



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΤΙΤΛΟΣ**

Βελτιστοποίηση τροχιάς ακροφυσίου κατά την κατεργασία τρισδιάστατης εκτύπωσης:  
Εφαρμογή αλγορίθμων εύρεσης βέλτιστων διαδρομών

Βανδώρου Φωτεινή  
Α.Μ.:02119102

*Επιβλέπων Καθηγητής: Μπενάρδος Πανώριος*

ΑΘΗΝΑ 2022



## Περίληψη

Η τρισδιάστατη εκτύπωση συγκεντρώνει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον και υπάρχουν αρκετά προβλήματα που απαιτούν βελτιστοποιημένες λύσεις. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη άνθιση του συγκεκριμένου τομέα καθώς αυξάνονται σταδιακά οι τομείς της καθημερινότητας που η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να βρει εφαρμογή. Αναγκαία κρίνεται η εύρεση μεθοδολογιών που θα περιορίζουν τους χρόνους κατεργασίας ενώ ταυτόχρονα θα διατηρούν ένα βασικό επίπεδο ποιότητας.

Η εργασία επικεντρώνεται στην κατεργασία τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση τηγμένου νήματος (Fused Filament 3d Printing). Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε μεθοδολογία, βασισμένη στον αρχικό G-κώδικα που παρέχεται από τον εκτυπωτή, που βελτιστοποιεί την τροχιά που ακολουθεί το ακροφύσιο κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση έτσι ώστε να μειωθεί, κατά το δυνατόν, ο συνολικός χρόνος κατεργασίας διατηρώντας όμως σταθερά τα χαρακτηριστικά ποιότητας του εκτυπωμένου τεμαχίου (π.χ. διαστάσεις, τραχύτητα κ.λπ.). Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία αποτελεί ενσωμάτωση δύο αλγορίθμων εύρεσης βέλτιστης διαδρομής, του Nearest Neighbor και του Chinese Postman σε G-κώδικα. Εκτός από τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των αλγορίθμων στο Matlab, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμαστικές εκτυπώσεις. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν τόσο ως προς το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εκτύπωσης όσο και στην τελική ποιότητα του δοκιμίου σε σχέση με τις προτεινόμενες διαδρομές από το λογισμικό τεμαχισμού (slicer).

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνεται ότι για δοκίμια μικρής πολυπλοκότητας ο Chinese Postman υπερτερεί ως προς την συνολική απόσταση που διανύεται υστερώντας ελάχιστα ποιοτικά σε σχέση με τον αρχικό αλγόριθμο του εκτυπωτή. Αντίθετα, ο αλγόριθμος Nearest Neighbor φαίνεται να μην δίνει καλά αποτελέσματα υστερώντας σημαντικά στην διατήρηση της επιθυμητής ποιότητας αλλά και της συνολικής απόστασης που διανύθηκε. Παρόλα αυτά, ως προς τον χρόνο εκτύπωσης, οι δύο αλγόριθμοι που μελετήθηκαν κατά βάση εκτελούν την εκτύπωση πιο γρήγορα σε σχέση με το αρχικό πρόγραμμα.

Από τα αποτελέσματα των εκτυπώσεων φαίνεται ότι κατά βάση ακολουθούνται τα θεωρητικά αποτελέσματα. Ως προς την ποιότητα των δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι το αρχικό πρόγραμμα υπερτερεί έναντι των δύο αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν αλλά χρονικά δεν αποτελεί την βέλτιστη λύση. Παρόλα αυτά, υπήρξε αποτέλεσμα με την χρήση του Chinese Postman όπου επειδή βρέθηκε βέλτιστο μονοπάτι προσπέλασης των σημείων ακριβώς μια φορά, κατέστη δυνατή η γρηγορότερη εκτύπωση του δοκιμίου με ποιότητα οριακά όμοια με αυτήν του αρχικού προγράμματος. Σχετικά με τον Nearest Neighbor παρατηρήθηκε ότι υστερεί σημαντικά σε ποιότητα παρά την γρηγορότερη εκτύπωση του δοκιμίου σε σχέση με το αρχικό πρόγραμμα.

