.5 Τροποποιημένο Θηλυκό Δοκίμιο

Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζονται και οι δύο σειρές δοκιμίων εκτυπωμένες. Παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια που έχουν εκτυπωθεί σε Κανονική ποιότητα εκτύπωσης, είναι δύσκολο να συναρμοστούν καθώς το αρσενικό δοκίμιο δεν μπορεί να εισχωρήσει μέσα στο θηλυκό έως ότου η αλλαγή της διαμέτρου φτάσει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από +0.4mm. Για τα δοκίμια με υψηλή ποιότητα εκτύπωσης, η αντίστοιχη δυσκολία παρατηρήθηκε όταν η αλλαγή της διαμέτρου ήταν ίση ή μεγαλύτερη από +0.3mm. Επομένως, όπως αναμενόταν, επιλέγοντας τις παραμέτρους υψηλής ποιότητας εκτύπωσης (όπως τις προτείνει το πρόγραμμα), η ακρίβεια τις εκτύπωσης αυξάνεται.



Εικόνα 3.6 Τυπική Ποιότητα Αρσενικού Θηλυκού σε PLA. Τροποποιημένο Θηλυκό, Αρσενικό Υψηλή Ποιότητα

Επίσης η δεύτερη γενιά δοκιμίων επιτρέπει τον προσδιορισμό των σφαλμάτων τόσο μεμονωμένα σε κάθε ζευγάρι κυλίνδρου-οπής όσο και συνδυαστικά. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7, ο χρήστης μπορεί να εκτιμήσει το σφάλμα συναρμογής ενός μεμονωμένου ζεύγους κυλίνδρου-οπής και κατ' επέκταση να εκτιμήσει τα σφάλματα διαμέτρου, κυλινδρικότητας και καθετότητας της διαδικασίας εκτύπωσης, ενώ όταν επιχειρεί να συναρμόσει και τους δύο κυλίνδρους με τις αντίστοιχες οπές ταυτόχρονα, μπορεί να εκτιμήσει το σφάλμα συναρμόσει και τους δύο κυλίνδρους με τις αντίστοιχες οπές ταυτόχρονα, μπορεί να εκτιμήσει το σφάλμα θέσης. Αυτό το χαρακτηριστικό αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την εκτύπωση εξαρτημάτων ενός ευρύτερου συναρμολογήματος, όπου σε άλλες θέσεις υπάρχει μία μεμονωμένη συναρμογή, ενώ αλλού μπορεί να υπάρχει ένα σύστημα κυλίνδρων-οπών για την επίτευξη της ένωσης των εξαρτημάτων. Όπως φάνηκε και στην πράξη, ενώ για μια μεμονωμένη συναρμογή χρειάζεται μια αλλαγή της διαμέτρου της οπής κατά +0.3mm για τα εκτυπωμένα δοκίμια που φαίνονται στις Εικόνες 3.6 και 3.7 για κανοική ποιότητα εκτύπωσης, για την ταυτόχρονη συναρμογή και των δύο κυλίνδρων χρειάζεται μια αλλαγή της διαμέτρου της τάξης των +0.4mm.



Εικόνα 3.7 Μετρήσεις Μεμονωμένων Διατομών

#### 3.2.4. Τρίτη Γενιά Δοκιμίων

Αν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση της δεύτερης γενιάς δοκιμίων ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, προέκυψε ο προβληματισμός ότι το τετριμμένο κυλινδρικό σχήμα των γεωμετριών που συναρμόζονταν μπορεί να μην προσφέρει ασφαλή συμπεράσματα για την αλλαγή των ονομαστικών διαστάσεων σε περιπτώσεις συναρμογών γεωμετριών μηκυκλικής κάθετης διατομής. Στην ανάπτυξη της τρίτης γενιάς δοκιμίων, με σκοπό να επιλυθεί το παραπάνω πρόβλημα, δημιουργήθηκε ένα δοκίμιο με ένα κύλινδρο διαμέτρου 9mm και ένα κύβο με μήκος ακμής 9mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8 Διάταξη Κυκλικής και Τετραγωνικής Διατομής, Θηλυκό με αύξηση διαστάσεων έως +0.6mm

Με την διάταξη που φαίνεται την Εικόνα 3.8 μπορεί να ελεγχθούν σφάλματα που εμφανίζονται και στις προηγούμενες γενιές, αλλά όχι μόνο για κυλίνδρους κυκλικής διατομής. Η εκτύπωση του ζεύγος των δοκιμίων έγινε σε κανονική ποιότητα εκτύπωσης σε δύο διαφορετικά υλικά PLA και PETG.

Σε επίπεδο υλικών, παρατηρήθηκε ότι μεταξύ των υλικών στο PETG υπάρχει καλύτερη εφαρμογή ενώ παράλληλα η διαφορά δεν ήταν σημαντική για να μπορεί να διακριθεί από την πειραματική διάταξη αυτή. Και στις δύο περιπτώσεις, υπήρξε δυσκολία για το αρσενικό δοκίμιο να ταιριάξει με το θηλυκό προτού το δοκίμιο συναντήσει αλλαγή της διαμέτρου ίση ή μεγαλύτερη των 0.3mm. Όπως προαναφέρθηκε το PLA εμφανίζει μια ελαφρά μεγαλύτερη αντίσταση κατά την συναρμογή των δοκιμίων.



Εικόνα 3.9 Τυπική Ποιότητα, Κόκκινο: Ζεύγος δοκιμίων σε PLA, Μαύρο: Ζεύγος δοκιμίων σε PETG

#### 3.2.5. Τέταρτη Γενιά Δοκιμίων

Με σκοπό τη δημιουργία μιας πιο σύνθετης γεωμετρίας για πιο εξεζητημένα σχήματα συναρμογών, δοκιμάστηκε η σύμπτυξή των δύο εξεταζόμενων γεωμετριών της τρίτης γενιάς. Επομένως η τέταρτη γενιά δοκιμίων αφορά ένα αρκετά πιο περίπλοκο σχήμα. Τα δοκίμια αποτελούνται από ένα κύλινδρο και έναν κύβο τον ένα μέσα στον άλλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10 Ζεύγος δοκιμίων με διατομή Κύκλου με την Επικάλυψη Τετραγώνου

Τα δοκίμια εκτυπώθηκαν σε κανονική ποιότητα εκτύπωσης. Παρατηρήθηκε ότι ήταν δύσκολο για το αρσενικό δοκίμιο να συναρμοστεί με το θηλυκό όταν η αλλαγή των διαστάσεων ήταν μικρότερη από +0.4mm. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η αλλαγή του προσανατολισμού επηρεάζει σημαντικά την λειτουργία της διάταξης και καθιστά αδύνατη την εφαρμογή του αρσενικού δοκιμίου μέσα στο θηλυκό. Το σχήμα του πεπλεγμένου κυλίνδρου με τον κύβο δεν ήταν ομοιόμορφο σε όλο το μήκος του δοκιμίου σαν τα στρώματα της κυκλικής διατομής να έχουν στοιβαχτεί το ένα πάνω στο άλλο με μια μικρή μετατόπιση.



Εικόνα 3.11 Τυπική Εκτύπωση σε PLA διατομής Κύκλου με Επικάλυψη Τετραγώνου

#### 3.2.6. Πέμπτη Γενιά Δοκιμίων

Στην πέμπτη γενιά η εργαζόμενη διατομή των δοκιμίων εξελίχθηκε σε σχέση με αυτή της τέταρτης και έτσι τα δοκίμια απέκτησαν ένα αστεροειδές σχήμα, σχήμα πυξίδας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.12. Οι έντονες ακμές και η διαφορά στο μήκος τους αποτελεί πρόκληση για την τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς από την εμπειρία που αποκτήθηκε από την προηγούμενη γενιά το τελικό δοκίμιο δεν είναι συμμετρικό όπως είχε σχεδιαστεί.



Εικόνα 3.12 Ζεύγος δοκιμίων με Αστεροειδής διατομή

Έγιναν διάφορες εκτυπώσεις των μερών και προέκυψαν διάφορα προβλήματα μέχρι να εκτυπωθούν τα διάφορα μέρη με έναν αποδεκτό τρόπο. Αρχικά εκτυπώθηκαν τα θηλυκά δοκίμια με φυσικό PLA (φαίνονται με μπλε χρώμα στην Εικόνα 3.13 καθώς χρωματίστηκαν τα νήματα με μπλε χρώμα για να διαφοροποιηθούν τα καρούλια, το φυσικό χρώμα του PLA είναι άσπρο ημιδιαφανές). Το πάχος του δοκιμίου με τις οπές ήταν 6mm και ο στόχος ήταν να διαπιστωθεί εάν το προς εκτύπωση γεωμετρικό σχήμα ήταν αποδεκτό.

Παρατηρήθηκε ότι ήταν δύσκολο το αρσενικό δοκίμιο να ταιριάξει με το θηλυκό όταν η διαφορά στη διάμετρο ήταν μικρότερη από +0.5mm. Σημειώνεται επίσης ότι με βάση τον προσανατολισμό το αρσενικό δοκίμιο ήταν αδύνατο να εισέλθει στο θηλυκό. Το αστεροειδές σχήμα δεν ήταν ομοιόμορφο, κάτι το οποίο αναμενόταν, σε όλο το μήκος του δοκιμίου σαν τα στρώματα της κυκλικής διατομής να έχουν στοιβαχτεί το ένα πάνω στο άλλο με μια μικρή μετατόπιση.



Εικόνα 3.13 Αριστερά: Θηλυκό με αστεροειδείς διατομή, Φυσικό PLA. Δεξιά: Ζεύγος δοκιμίων με Αστεροειδής διατομή κόκκινο PLA.

#### 3.2.7. Περαιτέρω αλλαγές και τροποποιήσεις

Μετά το πέρας των πειραμάτων της προηγούμενης γενιάς δοκιμίων, παρατηρήθηκε ότι το εύρος ανοχών ήταν διαφορετικό (και καλύτερο) για φυσικό PLA (μπλε) σε σχέση με το

χρωματισμένο (κόκκινο). Ως αποτέλεσμα, το θηλυκό δοκίμιο της δεύτερης γενιάς τροποποιήθηκε, διατηρήθηκαν οι αρχικές ονομαστικές διαστάσεις με την προσθήκη νέων διαμέτρων +0.2mm και +0.25mm όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.14.



Εικόνα 3.14 Αρσενικό: Πανομοιότυπο με την δεύτερη γενιά. Θηλυκό: Τροποποιημένο, αύξηση διαστάσεων

Τα δοκίμια εκτυπώθηκαν σε υψηλή ποιότητα εκτύπωσης με φυσικό PLA. Παρατηρήθηκε ότι ήταν δύσκολο για το αρσενικό δοκίμιο να συναρμοστεί με το θηλυκό όταν η αλλαγή στη διάμετρο ήταν +0.15mm. Η υψηλή αυτή ακρίβεια επιτυγχάνεται και λόγω του φυσικού PLA αλλά και της χρήσης υψηλής ποιότητας εκτύπωσης.



Εικόνα 3.15 Ζεύγος Δοκιμίων σε Υψηλή Ποιότητα, Τροποποιημένο Θηλυκό, Φυσικό PLA.

Με τον ίδιο τρόπο όπως και στην έκτη γενιά, τροποποιήθηκε και η πρώτη γενιά δοκιμιών. Τα δύο ζευγάρια τροποποιημένων δοκιμίων εκτυπώθηκαν σε υψηλή ποιότητα εκτύπωσης με κόκκινο PLA. Το αρσενικό δοκίμιο είχε κυλίνδρους διαμέτρων 9mm, 6mm και 3mm και το θηλυκό δοκίμιο είχε κυλίνδρους διαμέτρων 9.2mm, 6.2mm και 3.2mm.



Εικόνα 3.16 Ζεύγος Τροποποιημένων Δοκιμίων Τριών Διαμέτρων.

Τα δοκίμια εκτυπώθηκαν σε Υψηλή ποιότητα εκτύπωσης με φυσικό PLA. Τα δύο δοκίμια δεν μπορούσαν να συναρμόσουν.



Εικόνα 3.17 Ζεύγος Τροποποιημένων Δοκιμίων Τριών Διαμέτρων, Υψηλή Ποιότητα, Κόκκινο PLA

### 3.2.8. Μετρήσεις

Για όλες τις γενιές δοκιμίων που παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση παχύμετρου. Το πρωτόκολλο των μετρήσεων που ακολουθήθηκε ήταν το εξής: πάρθηκαν έξι μετρήσεις για κάθε γεωμετρικό σχήμα. Για παράδειγμα, για το δοκίμιο με τους τρεις κυλίνδρους διαμέτρων 9mm, 6mm και 3mm κάθε κύλινδρος μετρήθηκε έξι φορές (δύο στη βάση, δύο στη μέση και δύο στην κορυφή) με διαφορετικό προσανατολισμό κάθε φορά. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από το ίδιο άτομο.

Μόνο οι οπές διαμέτρου 3mm των θηλυκών δοκιμίων μετρήθηκαν δύο φορές (στη βάση και στην κορυφή) καθώς το παχύμετρο ήταν πολύ φαρδύ για να παρθούν οι μετρήσεις στη μέση του κυλίνδρου. Τα δοκίμια της πέμπτης γενιάς (αστέρι) δεν μετρήθηκαν καθώς το σχήμα τους ήταν ανώμαλο και κατέστη δύσκολη η καθιέρωση μετρητικού πρωτοκόλλου.



Εικόνα 3.18 Επισκόπηση του πίνακα μετρήσεων του Excel για τα δείγματα από τη γενιά 1 έως 4. Αναλυτικά οι Πίνακες παρουσιάζονται στο Παράρτημα

#### 3.2.9. Ανάλυση των μετρήσεων

Προς χάριν σαφήνειας, μόνο ένας πίνακας μετρήσεων θα παρουσιαστεί στο κύριο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασία (οι υπόλοιποι επισυνάπτονται στο Παράρτημα). Ο παρακάτω πίνακας αφορά τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην τρίτη γενιά δοκιμίων (μια κυκλική και μία πρισματική) εκτυπωμένο σε Κανονική ποιότητα εκτύπωσης με κόκκινο PLA. Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται τα εξής:

| Су-са                     | Standard qu | ality | PLA Red |      |      |      |         |          |                  |              |
|---------------------------|-------------|-------|---------|------|------|------|---------|----------|------------------|--------------|
|                           | Base        |       | Middle  |      | Тор  |      | Average | Expected | Measurement devi | Relative gap |
| Male Cylinder 9mm         | 8,97        | 9,12  | 9,1     | 8,9  | 8,78 | 8,97 | 8,97    | 9,00     | 0,03             | 0,30         |
| Male Square 9mm           | 8,98        | 9,02  | 9,1     | 9,05 | 9    | 9,05 | 9,03    | 9,00     | 0,03             | 0,37         |
| Female Cylinder 9mm +0,15 | 9,05        | 9     | 8,84    | 8,8  | 9    | 8,97 | 8,94    | 9,15     | 0,21             | 2,26         |
| Female Square 9mm +0,15   | 9,1         | 9,15  | 8,74    | 9,07 | 9,15 | 9,19 | 9,07    | 9,15     | 0,08             | 0,91         |
| Female Cylinder 9mm +0,3  | 9           | 9,14  | 8,73    | 8,82 | 9,01 | 9,16 | 8,98    | 9,30     | 0,32             | 3,48         |
| Female Square 9mm +0,3    | 9,16        | 9,12  | 8,62    | 8,63 | 9,03 | 9,28 | 8,97    | 9,30     | 0,33             | 3,51         |
|                           |             |       |         |      |      |      |         |          |                  |              |
| Female Cylinder 9mm +0,4  | 9,15        | 9,27  | 8,84    | 8,98 | 9,08 | 9,25 | 9,10    | 9,40     | 0,31             | 3,24         |
| Female Square 9mm +0,4    | 9,32        | 9,28  | 9,22    | 9,05 | 9,38 | 9,42 | 9,28    | 9,40     | 0,12             | 1,29         |
| Female Cylinder 9mm +0,5  | 9,29        | 9,3   | 9,06    | 8,99 | 9,08 | 9,2  | 9,15    | 9,50     | 0,35             | 3,65         |
| Female Square 9mm +0,5    | 9,3         | 9,29  | 9,13    | 9,12 | 9,43 | 9,37 | 9,27    | 9,50     | 0,23             | 2,39         |
| Female Cylinder 9mm +0,6  | 9,43        | 9,49  | 9,36    | 9,36 | 9,47 | 9,52 | 9,44    | 9,60     | 0,16             | 1,68         |
| Female Square 9mm +0,6    | 9,3         | 9,28  | 9,15    | 9,31 | 9,59 | 9,5  | 9,355   | 9,6      | 0,245            | 2,552083333  |

Εικόνα 3.19 Μετρήσεις για το Ζεύγος δοκιμίων με διατομή Κύκλου με την Επικάλυψη Τετραγώνου

- 1<sup>η</sup> Στήλη: Όνομα της μέτρησης
- 2<sup>η</sup> 7<sup>η</sup> Στήλη: Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το παχύμετρο
- 8<sup>n</sup> Στήλη: Ο μέσος όρος των μετρήσεων
- 9<sup>η</sup> Στήλη: Ονομαστική τιμή
- 10<sup>η</sup> Στήλη: Η απόκλιση μεταξύ του μέσου όρου και της ονομαστικής τιμής
- 11<sup>η</sup> Στήλη: Η σχετική απόκλιση μεταξύ του μέσου όρου και της ονομαστικής τιμής

Η πράσινη γραμμή αποτελεί ένα οπτικό διαχωρισμό μεταξύ των διαμέτρων των θηλυκών δοκιμίων στα οποία το αρσενικό δεν μπορεί να εισέλθει. Από τον παραπάνω πίνακα είναι ήδη εμφανές ότι η απόκλιση των μετρήσεων μεταξύ των αρσενικών και των θηλυκών δοκιμίων είναι έως και μια τάξη μεγέθους. Το ίδιο παρατηρείται και στη σχετική απόκλιση. Από στατιστική οπτική παρουσιάζονται τα ακόλουθα. Χρησιμοποιήθηκε ένα διάστημα εμπιστοσύνης με περιθώριο σφάλματος 10%. Στην Εικόνα 3.20 παρουσιάζονται τα εξής:

- 1<sup>η</sup> Στήλη: Τυπική απόκλιση
- 2<sup>η</sup> Στήλη: Το αποτέλεσμα της τυπικής απόκλισης με την χρήση της κατανομής Student
- 3<sup>η</sup> & 4<sup>η</sup> Στήλη: Τα ελάχιστα και τα μέγιστα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης
- 5<sup>η</sup> & 6<sup>η</sup> Στήλη: Η παρουσία ή η απουσία της ονομαστικής τιμής (συγκρινόμενο με την μετρούμενη τιμή)

Ως αποτέλεσμα, εάν στις δύο τελευταίες στήλες υπάρχει αρνητική τιμή, σηματοδοτεί ότι η μετρούμενη τιμή δεν είναι εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης.

| Confidence interva | l with 10% error             |                         |                         |                       |                     |
|--------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| Standard deviation | u=student*standard deviation | Confidence interval min | Confidence interval max | Presence within the o | confidence interval |
| 0,13               | 0,26                         | 8,87                    | 9,18                    | 0,13                  | 0,18                |
| 0,04               | 0,09                         | 9,00                    | 9,10                    | 0,00                  | 0,10                |
|                    |                              |                         |                         |                       |                     |
| 0,10               | 0,20                         | 8,86                    | 9,11                    | 0,29                  | -0,04               |
| 0,17               | 0,33                         | 8,93                    | 9,34                    | 0,22                  | 0,19                |
|                    |                              |                         |                         |                       |                     |
| 0,17               | 0,35                         | 8,84                    | 9,26                    | 0,46                  | -0,04               |
| 0,28               | 0,57                         | 8,74                    | 9,44                    | 0,56                  | 0,14                |
|                    |                              |                         |                         |                       |                     |
| 0,17               | 0,33                         | 8,96                    | 9,37                    | 0,44                  | -0,03               |
| 0,13               | 0,27                         | 9,17                    | 9,50                    | 0,23                  | 0,10                |
|                    |                              |                         |                         |                       |                     |
| 0,13               | 0,26                         | 9,05                    | 9,37                    | 0,45                  | -0,13               |
| 0,13               | 0,25                         | 9,17                    | 9,48                    | 0,33                  | -0,02               |
|                    |                              |                         |                         |                       |                     |
| 0,07               | 0,14                         | 9,38                    | 9,55                    | 0,22                  | -0,05               |
| 0,16               | 0,32                         | 9,22                    | 9,62                    | 0,38                  | 0,02                |

Εικόνα 3.20 Μέθοδος δειγματοληψίας για το Ζεύγος δοκιμίων με διατομή Κύκλου με την Επικάλυψη Τετραγώνου

Όπως επίσης είναι εμφανές από τον πίνακα, οι μετρήσεις που πάρθηκαν στο δύο αρσενικά δοκίμια είναι εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης. Βάση αυτής της μεθόδου των δοκιμίων, υπάρχει μια πιθανότητα της τάξης του 90% ότι οι μετρήσεις που πάρθηκαν σε αυτά τα δοκίμια είναι μεταξύ 8.91mm και 9.10mm. Αυτό δεν ισχύει, για παράδειγμα, για τα θηλυκά δοκίμια, καθώς ορισμένες τιμές είναι αρνητικές. Η διασπορά των μετρήσεων για τα θηλυκά δοκίμια ήταν πολύ συχνά μεγάλες. Για παράδειγμα, για ένα εξάρτημα του οποίου η αναμενόμενη μέτρηση ήταν 12.4mm, ο μέσος όρος των μετρήσεων ήταν 12.14mm με μία από τις μετρήσεις να είναι στα 12.01mm. Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα ότι κατά κανόνα οι

θηλυκές γεωμετρίες παρουσιάζουν μεγαλύτερα σφάλματα κατά την εκτύπωσή τους από τις αρσενικές.

3.2.10. Επισκόπηση όλων των μετρήσεων

Στις παρακάτω εικόνες παρατίθεται μία περίληψη της απόκλισης μεταξύ του μέσου όρου των μετρήσεων και των ονομαστικών όλων των δοκιμίων.

| AVERAGE  | AVERAGE MEASUREMENT DEVIATION |          |      |  |  |  |
|----------|-------------------------------|----------|------|--|--|--|
| Cylinder |                               |          |      |  |  |  |
| PLA      | Super                         | Standard | Low  |  |  |  |
| Male     | 0,04                          | 0,03     | 0,04 |  |  |  |
| Female   | 0,28                          | 0,24     | 0,39 |  |  |  |
| Cylinder |                               |          |      |  |  |  |
| PETG     | Super                         | Standard | Low  |  |  |  |
| Male     |                               | 0,07     |      |  |  |  |
| Female   |                               | 0,23     |      |  |  |  |

Εικόνα 3.21 Μέσος όρος αποκλίσεων μέτρησης για κυλίνδρους.

| AVERAGE ME<br>Square | ASUREMEN | T DEVIATION |      |   |
|----------------------|----------|-------------|------|---|
| PLA                  | Super    | Standard    | Lov  | N |
| Male                 |          |             | 0,08 |   |
| Female               |          |             | 0,22 |   |
| Square               |          |             |      |   |
| PETG                 | Super    | Standard    | Lov  | N |
| Male                 |          |             | 0,01 |   |
| Female               |          |             | 0,23 |   |

Εικόνα 3.22 Μέσος όρος αποκλίσεων μέτρησης για τετράγωνα

Για τα κυλινδρικά σχήματα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι ανεξαρτήτως ποιότητάς και υλικού, υπάρχουν μερικές αποκλίσεις μετρήσεων σχεδόν δέκα (10) φορές σε κάποιες περιπτώσεις μικρότερη από τα θηλυκά δοκίμια. Αυτό κατέστη κατανοητό κατά τη διάρκεια συλλογής των μετρήσεων. Βάση των προηγουμένων, παρουσιάζεται μία πραγματική απεικόνιση του σχήματος των δοκιμίων μετά την εκτύπωση όπως μπορεί να παρατηρηθεί στις παρακάτω εικόνες. Για να γίνουν τα παραπάνω πιο αντιπροσωπευτικά και κατανοητά, οι τιμές των θηλυκών δοκιμίων πολλαπλασιάστηκαν επί 40 και οι τιμές των αρσενικών επί 50. Συνεπώς κατέστη προφανές ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ του ιδανικού κυλίνδρου ο οποίος έχει σχεδιαστεί σε λογισμικό CAD και του εκτυπωμένου του οποίου η διατομή στην πραγματικότητα είναι εντελώς διαφορετική.



Εικόνα 3.23 Αναπαράσταση του αρσενικού τελικού δοκιμίου με CATIA V5 (μεγέθυνση x50)



Εικόνα 3.24 Αναπαράσταση του θηλυκού δοκιμίου με CATIA V5 (μεγέθυνση x40)

# 3.2.11. Συμπεράσματα

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έδωσαν μία σαφή εικόνα για τις διαφορές μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής τιμής των διαμέτρων των γεωμετριών που εκτυπώθηκαν. Για την εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων, είναι προφανές ότι είναι απαραίτητο να εκτυπωθεί μεγαλύτερο πλήθος δοκιμίων έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός μετρήσεων βάση του πρωτοκόλλου μετρήσεων. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει σαφές ότι ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να μπορεί δοθεί μια εκτίμηση των διαστημάτων ανοχής των διαφόρων δοκιμίων με διαφορετικά υλικά, με έναν τρόπο απλό και εύχρηστο, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν χρήστη τρισδιάστατου εκτυπωτή, ο οποίος ενδεχομένως να μην έχει γνώσει μηχανικού περί σφαλμάτων και ανοχών.

### 3.3. Μελέτη περίπτωσης

### 3.3.1. Στόχος της μελέτης

Ο στόχος αυτής της μελέτης περίπτωσης ήταν η δημιουργία ενός πολύπλοκου συναρμολογήματος, με πολλαπλές συναρμογές, που μπορεί να παραχθεί με τρισδιάστατη εκτύπωση και να αποτελεί ένα λειτουργικό κομμάτι ενός συστήματος. Για να γίνει αυτό, πρέπει να προσαρμοστούν όλες ονομαστικές διαστάσεις που αφορούν τους συνδέσμους του συναρμολογήματος (άξονες, οπές κ.λπ.) έτσι ώστε να αντισταθμιστούν τα σφάλματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για να μπορεί να γίνει αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα που εκτυπώθηκε όπως και προηγουμένως και το οποίο θα επιτρέψει την πρόβλεψη των σφαλμάτων και να την εφαρμογή τους στο αρχικό ηλεκτρονικό σχέδιο (CAD).

### 3.3.2. Σχεδιασμός Συστήματος

Σκοπός του συναρμολογήματος που θα σχεδιαστεί και θα εκτυπωθεί για την περίπτωση μελέτης είναι οι συμπερίληψη όσο το δυνατόν περισσότερων τύπων συναρμογών. Επιλέχθηκαν να προστεθούν η παρακάτω συναρμογές στο εξεταζόμενο δοκίμιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.25:

- έναν εντελώς ελεύθερο τροχό
- μία σφιχτά συναρμοσμένη «πινέζα»
- μια ελεύθερη σφαιρική άρθρωση
- έναν άξονας με χαλαρή συναρμογή (αυτό σημαίνει σφιγμένο αλλά τοποθετημένο στο χέρι)
- τρία εξάγωνα με πολύ σφιχτή συναρμογή (τοποθετημένα με σφυρί)



Εικόνα 3.25 Εξεταζόμενο Δοκίμιο Μελέτης

Τα τρία εξαγωνικά πρίσματα συνεισφέρουν στην πολυπλοκότητα του δοκιμίου, αφού πλέον δεν έχουμε μόνο απλές κυκλικές διατομές. Επίσης επιτρέπει την πρόβλεψη των γεωμετρικών ανοχών της θέσης κάθε οπής. Οι άλλες συναρμογές λειτουργούν αυτόνομα και έτσι επιτρέπουν να δοκιμαστούν οι γεωμετρικές ανοχές του σχήματος σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Ακόμη, με αυτούς τους τύπους συνδέσμων μπορούν να δοκιμαστούν 3 διαφορετικές συναρμογές: ελεύθερες, ενδιάμεσες και σφικτές.

# 3.3.3. Δοκίμιο πρόβλεψης και αντιστάθμιση.

Για να προβλεφθούν οι αντισταθμίσεις που πρέπει να γίνουν σε κάθε συναρμογή, εκτυπώθηκε ένα δοκιμαστικό δοκίμιο της τρίτης γενιάς, που έχει δύο είδη σχημάτων, ένα κυκλικής και ένα τετραγωνικής διατομής. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από ένα αρσενικό δοκίμιο, με έναν κύλινδρο διαμέτρου 10mm και ένα πρίσμα τετραγωνικής διατομής πλευράς 10mm. Εκτυπώθηκε επίσης ένα θηλυκό δοκίμιο με πολλαπλές κυλινδρικές και τετραγωνικές οπές, με διακύμανση των ονομαστικών διαστάσεων από +0,15 mm έως +0,4 mm. Αυτό το δείγμα επιτρέπει επίσης να δοκιμαστεί η γεωμετρική ανοχή της θέσης όπως έχει μελετηθεί και σε προηγούμενο σημείο του κεφαλαίου.



Εικόνα 3.26 Δοκιμαστικό Δοκίμιο πρόβλεψης

Μετά τις εκτυπώσεις, δοκιμάστηκε το αρσενικό δοκίμιο σε όλες τις πιθανές θέσεις και σημειώθηκαν τα αποτελέσματα βάση του είδους της συναρμογής. Αφού έγινε η καταγραφή για το δοκιμαστικό δοκίμιο αντισταθμίστηκαν οι διαστάσεις του εξεταζόμενου δοκιμίου με γνώμονα τις προδιαγραφές που τέθηκαν στην αρχή της μελέτης.



Εικόνα 3.27 Δοκίμιο Μελέτης προ Συναρμολόγησης

Οι αλλαγές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω :

- Για τον εντελώς ελεύθερο τροχό: +0,5mm στην ονομαστική εσωτερική διάμετρο του τροχού.
- Για την πινέζα: +0,2 mm στην ονομαστική διάμετρο της οπής του άξονα.
- Για την ελεύθερη σφαιρική άρθρωση: +0,5mm στην ονομαστική εσωτερική διάμετρο του κελύφους.
- Για τον άξονα με χαλαρή συναρμογή: +0,4 mm στην ονομαστική διάσταση του διακένου που υπάρχει στο κέλυφος. (+0.2mm από κάθε μεριά)
- Για καθένα από τα τρία εξάγωνα: +0,3 mm στην ονομαστική των οπών του κελύφους.



Εικόνα 3.28 Τελικό συναρμολογημένο εξεταζόμενο δοκίμιο

#### 3.3.4. Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Μετά την εκτύπωση του συστήματος, πραγματοποιήθηκαν κάποιες δοκιμές για τη σύγκριση των επιθυμητών συναρμογών με αυτές που προέκυψαν μετά την εκτύπωση. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι το σύστημα είναι πλήρως λειτουργικό και συμμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό με τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί, με τις περισσότερες συναρμογές να λειτουργούν σωστά.

Αποτίμηση των συναρμογών:

- Ο ελεύθερος τροχός γυρίζει ομαλά, καθώς επίσης και ο ελεύθερος σφαιρικός σύνδεσμος με μικρά «μαγκώματα» που προέρχονται από το μη ιδανικό «σφαιρικό» πραγματικό σχήμα που εκτυπώθηκε.
- Ο σφιγμένος πείρος και τα τρία εξάγωνα έχουν τοποθετηθεί με ένα σφυρί και είναι πλέον εξαιρετικά σταθερά και αδύνατο να αφαιρεθούν χωρίς να σπάσει το σύστημα.
- Υπάρχει ένα πρόβλημα στον άξονα χαλαρής συναρμογής που υποτίθεται ότι συγκρατεί τη θέση του τροχού. Στη συνολική περιστροφή στις 90° του άξονα, είναι σαν ήταν επιθυμητό να ρυθμίζεται στις πρώτες 45°, αλλά για τις επόμενες 45° να είναι εντελώς ελεύθερος και να μην συγκρατείται από πουθενά.

Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να οφείλεται σε βλάβη στην εκτύπωση του περιβλήματος. Οι επιφάνειες των δύο κομματιών μπορεί να είναι κάπως λυγισμένες όπως συνέβη μερικές φορές με τους τρισδιάστατους εκτυπωτές (φαινόμενο που ονομάζεται στρέβλωση). Αυτό σημαίνει ότι το τμήμα της θηλυκής διαμέτρου του συνδέσμου δεν είναι όπως είχε σχεδιαστεί αλλά είναι μεγαλύτερο και επομένως θα ήταν καλύτερη πρόβλεψη η τιμή +0,1mm για την συγκεκριμένη διάσταση, αλλά η μορφοποίηση που πραγματοποιήθηκε είναι αρκετή για να γίνει ο σύνδεσμος εντελώς ελεύθερος. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η μισή περιστροφή είναι καλά τυπωμένη και λειτουργική. Συμπερασματικά, αυτή η μελέτη περίπτωσης επιτρέπει να επικυρωθεί η χρήση αυτού του τύπου δοκιμαστικών δοκιμίων, τα οποία είναι ικανά για να εκτιμήσουν την αντιστάθμιση για την επίτευξη συναρμογών σε ένα συναρμολόγημα εκτυπωμένο από τρισδιάστατο εκτυπωτή.

#### 3.3.5. Μηχανή Stirling

Η παραπάνω πειραματική διαδικασία καθώς και οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα αυτής, αποτέλεσαν πολύτιμο εργαλείο για μια μελέτη αντιστρόφου σχεδιασμού που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Ταχείας Πρωτοτυποποίησης και Αντίστροφου Σχεδιασμού. Ο στόχος αυτού ήταν να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο μοντέλο μιας μηχανής Stirling. Η μηχανή αυτή αποτελείται από πολλά εξαρτήματα που ποικίλλουν σε μέγεθος. Όλα τα εξαρτήματα μετρήθηκαν, σχεδιάστηκαν, και εκτυπώθηκαν. Όπως έγινε προφανές από την παραπάνω διαδικασία οι τελικές διαστάσεις μετά το πέρας της εκτύπωσης διαφέρουν από τις ονομαστικές. Για τον λόγο αυτό όλα τα κομμάτια της μηχανής χρειάστηκε να τροποποιηθούν για να μπορούν να συνεργαστούν και να συνθέσουν την μηχανή. Από την μελέτη κάθε συναρμογής και την αντίστοιχη τροποποίηση των συνεργαζόμενων εξαρτημάτων κάθε φορά, με την χρήση των διαγνωστικών δοκιμίων, δημιουργήθηκε το επιθυμητό μοντέλο της μηχανής.



Εικόνα 3.29 Αρχικό Μοντέλο & Σχέδια μηχανής Stirling



Εικόνα 3.30 Εκτυπωμένο Μοντέλο Μηχανής Stirling

# 4. Προσδιορισμός σφάλματος μορφής εκτυπωτών

### 4.1. Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε η ανάπτυξη και ο σχεδιασμός διαφόρων δοκιμίων με σκοπό την εκτίμηση του συγκεντρωτικού σφάλματος ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αντιστάθμισης που χρειάζεται να γίνει από τον χρήστη στις ονομαστικές διαστάσεις των εξαρτημάτων που πρόκειται να εκτυπωθούν έτσι ώστε να επιτυγχάνονται επιθυμητά επίπεδα συναρμογών. Στο παρών Κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια διαφορετική φιλοσοφία δοκιμίου που σκοπό έχει, όχι την αδρή εκτίμηση του συγκεντρωτικού σφάλματος της διαδικασίας εκτύπωσης, αλλά τον ακριβή προσδιορισμό των σφαλμάτων μορφής δοκιμίων συγκεκριμένου σχήματος. Τα δοκίμια που εξετάζονται είναι κύλινδροι.

Η διαδικασία προσδιορισμού του σφάλματος μορφής των κυλίνδρων απαιτείται να είναι εύκολη, απλή και γρήγορη έτσι ώστε ο μέσος χρήστης να μπορεί να αποκτήσει μια αξιόπιστη εικόνα για τα σφάλματα μορφής που παρουσιάζονται στον τρισδιάστατο εκτυπωτή που διαθέτει. Ο χρηστής θα εκτυπώνει από τον ίδιο εκτυπωτή και το κυλινδρικό δοκίμιο αλλά και την μετρητική διάταξη στην οποία εκείνος θα μετρηθεί. Με αυτήν την οπτική, η διαδικασία που θα παρουσιαστεί παρακάτω αποτελεί μία μέθοδο αυτοελέγχου της ακρίβειας του τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Ο κύλινδρος που εκτυπώνεται από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή δεν έχει την ονομαστική του μορφή, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα Κεφάλαια, αλλά εμπεριέχει σφάλματα μορφής που αλλοιώνουν τη γεωμετρία και το σχήμα του. Τα σφάλματα έχουν ως αποτέλεσμα, το κυλινδρικό δοκίμιο να έχει διαφορετική φαινόμενη διάμετρο ανάλογα με τον προσανατολισμό και το ύψος που αυτή μετράται. Σε ένα δοκίμιο, αν για παράδειγμα πραγματοποιηθούν 4 μετρήσεις διαμέτρων σε 4 διαφορετικές γωνίες περιστροφής του κυλίνδρου και σε 4 διαφορετικά ύψη, τότε η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή ανάμεσα στις 16 μετρήσεις θα είναι το συνολικό σφάλμα μορφής που θα έχει το δοκίμιο.

Για να μετρηθούν αυτές οι διάμετροι χρειάζεται κάποιο μετρητικό όργανό που μπορεί τόσο απλό όσο ένα παχύμετρο ή τόσο σύνθετο όσο μια CMM. Σε κάθε περίπτωση, το μετρητικό αυτό όργανο θα πρέπει να είναι στη διάθεση του χρήστη ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτόν με ευκολία και αξιοπιστία, προκειμένου οι μετρήσεις να έχουν νόημα. Στην προσπάθεια αναζήτησης ενός μοντέλου που θα μπορούσε να έχει την δυνατότητα να αναδεικνύει τις μεταβολές που εμφανίζονται στην επιφάνια ενός κυλίνδρου, προτάθηκε η μελέτη ενός συναρμολογήματος αποτελούμενο από τρία κομμάτια όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 Σχέδιο Μετρητικής Διάταξης

Η αρχή λειτουργίας αυτής τις διάταξης βασίζεται στο γεγονός ότι ανάλογα με τον προσανατολισμό που θα τοποθετηθεί το κυλινδρικό κομμάτι θα μεταβάλετε και το πόσο θα βυθίζεται στο ενδιάμεσο κομμάτι, λόγω της αλλαγής της φαινόμενης διαμέτρου σε κάθε θέση. Κατά συνέπεια επηρεάζεται η βύθιση του συσσωματώματος, των δύο εσωτερικών κομματιών, ως προς το εξωτερικό τεμάχιο.

Τα τραπεζοειδή τεμάχια λειτουργούν ως πολλαπλασιαστές των σφαλμάτων που εμφανίζονται στην επιφάνια του κυλίνδρου. Η διάταξη αυτή επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από της κλίσεις που έχουν στο εσωτερικό τους τα τραπεζοειδή τεμάχια. Όσο πιο απότομη είναι η κλίση αυτή τόσο πιο ευαίσθητο καθίσταται το συναρμολόγημα, αφού οι συντελεστές που υπολογίζονται, από την γεωμετρία της διάταξης αυξάνονται όσο μικραίνουν οι γωνίες των κεκλιμένων εσωτερικών επιφανειών. Με αυτό τον τρόπο μπορεί μια απόκλιση της διαμέτρου του δοκιμίου της τάξης του 0.1mm, να οδηγήσει σε μια κατακόρυφη κίνηση του συστήματος του κυλίνδρου και του ενδιάμεσου δοκιμίου της τάξης των 10mm.

### 4.2. Μαθηματικό Μοντέλο Υπολογισμών

Για να μπορεί να υπολογιστούν οι μεταβολές της επιφανείας χρειάζεται να δημιουργηθεί το μαθηματικό μοντέλο που θα επιτρέπει των υπολογισμό των διαμέτρων που εμφανίζονται καθώς περιστρέφεται ο κύλινδρος μέσα στην διάταξη.

#### Διπλωματική Εργασία - Καραγιάννης Κωνσταντίνος



Εικόνα 4.2 Σχέδιο Διάταξης με Όλες τις Διαστάσεις

Αρχικά ο κύκλος που υπολογίζετε από το μοντέλο αυτό ορίζεται από τα τρία σημεία επαφής με τις κεκλιμένες επιφανείς. Στους παρακάτω μαθηματικούς τύπους υπάρχουν σταθερές και μεταβαλλόμενες διαστάσεις τα οποία διαχωρίζονται με ευκρίνεια στον παρακάτω:

- Σταθερές Διαστάσεις: Ι<sub>1</sub>, Ι<sub>4</sub>, Ι<sub>5</sub>, Ι<sub>7</sub>, φ<sub>1</sub>, φ<sub>2</sub>
- Δευτερεύουσες Διαστάσεις: l<sub>2</sub>, l<sub>3</sub>, l<sub>6</sub>, l<sub>8</sub>, p<sub>1max</sub>, p<sub>1min</sub>, p<sub>2max</sub>, p<sub>2min</sub>
- Μεταβαλλόμενες Διαστάσεις: D, r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>, b, b<sub>1</sub>, h<sub>oλ</sub>, h, h<sub>3</sub>

Οι Σταθερές και οι Δευτερεύουσες διαστάσεις μετρούνται μία φορά και ισχύουν για όλη την διαδικασία. Η διαδικασία των μετρήσεων θα αναλυθεί σε παρακάτω κεφάλαιο. Στο τρέχον κεφάλαιο αξίζει να αναφερθεί μόνο ο τρόπος υπολογισμού των γωνιών (φ<sub>1</sub>,φ<sub>2</sub>), επειδή προκύπτουν από τις δευτερεύουσες διαστάσεις.

Με την βοήθεια της τριγωνομετρίας προκύπτει ότι για να υπολογιστούν οι γωνίες των κεκλιμένων επιφανειών θα χρειαστεί μόνο το μήκος της εμπλεκόμενης ευθείας, υποτείνουσα του νοητού ορθογωνίου τριγώνου, και της διαφοράς των διαστάσεων (p<sub>max</sub>, p<sub>min</sub>), ως απέναντι κάθετη πλευρά. Με όμοιο τρόπο αντιμετωπίζονται και οι δύο γωνίες. Στις Εξισώσεις 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται οι γωνίες με τους κατάλληλες πλευρές που τους αντιστοιχούν.

$$\tan \varphi_1 = \frac{p_{1max} - p_{1max}}{l_3} \Rightarrow \varphi_1 = \arctan\left(\frac{p_{1max} - p_{1max}}{l_3}\right)$$
(4.1)

$$\tan \varphi_2 = \frac{p_{2max} - p_{2max}}{l_8} \Rightarrow \varphi_2 = \arctan\left(\frac{p_{2max} - p_{2max}}{l_8}\right) \tag{4.2}$$

Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται η διάταξη με τις διαστάσεις του είναι αναγκαίες για την εύρεση της διαμέτρου (D) του κυλίνδρου.



Εικόνα 4.3 Σχέδιο Διάταξης με Απαραίτητες Διαστάσεις

Η αρχή των υπολογισμών γίνεται οι αποστάσεις ( $r_1$ ,  $r_2$ ) από το κέντρο της κυκλικής διατομής έως τις χορδές που ορίζουν οι οριζόντιες ευθείες που τέμνουν τον κύκλο στο σημείο επαφής του με τις κεκλιμένες ευθείες:

$$r_1 = \frac{D}{2}\sin\varphi_1 \tag{4.3}$$

$$r_2 = \frac{D}{2}\cos\varphi_2 \tag{4.4}$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η κάθετη απόσταση (h) από την εσωτερική βάση ( $l_5$ ) έως τα σημεία επαφής, με το μεσαίο κομμάτι:

$$\tan \varphi_1 = \frac{\frac{D}{2}\cos\varphi_1 - \frac{l_5}{2}}{h} \Rightarrow h = D\left(\frac{\cos\varphi_1}{2\tan\varphi_1}\right) - \left(\frac{l_5}{2\tan\varphi_1}\right)$$
(4.5)

Ορίζεται ο συντελεστής σ1:

$$\sigma_1 = \left(\frac{\cos\varphi_1}{2\,\tan\varphi_1}\right) \tag{4.6}$$

Επομένως μπορεί να υπολογιστεί η μεγάλη βάση (*h\_oλ*) του τραπέζιου που ορίζεται από το άνω σημείο επαφής, την κάθετη ευθεία και το εσωτερικό του εξωτερικού κομματιού:

$$h_{o\lambda} = l_4 + h + r_1 + r_2 = \left(l_4 - \frac{l_5}{2\tan\varphi_1}\right) + D\left(\sigma_1 + \frac{\sin\varphi_1}{2} + \frac{\cos\varphi_2}{2}\right)$$
(4.7)

Ορίζεται ο συντελεστής σ<sub>2</sub>:

$$\sigma_2 = \left(\sigma_1 + \frac{\sin\varphi_1}{2} + \frac{\cos\varphi_2}{2}\right) \tag{4.8}$$

Οπότε το υπάρχει η δυνατότητα να βρεθεί η απόσταση (h\_3) των δύο βάσεων του μεγάλου τραπεζίου:

$$h_{3} = \frac{h_{o\lambda} - l_{7}}{\tan \varphi_{2}} = \left(\frac{l_{4} - \frac{l_{5}}{2\tan \varphi_{1}} - l_{7}}{\tan \varphi_{2}}\right) + D\left(\frac{\sigma_{2}}{\tan \varphi_{2}}\right)$$
(4.9)

Ορίζεται ο συντελεστής σ<sub>3</sub>:

$$\sigma_3 = \left(\frac{\sigma_2}{\tan \varphi_2}\right) \tag{4.10}$$

Έτσι λοιπόν υπολογίζεται το βύθισμα (b), η απόσταση από την μικρή βάση του μεγάλου τραπεζίου έως την εξωτερική κάθετη επιφάνια του μεσαίου κομματιού:

$$b = h_3 + \frac{D}{2}\sin\varphi_2 + \frac{l_1}{2} = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{l_4 - \frac{l_5}{2\tan\varphi_1} - l_7}{\tan\varphi_2}\right) + D\left(\sigma_3 + \frac{\sin\varphi_2}{2}\right)$$
(4.11)