Εν κατακλείδι, συνδυάζοντας τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό πως οι αλγόριθμοι που μελετήθηκαν υπερτερούν χρονικά σε σχέση με το αρχικό πρόγραμμα. Όταν το αποτέλεσμα ανάγεται σε πληθώρα επιπέδων που χαρακτηρίζουν ένα δοκίμιο τότε οι διαφορές αυτές είναι αξιοσημείωτες καθώς οδηγούν σε σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και πόρων. Ως προς την επιλογή της μεθοδολογίας που υπερτερεί, αυτό έγκειται στην χρήση του δοκιμίου εάν πρόκειται για υψηλής ποιότητας μηχανολογικό εξάρτημα ή δοκίμιο πρότυπο για μελέτη νέων μεθοδολογιών εκτύπωσης ή συμπεριφοράς εκτυπωτών, χωρίς όμως αυτό να αποκλείει την χρήση του Chinese Postman που υπό προϋποθέσεις μπορεί να δώσει ποιοτικά ίδιο αποτέλεσμα με το αρχικό πρόγραμμα.

## **Abstract**

Nowadays, 3D printing is attracting intense research interest and there are several problems that require optimized solutions. In recent years, it has been observed that this sector is thriving as more and more everyday problems can be solved more efficiently with the use of 3D printing. Thus, it is deemed necessary to find technologies/methodologies that will limit the processing times while at the same time maintain an appropriate level of quality.

The present thesis, focuses on the fused filament 3D printing process. In this context, a methodology was developed, based on the original G-code provided by the slicing software, which optimizes the trajectory followed by the nozzle during 3D printing in order to reduce, as much as possible, the total processing time while maintaining constantly the quality characteristics of the printed piece (e.g. dimensions, roughness, etc.). More specifically, the methodology created is about the integration of two optimal path finding algorithms, Nearest Neighbor and Chinese Postman in G-code. In addition to the theoretical results obtained from the implementation of the algorithms in Matlab, test prints were also carried out. The results were compared both in terms of the time required to complete the print as well as regarding the final quality of the sample print against the suggested paths from the Slicer.

From the results of the simulations it is evident that for low complexity parts, the Chinese Postman algorithm excels in terms of total distance travelled while slightly lagging in quality when compared to the printer's original algorithm. On the contrary, the Nearest Neighbor algorithm seems not to give good results, significantly lagging in maintaining the desired quality as well as the total traveled distance. Nevertheless, in terms of printing time, the two studied algorithms perform the procedure faster than the original methodology.

The results of the printed parts follow in line with the theoretical results. Regarding the quality of the parts, it can be seen that the original program outperforms the two algorithms applied, but in terms of time it is not the optimal solution. However, a result was achieved using the Chinese Postman algorithm in which an optimal path to access all points exactly once was found. This led to the creation of a part with its quality marginally similar to that of the original method while at the same time the procedure required less time. The Nearest Neighbor algorithm appeared to be significantly lagging in quality despite the fact that the parts were printed faster than the original methodology.

In conclusion, when combining the results, it can be seen that the studied algorithms outperform the original methodology in terms of time. When the result is reduced to a multitude of layers that characterize a part, these differences are remarkable as they can lead to significant savings in time and resources. Regarding the choice of which methodology is superior, it lies in the terms of which each part will be used, whether it is a high-quality mechanical part or an engineering model part used to study new printing methodologies or printing behavior. However, this does not exclude the use of the Chinese Postman which under conditions can produce the same quality results as the original methodology of the printer.

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μπενάρδο Πανώριο για την σημαντική βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους πίστεψαν σε εμένα και με στήριξαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βαθέων τον Άγγελο Αποστόλου για την αμέριστη κατανόηση και συμπαράσταση που μου προσέφερε όλον αυτό τον καιρό. Χωρίς εκείνον τίποτα δεν θα ήταν το ίδιο.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε και με στηρίζει σε ότι και αν κάνω και στους φίλους μου για τις ατελείωτες ώρες γέλιου που συνόδευαν τα φοιτητικά μου χρόνια.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι αφιερωμένη σε ένα από τα σημαντικότερα πρόσωπα της ζωής μου, την μητέρα μου.