Ορίζεται ο συντελεστής σ4:

$$\sigma = \left(\sigma_3 + \frac{\sin \varphi_2}{2}\right) \tag{4.12}$$

Αν είναι γνωστή η διάμετρος (D) του κυλίνδρου αυτό είναι το τελευταίο βήμα. Στην περίπτωση του παρόντος κεφαλαίου ο υπολογισμός της διαμέτρου είναι το ζητούμενο. Επομένως ο τελευταία Εξίσωση λύνεται ως προς την διάμετρο (D) και προκύπτει ο τελική Εξίσωση 4.14 που από το βύθισμα επιτρέπει τον κατευθείαν υπολογισμό της. Αυτό οφείλεται στο ότι σε αυτόν τον τύπο εμφανίζονται μόνο οι σταθερές διαστάσεις και οι συντελεστές που έχουν οριστεί που, επίσης, δεν μεταβάλλονται. Εκτός από το (b) που προκύπτει από το (b\_1) από την Εξίσωση 4.13. Το (b\_1) είναι το μετρούμενο μέγεθος.

$$b = b_1 + l_1 \tag{4.13}$$

$$D = \frac{b - \left(\frac{l_1}{2} + \frac{l_4 - \frac{l_5}{2\tan\varphi_1} - l_7}{\tan\varphi_2}\right)}{\sigma}$$
(4.14)

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και την αποφυγή λαθών δημιουργήθηκες ένας έλεγχος. Σε αυτόν συγκρίνονται οι διαφορές των τιμών των μεταβαλλόμενων διαστάσεων, καθώς αλλάζει η διάμετρος, τόσο με την άμεση αφαίρεση όσο και με τον αλγεβρικό υπολογισμό τους από τους συντελεστές, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

| Έλεγχος Διαφορών      | Άμεση Αφαίρεση                      | Διαφορά με Συντελεστές    |
|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| δb                    | $b-\acute{b}$                       | _                         |
| δD                    | D - D                               | $\frac{\delta b}{\sigma}$ |
| δh                    | $h-\hat{h}$                         | $\delta D * \sigma_1$     |
| $\delta h_{o\lambda}$ | $h_{o\lambda} - \dot{h_{o\lambda}}$ | $\delta D * \sigma_2$     |
| $\delta h_3$          | $h_3 - \dot{h_3}$                   | $\delta D * \sigma_3$     |

Πίνακας 4.1 Έλεγχος Διαφορών

# 4.3. Πρώτη & Δεύτερη Γενιά Διάταξης

Αφού ο βασικός σχεδιασμός της διάταξης έχει γίνει και η μαθηματική μοντελοποίηση έχει ολοκληρωθεί, στα παρακάτω Κεφάλαια παρουσιάζονται οι διάφορες γενιές δοκιμίων που αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν για την πρακτική υλοποίηση της μετρητικής διάταξης. Στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται οι βασικές παράμετροι των εκτυπώσεων που αφορούν όλες τις γενιές των δοκιμίων για το παρών κεφάλαιο.

| Παράμετροι εκτυπώσεις |   |  |  |
|-----------------------|---|--|--|
| Ποιότητα              | Κανονική (0.20mm πάχος στρώσης, 20% γέμιση) |  |  |
| Θερμοκρασία πλάκας    | 65°C  |  |  |
| Θερμοκρασία μύτης     | 200 °C                                      |  |  |
| Υλικό                 | ΡLΑ (κόκκινο)                               |  |  |

Πίνακας 4.2 Παράμετροι εκτυπώσεις

#### 4.3.1. Πρώτη Γενιά

Η πρώτη εκδοχή της μετρητικής διάταξης σχεδιάστηκε προκειμένου να αποδειχθεί ότι οι υποθέσεις και οι προσδοκίες που υπήρχαν κατά την επινόηση της διάταξης αντανακλούσαν στην πραγματικότητα (proof of concept). Στο κυλινδρικό κομμάτι την επάνω διατομή εμφανίζονται μικρές εγκοπές περιμετρικά της διαμέτρου. Αυτές λειτουργούν ως δεδομένες θέσεις προσανατολισμού για τις μετρήσεις που έπονται (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4 Σχέδιο Διάταξης Πρώτη Γενιά

Για την εκτύπωση των παραπάνω κομματιών χρειάστηκαν περίπου οκτώ ώρες, για τις παραμέτρους του έχουν επιλεγεί (Πίνακας 4.2).



Εικόνα 4.5 Προσομοίωση Εκτυπώσεις Διάταξης Πρώτης Γενιάς

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.6 της εκτυπωμένης διάταξης, παρατηρούνται έντονες ανωμαλίες την επιφάνια του κυλίνδρου. Η αιτία που πιθανόν ευθύνεται για αυτές τις παραμορφώσεις είναι οι εγκοπές που είχαν σχεδιαστεί, αν και στην προσομοίωση του προγράμματος (CURA Ultimaker) δεν φαινόταν να δημιουργούν κάποιο πρόβλημα. Παρόλα αυτά όταν επανατυπώθηκε ο κύλινδρος χωρίς τις εγκοπές δεν υπήρξε κάποιο μη αναμενόμενο σφάλμα. Άλλο ένα πρόβλημα που παρατηρήθηκε ήταν το μεγάλο πάχος των δοκιμίων. Ως αποτέλεσμα ήταν ο κύλινδρος να παρουσιάζει μια κλίση στον άξονά του κατά την τοποθέτηση του στην διάταξη. Επιπροσθέτως σε αυτήν την περίπτωση παρατηρήθηκαν κάποια σφάλματα που αφορούν των σχεδιασμό και ιδιαίτερα την επιλογή των διαστάσεων. Το κυριότερο από αυτά είναι ότι το συσσωμάτωμα του κυλίνδρου και του μεσαίου κομματιού δεν βυθίζετε αρκετά στο μεγάλο κομμάτι, επειδή τα σφάλματα που προέκυψαν ήταν μεγαλύτερα από τα αναμενόμενα. Με αυτόν τον τρόπο η διάταξη δεν έχει μεγάλο μετρητικό εύρος.



Εικόνα 4.6 Εκτυπωμένη Διάταξης Πρώτης Γενιάς

#### 4.3.2. Δεύτερη Γενιά

Στην προσπάθεια βελτίωσης της διάταξης ελαττώθηκε το πάχος των δοκιμίων στο μισό και ο κύλινδρος απλοποιήθηκε. Ακόμη η μικρή διάσταση του μεσαίου κομματιού αυξήθηκε ελάχιστα κατά 0,15mm (31,55 mm) σε σύγκριση με το δοκίμιο πρώτης γενιάς (31,40mm). Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκε η δεύτερη γενιά της διάταξης που φαίνεται στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.7 Σχέδιο Διάταξης, Δεύτερη Γενιά

Όπως παρατηρείται από την Εικόνα 4.7 η σύγκριση των δύο γενεών των δοκιμίων, οι μικρές μεταβολές των διαστάσεων επηρεάζουν σημαντικά το μετρητικό εύρος της διάταξης.



Εικόνα 4.8 Σύγκριση Πεώτης - Δέυτερης Γενιάς



Εικόνα 4.9 Προσομοίωση Εκτυπώσεις Διάταξης Δεύτερης Γενιάς

Αφού εκτυπώθηκε η διάταξη, σε σημαντικά μειωμένο χρόνο (τέσσερεις ώρες και είκοσι λεπτά) δεν παρατηρήθηκαν απρόοπτες παραμορφώσεις. Επομένως πλέον υπάρχει μια δομή η όποια είναι λειτουργική και έτοιμη για περεταίρω δοκιμές (Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10 Εκτυπωμένη Διάταξης Δεύτερης Γενιάς

# 4.4. Τρίτη Γενιά Διάταξης

Περνώντας στην τρίτη γενιά δοκιμίων οι αλλαγές δεν είναι μεγάλες. Το μόνο χαρακτηριστικό στο οποίο διαφέρει με την προηγούμενη γενιά είναι το μήκος που έχει ο κύλινδρος. Η αλλαγή αυτή έγινε με σκοπό την μεγαλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων. Κατά τα πρώτα στάδια της εκτύπωσης, στην βάση των δοκιμίων δημιουργείτε ένα στρώμα από υλικό που μετά αφαιρείται. Αυτό επίσης επηρεάζει και τα αρχικά στρώματα της εκτύπωσης με συνέπια να εμφανίζεται μια δομή σαν βάση που δεν είναι επιθυμητή. Θέλοντας να αφαιρεθεί με ασφάλεια το επιπλέον υλικό χωρίς να υπάρχει η πιθανότητα να καταστραφεί το εργαζόμενο μέρος του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε η προαναφερθείσα αύξηση της διάστασης του ύψους (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11 Σχέδιο Διάταξης, Τρίτη Γενιά

Προκειμένου να μπορεί να επιβεβαιωθεί και στατιστικα η ακρίβεια προσδιορισμού των σφαλμάτων μορφής από την μετρητική διάταξη εκτυπώθηκε ένα σύνολο είκοσι κυλινδρικών τεμαχίων, καθώς επίσης εκ νέου εκτυπώθηκαν από μία φορά τα τραπεζοειδή δοκίμια. Οι μετρήσεις αυτών θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 4.6.1. Η επανατύπωση πραγματοποιήθηκε με το σκεπτικό να υπάρχει, κατά το δυνατόν, ομοιογένεια στην ομάδα των δοκιμίων λόγω των επερχόμενων μετρήσεων.



Εικόνα 4.12 Εκτυπωμένη Διάταξης Τρήτης Γενιάς

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που παρατηρήθηκε και χρίζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η παραμόρφωση. Αυτό επηρεάζει την διάταξη ως προς τη συναρμογή των δοκιμίων, δηλαδή τα κομμάτια δεν πρέπει να πιεστούν απλά να εφάπτονται χωρίς να ασκούνται ισχυρές δυνάμεις. Λόγο του υλικού των δοκιμίων (PLA) είναι πολύ εύκολο να παραμορφωθούν και να δώσουν λανθασμένες μετρήσεις που δεν θα αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές τιμές. ΤΟ κύριο πρόβλημα που μπορεί, δηλαδή, να προκύψει είναι η επιπλέον βύθιση του κυλίνδρου λόγω της ελαστικότητας των εξαρτημάτων. Οπότε με το υπάρχον πρέπει να υπάρχει μεγάλη προσοχή για να μπορεί να επιτευχθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

### 4.5. Τέταρτη Γενιά Διάταξης

Η τελευταία βελτίωση που επιδέχτηκε η διάταξη αφορούσε την ενίσχυση του εξωτερικού τεμαχίου, καθώς επίσης και του μεσαίου, με της προσθήκη ενιαίας επιφάνειας στο κάτω μέρος του, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.13. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγετε σημαντικά η στρέβλωση και η παραμόρφωση αφού πλέον υποστηρίζονται στο κάτω μέρος λόγω της επιφάνειας που έχει προστεθεί. Επιπλέων η διάσταση της κάθετης πλευράς μειώθηκε αφού κρίθηκε ότι δεν είναι εκμεταλλεύσιμη σε όλο το μήκος της.



Εικόνα 4.13 Σχέδιο Διάταξης, Τέταρτη Γενιά

Όπως έγινε και με την τρίτη γενιά, έτσι και στην τέταρτη εκτυπώθηκαν είκοσι δοκίμια για να υπάρχει ικανό πλίθος μετρήσεων. Ο χρόνος εκτύπωσης μόνο για τα τραπεζοειδή τεμάχια ήταν πέντε ώρες και τριάντα λεπτά.



Εικόνα 4.14 Προσομοίωση Εκτυπώσεις Διάταξης Τέταρτης Γενιάς

Εφόσον υπάρχει μια αρκετά καλή εκδοχή της διάταξης έπρεπε να εξακριβωθεί αν οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι ακριβείς. Έτσι έγιναν μετρήσεις στης CMM με σκοπό την σύγκριση των δύο μετρητικών μεθόδων.



Εικόνα 4.15 Μετρήσεις Δοκιμίων CMM

Τα εκτυπωμένα κυλινδρικά δοκίμια εμφάνιζαν μικρά εξογκώματα σε συγκεκριμένο σημείο της περιφέρειας της κυκλικής διατομής (Εικόνα 4.16). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάστηκε στην πλειονότητα των τεμαχίων. Παρόλο που για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν πρέπει να γίνει καμία επέμβαση στα δοκίμια αφού μετρήθηκαν, μερικά από αυτά λειάνθηκαν τοπικά με γυαλόχαρτο και στην συνέχεια ξαναμετρήθηκαν.



Εικόνα 4.16 Δυσμορφίες Επιφανίας - Τέταρτη Γενιά

Αξίζει να σημειωθεί ότι η CMM μέτρησε δέκα σημεία περιμετρικά σε κάθε κύλινδρο σε τρία διαφορετικά ύψη. Ως εκ τούτου παρατηρήθηκε ότι δεν αντιλαμβανόταν όλες τις ανωμαλίες στην επιφάνια των δοκιμίων. Σε αντίθεση με την διάταξη στην οποία υπάρχει η δυνατότητα ο παρατηρητής να διακρίνει που υπάρχουν δυσμορφίες και να μπορούν να μετρηθούν.

### 4.6. Μετρήσεις - Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, για την τρίτη και τέταρτη γενιά δοκιμίων, θα παρουσιαστούν στα παρακάτω υποκεφάλαια. Ακόμη οι σταθερές διαστάσεις των δοκιμίων μετρήθηκαν με παχύμετρο σε διάφορα ύψη και στην συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος, όπου αποτέλεσε και το τελικό αποτέλεσμα για την κάθε διάσταση.

### 4.6.1. Μετρήσεις τρίτης Γενιάς

Αρχικά η τρίτη γενιά εκτυπώθηκε στον εκτυπωτή Ender 3 Pro printer. Οι υπόλοιπες συνθήκες της εκτυπώσεις προαναφέρονται στον Πίνακα 4.2. Οι κύριες σταθερές διαστάσεις, όπως μετρήθηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες ονομαστικές που προκύπτουν από το αρχικό ηλεκτρονικό σχέδιο.

| Διαστάσεις           | Ονομαστικές | Πραγματικές |  |  |
|----------------------|-------------|-------------|--|--|
| φ₁ (deg)             | 3           | 2,66        |  |  |
| φ1 (rad)             | 0,052       | 0,046       |  |  |
| φ₂ (deg)             | 3           | 2,96        |  |  |
| φ <sub>2</sub> (rad) | 0,052       | 0,052       |  |  |
| I <sub>1</sub>       | 31,55       | 31,5        |  |  |
| I <sub>4</sub>       | 10          | 10,18       |  |  |
| I <sub>5</sub>       | 10,52       | 10,66       |  |  |
| <sub>7</sub>         | 58,55       | 58,15       |  |  |

Πίνακας 4.3 Σταθερές Διαστάσεις - Τρίτη Γενιά

Παρακάτω υπολογίζονται οι συντελεστές που προκύπτουν από τις γωνίες που βρέθηκαν όπως και επίσης οι αντίστοιχοι που αναμένονταν από τα ονοματικά μεγέθη (Πίνακας 4.4).

| Συντελεστές    | Ονομαστικοί | Πραγματικοί |
|----------------|-------------|-------------|
| σ1             | 9,53        | 10,75       |
| σ <sub>2</sub> | 10,05       | 11,28       |
| σ3             | 191,82      | 217,84      |
| σ              | 191,85      | 217,87      |

Πίνακας 4.4 Συντελεστές Πολλαπλασιασμού του σφάλματος - Τρίτη Γενιά

Από τους συντελεστές προκύπτει ο πολλαπλασιασμός του σφάλματος που είναι περίπου διακόσες φορές μεγαλύτερος σε σχέση με το πραγματικό. Η διαφορά σε σχέση με τους ονομαστικούς οφείλεται στο γεγονός ότι οι πραγματικές γωνίες είναι μικρότερες από τις ονομαστικές. Στην συνέχεια ορίστηκαν πέντε θέσεις που αποτελούν τους προσανατολισμούς για τους οποίους λήφθηκαν οι μετρήσεις. Στον παρακάτω Πίνακα 4.5 παρουσιάζετε ενδεικτικά ένας από τους κυλίνδρους με όλες της μετρήσεις που τον αφορούν. Ο αντίστοιχος πίνακας για τους υπολοίπους κυλίνδρους παρατίθεται στο Παράρτημα.

| #2  | b'    | δb    | D'    | δD   | h'    | δh   | <b>r</b> 1' | <b>r</b> <sub>2</sub> ' | h <sub>oλ</sub> ' | $\delta h_{o\lambda}$ | h₃'   | δh₃   |
|---|-------|-------|-------|------|-------|------|-------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|-------|-------|
| <b>b</b> 1                                      | 54,50 | 13,00 | 14,60 | 0,06 | 42,32 | 0,64 | 0,34        | 7,29                    | 60,13             | 0,67                  | 38,37 | 13,00 |
| b <sub>2</sub>                                  | 67,50 | 0,00  | 14,66 | 0,00 | 42,96 | 0,00 | 0,34        | 7,32                    | 60,81             | 0,00                  | 51,37 | 0,00  |
| b₃  | 45,50 | 22,00 | 14,56 | 0,10 | 41,87 | 1,09 | 0,34        | 7,27                    | 59,67             | 1,14                  | 29,38 | 22,00 |
| $b_4$   | 63,50 | 4,00  | 14,65 | 0,02 | 42,76 | 0,20 | 0,34        | 7,31                    | 60,60             | 0,21                  | 47,37 | 4,00  |
| b₅  | 59,50 | 8,00  | 14,63 | 0,04 | 42,57 | 0,39 | 0,34        | 7,30                    | 60,39             | 0,41                  | 43,37 | 8,00  |
| Πίνακας 4.5 Μετοάσεις κυλίνδοου #2. Τοίτη Γενιά |       |       |       |      |       |      |             |                         |                   |                       |       |       |

Πίνακας 4.5 Μετρήσεις κυλίνδρου #2 - Τρίτη Γενιά

Στο πάνω μέρος του Πίνακα 4.5 αναγράφονται όλα τα μεταβλητά μεγέθη. Στα πεδία με ελληνικό δ, πριν από το σύμβολο της διάστασης που αντιστοιχεί, οι τιμές συγκρίνονται, αφαιρούνται, με την μέγιστη τιμή που μετρήθηκε για κάθε δοκίμιο. Στον κάθετο άξονα παρουσιάζονται οι διαφορετικοί προσανατολισμοί κατά σειρά μέτρησης. Όμοιος πίνακας υπάρχει για κάθε δοκίμιο.

Από τις μετρήσεις αυτές υπολογίστηκε το σφάλμα μορφής για κάθε δοκίμιο, το οποίο έτσι όπως μετράται και όπως περιγράφηκε παραπάνω αντιστοιχεί στο σφάλμα κυλινδρικότητας για κάθε κύλινδρο. Τα αποτελέσματα για τα παραπάνω παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6. Ακόμη, στον ίδιο πίνακα φαίνεται και η σύγκριση με τις μετρήσεις από το παχύμετρο.

| Κυλινδρικότητα | Μετρητική Διάταξη | Παχύμετρο | Απόλυτη διαφορά |
|----------------|-------------------|-----------|-----------------|
| 1              | 0,06              | 0,14      | 0,08            |
| 2              | 0,05              | 0,07      | 0,02            |
| 3              | 0,14              | 0,11      | 0,03            |
| 4              | 0,05              | 0,08      | 0,03            |
| 5              | 0,08              | 0,13      | 0,05            |
| 6              | 0,08              | 0,08      | 0,00            |
| 7              | 0,06              | 0,09      | 0,03            |
| 8              | 0,06              | 0,06      | 0,00            |
| 9              | 0,07              | 0,08      | 0,01            |
| 10             | 0,07              | 0,09      | 0,02            |
| 11             | 0,06              | 0,08      | 0,02            |
| 12             | 0,08              | 0,08      | 0,00            |
| 13             | 0,07              | 0,07      | 0,00            |
| 14             | 0,07              | 0,08      | 0,01            |
| 15             | 0,03              | 0,07      | 0,04            |
| 16             | 0,06              | 0,07      | 0,01            |
| 17             | 0,08              | 0,07      | 0,01            |
| 18             | 0,07              | 0,08      | 0,01            |
| 19             | 0,06              | 0,08      | 0,02            |
| 20             | 0,05              | 0,05      | 0,00            |

Πίνακας 4.6 Σύγκριση Κυλινδρικότητας - Τρίτη Γενιά
Ακόμη έχει μεγάλο ενδιαφέρον το που κυμαίνονται οι τιμές και τι αποκλείσεις υπήρχαν από τον μέσο όρο και πια είναι η τυπική απόκλιση καθώς επίσης η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή (Πίνακας 4.7). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των μετρήσεων της νέας μετρητικής διάταξης και του παχύμετρου είναι σημαντικές όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.1 για αυτό στις μετρήσεις της τέταρτη γενιάς θα πραγματοποιηθούν και μετρήσεις σε CMM για την πιο αξιόπιστη αξιολόγηση των μετρήσεων.

| Κυλινδρικότητα  | Μετρητική Διάταξη | Παχύμετρο | Απόλυτη διαφορά |
|-----------------|-------------------|-----------|-----------------|
| Μέγιστη τιμή    | 0,14              | 0,14      | 0,08            |
| Ελάχιστη τιμή   | 0,03              | 0,05      | 0,00            |
| Μέσος Όρος      | 0,07              | 0,08      | 0,02            |
| Τυπική Απόκλιση | 0,02              | 0,02      | 0,02            |



Πίνακας 4.7 Ανάλυση Κυλινδρικότητας Τρίτη Γενιά

Διάγραμμα 4.1 Απόλυτη Διαφορά

### 4.6.2. Μετρήσεις τέταρτης Γενιάς

Η τέταρτη γενιά εκτυπώθηκε στον εκτυπωτή Creality CR-10S5. Οι υπόλοιπες συνθήκες της εκτυπώσεις προαναφέρονται στον Πίνακα 4.2. Οι κύριες σταθερές διαστάσεις, όπως μετρήθηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8 καθώς επίσης και οι αντίστοιχες ονομαστικές που προκύπτουν από το αρχικό ηλεκτρονικό σχέδιο.

|                      | •           |             |
|----------------------|-------------|-------------|
| Διαστάσεις           | Ονομαστικές | Πραγματικές |
| φ₁ (deg)             | 3           | 2,92        |
| φ <sub>1</sub> (rad) | 0,052       | 0,051       |
| φ₂ (deg)             | 3           | 3,21        |
| φ <sub>2</sub> (rad) | 0,052       | 0,056       |
| I <sub>1</sub>       | 31,55       | 31,57       |
| I <sub>4</sub>       | 10          | 10,09       |
| I <sub>5</sub>       | 13,45       | 13,32       |
| I <sub>7</sub>       | 30,55       | 30,10       |

Πίνακας 4.8 Σταθερές Διαστάσεις - Τέταρτη Γενιά

| Συντελεστές    | Ονομαστικοί | Πραγματικοί |
|----------------|-------------|-------------|
| σ1             | 9,53        | 9,78        |
| σ <sub>2</sub> | 10,05       | 10,30       |
| σ3             | 191,82      | 183,45      |
| σ              | 191,85      | 183,48      |

Παρακάτω υπολογίζονται οι συντελεστές που προκύπτουν από τις γωνίες που βρέθηκαν όπως και επίσης οι αντίστοιχοι που αναμένονταν από τα ονοματικά μεγέθη (Πίνακας 4.9).

Πίνακας 4.9 Συντελεστές Πολλαπλασιασμού του σφάλματος - Τέταρτη Γενιά

Στην συνέχεια ορίστηκαν οκτώ θέσεις που αποτελούν τους προσανατολισμούς για τους οποίους λήφθηκαν οι μετρήσεις. Στον παρακάτω Πίνακα 4.10 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας από τους κυλίνδρους με όλες της μετρήσεις που τον αφορούν. Ο αντίστοιχος πίνακας για τους υπολοίπους κυλίνδρους παρατίθεται στο Παράρτημα.

| 16                    | b'     | δb    | D'    | δD   | h'    | δh   | <b>r</b> 1' | r <sub>2</sub> ' | h₀ <sub>λ</sub> ' | δh₀λ | h₃'    | δh₃   |
|-----------------------|--------|-------|-------|------|-------|------|-------------|------------------|-------------------|------|--------|-------|
| b <sub>1</sub>        | 151,57 | 0,00  | 15,34 | 0,00 | 19,57 | 0,00 | 0,39        | 7,66             | 37,70             | 0,00 | 135,36 | 0,00  |
| b <sub>2</sub>        | 76,57  | 75,00 | 14,93 | 0,41 | 15,57 | 4,00 | 0,38        | 7,45             | 33,49             | 4,21 | 60,37  | 74,99 |
| b <sub>3</sub>        | 90,57  | 61,00 | 15,00 | 0,33 | 16,32 | 3,25 | 0,38        | 7,49             | 34,28             | 3,42 | 74,36  | 60,99 |
| b4                    | 94,57  | 57,00 | 15,02 | 0,31 | 16,53 | 3,04 | 0,38        | 7,50             | 34,50             | 3,20 | 78,36  | 56,99 |
| b₅                    | 131,57 | 20,00 | 15,23 | 0,11 | 18,50 | 1,07 | 0,39        | 7,60             | 36,58             | 1,12 | 115,36 | 20,00 |
| <b>b</b> 6            | 73,57  | 78,00 | 14,91 | 0,43 | 15,41 | 4,16 | 0,38        | 7,44             | 33,32             | 4,38 | 57,37  | 77,99 |
| <b>b</b> 7            | 74,57  | 77,00 | 14,92 | 0,42 | 15,46 | 4,10 | 0,38        | 7,45             | 33,38             | 4,32 | 58,37  | 76,99 |
| <b>b</b> <sub>8</sub> | 89,57  | 62,00 | 15,00 | 0,34 | 16,26 | 3,30 | 0,38        | 7,49             | 34,22             | 3,48 | 73,36  | 61,99 |

Πίνακας 4.10 Μετρήσεις κυλίνδρου 16 - Τέταρτη Γενιά

Στο πάνω μέρος του Πίνακα 4.10 αναγράφονται όλα τα μεταβλητά μεγέθη. Στα πεδία με ελληνικό δ, πριν από το σύμβολο της διάστασης που αντιστοιχεί, οι τιμές συγκρίνονται, αφαιρούνται, με την μέγιστη τιμή που μετρήθηκε για κάθε δοκίμιο. Στον κάθετο άξονα παρουσιάζονται οι διαφορετικοί προσανατολισμοί κατά σειρά μέτρησης. Όμοιος πίνακας υπάρχει για κάθε δοκίμιο.

Από τις μετρήσεις αυτές υπολογίστηκε η κυλινδρικότητα για κάθε δοκίμιο. Τα αποτελέσματα για τα παραπάνω παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11. Ακόμη στον ίδιο πίνακα φαίνεται και η σύγκριση με της μετρήσεις από το παχύμετρο, την CMM και παρουσιάζονται σε διαφορετικές στήλες τα στάδια των μετρήσεων, πριν και μετά το καθάρισμα από τα εξογκώματα.

| No | Λείανση | СММ   | Διάταξη (χωρίς<br>λείανση) | Διάταξη (με<br>λείανση) | Διάταξη (με<br>επιπλέον<br>λείανση) | Παχύμετρο |
|----|---------|-------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------|
| 1  | !       | 0,170 | 0,128                      | 0,065                   |                                     | 0,04      |
| 2  | !       | 0,082 | 0,093                      | 0,090                   |                                     | 0,07      |
| 3  | !       | 0,060 | 0,109                      | 0,071                   |                                     | 0,00      |
| 4  | !       | 0,138 | 0,087                      | 0,079                   |                                     | 0,04      |
| 5  | !!      | 0,064 | 0,093                      | 0,093                   | 0,084                               | 0,10      |
| 6  | -       | 0,106 | 0,120                      | -                       |                                     | 0,03      |
| 7  | !!      | 0,054 | 0,082                      | 0,082                   | 0,079                               | 0,04      |
| 8  | !       | 0,208 | 0,117                      | 0,082                   |                                     | 0,04      |

| 9  | ! | 0,198 | 0,076 | 0,074 | 0,04 |
|----|---|-------|-------|-------|------|
| 10 | - | 0,166 | 0,093 | -     | 0,09 |
| 11 | - | 0,087 | 0,079 | -     | 0,15 |
| 12 | - | 0,056 | 0,063 | -     | 0,08 |
| 13 | - | 0,077 | 0,068 | -     | 0,10 |
| 14 | - | 0,159 | 0,074 | -     | 0,09 |
| 15 | - | 0,063 | 0,065 | -     | 0,09 |
| 16 | - | 0,232 | 0,213 | -     | 0,23 |
| 17 | - | 0,064 | 0,071 | -     | 0,04 |
| 18 | ! | 0,125 | 0,123 | 0,063 | 0,07 |
| 19 | - | 0,089 | 0,12  | -     | 0,17 |
| 20 | - | 0,120 | 0,06  | -     | 0,08 |

Πίνακας 4.11 Σύγκριση Κυλινδρικότητα - Τέταρτη Γενιά

Σημείωση: Στην δεύτερη στήλη αναγράφεται συμβολικά το γεγονός αν το δοκίμιο έχει λειανθεί (!) ή όχι (-) με γυαλόχαρτο. Στην περίπτωση του συμβολισμού (!!) έχει γίνει εκτενής χρήση γυαλόχαρτου. Όπως και στην Τρίτη γενιά, έτσι και στην τρέχουσα, αναλύθηκαν τα αποτελέσματα από τον παραπάνω πίνακα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12.

| Κυλινδρικότητα  | CMM  | Μέτρηση 1 | Μέτρηση 2 | Διάταξη | Παχύμετρο |
|-----------------|------|-----------|-----------|---------|-----------|
| Μέγιστη τιμή    | 0,23 | 0,19      | 0,21      | 0,43    | 0,23      |
| Ελάχιστη τιμή   | 0,05 | 0,06      | 0,04      | 0,09    | 0,00      |
| Μέσος Όρος      | 0,12 | 0,09      | 0,08      | 0,17    | 0,08      |
| Τυπική Απόκλιση | 0,05 | 0,03      | 0,03      | 0,07    | 0,05      |

Πίνακας 4.12 Ανάλυση Κυλινδρικότητας - Τέταρτη Γενιά

## 4.7. Πρωτόκολλο Μετρήσεων - Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

### 4.7.1. Πρωτόκολλο Μετρήσεων

Από την εμπειρία που αποκτήθηκε στο κομμάτι των μετρήσεων διαπιστώθηκε ότι ο πιο ασφαλείς τρόπος για την πραγματοποίηση τους είναι ο ακόλουθος:

Προετοιμασία μεγάλου τραπεζοειδούς δοκιμίου: για την ευκολότερη λήψη των μετρήσεων προσαρμόζετε ένας απλός χάρακας στην **μη**-κεκλιμένη πλευρά του. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει με όποιον τρόπο θέλει ο χρήστης αρκεί να μην επηρεάζεται με κάποιον τρόπο η εσωτερική, εργαζόμενη, πλευρά του δοκιμίου. Στα πειράματα που εκπονήθηκαν χρησιμοποιήθηκε κολλητική ταινία.



Εικόνα 4.17 Προσάρτηση Χάρακα στην Διάταξη

Αρχικά το κυλινδρικό δοκίμιο τοποθετείται στο μικρό τραπεζοειδές εξάρτημα χωρίς να υπάρχει καθόλου προένταση, αλλά απλή επαφή. Στην συνέχεια το μεγάλο τραπεζοειδές δοκίμιο στρέφετε με το άνοιγμα προς τα κάτω με μια μικρή κλίση, όχι εντελώς κάθετα στο έδαφος. Κατά την τοποθέτηση των δύο μικρότερων δοκιμίων στο μεγάλο χρειάζονται ελαφριές κινήσεις που προωθούν την διάταξη στο οριακό σημείο επαφής. Με την βοήθεια της υποστήριξης που έχει προστεθεί το κινούμενο μέρος δεν πέφτει γιατί περιορίζετε από τρεις σταθερές επιφάνειες. Αφού η διάταξη ισορροπήσει τοποθετείται οριζόντια και καταγράφετε η μέτρηση.



Εικόνα 4.18 Παράδειγμα Μετρήσεις

### 4.7.2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Παρόλο που η διάταξη της τέταρτης γενιάς δοκιμίων είναι βελτιωμένη σε σχέση με τις προηγούμενες προσπάθειες, τα κυλινδρικά δοκίμια παρουσίασαν έντονες δυσμορφίες λόγω εξωτερικών μη ελέγξιμων παραγόντων. Το γεγονός αυτό, αν και μη επιθυμητό, βοήθησε στην καλύτερη κατανόηση της διάταξης. Οπότε από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11 παρατηρείται η εξέλιξη των μετρήσεων ανά φάση της διαδικασίας. Συγκριτικά με την Τρίτη Γενιά τα αποτελέσματα της Τέταρτης εμφανίζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις, οπότε μπορεί να ειπωθεί ότι ο εκτυπωτής Ender 3 Pro είναι πιο ακριβής από τον CR-10S5, δεδομένου ότι το υλικό που χρησιμοποιήθηκε και στους δύο εκτυπωτές ήταν το ίδιο.

Εμβαθύνοντας περισσότερο στις μετρήσεις που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.6.2 και αφορούν την τέταρτη και τελική έκδοση της μετρητικής διάταξης, πρέπει να γίνει ένας σχολιασμός που αφορά την ακρίβεια των κυλίνδρων που εξετάστηκαν. Συγκεκριμένα τα κυλινδρικά δοκίμια που εκτυπώθηκαν παρουσίαζαν κάποια συγκριμένα μοτίβα σφαλμάτων μορφής, κοινά για όλα τα δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκαν κάποιες προεξοχές υλικού, όπως φαίνονται στην Εικόνα 4.19. Οι προεξοχές αυτές ποικίλλουν σε μέγεθος και αριθμό από δοκίμιο σε δοκίμιο και είναι εντοπισμένες σε μία συγκεκριμένη στενή κατακόρυφη ζώνη του δοκιμίου. Κοντά σε αυτή τη ζώνη υπάρχει και μία επίσης στενή κατακόρυφη ζώνη που σχηματίζει έναν κυματισμό που απλώνεται σε όλο το ύψος του δοκιμίου. Οι αποκλίσεις αυτές είναι εμφανείς και με γυμνό μάτι και θα παίξουν σημαντικό ρόλο την ακρίβεια των μετρήσεων, όπως θα φανεί και στην συνέχεια.



Εικόνα 4.19 Σφάλματα μορφής στο κυλινδρικό δοκίμιο

Στο Διάγραμμα 4.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι μετρήσεις και με τους τρεις τρόπου μέτρησης, καθώς και οι αποκλίσεις από της τιμή της CMM, των άλλων δύο τρόπων μέτρησης. Είναι εμφανές ότι η απόκλιση της νέας μετρητικής διάταξης που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία είναι συστηματικά πιο κοντά στις μετρήσεις της CMM, σε σχέση με εκείνες που λήφθηκαν με το παχύμετρο. Αυτό το συμπέρασμα είναι αναμενόμενο, καθώς οι μετρήσεις με το παχύμετρο, που συνεπάγονται εκτίμηση διαμέτρου με μέτρηση δύο μόνο σημείων, δεν μπορεί να είναι αξιόπιστες, κάτι που επιβεβαιώνεται από την βιομηχανική πρακτική.



Διάγραμμα 4.2 Συγκριτικά αποτελέσματα μετρήσεων. Μπάρες: Τιμή μέτρηση με CMM (μπλε), Παχύμετρο (γκρι) και τη νέα μετρητική διάταξη (πράσινο). Γραμμή: Απόκλιση (%) μετρήσεων από τις μετρήσεις της CMM της μετρητικής διάταξης (κίτρινο) και του παχύμετρου (γκρι)

Αναλύοντας πιο διεξοδικά τις μετρήσεις, γίνεται σαφές ότι σε κάποια δοκίμια η απόκλιση μεταξύ των τιμών της CMM και της μετρητικής διάταξης είναι σημαντικά μεγάλη. Αυτό εξηγείται ως εξής. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα σφάλματα μορφής που εμφανίζονται στα κυλινδρικά δοκίμια και είναι φανερά και με γυμνό μάτι, συγκεντρώνονται σε μια στενή ζώνη του κυλινδρικού δοκιμίου. Δεδομένου ότι η CMM μέτρησε 10 σημεία της περιφέρειας σε διάφορα ύψη, κάποιες φορές η μέτρηση έπεσε πάνω σε μια προεξοχή και κάποιες φορές όχι. Η διαφορά αυτή μπορεί να αυξήσει την τιμή του σφάλματος μορφής έως και μία τάξη μεγέθους (0,1mm αντί για 0,01mm). Για παράδειγμα στο δοκίμιο #3, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.11, όταν έγινε η μέτρηση στη μετρητική διάταξη αρχικά, η τιμή του σφάλματος που προσδιορίστηκε ήταν περίπου διπλάσια από αυτή που εκτιμήθηκε με τη CMM. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.20, η μεγαλύτερη τιμή διαμέτρου που υπολογίστηκε με την μετρητική διάταξη αφορούσε τη θέση όπου σε επαφή ερχόντουσαν οι προεξοχές που έχει το κυλινδρικό δοκίμιο εκ κατασκευής. Όταν μετά αυτές οι προεξοχές αφαιρέθηκαν με τη χρήση ενός γυαλόχαρτου, η τιμή του σφάλματος που υπολογίστηκε ήταν πολύ κοντά στην τιμή που εκτιμήθηκε με τη CMM. Αντίστροφα, για το δοκίμιο #18, η τιμή που υπολογίστηκε πριν τη λείανση ήταν πάρα πολύ κοντά σε αυτήν της CMM, ενώ μετά τη λείανση απομακρύνθηκε. Από αυτό βγαίνει το συμπέρασμα ότι κάποιο από τα σημεία που μέτρησε η CMM έπεφτε πάνω σε αυτές τις προεξοχές.

Επιπλέον σε κάποια από το δοκίμια και συγκεκριμένα στα δοκίμια #1, #4, #8, #9, #10, #14 και #20 οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των μετρήσεων που έγιναν με τη CMM και των μετρήσεων που έγιναν με την μετρητική διάταξη αλλά και με το παχύμετρο είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Για τη μετρητική διάταξη για τα παραπάνω δοκίμια η απόλυτη τιμή της διαφοράς παίρνει τιμές από 0.05mm έως 0.12mm, ενώ για το παχύμετρο από 0.05mm έως 0.15mm. Οι μεγάλες αυτές αποκλίσεις μπορεί να ερμηνευθούν ως εξής. Οι μετρήσεις που παίρνει μια CMM αφορούν σημεία στον τρισδιάστατο χώρο. Τα σημεία αυτά αναπαριστούν μία γεωμετρία που μπορεί να έχει οποιοδήποτε σχήμα στο χώρο, με αλλαγές κυρτότητας και βαθουλώματα σε οποιοδήποτε ύψος του. Επομένως μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια το πραγματικό σφάλμα μορφής (σφάλμα κυλινδρικότητας). Η μετρητική διάταξη που προτάθηκε στο παρόν κεφάλαιο δεν μετρά σε κάθε προσανατολισμό όλες τις κάθετες διατομές ενός κυλίνδρου, αλλά μετρά τρία σημεία επαφής που μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικό ύψος και που δίνουν μια ισοδύναμη φαινόμενη διάμετρο. Το γεγονός αυτό, αν και δεν επιτρέπει στη διάταξη να προσδιορίσει με ακρίβεια το θεωρητικό σφάλμα μορφής όπως κάνει μια CMM, στην πράξη είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, μιας και σε περιπτώσεις συναρμογών, αυτή η φαινόμενη διάμετρος που μετράται από την μετρητική διάταξη είναι και η κρίσιμη για την επιτυχία της συναρμογής. Επομένως, αν και το σφάλμα μορφής που υπολογίζεται από τη διάταξη μπορεί να αποκλίνει κατά ένα ποσοστό από το θεωρητικό, εντούτοις είναι αυτό που πραγματικά ενδιαφέρει έναν χρήστη για την συναρμογή δύο δοκιμίων.



Εικόνα 4.20 Επαφή προεξοχών δοκιμίου κατά τη διαδικασία της μέτρησης

Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της απόκλισης των μετρήσεων των κυλίνδρων της μετρητικής διάταξης και του παχύμετρου σε σχέση με την CMM για δύο περιπτώσεις<sup>-</sup> για τους 20 κυλίνδρους συνολικά και για τους 13 κυλίνδρους, αν αφαιρεθούν εκείνοι με τη μεγαλύτερη απόκλιση (δηλαδή οι #1, #4, #8, #9, #10, #14 και #20). Όπως γίνεται φανερό, οι μετρήσεις με τη μετρική διάταξη είναι πολύ κοντά σε αυτές τις CMM και τα αποτελέσματα είναι πολύ πιο ακριβή σε σχέση με αυτά του παχύμετρου.

|                 | ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ | ΠΑΧΥΜΕΤΡΟ |
|-----------------|-------------------|-----------|
|                 | 20 ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ      |           |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ       | 0,034             | 0,064     |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | 0,035             | 0,048     |
|                 | 13 ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ      |           |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ       | 0,012             | 0,041     |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | 0,008             | 0,030     |

Πίνακας 4.13 Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των αποκλίσεων των μετρήσεων της μετρητικής διάταξης και του παχύμετρου από τη CMM για τις περιπτώσεις των 20 και 13 κυλίνδρων

Από τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτει ότι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μέτρηση με την νέα μετρητική διάταξη, μπορεί εάν ακολουθείται πιστά το πρωτόκολλο μετρήσεων, να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα που μπορεί να αποδειχθούν ακόμα και περισσότερο χρήσιμα για περιπτώσεις συναρμογών ακόμα και από αυτά μιας CMM. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις της CMM είναι πεπερασμένες και συχνά όχι πυκνές για εξοικονόμηση χρόνου και δεδομένου ότι οι ατέλειες των δοκιμίων τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να εμφανίζουν πολύ τοπικά μεγάλα σφάλματα, είναι πιθανό κάποια από αυτά να μην εντοπιστούν από τη CMM. Αντίθετα, με τη μετρητική διάταξη, δοκιμάζονται διαφορετικοί προσανατολισμοί (και περισσότεροι από 8, μιας και η μέτρηση γίνεται σε πολύ μικρό χρόνο) και μπορεί ένας χρήστης να αποφανθεί γρήγορα και αξιόπιστα για το σφάλμα μορφής του κυλίνδρου. Επίσης, η μέτρηση στη μετρητική διάταξη γίνεται μέσω τριών σημείων που ορίζουν μια φαινόμενη διάμετρο, που είναι πολύ καλύτερη εκτίμηση από μία μέτρηση τύπου παχύμετρου. Όλα τα παραπάνω συνηγορούν ότι η μετρητική διάταξη που σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και ελέγχθηκε μπορεί γρήγορα και αξιόπιστα να εκτιμήσει με ακρίβεια τα σφάλματα μορφής σε κυλινδρικά δοκίμια που παρήχθησαν μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης.

## 5. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μεθόδων και διαδικασιών που αποσκοπούν στον ποσοτικό προσδιορισμό των διαστασιολογικών και γεωμετρικών σφαλμάτων μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσα από την εκτύπωση από την ίδια τη μηχανή κατάλληλα σχεδιασμένων δοκιμίων. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, αν και αποτελεί μία από τις πιο ανερχόμενες μεθόδους παραγωγής παγκοσμίως, φέρει κάποια εγγενή προβλήματα/ελαττώματα που εμποδίζουν αυτή τη στιγμή την ταχεία εδραίωσή της σε ορισμένα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Ένα από αυτά, είναι οι περιορισμένη δυνατότητα παραγωγής εξαρτημάτων υψηλής διαστασιολογικής ακρίβειας και η μεγάλη αβεβαιότητα στις διαστασιολογικές και γεωμετρικές αποκλίσεις που προκύπτουν ανάλογα με την μέθοδο εκτύπωσης, την μηχανή εκτύπωσης, το υλικό και γενικά τις συνθήκες εκτύπωσης.

Μελετώντας εκτενώς την βιβλιογραφία κατέστη σαφές ότι ερευνητές από όλο τον κόσμο εργάζονται πάνω στον ποσοτικό προσδιορισμό των σφαλμάτων που προκύπτουν κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτημάτων με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που εμπλέκονται στη διαδικασία εκτύπωσης και την βελτίωση της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έμφαση δόθηκε στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη δοκιμίων, με σκοπό ένας χρήστης μηχανής τρισδιάστατης εκτύπωσης να μπορεί να προσδιορίσει ποσοτικά τα σφάλματα της μηχανής του, με σκοπό να αντισταθμίσει τα σφάλματα αυτά με αλλαγές στις ονομαστικές διαστάσεις των εξαρτημάτων στο ηλεκτρονικό τους σχέδιο έτσι ώστε να μπορεί να πετύχει επιθυμητές συναρμογές μεταξύ διαφορετικών εξαρτημάτων.

Τα δοκίμια πιο αναπτύχθηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα πρώτα αφορούν την ποσοτική εκτίμηση του συνολικού σφάλματος μεταξύ μιας αρσενικής και μιας θηλυκής γεωμετρίας, με συνυπολογισμό τόσο των διαστασιολογικών όσο και των γεωμετρικών σφαλμάτων, όπως η κυλινδρικότητα και το σφάλμα θέσης. Αναπτύχθηκαν διάφορες γενιές δοκιμίων για να μπορούν να ελεγχθούν συναρμογές με απλές διατομές (π.χ. κύκλος) ή και πιο σύνθετες, τόσο μεμονωμένα όσο και συνδυαστικά. Η πρακτική αξία των δοκιμίων που αναπτύχθηκαν φάνηκε μέσα από την ολοκλήρωση δύο περιπτώσεων εφαρμογής. Η μία σχεδιάστηκε ειδικά για αυτό το σκοπό και αφορούσε ένα εξάρτημα με διάφορους τύπους συναρμογών για να ελεγχθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης διάταξης. Η άλλη αφορούσε ένα πραγματικό πρόβλημα αντίστροφου σχεδιασμού μιας μικρής μηχανής Stirling.

Η δεύτερη κατηγορία δοκιμίων αφορούσε τον ακριβή υπολογισμό του σφάλματος μορφής κυλινδρικών δοκιμίων. Η μέθοδος αυτή είναι ικανή εύκολα και γρήγορα, με εξαρτήματα που εκτυπώνονται αποκλειστικά από τον χρήστη να δώσει ποσοτικά αποτελέσματα για τα σφάλματα του κυλίνδρου που είναι ακριβή, όπως αποδείχθηκε από την σύγκρισή τους με μετρήσεις CMM, και πιο αξιόπιστα από μετρήσεις με απλό παχύμετρο. Η διάταξη αυτή, που μπορεί να μετρήσει σφάλματα της τάξης του 0.01mm, μπορεί να εκτιμήσει τη δυνατότητα

συναρμογής ενός κυλίνδρου και να συνυπολογίσει τοπικά σφάλματα που προκύπτουν σε μια μικρή ζώνη του υλικού (σύνηθες σε δοκίμια τρισδιάστατης εκτύπωσης).