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Ευχαριστίες.....	5
Κατάλογος Σχημάτων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	10
1. Εισαγωγή.....	11
1.1 Σκοπός εργασίας.....	11
1.2 Τι είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση;.....	11
1.3 Τα βήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	12
1.4 Τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης .....	13
1.5 Δομή Εργασίας.....	13
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	14
2.1 Μεθοδολογίες Βελτιστοποίησης .....	14
3. Μεθοδολογία .....	19
3.1 Nearest Neighbor.....	20
3.2 Chinese Postman Problem.....	20
3.3 Ανάλυση κώδικα Matlab .....	21
3.3.1 Εφαρμογή αλγορίθμου Nearest neighbor .....	21
3.3.2 Εφαρμογή αλγορίθμου Chinese Postman.....	22
3.3.3 Δημιουργία και εξαγωγή G-κώδικα .....	22
3.3.4 Μεθοδολογία υπολογισμού E (Extrusion Value).....	23
4. Υλοποίηση Μεθοδολογίας .....	26
4.1 Επιλογή και σχεδιασμός κατάλληλων δοκιμίων .....	26
4.2 Δημιουργία G-κώδικα και εξαγωγή βασικών πληροφοριών των δοκιμίων .....	32
4.2.1 Εισαγωγή δοκιμίων στο πρόγραμμα Ultimaker Cura.....	32
4.2.2 Εξαγωγή G-κώδικα – Βασικά χαρακτηριστικά εκτύπωσης (παραδοχές).....	34
4.2.3 Υπολογισμός χρόνου εκτέλεσης και τελικής ποιότητας .....	35
5. Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμων εύρεσης βέλτιστης διαδρομής.....	37
5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων Matlab .....	37
5.1.1 Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο.....	37
5.1.2 Γρανάζι.....	39
5.1.3 Κοχλίας – Περικόχλιο .....	40
5.1.4 Σφήνα .....	44

5.1.5	Προφίλ σχήματος L (γωνιά) / Μεντεσές .....	45
5.1.6	Συγκεντρωτικός σχολιασμός θεωρητικών αποτελεσμάτων .....	47
5.2	Σχολιασμός αποτελεσμάτων εκτύπωσης.....	47
5.2.1	Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο.....	47
5.2.2	Γραναζί.....	50
5.2.3	Σφήνα τύπου Woodtruff.....	53
5.2.4	Προφίλ σχήματος L (γωνιά)/ Μεντεσές .....	56
5.2.5	Συγκεντρωτικός σχολιασμός αποτελεσμάτων εκτύπωσης των δοκιμίων .....	60
6.	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα.....	61
6.1	Συμπεράσματα.....	61
6.2	Μελλοντική Έρευνα.....	61
7.	Βιβλιογραφία.....	62
	Παράρτημα Α .....	64
	Παράρτημα Β .....	70

## **Κατάλογος Σχημάτων**

Figure 1:	Η γενική διεργασία AM, από το σύστημα CAD ως το τελικό κομμάτι: Παρουσιάζονται και τα οκτώ βήματα [3] .....	12
Figure 2.	Βασικές μεθοδολογίες πλήρωσης δοκιμίων κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση [5] .....	15
Figure 3.	Μοτίβα πλήρωσης δοκιμίων .....	16
Figure 4.	Ανάλυση φαινομένου σκάλας: (a) Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης. (b) Σφάλμα όγκου μεταξύ δύο στρώσεων. (b) Εκτίμηση σφάλματος όγκου [12] .....	18
Figure 5.	Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.....	19
Figure 6.	Απεικόνιση βασικού πολυγώνου .....	26
Figure 7.	Απεικόνιση γραναζιού .....	27
Figure 8:	Ένα σπείρωμα κοχλία [20].....	28
Figure 9.	Απεικόνιση κοχλία .....	29
Figure 10.	Απεικόνιση περικόχλιου .....	29
Figure 11:	Σφήνες τύπου Woodruff .....	30
Figure 12.	Απεικόνιση σφήνας τύπου Woodruff.....	30
Figure 13:	Γωνιά αλουμινίου.....	31
Figure 14.	Απεικόνιση προφίλ σχήματος L και μεντεσέ.....	31
Figure 15.	Προσανατολισμός δοκιμίων κατά την τοποθέτησή τους στο Ultimaker Cura (X άξονας κόκκινο χρώμα, Y άξονας πράσινο χρώμα, Z άξονας μπλε χρώμα).....	33
Figure 16.	Παράδειγμα δοκιμίου που φέρει ποδιά και υποστήριξη [27].....	34
Figure 17.	Τμήμα G-κώδικα του 1ου επιπέδου (layer) ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου .....	35
Figure 18.	Αποτέλεσμα slicing ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου .....	36
Figure 19.	Αποτέλεσμα slicing γραναζιού με χρήση βοηθητικής ποδιάς και υποστηριγμάτων ...	36
Figure 20.	Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για το ορθογώνιο.....	37
Figure 21.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για το πολύγωνα .....	38



Figure 22. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για το γρανάζι .....	39
Figure 23. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για γρανάζι .....	40
Figure 24. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για τον κοχλία .....	41
Figure 25. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για τον κοχλία .....	41
Figure 26. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για το περικόχλιο .....	42
Figure 27. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για το περικόχλιο.....	43
Figure 28. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για την σφήνα τύπου Woodtruff.....	44
Figure 29. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για την σφήνα τύπου Woodtruff.....	44
Figure 30. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για τον μεντεσέ .....	45
Figure 31. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για τον μεντεσέ.....	46
Figure 32. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτύπωσης πολυγώνου και με τους 3 αλγορίθμους....	47
Figure 33. Αποτέλεσμα εκτύπωσης ορθογωνίου με την προτεινόμενη από τον εκτυπωτή μεθοδολογία .....	48
Figure 34. Αποτελέσματα εκτύπωσης ορθογωνίου με την χρήση του αλγορίθμου Nearest Neighbor .....	49
Figure 35. Αποτέλεσμα εκτύπωσης ορθογωνίου με την χρήση του αλγορίθμου Chinese Postman .....	50
Figure 36. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτύπωσης του γραναζιού .....	51
Figure 37. Αποτέλεσμα εκτύπωσης γραναζιού με την χρήση της προτεινόμενης από τον εκτυπωτή μεθοδολογίας.....	52
Figure 38. Αποτέλεσμα εκτύπωσης γραναζιού με την χρήση του αλγορίθμου Chinese Postman	53
Figure 39. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτύπωσης σφήνας τύπου Woodtruff.....	54
Figure 40. Αποτέλεσμα εκτύπωσης σφήνας τύπου Woodtruff με την χρήση της προτεινόμενης από τον εκτυπωτή μεθοδολογίας.....	54
Figure 41. Αποτέλεσμα εκτύπωσης σφήνας τύπου Woodtruff με την χρήση του αλγορίθμου Nearest Neighbor.....	55
Figure 42. Αποτέλεσμα εκτύπωσης σφήνας τύπου Woodtruff με την χρήση του αλγορίθμου Chinese Postman .....	56
Figure 43. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτύπωσης μεντεσέ και με τους 3 αλγορίθμους.....	57
Figure 44. Αποτέλεσμα εκτύπωσης μεντεσέ με την χρήση της προτεινόμενης από τον εκτυπωτή μεθοδολογίας.....	58
Figure 45. Αποτέλεσμα εκτύπωσης μεντεσέ με την χρήση του αλγορίθμου Nearest Neighbor ...	59
Figure 46. Αποτέλεσμα εκτύπωσης μεντεσέ με την χρήση του αλγορίθμου Chinese Postman....	60

## **Κατάλογος Πινάκων**

Table 1. Παραδοχές μεταβλητών για τον υπολογισμό του E σε εκτυπωτή Ultimaker S5 .....	23
Table 2. Σύγκριση αποτελεσμάτων E που προέκυψαν με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε σύγκριση με τον αρχικό αλγόριθμο για το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο.....	24
Table 3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου .....	39
Table 4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του γκραντζιού .....	40
Table 5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του κοχλία.....	42
Table 6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του περικόχλιου .....	43
Table 7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου της σφήνας τύπου Woodtruff.....	45
Table 8. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του μεντεσέ.....	46