### 5.1. Προοπτικές για το μέλλον

Η εργασία αυτή προσφέρει μία βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη δοκιμίων και διαδικασιών για την ποσοτική πρόβλεψη των σφαλμάτων τρισδιάστατων εκτυπωτών. Οι διατάξεις που αναπτύχθηκαν μπορούν να δοκιμαστούν και σε άλλες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης (SLA, SLS, DLP κ.α.), να γίνουν πειράματα και να ελεγχθεί η δυνατότητα χρήσης του δοκιμίου και σε τέτοιες μεθόδους. Επιπλέον, με βάση την γενικότερη μελέτη που έγινε για τις αποκλίσεις των εξαρτημάτων που παράγονται από την τρισδιάστατη εκτύπωση αλλά και τα αποτελέσματα από τα δοκίμια που αναπτύχθηκαν, μπορούν να σχεδιαστούν νέας φιλοσοφίας δοκίμια για τον προσδιορισμό διαφόρων σφαλμάτων οι συνδυασμών τους με σκοπό την κατάστρωση μιας ολοκληρωμένης σειράς δοκιμίων για την πλήρη χαρτογράφηση των σφαλμάτων μιας μηχανής τρισδιάστατης εκτύπωσης.

## Βιβλιογραφία

[1] Available in: <u>https://www.renishaw.fr/fr/la-fabrication-additive-definition-15240</u>

[2] Matias, Elizabeth, and Bharat Rao. "3D printing: On its historical evolution and the implications for business." 2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET). IEEE, 2015.

[3] Anastasiou, Athanasios, et al. "3D printing: Basic concepts mathematics and technologies." *13th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering*. IEEE, 2013.

[4] Gross, Bethany C., et al. "Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences." (2014): 3240-3253.

[5] Pandian, Annamalai, and Cameron Belavek. "A review of recent trends and challenges in 3D printing." *2016 ASEE North Central Section Conference*. Michigan, MI: American Society for Engineering Education, 2016.

[6] Schubert, Carl, Mark C. Van Langeveld, and Larry A. Donoso. "Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs." *British Journal of Ophthalmology* 98.2 (2014): 159-161.

[7] Wren, K. "Science and society. Experts warn against bans on 3D printing." Science 342.6157 (2013): 439.

[8] Mertz, Leslie. "New world of 3-D printing offers" completely new ways of thinking": Q&A with author, engineer, and 3-D printing expert Hod Lipson." IEEE pulse 4.6 (2013): 12-14.

[9] Hoy, Matthew B. "3D printing: making things at the library." *Medical reference services quarterly* 32.1 (2013): 93-99.

[10] Mertz, Leslie. "Dream it, design it, print it in 3-D: What can 3-D printing do for you?" *IEEE pulse* 4.6 (2013): 15-21.

[11] Grieser, Franz. "PLA vs ABS: Filaments for 3D Printing Explained & Compared." *All About 3D Printing* (2016).

[12] Rohringer, S. (2019). 3D Printer Filament Guide - All You Need to Know in 2019

[13] Available in: <u>https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/</u>

[14] Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints Ksawery Szykiedans Wojciech Credo Dymitr Osiński

[15] Available in: https://www.creality3dshop.eu

[16] Available in: https://support.stratasys.com/en/printers/fdm/fortus-360mc-400mc

[17] Available in: <u>http://www.3dprinterscanada.com/fdm-production-series-fortus-</u> <u>360mc.php#Tabs:Specifications</u>

[18] Available in: https://www.xyzprinting.com/en/product/nobel-1-0a

[19] Available in: <u>https://www.xyzprinting.com/fr-FR/product/da-vinci-jr-2-0-mix</u>

[20] Available in: https://www.solidworks.com/domain/design-engineering

[21] Available in: https://www.3ds.com/products-services/catia/

[22] Available in: https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura

[23] Adam, Guido AO. Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling. Shaker, 2015.

[24] Lieneke, Tobias, et al. "Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling." *Procedia CIRP* 43 (2016): 286-291.

[25] Monnerjahn, V., et al. "The CRC666 Approach: Realizing Optimized Solutions Based on Production Technological Innovation." *Manufacturing Integrated Design*. Springer, Cham, 2017. 11-29.

[26] Dantan, Jean-Yves, et al. "Geometrical variations management for additive manufactured product." *CIRP Annals* 66.1 (2017): 161-164.

[27] ISO, 2010.Geometrical Product Specifiations (GPS) -ISO code system for tolerances on liner sizes -Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits, ISO 268-1:2010.

[28] Shahrain, Mahmood, et al. "Fast deviation simulation for 'fused deposition modeling'process." *Procedia Cirp* 43 (2016): 327-332.

[29] Islam, Mohammad Nazrul, Brian Boswell, and Alokesh Pramanik. "An investigation of dimensional accuracy of parts produced by three-dimensional printing." *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013*. IAENG, 2013.

[30] Mahmood, Shahrain, A. J. Qureshi, and Didier Talamona. "Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling." *Additive Manufacturing* 21 (2018): 183-190.

[31] Caminero, Miguel Ángel, et al. "Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: Effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture." *Polymers* 11.5 (2019): 799.

[32] Mendricky, Radomir, and Daniel Fris. "Analysis of the Accuracy and the Surface Roughness of FDM/FFF Technology and Optimisation of Process Parameters." *Tehnički vjesnik* 27.4 (2020): 1166-1173.

[33] Vaezi, Mohammad, and Chee Kai Chua. "Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53.1 (2011): 275-284.

[34] Kechagias, John. "Investigation of LOM process quality using design of experiments approach." *Rapid Prototyping Journal* (2007).

[35] Kechagias, J. P. A. I., et al. "Dimensional accuracy optimization of prototypes produced by PolyJet direct 3D printing technology." *Adv. Eng. Mech. Mater* (2014): 61-65.

[36] Khoshkhoo, Ali, Andres L. Carrano, and David M. Blersch. "Effect of build orientation and part thickness on dimensional distortion in material jetting processes." *Rapid Prototyping Journal* (2018).

[37] S. S. Karganroudi, J.-C. Cuillière, V. François, and S.-A. Tahan, "'Whatif' scenarios towards virtual assembly-state mounting for non-rigid parts inspection using permissible loads," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 97, nos. 1–4, pp. 353–373, 2018.

[38] Luo, Chen, et al. "Early Stage Variation Simulation and Visualization of Compliant Part Based on Parametric Space Envelope." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (2020).

[**39**] Rupal, Baltej Singh, et al. "Geometric tolerance and manufacturing assemblability estimation of metal additive manufacturing (AM) processes." *Materials & Design* **194** (2020): **108842**.

[40] Huang, Qiang, et al. "Optimal offline compensation of shape shrinkage for three-dimensional printing processes." *lie transactions* 47.5 (2015): 431-441.

[41] Knoop, F., and Volker Schöppner. "Geometrical accuracy of holes and cylinders manufactured with fused deposition modeling." *Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference*. 2017.

## Παράρτημα

# Από κεφάλαιο 3.1.1

### Κυλινδρικότητα πίρων



#### Καθετότητα πίρων





#### Διάμετρος οπών



### Αναλογία οπών



#### Κυλινδρικότητα οπών

### Καθετότητα οπών



## Από κεφάλαιο 3.1.2

### Πάχος στρώματος απόθεσης υλικού στα 0,2mm

| 0.2mm |                 | Κυλινδρικότητα   | Καθετότητα       | Διάμετρος        | Προσέγγιση       |       |      |   | _            | 1 10 0   |                |      |   |
|-------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|------|---|--------------|----------|----------------|------|---|
|       | Κυλινδρ & Καθετ | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   |       |      |   | ευναρμο      | γη (0.2m | ım)            |      |   |
| 15    | LOC1            | 0,082            | 0,028            | 14,836           | 14,726           |       |      |   |              |          |                |      |   |
| 10    | LOC2            | 0,096            | 0,040            | 9,890            | 9,754            | 13.5  |      |   |              |          |                |      |   |
| 8     | LOC3            | 0,05             | 0,066            | 7,935            | 7,819            |       |      |   |              |          |                |      |   |
| 4     | LOC4            | 0,053            | 0,067            | 3,950            | 3,830            | 11,5  |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  | 0.5   |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  | 5,5   |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  | 7,5   |      |   |              |          |                |      |   |
| 0.2mm |                 | Κυλινδρικότητα   | Καθετότητα       | Διάμετρος        | Προσέγγιση       |       |      |   |              |          |                |      |   |
|       | Κυλινδρ & Καθετ | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | 5,5   |      |   |              |          |                |      |   |
| 15    | LOC1            | 0,073            | 0,020            | 14,828           | 14,921           | 3,5   |      |   |              |          |                |      |   |
| 10    | LOC2            | 0,037            | 0,034            | 9,838            | 9,909            |       | LOC1 |   | LOC2         | 1        | LOC3           | LOC4 |   |
| 8     | LOC3            | 0,053            | 0,063            | 7,817            | 7,933            |       |      |   |              |          | τενικό Δοκίτια |      |   |
| 4     | LOC4            | 0,093            | 0,045            | 3,861            | 3,999            |       |      |   | ιοκο Δοκιμιο | Apt      | σενικό Δοκιμιι | ,    |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |   | Δια          | φορα     |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  | 0     |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 | Θηλυκό Δοκίμιο   | Αρσενικό Δοκίμιο | διαφορα          |                  |       | 1    |   | 2            |          | 3              |      | 4 |
|       | LOC1            | 14,726           | 14,921           | -0,195           |                  |       |      |   |              |          |                |      |   |
|       | LOC2            | 9,754            | 9,909            | -0,155           |                  | -0,05 |      |   |              |          |                |      |   |
|       | LOC3            | 7,819            | 7,933            | -0,114           |                  |       |      |   |              |          |                |      |   |
|       | LOC4            | 3,83             | 3,999            | -0,169           |                  | -0,1  |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |   |              | -        | $\sim$         |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  | -0.15 |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  | 0,10  |      | - |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  |       | -    |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  | -0,2  |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  | -0,25 |      |   |              |          |                |      |   |
|       |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |   |              |          |                |      |   |

### Πάχος στρώματος απόθεσης υλικού στα 0,2mm

| 0.12mm |                 | Κυλινδρικότητα   | Καθετότητα       | Διάμετρος        | Προσέγγιση       |       |      | 5       | aouour   | (0 1 2 m | 2021         |          |   |
|--------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|------|---------|----------|----------|--------------|----------|---|
|        | Κυλινδρ & Καθετ | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   |       |      | 200     | αρμογι   | (0,1211  | )            |          |   |
| 15     | LOC1            | 0,073            | 0,031            | 14,895           | 14,791           | 16 -  |      |         |          |          |              |          |   |
| 10     | LOC2            | 0,059            | 0,018            | 9,948            | 9,871            | 14    |      |         |          |          |              |          |   |
| 8      | LOC3            | 0,059            | 0,034            | 7,967            | 7,874            | 12    |      |         |          |          |              |          |   |
| 4      | LOC4            | 0,060            | 0,063            | 3,958            | 3,835            | 10    |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  | 10    |      |         |          | _        |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  | 8     |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  | 6     |      |         |          |          |              | <u> </u> |   |
| 0.12mm |                 | Κυλινδρικότητα   | Καθετότητα       | Διάμετρος        | Προσέγγιση       | 4 -   |      |         |          |          |              |          |   |
|        | Κυλινδρ & Καθετ | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | 2 -   |      |         |          |          |              |          |   |
| 15     | LOC1            | 0,070            | 0,087            | 14,899           | 15,056           | 0     |      |         |          |          |              |          |   |
| 10     | LOC2            | 0,065            | 0,070            | 9,891            | 10,026           |       | LOC1 | L       | .OC2     | Ŀ        | OC3          | LOC4     |   |
| 8      | LOC3            | 0,037            | 0,063            | 7,871            | 7,971            |       |      |         | h Aovino | 100      |              |          |   |
| 4      | LOC4            | 0,075            | 0,077            | 3,851            | 4,003            |       |      | OIJAUKO | σασκιμισ | Аро      | ενικοΔοκιμιο |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |         | Διαά     | ορα      |              |          |   |
|        |                 | Θηλυκό Δοκίμιο   | Αρσενικό Δοκίμιο | Διαφορα          |                  | 0     | 1    | 2       |          |          | 3            |          | 4 |
|        | LOC1            | 14,791           | 15,056           | -0,265           |                  | -0.05 |      |         |          |          |              |          |   |
|        | LOC2            | 9,871            | 10,026           | -0,155           |                  | -,    |      |         |          |          |              |          |   |
|        | LOC3            | 7,874            | 7,971            | -0,097           |                  | -0.1  |      |         |          |          | -            |          |   |
|        | LOC4            | 3,835            | 4,003            | -0,168           |                  |       |      |         |          | /        |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  | -0,15 |      |         | $\sim$   |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  | -0,2  |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  | -0,25 |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  | -0,3  |      |         |          |          |              |          |   |
|        |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |         |          |          |              |          |   |

| FORT | US 360mc HORIZ  | Κυλινδρικότητα   | Καθετότητα       | Διάμετρος        | Προσέγγιση       |       |      |     |             |          |               |      |  |
|------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|------|-----|-------------|----------|---------------|------|--|
|      | Κυλινδρ & Καθετ | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   |       |      | Σ   | υναρμογ     | ή (0,12m | าm)           |      |  |
| 15   | LOC1            | 0,072            | 0,007            | 14,953           | 14,874           | 16 -  |      |     |             |          |               |      |  |
| 10   | LOC2            | 0,058            | 0,014            | 9,997            | 9,925            | 14 -  |      |     |             |          |               |      |  |
| 8    | LOC3            | 0,065            | 0,021            | 7,993            | 7,907            | 10    |      |     |             |          |               |      |  |
| 4    | LOC4            | 0,068            | 0,020            | 3,962            | 3,874            | 12    |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | 10 -  |      |     |             | -        |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | 8 –   |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | 6 -   |      |     |             |          |               |      |  |
| FORT | US 360mc HORIZ  | Κυλινδρικότητα   | Καθετότητα       | Διάμετρος        | Προσέγγιση       | 4 –   |      |     |             |          |               |      |  |
|      | Κυλινδρ & Καθετ | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | 2 -   |      |     |             |          |               |      |  |
| 15   | LOC1            | 0,075            | 0,026            | 14,894           | 14,995           | 0 -   |      |     |             |          |               |      |  |
| 10   | LOC2            | 0,070            | 0,025            | 9,857            | 9,952            | 0     | LOC1 |     | LOC2        | L        | OC3           | LOC4 |  |
| 8    | LOC3            | 0,066            | 0,007            | 7,846            | 7,919            |       |      |     |             |          |               |      |  |
| 4    | LOC4            | 0,083            | 0,006            | 3,865            | 3,954            |       |      | Θηλ | υκό Δοκίμιο | —— Αρσ   | ενικό Δοκίμια | )    |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  |       |      |     | Δια         | φορα     |               |      |  |
|      |                 | Θηλυκό Δοκίμιο   | Αρσενικό Δοκίμιο | Διαφορα          |                  | 0     | 1    |     | 2           |          | 2             |      |  |
|      | LOC1            | 14,874           | 14,995           | -0,121           |                  | -0,02 | İ    |     | -           |          | -             |      |  |
|      | LOC2            | 9,925            | 9,952            | -0,027           |                  |       |      |     |             |          |               |      |  |
|      | LOC3            | 7,907            | 7,919            | -0,012           |                  | -0,04 |      | /   | ·           |          |               |      |  |
|      | LOC4            | 3,874            | 3,954            | -0,08            |                  | 0.00  |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | -0,06 |      | /   |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | -0,08 |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | 0.1   |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | -0,1  |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | -0,12 |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | 0.14  |      |     |             |          |               |      |  |
|      |                 |                  |                  |                  |                  | -0,14 |      |     |             |          |               |      |  |

## Για την FORTUS με οριζόντιο προσανατολισμό (FORTUS 360mc HORIZ)

## Για την FORTUS με κάθετο προσανατολισμό (FORTUS 360mc VERTICAL)

| FORTUS | S 360mc VERTICAL | Κυλινδρικότητα   | Καθετότητα       | Διάμετρος        | Προσέγγιση       |     |                 | ~  |              | 4 (0 1 2 | ( eei eei      |      |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----|-----------------|----|--------------|----------|----------------|------|
|        | Κυλινδρ & Καθετ  | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   | Θηλυκό Δοκίμιο   |     |                 | 2  | υναρμογ      | n (0,12  | (1)(1)         |      |
| 15     | LOC1             | 0,109            | 0,015            | 14,948           | 14,824           | 16  |                 |    |              |          |                |      |
| 10     | LOC2             | 0,085            | 0,034            | 9,986            | 9,867            | 14  |                 |    |              |          |                |      |
| 8      | LOC3             | 0,082            | 0,028            | 7,989            | 7,879            | 12  |                 |    |              |          |                |      |
| 4      | LOC4             | 0,083            | 0,034            | 3,973            | 3,856            | 10  |                 |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  |     |                 |    |              |          | _              |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  |     |                 |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  | 6   |                 |    |              |          |                |      |
| FORTUS | S 360mc VERTICAL | Κυλινδρικότητα   | Καθετότητα       | Διάμετρος        | Προσέγγιση       | 4   |                 |    |              |          |                |      |
|        | Κυλινδρ & Καθετ  | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | Αρσενικό Δοκίμιο | 2   |                 |    |              |          |                |      |
| 15     | LOC1             | 0,082            | 0,021            | 14,872           | 14,975           | 0   |                 |    |              |          |                |      |
| 10     | LOC2             | 0,085            | 0,021            | 9,868            | 9,974            |     | LOC1            |    | LOC2         |          | LOC3           | LOC4 |
| 8      | LOC3             | 0,086            | 0,013            | 7,876            | 7,975            |     |                 | On | λυκό Δοκίμιο | Ac       | σενικό Δοκίμιο |      |
| 4      | LOC4             | 0,159            | 0,018            | 3,920            | 4,097            |     |                 |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  |     |                 |    | δια          | hood     |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  |     |                 |    | otu          | φορα     |                |      |
|        |                  | Θηλυκό Δοκίμιο   | Αρσενικό Δοκίμιο | διαφορα          | 1                |     | 0               |    |              |          | 2              |      |
|        | LOC1             | 14.824           | 14.975           | -0.151           |                  | _   |                 |    | 2            |          | 5              | **   |
|        | LOC2             | 9.867            | 9,974            | -0.107           |                  | -0, | 15              |    |              |          |                |      |
|        | LOC3             | 7.879            | 7.975            | -0.096           |                  |     |                 |    |              |          |                |      |
|        | LOC4             | 3,856            | 4,097            | -0,241           |                  |     | <sup>1, ±</sup> | _  |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  | -0. | 15              |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  |     |                 |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  | -(  | 0,2             |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  |     |                 |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  | -0, | 25              |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  |     |                 |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  | -(  | 0,3             |    |              |          |                |      |
|        |                  |                  |                  |                  |                  |     |                 |    |              |          |                |      |