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός εργασίας

Η εργασία επικεντρώνεται στην κατεργασία τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση τηγμένου νήματος (Fused Filament 3D printing). Η βασική ιδέα της προσέγγισης είναι πως το πρόγραμμα που δημιουργείται από το λογισμικό τεμαχισμού (Slicer) κατά την προετοιμασία της εκτύπωσης δεν είναι το βέλτιστο δυνατό και για αυτό τον λόγο αξίζει να διερευνηθεί το κατά πόσο μπορεί να βελτιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας τυπικούς αλγορίθμους εύρεσης βέλτιστων διαδρομών, διατηρώντας πάντα την ίδια ποιότητα των τεμαχίων. Το πρόγραμμα αυτό αν και καταφέρνει να δώσει δοκίμια υψηλής ποιότητας, σύμφωνα πάντα με τις ορισθείσες προδιαγραφές, απαιτεί συνήθως αρκετό χρόνο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης. Σε συνδυασμό με τον χρόνο, οι τελικοί χρήστες επιζητούν το κατάλληλο επίπεδο ποιότητας στα δοκίμιά τους, ανάλογα με την χρήση που αυτά προορίζονται (π.χ. μηχανολογικό εξάρτημα, τεμάχιο μοντελισμού). Η ανάπτυξη λοιπόν μεθοδολογιών που θα μπορέσουν ταυτόχρονα να μειώσουν τον συνολικό χρόνο της διαδικασίας διατηρώντας παράλληλα ένα υψηλό επίπεδο ποιότητας, θα αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη του τομέα αυτού και στους τομείς της καθημερινότητας που θα μπορεί να βρει εφαρμογή. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται σύγκριση δύο αλγορίθμων που κάνουν εύρεση της βέλτιστης διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει το ακροφύσιο (extruder) κατά την εκτύπωση ενός στρώματος (layer) σε σχέση με την αρχική διαδρομή όπως αυτή προκύπτει από το πρόγραμμα τεμαχισμού (Slicer). Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι ο Nearest Neighbor και ο Chinese Postman και γίνεται εφαρμογή τους στα ήδη παρεχόμενα από τον G-κώδικα του αρχικού δοκιμίου σημεία. Σκοπός είναι να συγκριθούν τόσο τα θεωρητικά αποτελέσματα όσο και τα πειραματικά, που προέκυψαν από δοκιμαστικές εκτυπώσεις ώστε να καταρτιστεί η μεθοδολογία που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε χρονικό επίπεδο ή σε επίπεδο ποιότητας ή ακόμα και συνδυαστικά. Μέσω των συγκρίσεων αυτών θα γίνει αντιληπτό κατά πόσο είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της μεθοδολογίας που ακολουθείται από το πρόγραμμα τεμαχισμού Slicer κατά την εκτύπωση.

## 1.2 Τι είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση;

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αρκετά γνωστή στο ευρύ κοινό, παρόλα αυτά η εν λόγω τεχνολογία δεν αποτελεί καινούργια εφεύρεση καθώς ήδη από το 1971 ο Johannes F. Gottwald κατοχύρωσε την πατέντα του για τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή γνωστό με το όνομα Liquid Metal Recorder [1] ενώ ήδη από το 1950 έχει γίνει γενική αναφορά στην έννοια της τρισδιάστατης εκτύπωσης από τον Raymond F. Jones σε ιστορία που δημοσιεύτηκε σε περιοδικό με ιστορίες επιστημονικής φαντασίας (αναφορά ως σπρέι μορίων) [2]. Από τότε, η πρόοδος της τεχνολογίας οδήγησε στην περαιτέρω ανάπτυξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το ερευνητικό ενδιαφέρον συνεχίζει να παραμένει υψηλό και κάθε χρόνο δημοσιεύονται νέες τεχνικές και μεθοδολογίες.

Ο επίσημος όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing-AM). Βασική αρχή της τεχνολογίας αυτής είναι ότι ένα μοντέλο που αρχικά δημιουργείται με την χρησιμοποίηση ενός τρισδιάστατου συστήματος

CAD (Computer Aided Design), μπορεί να κατασκευασθεί απευθείας χωρίς να απαιτείται προηγουμένως ο προγραμματισμός της διαδικασίας παραγωγής του. Σε αντίθεση με τις κλασικές κατασκευαστικές διεργασίες που απαιτείται προσεκτική και λεπτομερής ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός δοκιμίου, στην προσθετική κατασκευή απαιτούνται ορισμένες βασικές διαστασιακές λεπτομέρειες [3]. Η δημιουργία του τεμαχίου επιτυγχάνεται με την προσθήκη ή/και στερεοποίηση υλικού σε διαδοχικές στρώσεις.

### 1.3 Τα βήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Από την εικονική αναπαράσταση των επιθυμητών τεμαχίων μέχρι το πλήρως περατωμένο δοκίμιο μεσολαβούν αρκετά στάδια τα οποία ενδέχεται να εφαρμόζονται σε διαφορετικό βαθμό για τις διάφορες μεθοδολογίες προσθετικής κατασκευής (Εικόνα 1). Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα 8 βήματα:

- Βήμα 1<sup>ο</sup>: CAD
- Βήμα 2<sup>ο</sup>: Μετατροπή αρχείου σε STL (Standard Tessellation Language)
- Βήμα 3<sup>ο</sup>: Μεταφορά αρχείου στον εκτυπωτή και επεξεργασία του
- Βήμα 4<sup>ο</sup>: Προετοιμασία μηχανής
- Βήμα 5<sup>ο</sup>: Εκτύπωση
- Βήμα 6<sup>ο</sup>: Ασφαλής απομάκρυνση τεμαχίου
- Βήμα 7<sup>ο</sup>: Μετεπεξεργασία τεμαχίου
- Βήμα 8<sup>ο</sup>: Φινίρισμα

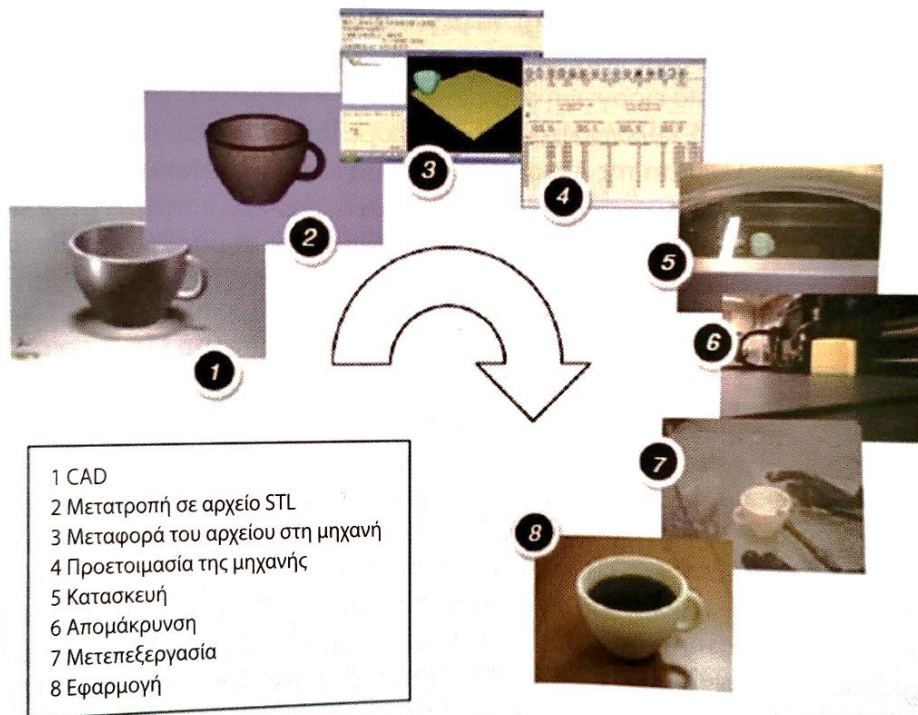


Figure 1: Η γενική διεργασία AM, από το σύστημα CAD ως το τελικό κομμάτι: Παρουσιάζονται και τα οκτώ βήματα [3]

## 1.4 Τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης

Για την δημιουργία ενός δοκιμίου με χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες οι οποίες εφαρμόζονται με βάση το εκάστοτε επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Ενδεικτικά αναφέρονται οι βασικότερες.