# Από κεφάλαιο 3.2.10

| 3 cylinders +0,00 | Low quality | /        | PLA Red |      |              |      |             |          |                       |              | Confidence interval w | /ith 10% error             |                         |                         |                         |                   |
|-------------------|-------------|----------|---------|------|--------------|------|-------------|----------|-----------------------|--------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
|                   | Base        |          | Viddle  |      | Тор          |      | Average     | Expected | Measurement deviation | Relative gap | Standard deviation u= | student*standard deviation | Confidence interval min | Confidence interval max | Presence within the con | nfidence interval |
| Male1 9mm         | 8,94        | 9,08     | 9       | 8,89 | 9,03         | 8,89 | 8,97166667  | 9        | 0,028333333           | 0,314814815  | 0,077824589           | 0,156820312                | 8,907645043             | 9,100673336             | 0,092354957             | 0,100673336       |
| Male1 6mm         | 6,18        | 5,93     | 5,95    | 6,22 | 5,87         | 6,07 | 6,03666667  | 6        | 0,036666667           | 0,611111111  | 0,142781885           | 0,287712405                | 5,919208569             | 6,273350415             | 0,080791431             | 0,273350415       |
| Male1 3mm         | 3,17        | 2,97     | 3,16    | 2,94 | 2,83         | 3,14 | 3,035       | 3        | 0,035                 | 1,166666667  | 0,141527383           | 0,285184522                | 2,918573906             | 3,26960421              | 0,081426094             | 0,26960421        |
| Female1 9mm       | 8.56        | 8.47     | 8.4     | 8.38 | 8.75         | 8.93 | 8.58166667  | 9        | 0.418333333           | 4.648148148  | 0.217385985           | 0.438043276                | 8,402836248             | 8.942018611             | 0.597163752             | -0.057981389      |
| Female1 6mm       | 5.67        | 5.55     | 5.65    | 5.43 | 5.72         | 5.75 | 5.62833333  | 6        | 0.371666667           | 6.19444444   | 0.119065808           | 0.239923363                | 5,530385031             | 5,825703902             | 0.469614969             | -0.174296098      |
| Female 3mm        | 2 29        | 2 55     | 5,05    | 5,15 | 2 72         | 2 72 | 2 57        | 3        | 0.43                  | 14 33333333  | 0 2031/1986           | 0,478066923                | 2 330966538             | 3 132532608             | 0,669033462             | 0 132532608       |
|                   | 2,23        | 2,55     |         |      | 2,72         | 2,72 | 2,57        |          | 0,43                  | 14,555555555 | 0,203141300           | 0,470000525                | 2,550500550             | 5,132552000             | 0,005055402             | 0,132332000       |
| Male2 9mm         | 9,11        | 8,93     | 8,91    | 9,02 | 8,88         | 8,96 | 8,96833333  | 9        | 0,031666667           | 0,351851852  | 0,084241716           | 0,169751132                | 8,899032724             | 9,107977414             | 0,100967276             | 0,107977414       |
| Male2 6mm         | 5,98        | 6,14     | 6,06    | 5,95 | 6,12         | 5,97 | 6,03666667  | 6        | 0,036666667           | 0,611111111  | 0,081649658           | 0,164528011                | 5,969498388             | 6,172013998             | 0,030501612             | 0,172013998       |
| Male2 3mm         | 3,22        | 2,93     | 2,93    | 3,13 | 2,95         | 3,15 | 3,05166667  | 3        | 0,051666667           | 1,722222222  | 0,129679091           | 0,261309642                | 2,944987452             | 3,266630444             | 0,055012548             | 0,266630444       |
| Female2 9mm       | 8,36        | 8,52     | 8,54    | 8,19 | 8,64         | 8,9  | 8,525       | 9        | 0,475                 | 5,27777778   | 0,242301465           | 0,488249173                | 8,32567311              | 8,926653326             | 0,67432689              | -0,073346674      |
| Female2 6mm       | 5,63        | 5,68     | 5,46    | 5,5  | 5,77         | 5,82 | 5,64333333  | 6        | 0,356666667           | 5,94444444   | 0,143480545           | 0,337661867                | 5,505483453             | 5,92110751              | 0,494516547             | -0,07889249       |
| Female2 3mm       | 2,56        | 2,79     |         |      | 2,71         | 2,83 | 2,7225      | 3        | 0,2775                | 9,25         | 0,119268604           | 0,280682373                | 2,582158814             | 3,052773816             | 0,417841186             | 0,052773816       |
| 3 cylinders +0.00 | Standard o  | uality i |         |      |              |      |             |          |                       |              | Confidence interval w | ith 10% error              |                         |                         |                         |                   |
| S cymucis (0,00   | Base        | unity i  | Middle  |      | Ton          |      | Average     | Expected | Measurement deviation | Relative gan | Standard deviation    | student*standard deviation | Confidence interval min | Confidence interval max | Presence within the co  | nfidence interval |
| Male1 9mm         | 9.14        | 8.96     | 8 9/    | 91   | 9.05         | 9.08 | 9.045       | a        | 0.045                 | 0.5          | 0.079435508           | 0 160066392                | 8 979653169             | 9 176677025             | 0.0203/6831             | 0 176677025       |
| Male1 6mm         | 5,14        | 6 15     | 6 1 2   | 5.00 | 5,05         | 5,00 | 6 02166667  | 6        | 0.021666667           | 0,5          | 0.095276447           | 0 102199155                | 5 052206191             | 6 190769241             | 0,020340031             | 0 190769241       |
| Male1 2mm         | 3,37        | 2,22     | 2.01    | 3,35 | 2,5          | 2,00 | 0,03100007  | 2        | 0,031000007           | 0,32/1/1/18  | 0,055370447           | 0,152188155                | 3,353200181             | 2 297220905             | 0,040793819             | 0,185708341       |
| Malei 3mm         | 2,89        | 3,22     | 2,91    | 3,17 | 2,82         | 3,08 | 3,015       | 3        | 0,015                 | 0,5          | 0,164286335           | 0,331044913                | 2,87985148              | 3,287330805             | 0,12014852              | 0,287330805       |
| Female1 9mm       | 8,49        | 8,48     | 8,49    | 8,5  | 8,78         | 8,82 | 8,59333333  | 9        | 0,406666667           | 4,518518519  | 0,160706772           | 0,32383192                 | 8,461129506             | 8,859730441             | 0,538870494             | -0,140269559      |
| Female1 6mm       | 5.6         | 5.64     | 5.8     | 5.79 | 5.71         | 5.91 | 5.74166667  | 6        | 0.258333333           | 4.305555556  | 0.114440669           | 0.230603483                | 5.647523189             | 5.931370329             | 0.352476811             | -0.068629671      |
| Female 3mm        | 2,27        | 2,39     |         |      | 2,88         | 2,83 | 2,5925      | 3        | 0,4075                | 13,58333333  | 0,307720111           | 0,724177257                | 2,230411371             | 3,444626139             | 0,769588629             | 0,444626139       |
| Malo2.9mm         | 8 QQ        | 0.09     | 8 04    | 8 00 | 0 00         | 0.05 | 9 04666667  | 0        | 0 05222222            | 0 502502502  | 0.004275129           | 0 100170/69                | 8 960020909             | 0 102109511             | 0 120970102             | 0 102109511       |
| Male2 5mm         | 8,55        | 6 19     | 6.02    | 5.05 | 5 90         | 6,03 | 6.01        | 5        | 0,05555555            | 0,332332333  | 0.097159662           | 0,19579143                 | 5 02007257              | 6 171057629             | 0,130970102             | 0,103108511       |
| Male2 0mm         | 2 22        | 2,00     | 0,02    | 3,95 | 2,03         | 0,02 | 2 02022222  | 2        | 0,01                  | 0,100000007  | 0,097139662           | 0,19578142                 | 3,95007257              | 0,1/105/056             | 0,00992745              | 0,171057058       |
| Malez Shim        | 5,22        | 2,99     | 2,90    | 5,11 | 5,05         | 2,00 | 5,02655555  | 3        | 0,028555555           | 0,944444444  | 0,124800517           | 0,251491109                | 2,923002494             | 5,255220042             | 0,074537506             | 0,233220042       |
| Female2 9mm       | 8,58        | 8,74     | 8,59    | 8,84 | 8,85         | 9,02 | 8,77        | 9        | 0,23                  | 2,555555556  | 0,169233566           | 0,341013823                | 8,63078169              | 9,050531629             | 0,36921831              | 0,050531629       |
| Female2 6mm       | 5,86        | 5,88     | 5,78    | 5,45 | 6,02         | 5,71 | 5,78333333  | 6        | 0,216666667           | 3,611111111  | 0,193769623           | 0,390455163                | 5,623930681             | 6,10453739              | 0,376069319             | 0,10453739        |
| Female2 3mm       | 2,54        | 2,88     |         |      | 2,9          | 2,92 | 2,81        | 3        | 0,19                  | 6,333333333  | 0,180739223           | 0,425345078                | 2,597327461             | 3,310495777             | 0,402672539             | 0,310495777       |
| 2 cylindors ±0.00 | Super quali |          |         |      |              |      |             |          |                       |              | Confidence interval w | ith 10% orror              |                         |                         |                         |                   |
| 5 cymacrs 10,00   | Base        |          | Middle  |      | Ton          |      | Average     | Expected | Measurement deviation | Relative gan | Standard deviation    | student*standard deviation | Confidence interval min | Confidence interval max | Presence within the co- | nfidence interval |
| Male1 9mm         | 8 93        | 9.02     | 9.04    | 8 93 | 8.87         | 8 87 | 8 94333333  | 9        | 0.056666667           | 0.62962963   | 0.072571804           | 0 146235695                | 8 883632861             | 9.063632673             | 0 116367139             | 0.063632673       |
| Male1 6mm         | 5.95        | 5 92     | 5 94    | 6    | 5.93         | 5 92 | 5 94333333  | - 6      | 0.056666667           | 0 94444444   | 0.030110906           | 0.060674932                | 5 918562896             | 5 993246963             | 0.081437104             | -0.006753037      |
| Male1 3mm         | 2,86        | 3,21     | 3,12    | 2,89 | 3,09         | 2,88 | 3,00833333  | 3        | 0,008333333           | 0,277777778  | 0,149855486           | 0,301966053                | 2,885056208             | 3,256742704             | 0,114943792             | 0,256742704       |
|                   |             |          |         |      |              |      |             |          |                       |              |                       |                            |                         |                         |                         |                   |
| Female1 9mm       | 8,48        | 8,52     | 8,81    | 8,63 | 8,84         | 8,96 | 8,70666667  | 9        | 0,293333333           | 3,259259259  | 0,192215157           | 0,38732284                 | 8,548542779             | 9,025293948             | 0,451457221             | 0,025293948       |
| Female1 6mm       | 5,58        | 5,72     | 5,68    | 5,66 | 5,9          | 5,83 | 5,72833333  | 6        | 0,271666667           | 4,527777778  | 0,117374046           | 0,23651438                 | 5,631776742             | 5,922899536             | 0,368223258             | -0,077100464      |
| Female 3mm        | 2,28        | 2,43     |         |      | 2,67         | 2,88 | 2,565       | 3        | 0,435                 | 14,5         | 0,264386081           | 0,622196536                | 2,253901732             | 3,297127289             | 0,746098268             | 0,297127289       |
| Male2 9mm         | 8,96        | 8,89     | 8,83    | 8,97 | 8,93         | 8,93 | 8,91833333  | 9        | 0,081666667           | 0,907407407  | 0,051542862           | 0,103861361                | 8,87593211              | 9,003773849             | 0,12406789              | 0,003773849       |
| Male2 6mm         | 5,92        | 6,12     | 6,09    | 5,9  | 5,9          | 6,02 | 5,99166667  | 6        | 0,008333333           | 0,138888889  | 0,098877028           | 0,199241994                | 5,910326463             | 6,155571112             | 0,089673537             | 0,155571112       |
| Male2 3mm         | 3,13        | 2,89     | 2,99    | 3,2  | 3,11         | 3,06 | 3,06333333  | 3        | 0,063333333           | 2,111111111  | 0,110211917           | 0,222082344                | 2,972668596             | 3,246027165             | 0,027331404             | 0,246027165       |
| Fomalo2.0mm       | 0.25        | 0 50     | 0.20    | 0.4  | 0.00         | 0.00 | 0 56033333  |          | 0.42166666            | 4 706206200  | 0.353567074           | 0 510051533                | 9 250720244             | 000000000               | 0.640361356             | 0.011227474       |
| Fomale2 5000      | 0,35        | 6,03     | 0,30    | 6,4  | 0,08<br>5.02 | 0,89 | 0,000000000 | 9        | 0,45100000/           | +,/90290290  | 0,235367874           | 0,510951532                | 5 462400205             | 6.020004525             | 0,040201750             | -0,01155/4/1      |
| Fomale2 0mm       | 2,0         | 3,30     | 3,35    | 5,54 | 2,35         | 3,92 | 3,05        | 2        | 0,55                  | 11 1666667   | 0,220035085           | 0,40001/2/                 | 2 202650575             | 2 227002670             | 0,557550795             | 0,020004525       |
| I CITUICZ JIIIII  | 2,42        | ≡ د,∠    |         |      | 2,00         | ∠,00 | 2,005       | 5        | 0,555                 | 11,1000000/  | 0,235035510           | 0,0020/0049                | 2,303000073             | 3,3210950/9             | 0,0103333223            | 0,3210330/9       |

| 3 cylinders +0,2    | Super qualit    | ty I  | PLA Red |      |      |        |            |         |                       |               | Confidence interva | al with 10% error            |                         |                         |                         |                   |
|---------------------|-----------------|-------|---------|------|------|--------|------------|---------|-----------------------|---------------|--------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
|                     | Base            |       | Middle  |      | Тор  |        | Average E  | xpected | Measurement deviation | Relative gap  | Standard deviation | u=student*standard deviation | Confidence interval min | Confidence interval max | Presence within the cor | nfidence interval |
| Male1 9mm           | 8,86            | 9,04  | 8,85    | 9    | 8,89 | 9,03   | 8,945      | . 9     | 0,055                 | 0,611111111   | 0,087806606        | 0,176934558                  | 8,872766769             | 9,090553454             | 0,127233231             | 0,090553454       |
| Male1 6mm           | 5,91            | 6,11  | 5,93    | 6,13 | 6,11 | 5,92   | 6,01833333 | 6       | 0,018333333           | 0,305555556   | 0,108151129        | 0,217929756                  | 5,929363883             | 6,19761108              | 0,070636117             | 0,19761108        |
| Male1 3mm           | 3.15            | 2.9   | 3.13    | 2.94 | 3.15 | 2.88   | 3.025      | 3       | 0.025                 | 0.8333333333  | 0.131263095        | 0.264501485                  | 2,917017721             | 3.242589516             | 0.082982279             | 0.242589516       |
|                     | ., .            | 1-    |         | 7-   |      |        |            |         |                       |               |                    | .,                           | ,                       | .,                      |                         |                   |
| Female1 9mm +0.2    | 8.71            | 8.74  | 8.84    | 8.87 | 8.8  | 8.98   | 8.82333333 | 9.2     | 0.376666667           | 4.094202899   | 0.097296797        | 0.196057752                  | 8,743293091             | 8,984618293             | 0.456706909             | -0.215381707      |
| Female1 6mm +0 2    | 5.8             | 5.85  | 5 76    | 5.87 | 5.83 | 5 92   | 5 83833333 | 6.2     | 0 361666667           | 5 833333333   | 0.055647701        | 0 11213281                   | 5 792555305             | 5 930578274             | 0 407444695             | -0 269421726      |
| Female 3mm +0.2     | 2.83            | 2 78  | 5,70    | 5,67 | 2.86 | 2 93   | 2.85       | 3.2     | 0.35                  | 10 9375       | 0.062716292        | 0 147594229                  | 2 776202885             | 3 023671431             | 0 423797115             | -0 176328569      |
| remate similar oje  | 2,00            | 2,70  |         | _    | 2,00 | 2,55   | 2,05       | 5,2     |                       | 10,5575       | 0,002/10252        | 0,11,00 1220                 | 2,770202000             | 5,025072102             | 0,120707110             | 0,170520505       |
| Male2.9mm           | 8 97            | 8 97  | 9.03    | 8 89 | 8 97 | 8 97   | 8 95       | ٩       | 0.05                  | 0 55555556    | 0.050199602        | 0 101154626                  | 8 908703797             | 9 0332138/7             | 0.091296203             | 0.033213847       |
| Male2 5mm           | 5.0             | 6 12  | 6.01    | 6.1  | 5 02 | 6 11   | 6 07922222 | 6       | 0,03                  | 0,555555555   | 0,096636438        | 0 104706027                  | 5 049944562             | 6 199507051             | 0,051155427             | 0.199507051       |
| Male2 0mm           | 2 15            | 2 90  | 2 0,01  | 2 10 | 2 17 | 2 0,11 | 2 02666667 | 2       | 0,028333333           | 0,472222222   | 0,050020428        | 0,154700527                  | 2 2070/755              | 2 207055457             | 0,031133437             | 0,188507051       |
| Watez Shim          | 5,15            | 2,05  | 2,00    | 3,13 | 5,17 | 2,00   | 3,02000007 | 5       | 0,020000007           | 0,000000000   | 0,157504001        | 0,517500057                  | 2,00704703              | 5,207055457             | 0,10255245              | 0,207033437       |
| Fomalo2.0mm ±0.2    | 0 7             | 9 71  | 0.05    | 80   | 8 00 | 0      | 0 05022222 | 0.2     | 0.241666667           | 2 712769116   | 0 121264622        | 0.264706089                  | 9 750267525             | 0.076001165             | 0 449722475             | 0 122009925       |
| Female2 9mm +0,2    | 6,/             | 0,71  | 0,00    | 0,9  | 6,99 | 5 0 2  | 6,63633333 | 9,2     | 0,541000007           | 5,715706110   | 0,131304032        | 0,204700089                  | 6,750207525             | 9,070091103             | 0,449732473             | -0,125906655      |
| Female2 0mm +0,2    | 2,7             | 3,71  | 5,74    | 5,70 | 3,94 | 2,95   | 3,79000007 | 0,2     | 0,40555555            | 10 950376344  | 0,109300808        | 0,220240410                  | 3,700731444             | 2,97763019              | 0,495246550             | -0,22214961       |
| remalez Simin +0,2  | 2,74            | 2,00  |         |      | 5,09 | 2,92   | 2,6525     | 5,2     | 0,5475                | 10,659575     | 0,192072033        | 0,452015504                  | 2,020492540             | 5,504576144             | 0,575507652             | 0,104576144       |
| a culturateur       | Character of an |       |         |      |      |        |            |         |                       |               | Confidence interes | Luith 10% and a              |                         |                         |                         |                   |
| 2 Cylinders         | Standard qu     | Janty | PLA Red |      | -    |        |            |         |                       | <b>D</b> 1 11 | Confidence interva |                              | 0 01 11 11              | 0 01 11 1               | a                       | <u> </u>          |
|                     | Base            |       | Middle  |      | Тор  |        | Average E  | xpected | Measurement deviation | Relative gap  | Standard deviation | u=student*standard deviation | Confidence interval min | Confidence interval max | Presence within the cor | ntidence interval |
| Male 9mm            | 9,11            | 9,03  | 9       | 9,12 | 8,96 | 9,12   | 9,05666667 | 9       | 0,056666667           | 0,62962963    | 0,069474216        | 0,139993906                  | 8,999514394             | 9,1/1831261             | 0,000485606             | 0,1/1831261       |
| Male 3mm            | 3,03            | 3,21  | 3,2     | 2,83 | 2,86 | 3,24   | 3,06166667 | 3       | 0,061666667           | 2,055555556   | 0,183457534        | 0,369675805                  | 2,910/4/151             | 3,365776791             | 0,089252849             | 0,365776791       |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| Female 9mm +0,0     | 8,95            | 8,89  | 8,56    | 8,57 | 8,79 | 8,98   | 8,79       | 9       | 0,21                  | 2,3333333333  | 0,186010752        | 0,374820664                  | 8,636980105             | 9,098342491             | 0,363019895             | 0,098342491       |
| Female 3mm +0,0     | 2,8             | 2,82  |         | _    | 2,79 | 2,76   | 2,7925     | 3       | 0,2075                | 6,916666667   | 0,025              | 0,058834086                  | 2,763082957             | 2,861728993             | 0,236917043             | -0,138271007      |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| Female 9mm +0,1     | 8,82            | 8,94  | 8,86    | 8,92 | 8,89 | 8,92   | 8,89166667 | 9,1     | 0,208333333           | 2,289377289   | 0,044907312        | 0,090490406                  | 8,854724113             | 8,966107699             | 0,245275887             | -0,133892301      |
| Female 3mm +0,1     | 2,89            | 3,22  |         |      | 2,87 | 2,88   | 2,965      | 3,1     | 0,135                 | 4,35483871    | 0,170195965        | 0,400532962                  | 2,764733519             | 3,436299814             | 0,335266481             | 0,336299814       |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| Female 9mm +0,2     | 9               | 9,26  | 8,76    | 8,95 | 9,03 | 9,16   | 9,02666667 | 9,2     | 0,173333333           | 1,884057971   | 0,173166586        | 0,348939048                  | 8,884212897             | 9,313717904             | 0,315787103             | 0,113717904       |
| Female 3mm +0,2     | 2,97            | 3,03  |         |      | 3,23 | 3,06   | 3,0725     | 3,2     | 0,1275                | 3,984375      | 0,111467484        | 0,262323501                  | 2,941338249             | 3,381171268             | 0,258661751             | 0,181171268       |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| Female 9mm +0,3     | 9,02            | 9,31  | 9       | 8,94 | 9,15 | 9,22   | 9,10666667 | 9,3     | 0,193333333           | 2,078853047   | 0,143341085        | 0,28883922                   | 8,988748549             | 9,344277378             | 0,311251451             | 0,044277378       |
| Female 3mm +0,3     | 3,1             | 3,22  |         |      | 3,11 | 3,2    | 3,1575     | 3,3     | 0,1425                | 4,318181818   | 0,061305247        | 0,144273527                  | 3,085363236             | 3,327264022             | 0,214636764             | 0,027264022       |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| Female 9mm +0,4     | 9,34            | 9,16  | 9,05    | 9,11 | 9,2  | 9,29   | 9,19166667 | 9,4     | 0,208333333           | 2,216312057   | 0,109071842        | 0,219785037                  | 9,101939801             | 9,372470642             | 0,298060199             | -0,027529358      |
| Female 3mm +0,4     | 3,26            | 3,28  |         |      | 3,2  | 3,27   | 3,2525     | 3,4     | 0,1475                | 4,338235294   | 0,035939764        | 0,084579327                  | 3,210210336             | 3,352022948             | 0,189789664             | -0,047977052      |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| Female 9mm +0,5     | 9,33            | 9,36  | 9,24    | 9,22 | 9,3  | 9,33   | 9,29666667 | 9,5     | 0,203333333           | 2,140350877   | 0,055377492        | 0,111588326                  | 9,251110923             | 9,388463693             | 0,248889077             | -0,111536307      |
| Female 3mm +0,5     | 3,21            | 3,41  |         |      | 3,46 | 3,31   | 3,3475     | 3,5     | 0,1525                | 4,357142857   | 0,110867789        | 0,260912201                  | 3,217043899             | 3,654510617             | 0,282956101             | 0,154510617       |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| Female 9mm +0,6     | 9,59            | 9,47  | 9,07    | 8,88 | 9,5  | 9,51   | 9,33666667 | 9,6     | 0,263333333           | 2,743055556   | 0,289251909        | 0,582856588                  | 9,098716461             | 9,816147842             | 0,501283539             | 0,216147842       |
| Female 3mm +0,6     | 3,29            | 3,49  |         |      | 3,33 | 3,68   | 3,4475     | 3,6     | 0,1525                | 4,236111111   | 0,177458915        | 0,417625323                  | 3,238687339             | 3,938912082             | 0,361312661             | 0,338912082       |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| 2 Cylinders         | Super qualit    | ty I  | PLA Red |      |      |        |            |         |                       |               | Confidence interva | al with 10% error            |                         |                         |                         |                   |
|                     | Base            |       | Middle  |      | Тор  |        | Average E  | xpected | Measurement deviation | Relative gap  | Standard deviation | u=student*standard deviation | Confidence interval min | Confidence interval max | Presence within the cor | nfidence interval |
| Male 9mm            | 8.92            | 8.79  | 8.97    | 8.92 | 9.01 | 8.94   | 8.925      | . 9     | 0.075                 | 0.8333333333  | 0.074498322        | 0.150117723                  | 8.863714696             | 9.048492852             | 0.136285304             | 0.048492852       |
| Male 3mm            | 3,11            | 2,84  | 2,8     | 3,22 | 2,78 | 3,13   | 2,98       | 3       | 0,02                  | 0,666666667   | 0,194422221        | 0,39177018                   | 2,820060494             | 3,302285842             | 0,179939506             | 0,302285842       |
|                     |                 |       |         |      |      |        |            |         |                       |               |                    |                              |                         |                         |                         |                   |
| Female 9mm +0.15    | 8.85            | 8.9   | 8.76    | 8.81 | 9.05 | 9.03   | 8.9        | 9.15    | 0.25                  | 2.732240437   | 0.11798305         | 0.237741552                  | 8.802942418             | 9.095575723             | 0.347057582             | -0.054424277      |
| Female 3mm +0.15    | 3.01            | 2.97  | ., .    | .,   | 3.06 | 3.03   | 3.0175     | 3.15    | 0.1325                | 4,206349206   | 0.037749172        | 0.088837521                  | 2,973081239             | 3,122033487             | 0.176918761             | -0.027966513      |
|                     | 0,01            | -/**  |         |      | 0,00 | 0,00   | 0,0210     | 0/20    |                       | .,            |                    | -,                           | _,                      | -,                      |                         | -,                |
| Female 9mm +0.3     | 9.05            | 9.05  | 8.9     | 9.06 | 9.08 | 9.25   | 9.065      | 9.3     | 0.235                 | 2.52688172    | 0.11148991         | 0.224657562                  | 8,973283935             | 9,249812308             | 0.326716065             | -0.050187692      |
| Female 3mm +0 3     | 3.2             | 3 3   | -,-     |      | 3 25 | 3 31   | 3 265      | 33      | 0.035                 | 1.060606061   | 0.050662281        | 0 119226758                  | 3 205386621             | 3 405291947             | 0.094613379             | 0 105291947       |
| remate shim (0,5    | 0,2             | 5,5   |         | _    | 5,25 | 5,51   | 5,205      | 5,5     |                       | 1,000000001   | 0,050002201        | 0,115220,50                  | 5,205500021             | 5,105251517             | 0,051015575             | 0,100201017       |
| Female 9mm +0.4     | 9.21            | 9 21  | 8 82    | 8 95 | 9.05 | 9 35   | 9 09833333 | 94      | 0 301666667           | 3 209219858   | 0 194978631        | 0 392891374                  | 8 937936102             | 9 421541514             | 0 462063898             | 0 021541514       |
| Female 3mm +0.4     | 3,21            | 3.25  | 0,02    | 0,00 | 3.24 | 2,35   | 3 205      | 3,4     | 0.105                 | 5 735294119   | 0.05//67115        | 0 120100010                  | 3 1/00/05/1             | 2 2559201/2             | 0,752003858             | -0.04/171957      |
| remate Smith +0,4   | 3,15            | 3,23  | _       |      | 3,24 | 2,2    | 3,205      | 3,4     | 0,195                 | 5,755254110   | 0,034407115        | 0,120100910                  | 3,140909341             | 3,333820143             | 0,235050439             | -0,0441/165/      |
| Fomalo 9mm ±0 5     | 0.20            | 0.2   | 0 77    | 0.24 | 0.29 | 0.22   | 0 20222222 | 0 5     | 0 20666667            | 2 175429506   | 0.05953737         | 0 117056373                  | 0 245177046             | 0 200269060             | 0.254922154             | 0 100621021       |
| Fomale 2mm ±0.5     | 3,29            | 3,3   | 9,22    | 9,24 | 3,56 | 3,33   | 2,2300000  | 9,5     | 0,200000007           | 2,1/3430390   | 0,000301440        | 0,11/9503/2                  | 3,24517/840             | 3,530308903             | 0.204022154             | -0,109051031      |
| i cinale smill #0,5 | 3,32            | 3,19  |         |      | 3,33 | 5,43   | 3,3223     | 5,5     | 0,1775                | 3,071420371   | 0,099791449        | 0,234645548                  | 5,200077220             | 3,330038402             | 0,294922774             | 0,030030402       |
| Fomalo Omm 10.6     | 0.25            | 0.41  | 0.7     | 0.12 | 0.46 | 0.44   | 0.24666667 | 0.0     | 0 35333333            | 2 620000000   | 0 13500400         | 0.252501200                  | 0 2424 75404            | 0 555300000             | 0.356934999             | 0.044703004       |
| Female 9mm +0,0     | 9,35            | 9,41  | 9,3     | 9,12 | 9,40 | 9,44   | 9,3400000/ | 9,6     | 0,253333333           | 2,03888889    | 0,12580408         | 0,253501308                  | 9,2431/5191             | 9,555206996             | 0,350824809             | -0,044793004      |
| remale 3mm +0,6     | 3,2             | 3,28  |         |      | 3,57 | 3,61   | 3,415      | 3,6     | 0,185                 | 5,13888889    | 0,205345238        | 0,483251974                  | 3,1/33/4013             | 3,983033763             | 0,420025987             | 0,383033763       |

| Су-са                      | Standard qu | iality F | LA Red |       |       |       |             |          |                       |              | Confidence interval with 10 | 0% error                     |                    |                            |                        |                  |
|----------------------------|-------------|----------|--------|-------|-------|-------|-------------|----------|-----------------------|--------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|------------------|
|                            | Base        | 1        | ۸iddle |       | Тор   |       | Average     | Expected | Measurement deviation | Relative gap | Standard deviation u=stude  | ent*standard deviation Confi | dence interval min | Confidence interval max Pr | resence within the con | fidence interval |
| Male Cylinder 9mm          | 8,97        | 9,12     | 9,1    | 8,9   | 8,78  | 8,97  | 8,97333333  | 9        | 0,026666667           | 0,296296296  | 0,126754356                 | 0,255416158                  | 8,869060123        | 9,183448895                | 0,130939877            | 0,183448895      |
| Male Square 9mm            | 8,98        | 9,02     | 9,1    | 9,05  | 9     | 9,05  | 9,03333333  | 9        | 0,03333333            | 0,37037037   | 0,042739521                 | 0,086122203                  | 8,998174091        | 9,104180907                | 0,001825909            | 0,104180907      |
| Female Cylinder 9mm +0.15  | 9.05        | 9        | 8 84   | 8.8   | 9     | 8 97  | 8 94333333  | 9.15     | 0 206666667           | 2 258652095  | 0 099732977                 | 0 200966773                  | 8 861288992        | 9 10865665                 | 0 288711008            | -0 04134335      |
| Female Square 9mm +0,15    | 9,1         | 9,15     | 8,74   | 9,07  | 9,15  | 9,19  | 9,066666667 | 9,15     | 0,083333333           | 0,910746812  | 0,165489174                 | 0,333468691                  | 8,930528644        | 9,340991368                | 0,219471356            | 0,190991368      |
|                            |             |          |        |       |       |       |             |          |                       |              |                             |                              |                    |                            |                        |                  |
| Female Cylinder 9mm +0,3   | 9           | 9,14     | 8,73   | 8,82  | 9,01  | 9,16  | 8,97666667  | 9,3      | 0,323333333           | 3,476702509  | 0,171658576                 | 0,345900334                  | 8,835453447        | 9,261218136                | 0,464546553            | -0,038781864     |
| Female Square 9mm +0,3     | 9,16        | 9,12     | 8,62   | 8,63  | 9,03  | 9,28  | 8,97333333  | 9,3      | 0,326666667           | 3,512544803  | 0,281543366                 | 0,567323501                  | 8,741724484        | 9,440036368                | 0,558275516            | 0,140036368      |
| Female Cylinder 9mm +0,4   | 9,15        | 9,27     | 8,84   | 8,98  | 9,08  | 9,25  | 9,095       | 9,4      | 0,305                 | 3,244680851  | 0,165015151                 | 0,332513511                  | 8,959251927        | 9,368538933                | 0,440748073            | -0,031461067     |
| Female Square 9mm +0,4     | 9,32        | 9,28     | 9,22   | 9,05  | 9,38  | 9,42  | 9,27833333  | 9,4      | 0,121666667           | 1,294326241  | 0,13242608                  | 0,266844957                  | 9,169394336        | 9,497850683                | 0,230605664            | 0,097850683      |
| Female Culiades Ones 10 F  | 0.20        | 0.2      | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.2   | 0 15222222  | 0.5      | 0.24000007            | 2 640122007  | 0 1300 44433                | 0.250020200                  | 0.047250470        | 0.267070207                | 0 452741522            | 0 122020702      |
| Female Cylinder 9mm +0,5   | 9,29        | 9,5      | 9,00   | 0,99  | 9,06  | 9,2   | 9,135555555 | 9,5      | 0,540000007           | 3,049122007  | 0,126944452                 | 0,253629209                  | 9,047236476        | 9,307079297                | 0,452/41522            | -0,132920703     |
| Female Square 9mm +0,5     | 9,3         | 9,29     | 9,13   | 9,12  | 9,43  | 9,37  | 9,2/333333  | 9,5      | 0,22000007            | 2,385964912  | 0,125645003                 | 0,253180758                  | 9,169972722        | 9,481009900                | 0,330027278            | -0,018390034     |
| Female Cylinder 9mm +0,6   | 9,43        | 9,49     | 9,36   | 9,36  | 9,47  | 9,52  | 9,43833333  | 9,6      | 0,161666667           | 1,684027778  | 0,067354782                 | 0,135723144                  | 9,382924592        | 9,549984628                | 0,217075408            | -0,050015372     |
| Female Square 9mm +0,6     | 9,3         | 9,28     | 9,15   | 9,31  | 9,59  | 9,5   | 9,355       | 9,6      | 0,245                 | 2,552083333  | 0,160592652                 | 0,323601963                  | 9,222890052        | 9,621207936                | 0,377109948            | 0,021207936      |
| Cv-ca                      | Standard ou | ality 6  | FTG    |       |       |       |             |          |                       |              | Confidence interval with 10 | )% error                     |                    |                            |                        |                  |
|                            | Base        | P        | Aiddle |       | Ton   |       | Average     | Expected | Measurement deviation | Relative gan | Standard deviation u=stude  | ent*standard deviation Confi | dence interval min | Confidence interval max Pr | resence within the con | fidence interval |
| Male Cylinder 9mm          | 8.98        | 8 88     | 8 87   | 8 99  | 8.88  | 8 98  | 8 93        | a        | 0.07                  | 0 77777778   | 0.058651513                 | 0.118185636                  | 8 881750916        | 9 027224238                | 0.1182/1908/           | 0.027224238      |
| Male Square 9mm            | 8 91        | 9.04     | 8 96   | 8 96  | 9.05  | 9.12  | 9 00666667  | 9        | 0,07                  | 0.074074074  | 0.076854842                 | 0 154866223                  | 8 943442796        | 9 13/065825                | 0.056557204            | 0 134065825      |
| Wate square shift          | 0,51        | 5,04     | 0,50   | 0,50  | 5,05  | 5,12  | 5,00000007  | 5        | 0,00000007            | 0,074074074  | 0,070034042                 | 0,134000223                  | 0,545442750        | 5,154005025                | 0,030357204            | 0,134003023      |
| Female Cylinder 9mm +0,15  | 9,03        | 9,08     | 8,94   | 8,79  | 8,92  | 8,95  | 8,95166667  | 9,15     | 0,198333333           | 2,167577413  | 0,099883265                 | 0,201269611                  | 8,869498692        | 9,11723911                 | 0,280501308            | -0,03276089      |
| Female Square 9mm +0,15    | 8,78        | 9,08     | 8,53   | 8,76  | 9,15  | 9,09  | 8,89833333  | 9,15     | 0,251666667           | 2,750455373  | 0,245716639                 | 0,495130914                  | 8,696196984        | 9,305647855                | 0,453803016            | 0,155647855      |
| Female Cylinder, 9mm +0.2  | 9.14        | 0.1      | 8 60   | 0.00  | 0.15  | 0.79  | 0.05666667  | 0.2      | 0 24222222            | 2 616497455  | 0 202820005                 | 0 410727200                  | 9 999097010        | 0 204547204                | 0 411012051            | 0.004547204      |
| Female Cylinder Smith +0,3 | 9,14        | 9.05     | 0,05   | 0,50  | 0.20  | 0.21  | 9,0000007   | 0,3      | 0,243333333           | 2,010487433  | 0,223178092                 | 0,410727295                  | 8,005667669        | 0 /01520000                | 0,411012031            | 0,034347334      |
| Temale Square Smin +0,5    | 8,95        | 8,95     | 0,0    | 5,10  | 5,35  | 5,51  | 3,03000007  | 3,3      | 0,20333333            | 2,180373328  | 0,232178055                 | 0,407830088                  | 8,505007008        | 5,481558888                | 0,354352552            | 0,181558888      |
| Female Cylinder 9mm +0,4   | 9,48        | 9,33     | 8,89   | 8,97  | 9,18  | 9,33  | 9,19666667  | 9,4      | 0,203333333           | 2,163120567  | 0,228706508                 | 0,460854676                  | 9,008523533        | 9,575784182                | 0,391476467            | 0,175784182      |
| Female Square 9mm +0,4     | 8,99        | 9,11     | 9,1    | 9,21  | 9,33  | 9,37  | 9,185       | 9,4      | 0,215                 | 2,287234043  | 0,146116392                 | 0,294431598                  | 9,064798803        | 9,427211226                | 0,335201197            | 0,027211226      |
| Female Cylinder 9mm +0.5   | 9 34        | 9 33     | 9 1 7  | 93    | 8 44  | 9 4 2 | 9 16666667  | 9.5      | 0 33333333            | 3 50877193   | 0 365166629                 | 0 735828421                  | 8 866265972        | 9 771988598                | 0 633734028            | 0 271988598      |
| Female Square 9mm +0.5     | 9.05        | 9.06     | 9.27   | 9 17  | 9 41  | 9.52  | 9 24666667  | 95       | 0 253333333           | 2 666666667  | 0 190438091                 | 0 383741966                  | 9 090004665        | 9 562348178                | 0.409995335            | 0.062348178      |
| remaie square smin (6,5    | 5,05        | 5,00     | 5,27   | 5,17  | 5,12  | 5,52  | 5,21000007  | 5,5      | 0,20000000            | 2,00000000   | 0,150 150051                | 0,0007 11000                 | 5,656661665        | 5,502510170                | 0,1033333333           | 0,002010170      |
| Female Cylinder 9mm +0,6   | 9,4         | 9,42     | 8,9    | 9,36  | 9,67  | 9,73  | 9,41333333  | 9,6      | 0,186666667           | 1,94444444   | 0,294188148                 | 0,59280335                   | 9,171322379        | 9,900997113                | 0,428677621            | 0,300997113      |
| Female Square 9mm +0,6     | 9,28        | 9,22     | 9,43   | 9,38  | 9,5   | 9,56  | 9,395       | 9,6      | 0,205                 | 2,135416667  | 0,129267165                 | 0,260479591                  | 9,288659652        | 9,609280945                | 0,311340348            | 0,009280945      |
| 2 in 1                     | Standard ou | ality    | A Red  |       |       |       |             |          |                       |              | Confidence interval with 10 | )% error                     |                    |                            |                        |                  |
|                            | Base        | P        | Aiddle |       | Top   |       | Average     | Expected | Measurement deviation | Relative gap | Standard deviation u=stude  | ent*standard deviation Confi | dence interval min | Confidence interval max Pr | resence within the con | fidence interval |
| Male Cylinder 12mm         | 11,85       | 11,95    | 11,97  | 12,16 | 11,97 | 12,11 | 12,0016667  | 12       | 0,001666667           | 0,013888889  | 0,113563492                 | 0,228835929                  | 11,90824479        | 12,18991627                | 0,09175521             | 0,189916268      |
| Female Culinder 12mm (0.1) | 11.02       | 11.00    | 11.0   | 11.70 | 12.00 | 12.02 | 11.04       | 12.15    |                       | 1 720205052  | 0 100 770 702               | 0.215140202                  | 11 05210000        | 12 1100000                 | 0 207022022            | 0.022010200      |
| Female Cylinder 12mm +0,1  | 5 11,93     | 11,96    | 11,9   | 11,76 | 12,06 | 12,03 | 11,94       | 12,15    | . 0,21                | 1,728395062  | 0,106770783                 | 0,215148292                  | 11,85216608        | 12,1169896                 | 0,297833922            | -0,033010398     |
| Female Cylinder 12mm +0,3  | 11,94       | 12,13    | 11,77  | 11,5  | 12,16 | 12,17 | 11,945      | 12,3     | 0,355                 | 2,886178862  | 0,268234972                 | 0,540506443                  | 11,72433917        | 12,38964225                | 0,575660831            | 0,089642249      |
| Female Cylinder 12mm +0,4  | 12,01       | 12,11    | 12,14  | 11,99 | 12,31 | 12,28 | 12,14       | 12,4     | 0,26                  | 2,096774194  | 0,13326665                  | 0,268538746                  | 12,03036952        | 12,36091073                | 0,369630484            | -0,039089271     |
| Female Cylinder 12mm +0,5  | 12,02       | 12,02    | 12,04  | 11,91 | 12,4  | 12,3  | 12,115      | 12,5     | 0,385                 | 3,08         | 0,190341798                 | 0,38354793                   | 11,95841721        | 12,43052189                | 0,541582787            | -0,06947811      |
| Female Cylinder 12mm +0,6  | 12,13       | 12,12    | 12,1   | 11,74 | 12,4  | 12,51 | 12,1666667  | 12,6     | 0,433333333           | 3,439153439  | 0,269196335                 | 0,542443637                  | 11,94521498        | 12,61290253                | 0,654785021            | 0,012902529      |

|                        | Base  |       |       |       | Middle |       |       | •     | Гор   |                |                |                    | Average                   | Expected                       | Measurement deviation | Relative gap |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------------|--------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------|
| Male Square 10mm       | 9,98  | 10,11 | 10,01 | 10,04 | 10,2   | 10,12 | 10,26 | 10,15 | 10,22 | 10,16          | 10,23          | 10,11              | 10,1325                   | 10                             | 0,1325                | 1,325        |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |                |                |                    |                           |                                |                       |              |
| Female Square 10,125mm | 9,73  | 9,71  | 9,78  | 9,71  | 9,71   | 9,75  | 10,02 | 9,98  | 10,06 | 10             | 10,05          | 10,12              | 9,885                     | 10,125                         | 0,24                  | 2,37037037   |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |                |                |                    |                           |                                |                       |              |
| Female Square 10,25mm  | 10,04 | 10,1  | 10,07 | 10,09 | 10,05  | 10,01 | 10,16 | 10,05 | 10,38 | 10,25          | 10,19          | 10,06              | 10,12083333               | 10,25                          | 0,129166667           | 1,260162602  |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |                |                |                    |                           |                                |                       |              |
| Female Square 10,33mm  | 10,03 | 10,17 | 10,12 | 10,18 | 10,21  | 10,17 | 10,02 | 9,85  | 10,19 | 10,21          | 10,2           | 10,25              | 10,13333333               | 10,33                          | 0,196666667           | 1,903839948  |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |                |                |                    |                           |                                |                       |              |
| Female Square 10,417mm | 9,94  | 10    | 9,99  | 10,03 | 10,35  | 10,15 | 10,14 | 10,23 | 10,14 | 9,81           | 10,45          | 10,09              | 10,11                     | . 10,417                       | 0,307                 | 2,947105693  |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |                |                |                    |                           |                                |                       |              |
| Female Square 10,5mm   | 10    | 10,04 | 10,14 | 10,14 | 10,07  | 10,27 | 10,33 | 10,34 | 10,16 | 10,21          | 10,48          | 10,32              | 10,20833333               | 10,5                           | 0,291666667           | 2,777777778  |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |                |                |                    |                           |                                |                       |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | <u> </u>       | 1 11 100       |                    |                           |                                |                       |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | Confidence Int | erval with 10% | 6 error            | Confidence internal and   | Descent of the location of the | daman tata mal        |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | Standard devia | u=student*st   | Confidence Interva | a Confidence Interval max | Presence within the confi      | dence Interval        |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0,088945847    | 0,1597365      | 10,08638805        | 10,17861195               | -0,086388046                   | 0,178611954           | •            |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0 164796262    | 0 20502722     | 0 700570257        | 0.070420749               | 0 225420749                    | 0 154570257           | •            |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0,104780505    | 0,29393733     | 9,799370232        | 5,570425746               | 0,525425746                    | -0,134370232          |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0 107319263    | 0 19273304     | 10.0651961         | 10 17647057               | 0 184803902                    | -0 073529433          | •            |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0,107515205    | 0,15275504     | 10,0051501         | 10,17047057               | 0,104003502                    | 0,073323432           |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0.113564826    | 0.20394935     | 10.07445823        | 10.19220844               | 0.255541772                    | -0.137791562          |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | -,             |                |                    |                           | -,                             | -,                    |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0,176635217    | 0,31721651     | 10,01842748        | 10,20157252               | 0,398572517                    | -0,215427483          |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |                |                |                    |                           |                                |                       |              |
|                        |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0,142945211    | 0,25671313     | 10,13422663        | 10,28244003               | 0,365773365                    | -0,217559968          | 1            |

## Από κεφάλαιο 4.6.1

|                |                 | Base thickness | top thickness | differences   | hypotenuse | angle      |               |            |      |         | <br>1 |
|----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|------|---------|-------|
| Big piece      | MEASUREMENT 1   | 19,13          | 14,87         | 4,26          | 84,2       | 2,90005072 |               |            | CO.C | <u></u> |       |
|                | MEASUREMENT 2   | 19,09          | 14,65         | 4,44          | 84,12      | 3,0255769  |               |            | 1 IM |         |       |
|                |                 |                |               |               | Average    | 2,96       | ф2            |            |      |         |       |
| Rig piece      | internal base   | MEASUREMENT 1  | MEASUREMENT 2 | MEASUREMENT 3 | Average    |            | [             |            |      |         |       |
| big piece      |                 | 58,1           | 58,06         | 58,28         | 58,15      | 17         |               |            |      |         |       |
|                |                 |                |               |               |            |            |               |            |      |         |       |
|                |                 |                |               |               |            |            |               |            | 15   |         |       |
|                |                 | Base thickness | top thickness | differences   | hypotenuse |            | differences   | angle      | - 11 |         |       |
| Middle piece   | MEASUREMENT 1   | 10,59          | 8,99          | 1,6           | 36,67      |            | 36,67         | 2,50074611 |      | •       |       |
|                | MEASUREMENT 2   | 10,66          | 8,96          | 1,7           | 36,51      |            | 36,51         | 2,66880459 |      |         |       |
|                |                 |                |               |               |            |            | Average       | 2,58       |      |         |       |
|                |                 | Base thickness | top thickness | differences   | hypotenuse |            | differences   | angle      |      |         |       |
| Middle piece 2 | MEASUREMENT 1   | 10,67          | 8,91          | 1,76          | 36,25      |            | 36,25         | 2,78290295 |      |         |       |
|                | MEASUREMENT 2   | 10,67          | 8,97          | 1,7           | 36,28      |            | 36,28         | 2,68573606 |      |         |       |
|                |                 |                |               |               |            |            | Average       | 2,73       |      |         |       |
|                |                 |                |               |               |            |            | TOTAL AVERAGE | 2,66       | ф1   |         |       |
|                | internal base:  | MEASUREMENT 1  | MEASUREMENT 2 | MEASUREMENT 3 | Average    |            |               |            |      |         |       |
|                |                 | 10,6           | 10,7          | 10,67         | 10,66      | 15         |               |            |      |         |       |
|                |                 |                |               |               |            |            |               |            |      |         |       |
| Middle piece   | external base : | MEASUREMENT 1  | MEASUREMENT 2 | MEASUREMENT 3 | Average    |            |               |            |      |         |       |
|                |                 | 31,5           | 31,51         | 31,5          | 31,50      | 1          |               |            |      |         |       |
|                |                 |                |               |               |            |            |               |            |      |         |       |
|                | thickness base  | MEASUREMENT 1  | MEASUREMENT 2 | MEASUREMENT 3 | Average    |            |               |            |      |         |       |
|                |                 | 10,17          | 10,18         | 10,2          | 10,18      | 14         |               |            |      |         |       |

| σταθερέ   | ς διάστάσεις   | Standard dim | ensions |          |          |          |           |           |          |     |          |
|-----------|----------------|--------------|---------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-----|----------|
| μετρ      | ούμενα         | Measurer     | nents   |          |          |          |           |           |          |     | 1        |
| υπολα     | ογιζόμενα      | Calcula      | ted     |          |          |          |           |           |          |     |          |
| συν       | τελεστές       | Ratio        | s       |          |          |          |           | ወን        |          |     |          |
| ευτερεύον | τες συντελεστέ | Secondary    | Ratios  |          |          |          |           | Ψ2<br>    |          |     |          |
|           | test           | Test         |         |          |          | (        | $(\cdot)$ |           | Ī        |     |          |
|           |                |              |         |          |          |          | M         |           |          |     |          |
| φ1 (deg)  | 2,66           |              |         |          |          |          |           |           |          | _   |          |
| φ1 (rad)  | 0,05           |              |         |          |          |          | D         |           |          | 7   |          |
| φ2 (deg)  | 2,96           |              |         |          |          |          | - And     |           |          |     |          |
| ф2 (rad)  | 0,05           |              |         |          | +        |          | φι        |           |          |     |          |
| 11        | 31,50          |              |         |          | 4        |          |           |           | +        |     |          |
| 14        | 10,18          |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| 15        | 10,66          |              |         |          |          |          | 15        |           |          |     |          |
| 17        | 58,15          |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
|           |                |              |         |          |          | ۹        | 11        |           |          |     |          |
| b         | 88,50          |              |         |          |          | -        | b         |           |          |     |          |
| b'        | 101,13         |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| δb        | 12,63          |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
|           |                |              |         | b'       | δb       | D'       | δD (mm)   | h'        | δh       | h3' | δh3      |
| στυντελ 1 | 10,75          |              |         | 101,1346 | 12,63129 | 14,81792 | 0,057976  | 44,61984  | 0,623385 | 85  | 12,62979 |
| στυντελ 2 | 11,27          |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| στυντελ 3 | 217,84         |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| σ         | 217,87         |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
|           |                |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| D         | 14,76          |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| D'        | 14,82          | test         |         |          |          |          |           |           | ወ2       |     |          |
| δD        | 0,06           | 0,06         |         |          | +        | 2        |           |           | 1        |     |          |
|           |                |              |         |          |          | + +      | - ( K     |           |          |     |          |
| r1        | 0,34           |              |         |          |          | 4        |           | h         | 3        |     |          |
| r1'       | 0,34           |              |         |          | 3        |          |           |           |          |     |          |
|           |                |              |         |          | Ē        | 2        |           | D         |          |     | 7        |
| r2        | 7,37           |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| r2'       | 7,40           |              |         |          |          | ¥        |           | φ1        |          |     |          |
|           |                |              |         |          |          | 4        |           |           |          |     |          |
| h         | 44,00          |              |         |          | _        |          |           |           |          |     | _        |
| h'        | 44,62          | test         |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| δh        | 0,62           | 0,62         |         |          |          |          |           | <b>15</b> |          |     |          |
|           |                |              |         |          |          |          | 4         | 11        |          |     |          |
| hoλ       | 61,89          |              |         |          |          |          |           | b         |          |     |          |
| hoλ'      | 62,55          | test         |         |          |          |          | 4         |           | •        |     |          |
| δhoλ      | 0,65           | 0,65         |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
|           |                |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| h3        | 72,37          |              |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| h3'       | 85,00          | test         |         |          |          |          |           |           |          |     |          |
| δh3       | 12,63          | 12,63        |         |          |          |          |           |           |          |     |          |

 n
 r1'
 r2'
 hoλ'
 δhoλ
 h3'
 <th1'</th>
 <th1'</th>
 <th1'</th>

 0,00
 0,34
 7,33
 60,91
 0,00
 53,37

 0,81
 0,34
 7,29
 60,06
 0,85
 36,87

 1,14
 0,34
 7,27
 59,72
 1,19
 30,38

 0,35
 0,34
 7,31
 60,55
 0,36
 46,37

 1,43
 0,34
 7,26
 59,41
 1,50
 24,38

0,34 7,29 60,13

 1,73
 0,34
 7,25

 0,00
 0,34
 7,33

 0,89
 0,34
 7,29

 0,05
 0,34
 7,33

 0,94
 0,34
 7,29

0,100,347,321,530,347,250,000,347,321,140,347,27

 0,20
 0,34
 7,31

 0,69
 0,34
 7,28

 0,00
 0,34
 7,32

 0,54
 0,34
 7,29

 0,54
 0,34
 7,29

 0,00
 0,34
 7,29

0,250,347,311,380,347,260,000,347,321,090,347,27

 0,00
 0,34
 7,34

 0,94
 0,34
 7,29

 1,04
 0,34
 7,30

 0,79
 0,34
 7,30

 1,73
 0,34
 7,26

1,430,347,260,150,347,321,280,347,270,000,347,33

0,000,347,331,330,347,271,090,347,280,740,347,290,940,347,29

 1,14
 0,34
 7,28
 59,82
 1,19
 32,37

 0,00
 0,34
 7,33
 61,01
 0,00
 55,37

 0,35
 0,34
 7,32
 60,65
 0,36
 48,37

 0,35
 0,34
 7,32
 60,65
 0,36
 48,37

 0,35
 0,34
 7,32
 60,65
 0,36
 48,37

 0,59
 0,34
 7,30
 60,39
 0,62
 43,37

0,34 7,31 60,60

5,00 4,00 0,00

0,00 18,00 1,00

16,5 23,0 7,0

1,09 38,3

36.4

 59,20
 1,60
 20,38
 31,00

 60,81
 0,00
 51,37
 0,00

 59,62
 1,19
 28,38
 23,00

 60,39
 0,41
 43,37
 8,00

 60,44
 0,21
 44,37
 59,93

 59,93
 0,72
 34,37
 14,00

 60,65
 0,00
 48,37
 0,00

 60,08
 0,57
 37,37
 11,00

 000
 48,37
 0,00
 48,37
 0,00

 60,60
 0,26
 47,37
 5,00

 59,41
 1,45
 24,38
 28,00

 60,86
 0,00
 52,37
 0,00

 59,72
 1,14
 30,38
 22,00

0,26 47,37

 61,12
 0,00
 57,37
 0,00

 60,13
 0,98
 38,37
 19,00

 60,03
 1,09
 36,37
 21,00

 60,29
 0,83
 41,37
 16,00

 59,30
 1,81
 22,38
 35,00

 59,41
 1,50
 24,38

 60,75
 0,16
 50,37

 59,56
 1,35
 27,38

 60,91
 0,00
 53,37

 59,77
 1,14
 31,38

 60,96
 0,00
 54,37
 0,00

 59,56
 1,40
 27,38
 27,00

 59,82
 1,14
 32,37
 22,00

 60,18
 0,78
 39,37
 15,00

 59,98
 0,98
 35,37
 19,00

3,00 26,00 0,00

> 0,00 7,00 7,00

 61,01
 0,00
 55,42

 60,08
 0,93
 37,42

 60,96
 0,05
 54,42

| n        | der 3          | Pro pri | nter  |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
|----------|----------------|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|----------------|-------|----------------|--------|
| 1        | b'             | δb      | D'    | δD    | h'    | δh    | r1'  | r2'  | hoλ'           | δhoλ  | h3'            | δh3    |
| 1        | 88,50          | 3,00    | 14,76 | 0,01  | 44,00 | 0,15  | 0,34 | 7,37 | 61,89          | 0,16  | 72,37          | 3,00   |
| 2        | 69,50          | 22,00   | 14,67 | 0,10  | 43,06 | 1,09  | 0,34 | 7,33 | 60,91          | 1,14  | 53,37          | 22,00  |
| 3        | 74,50<br>91,50 | 0.00    | 14,70 | 0,08  | 43,31 | 0,84  | 0,34 | 7,34 | 62.05          | 0,88  | 38,37<br>75 37 | 0.00   |
| 5        | 65,50          | 26,00   | 14,65 | 0,12  | 42,86 | 1,28  | 0,34 | 7,32 | 60,70          | 1,35  | 49,37          | 26,00  |
|          |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 2        |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 01       | 54,50          | 13,00   | 14,60 | 0,06  | 42,32 | 0,64  | 0,34 | 7,29 | 60,13          | 0,67  | 38,37          | 13,00  |
| 2        | 67,50          | 0,00    | 14,66 | 0,00  | 42,96 | 0,00  | 0,34 | 7,32 | 60,81          | 0,00  | 51,37          | 0,00   |
| 3        | 45,50          | 22,00   | 14,56 | 0,10  | 41,87 | 1,09  | 0,34 | 7,27 | 59,67          | 1,14  | 29,38          | 22,00  |
| 4<br>5   | 53,50          | 4,00    | 14,65 | 0,02  | 42,76 | 0,20  | 0,34 | 7,31 | 60,60          | 0,21  | 47,37          | 4,00   |
| 2        | 59,50          | 0,00    | 14,05 | 0,04  | 42,57 | 0,59  | 0,54 | 7,50 | 00,59          | 0,41  | 45,57          | 6,00   |
| 3        |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 1        | 57,50          | 0,00    | 14,62 | 0,00  | 42,47 | 0,00  | 0,34 | 7,30 | 60,29          | 0,00  | 41,37          | 0,00   |
| 2        | 31,50          | -26,00  | 14,50 | -0,12 | 41,18 | -1,28 | 0,34 | 7,24 | 58,94          | -1,35 | 15,38          | -26,00 |
| 3        | 92,50          | 35,00   | 14,78 | 0,16  | 44,19 | 1,73  | 0,34 | 7,38 | 62,10          | 1,81  | 76,37          | 35,00  |
| 4        | 40,00          | -17,50  | 14,54 | -0,08 | 41,60 | -0,86 | 0,34 | 7,26 | 59,38          | -0,91 | 23,88          | -17,50 |
| 5        | 60,00          | 2,50    | 14,63 | 0,01  | 42,59 | 0,12  | 0,34 | 7,30 | 60,42          | 0,13  | 43,87          | 2,50   |
|          |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 4        |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 1        | 40,00          | 21,50   | 14,54 | 0,10  | 41,60 | 1,06  | 0,34 | 7,26 | 59,38          | 1,11  | 23,88          | 21,50  |
| 2        | 61,50          | 0,00    | 14,64 | 0,00  | 42,66 | 0,00  | 0,34 | 7,31 | 60,50          | 0,00  | 45,37          | 0,00   |
| 3        | 53,50          | 8,00    | 14,60 | 0,04  | 42,27 | 0,39  | 0,34 | 7,29 | 50,08          | 0,41  | 37,37          | 8,00   |
| +        | 50,50          | 23,00   | 14,53 | 0,11  | 41,53 | 1,14  | 0,34 | 7,20 | 59,30<br>60,44 | 1,19  | 22,38          | 23,00  |
| -        | 00,50          | 1,00    | 14,03 | 0,00  | 42,01 | 0,03  | 0,54 | 7,51 | 00,44          | 0,05  | 44,57          | 1,00   |
| 5        |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 1        | 68,55          | 24,00   | 14,67 | 0,11  | 43,01 | 1,18  | 0,34 | 7,32 | 60,86          | 1,24  | 52,42          | 24,00  |
| 2        | 61,05          | 31,50   | 14,63 | 0,14  | 42,64 | 1,55  | 0,34 | 7,31 | 60,47          | 1,63  | 44,92          | 31,50  |
| 3        | 88,55          | 4,00    | 14,76 | 0,02  | 44,00 | 0,20  | 0,34 | 7,37 | 61,89          | 0,21  | 72,42          | 4,00   |
| 1        | 56,55          | 36,00   | 14,61 | 0,17  | 42,42 | 1,78  | 0,34 | 7,30 | 60,24          | 1,86  | 40,42          | 36,00  |
| 5        | 92,55          | 0,00    | 14,78 | 0,00  | 44,20 | 0,00  | 0,34 | 7,38 | 62,10          | 0,00  | 76,42          | 0,00   |
| _        |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 6        |                | 0.00    |       | 0.71  |       | 0.50  | 0.7  | -    |                | 0.70  |                |        |
| 1        | 77,50          | 0,00    | 14,71 | 0,00  | 43,45 | 0,00  | 0,34 | 7,34 | 61,32          | 0,00  | 61,37          | 0,00   |
| 2        | 59.50          | 16,00   | 14,64 | 0,07  | 42,66 | 0,79  | 0,34 | 7,31 | 60,50          | 0,83  | 45,37          | 16,00  |
| 4        | 42 50          | 35.00   | 14,02 | 0.16  | 42,52 | 1.72  | 0,54 | 7.26 | 59.54          | 1,98  | 26.39          | 35.00  |
| 5        | 56.50          | 21.00   | 14.61 | 0.10  | 42.42 | 1.04  | 0.34 | 7,30 | 60.24          | 1.09  | 40 37          | 21.00  |
| -        | 30,50          | 22,00   | 1.,01 | 0,10  |       | 2,04  | 0,04 | 7,50 | 00,24          | 2,09  | ,              | 21,00  |
| 7        |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 1        | 39,50          | 25,00   | 14,54 | 0,11  | 41,58 | 1,23  | 0,34 | 7,26 | 59,36          | 1,29  | 23,38          | 25,00  |
| 2        | 64,50          | 0,00    | 14,65 | 0,00  | 42,81 | 0,00  | 0,34 | 7,32 | 60,65          | 0,00  | 48,37          | 0,00   |
| 3        | 42,50          | 22,00   | 14,55 | 0,10  | 41,73 | 1,09  | 0,34 | 7,26 | 59,51          | 1,14  | 26,38          | 22,00  |
| 4        | 62,50          | 2,00    | 14,64 | 0,01  | 42,71 | 0,10  | 0,34 | 7,31 | 60,55          | 0,10  | 46,37          | 2,00   |
| 5        | 56,50          | 8,00    | 14,61 | 0,04  | 42,42 | 0,39  | 0,34 | 7,30 | 60,24          | 0,41  | 40,37          | 8,00   |
| _        |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 8        | 67.50          | 0.00    | 14.00 | 0.00  | 42.00 | 0.00  | 0.24 | 7.22 | 60.00          | 0.00  | E1.07          | 0.00   |
| 12       | 54.50          | 13.00   | 14,66 | 0,00  | 42,96 | 0,00  | 0,34 | 7,32 | 60.12          | 0,00  | 51,37          | 12.00  |
| 13       | 46.50          | 21.00   | 14.57 | 0,00  | 41.92 | 1.04  | 0.34 | 7,29 | 59.72          | 1.09  | 30.38          | 21.00  |
| 04       | 60,50          | 7,00    | 14,63 | 0,03  | 42,61 | 0,35  | 0,34 | 7,31 | 60,44          | 0,36  | 44,37          | 7,00   |
| 5        | 43,50          | 24,00   | 14,55 | 0,11  | 41,78 | 1,18  | 0,34 | 7,27 | 59,56          | 1,24  | 27,38          | 24,00  |
|          |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 9        |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 01       | 45,55          | 30,00   | 14,56 | 0,14  | 41,88 | 1,48  | 0,34 | 7,27 | 59,67          | 1,55  | 29,42          | 30,00  |
| 2        | 75,55          | 0,00    | 14,70 | 0,00  | 43,36 | 0,00  | 0,34 | 7,34 | 61,22          | 0,00  | 59,42          | 0,00   |
| 3        | 48,55          | 27,00   | 14,58 | 0,12  | 42,02 | 1,33  | 0,34 | 7,28 | 59,82          | 1,40  | 32,42          | 27,00  |
| )4<br>.E | 59,55          | 16,00   | 14,63 | 0,07  | 42,57 | 0,79  | 0,34 | 7,30 | 60,39          | 0,83  | 43,42          | 16,00  |
| 15       | 48,55          | 27,00   | 14,58 | 0,12  | 42,02 | 1,33  | 0,34 | 7,28 | 59,82          | 1,40  | 32,42          | 27,00  |
| 10       |                |         |       |       |       |       |      |      |                |       |                |        |
| 10       | 37.50          | 30.00   | 14.53 | 0.14  | 41.48 | 1.48  | 0.34 | 7.25 | 59.25          | 1.55  | 21.38          | 30.00  |
| 2        | 67,50          | 0.00    | 14.66 | 0.00  | 42.96 | 0.00  | 0,34 | 7,32 | 60.81          | 0.00  | 51.37          | 0.00   |
| 03       | 40,50          | 27.00   | 14.54 | 0,12  | 41.63 | 1.33  | 0,34 | 7,26 | 59.41          | 1.40  | 24.38          | 27.00  |
| 24       | 64,50          | 3,00    | 14,65 | 0,01  | 42,81 | 0,15  | 0,34 | 7,32 | 60,65          | 0,16  | 48,37          | 3,00   |
|          |                |         | ,     |       | ,     | ,     |      |      | ,              | ,     |                | .,     |

| max-min                      |  | cylindricity                 | mesuring tool  | calliper   | ABS(διαφορά)   | Μέση τιμή      |  |
|------------------------------|--|------------------------------|--|--|--|----------------|--|
| 1                            | 0,12   | 1                            | 0,06   | 0,14   | 0,08   | 0,02           |  |
| 2                            | 0,10   | 2                            | 0,05   | 0,07   | 0,01   | 0,02           |  |
| 3                            | 0,28   | 3                            | 0,14   | 0,11   | 0,03   | 0,02           |  |
| 4                            | 0,11   | 4                            | 0,05   | 0,08   | 0,02   | 0,02           |  |
| 5                            | 0,17   | 5                            | 0,08   | 0,13   | 0,05   | 0,02           |  |
| 6                            | 0,16   | 6                            | 0,08   | 0,08   | 0,01   | 0,02           |  |
| 7                            | 0,11   | 7                            | 0,06   | 0,09   | 0,03   | 0,02           |  |
| 8                            | 0,11   | 8                            | 0,06   | 0,06   | 0,00   | 0,02           |  |
| 9                            | 0,14   | 9                            | 0,07   | 0,08   | 0,01   | 0,02           |  |
| 10                           | 0,14   | 10                           | 0,07   | 0,09   | 0,02   | 0,02           |  |
| 11                           | 0,12   | 11                           | 0,06   | 0,08   | 0,02   | 0,02           |  |
| 12                           | 0,16   | 12                           | 0,08   | 0,08   | 0,01   | 0,02           |  |
| 13                           | 0,13   | 13                           | 0,07   | 0,07   | 0,00   | 0,02           |  |
| 14                           | 0,14   | 14                           | 0,07   | 0,08   | 0,00   | 0,02           |  |
| 15                           | 0,06   | 15                           | 0,03   | 0,07   | 0,04   | 0,02           |  |
| 16                           | 0,13   | 16                           | 0,06   | 0,07   | 0,00   | 0,02           |  |
| 17                           | 0,16   | 17                           | 0,08   | 0,07   | 0,01   | 0,02           |  |
| 18                           | 0,13   | 18                           | 0,07   | 0,08   | 0,01   | 0,02           |  |
| 19                           | 0,12   | 19                           | 0,06   | 0,08   | 0,01   | 0,02           |  |
| 20                           | 0,11   | 20                           | 0,05   | 0,05   | 0,00   | 0,02           |  |
|                              |  |                              |  |  |  |                |  |
|                              |  |                              |  |  |  |                |  |
| max                          | 0,28   | max                          | 0,14   | 0,14   | 0,08   |                |  |
| min                          | 0,06   | min                          | 0,03   | 0,05   | 0,00   |                |  |
|                              |  | average                      | 0,07   | 0,08   | 0,02   |                |  |
| average                      | 0,14   | std                          | 0,02   | 0,02   | 0,02   |                |  |
| std                          | 0,04   |                              |  |  |  |                |  |
| max<br>min<br>average<br>std | 0,13<br>0,12<br>0,11<br>0,11<br>0,28<br>0,06<br>0,14<br>0,04 | max<br>min<br>average<br>std | 0,07<br>0,06<br>0,05<br>0,14<br>0,03<br>0,07<br>0,02 | 0,08<br>0,08<br>0,05<br>0,05<br>0,04<br>0,05<br>0,08<br>0,02 | 0,01<br>0,01<br>0,00<br>0,08<br>0,00<br>0,02<br>0,02 | 0,02 0,02 0,02 |  |







|                |                 | Base thickness | top thickness | differences   | hypotenuse | angle      |         |
|----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|------------|------------|---------|
| Big niece      | MEASUREMENT 1   | 30,12          | 34,88         | 4,76          | 84,11      | 3,244248   |         |
| Dig piece      | MEASUREMENT 2   | 30,14          | 34,85         | 4,71          | 84,57      | 3,18361083 |         |
|                | MEASUREMENT 3   | 30,05          | 34,87         | 4,82          | 84,81      | 3,26729797 |         |
|                |                 |                |               |               | Average    | 3,21       | φ2      |
|                |                 |                |               |               |            |            |         |
| Rig pieco      | internal base   | MEASUREMENT 1  | MEASUREMENT 2 | MEASUREMENT 3 | Average    |            |         |
| big piece      |                 | 30,12          | 30,14         | 30,05         | 30,10      | 17         |         |
|                |                 |                |               |               |            |            |         |
|                |                 |                |               |               |            |            | D       |
|                |                 |                |               |               |            |            | 10      |
|                |                 | Base thickness | ton thickness | differences   | bight      | angle      | ╽╢╶╶    |
|                |                 | 42.20          | 45.4          | 2.02          | 10.50      | 5 00740422 |         |
| Middle piece   | MEASUREMENT 1   | 13,38          | 15,4          | 2,02          | 19,59      | 5,88718123 |         |
|                | MEASUREMENT 2   | 13,32          | 15,32         | 2             | 19,66      | 5,80868249 | - · · · |
|                | MEASUREMENT 3   | 13,25          | 15,36         | 2,11          | 19,62      | 6,1381872  |         |
|                |                 |                |               |               | Average    | 2,92       | φ1      |
|                |                 |                |               |               |            |            |         |
|                | internal base:  | MEASUREMENT 1  | MEASUREMENT 2 | MEASUREMENT 3 | Average    |            |         |
|                |                 | 13,38          | 13,32         | 13,25         | 13,32      | 15         |         |
|                |                 |                |               |               |            |            |         |
| Middlo pioco   | external base : | MEASUREMENT 1  | MEASUREMENT 2 | MEASUREMENT 3 | Average    |            |         |
| iviluale piece |                 | 31,6           | 31,61         | 31,5          | 31,57      | 11         |         |
|                |                 |                |               |               |            |            |         |
|                | thickness base  | MEASUREMENT 1  | MEASUREMENT 2 | MEASUREMENT 3 | Average    |            |         |
|                |                 | 10.00          | 10.07         | 10.11         | 10.00      | 14         |         |

## Σταθερές Διαστάσεις Τέταρτη γενιά

| [CMM m 1 m 2] m 3 calliper διαταξή (CMM-παχυμετρο Παρατηρήσεις<br>10.1270 1282 0.055 0.040 0.128 454 135 Τσίμουε με υλαλύγαστο τις πορεξοχές. Με 2-3 εποιγλάψεις με το γμαλάγαστο είναι χαθαρίσει |                             |
|---|-----------------------------|
| 1.0.170.0.128.0.065 0.04 0.128 4% 13% Τρίμαμε με γυαλόχαστο τις πορεξοχές. Με 2-3 επαγαλόμεις με το γυαλόχαστο είχαν καθαρίσει  |                             |
| τριφαμέ με το καιναλιβεία   |                             |
| 2 0,082 0,090 0,093 0,065 0,090 1% 2% Έχει μια ατέλεια ο κύλινδρος πέρα από τις προεξοχές που αυξάνει ξεκάθαρα την απόκλιση. Πολύ γυαλόχαρτο.   |                             |
| <b>3</b> 0,060 0,109 0,071 0 0,071 1% 6% πρωτη μετρηση χωρίς γυαλοχαρτο δευτερη με  |                             |
| 4 0,138 0,087 0,079 0,045 0,087 5% 9% γυαλοχαρτο στα εξογκοματα   |                             |
| 5 0,064 0,093 0,093 0,084 0,1 0,084 2% 4% m1, m2 δεν πυράχτικε, m3 περάσαμε τα εξογκόματα με γυαλόχαρτο   |                             |
| 6 0.106 0.120 0.117 0.035 0.117 1% 7% δεν πυράχτικε, κατι έχει παιχτει  |                             |
| 7 0.054 0.082 0.082 0.079 0.04 0.079 3% 1% αναμεασα στο 4 και στο 5 υπαρχει εξογκομα που το μετρήσαμε, m3 γυαλοχαρτο  |                             |
| 8 0,208 0,117 0,082 0,04 0,117 9% 17% μεταξύ των θέσεων 7 και 1 η επιφάνια είναι αρκετα ανάγληφη, με γιαλόχαρτο φάγαμε τα εξογκόματα- ατέλειες  |                             |
| 9 0,198 0,076 0,074 0,035 0,076 12% 16% πολύ ανομαλη επιφάνια, ξηθηκαν με γυαλοχαρτο οι ακιδες που υπίρχαν  |                             |
| 10 0,166 0,093 0,082 0,085 0,082 8% 8% σχετικά οκ, δεν πυράχτικέ  |                             |
| 11 0.087 0.071 0.079 0.15 0.079 1% 6% δεν πυράχτικε, όχι καλο δοκίμιο, το 2ο σετ μετρήσεων έχεινε πρακτικα με τις ενδιάμεσες θέσεις (μηκρη περιστροφή   | , σε 2 θέσεις δεν έχει τιμή |
| 12 0,056 0,063 0,044 0,075 0,063 1% 2% σχετικά οκ, δεν πυράχτικέ  |                             |
| <b>13</b> 0,077 0,068 0,063 0,1 0,068 1% 2% σχετικά οκ, δεν πυράχτικέ   |                             |
| 14 0.159 0.074 0.060 0.085 0.074 9% 7% σχετικά οκ, δεν πυράχτικέ, κατι έχει παιχτει   |                             |
| 15 0,063 0,065 0,065 0,065 0,09 0,065 0% 3% πολύ καλο   |                             |
| <b>16</b> 0,232 0,188 0,213 0,23 0,213 2% 0% εντονες ανωμαλίες, εξογκόματα, το πιο κακό δοκίμιο   |                             |
| 17 0.064 0.071 0.090 0.04 0.071 1% 2% σχετικά οκ, δεν πυράχτικέ, υπάρχει η ανωμαλια που εμφανίζεται σε όλα τα δοκίμια   |                             |
| 18 0,125 0,123 0,063 0,07 0,123 0% 6% σχετικά λείο, ελαφρός αναγλυφο, δυο μονο προεξωχες- εξογκωματα, το ένα το εχει πιασει η cmm, το καθαρίσαμε κ  | <b>χ</b> ι μετρήσαμε ξανα   |
| 19 0.089 0.123 0.112 0.165 0.112 2% 8% τραχια επιφάνια μεταξυ των θέσεων 4-6, στην δέτερη μετρηση αποφύγαμε τις ακίδες, η cmm δεν επισε την το τραχί  | μερος                       |
| 20 0.120 0.060 0.071 0.08 0.071 5% 4% πολύ καλο χωρις ακίδες, κατι έχει παιχτει.  |                             |