- Διεργασίες φωτοπολυμερισμού σε κáδο με σάρωση laser
- Διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη
- Συστήματα εξώθησης υλικού (Fused Deposition Modelling - FDM)
- Συστήματα εναπόθεσης υλικού (Συνεχής τύπος, τύπος Drop-On-Demand - DOD)
- Συστήματα εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας
- Διεργασίες επάλληλων φύλλων
- Διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (Directed-Energy Deposition - DED)
- Τεχνολογίες άμεσης εγγραφής (Direct Writing - DW με μελάνη, DW μεταφοράς με laser, DW θερμικού ψεκασμού κ.α.)

Οι διεργασίες προσθετικής κατασκευής όπως όλες οι μέθοδοι κατεργασίας δοκιμίων/υλικών, υπόκεινται σε πληθώρα περιορισμών που επιβάλλονται από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των υλικών καθώς επίσης και την ταχύτητα, το κόστος και την επιθυμητή ακρίβεια της κατασκευής.

Στην παρούσα εργασία τα δοκίμια αναπτύχθηκαν με χρήση συστημάτων εξώθησης υλικού (FDM). Η συγκεκριμένη διεργασία είναι μια από τις πιο διαδεδομένες.

## 1.5 Δομή Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από 6 ενότητες. Η 1<sup>η</sup> ενότητα αποτελεί την εισαγωγή στην οποία περιγράφεται το γενικό πρόβλημα καθώς επίσης παρουσιάζονται τα κίνητρα και οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής. Επιπλέον, η ενότητα αυτή περιλαμβάνει μια γενική εισαγωγή στην επιστήμη της προσθετικής κατασκευής. Η 2<sup>η</sup> ενότητα αποτελεί την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Στην 3<sup>η</sup> ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Στην 4<sup>η</sup> ενότητα παρουσιάζονται τα δοκίμια που σχεδιάστηκαν καθώς επίσης η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της μεθοδολογίας. Η 4<sup>η</sup> ενότητα αποτελείται από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν τόσο στο περιβάλλον του Matlab όσο και σε πρακτικό επίπεδο με την παρουσίαση των δοκιμαστικών εκτυπώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Τέλος στην 6<sup>η</sup> ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης.

## **2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια εκτενής αναφορά στις διαθέσιμες μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί με στόχο την βελτιστοποίηση της τροχιάς του ακροφυσίου (extruder) του εκτυπωτή κατά την διάρκεια της εκτύπωσης.

### **2.1 Μεθοδολογίες Βελτιστοποίησης**

Η προσθετική κατασκευή μπορεί να οριστεί ως η εναπόθεση επάλληλων στρώσεων υλικού, συνήθως τηγμένου, σε επίπεδα για την κατασκευή αντικειμένων που έχουν προκύψει από ένα τρισδιάστατο μοντέλο [4]. Καθώς η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής εξελίσσεται με ταχείς ρυθμούς, επιτακτική γίνεται η ανάγκη εύρεσης μεθοδολογιών που θα συντομεύουν τον χρόνο εκτέλεσης της διαδικασίας αλλά παράλληλα τα τελικά δοκίμια θα έχουν την επιθυμητή ποιότητα.

Η πλειοψηφία των ανεπτυγμένων μεθοδολογιών λαμβάνοντας υπόψιν ότι η προσθετική κατασκευή εκτελείται σε επίπεδα «στρώσεις» εκτελεί την βελτιστοποίηση για κάθε επίπεδο ξεχωριστά. Η διαδρομή που ακολουθεί κάθε φορά το ακροφύσιο του εκτυπωτή είναι προκαθορισμένη και οι δύο βασικές στρατηγικές εναπόθεσης υλικού που ακολουθούνται είναι η πλήρωση με παράλληλο περίγραμμα (contour-parallel based filling) και η πλήρωση με παράλληλη κατεύθυνση (direction parallel based filling). Ένα παράδειγμα των προαναφερθέντων μεθοδολογιών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Η πλήρωση με παράλληλο περίγραμμα αποτελείται από μια σειρά περιγραμμάτων τα οποία εκτείνονται παράλληλα με τα όρια των διαστατικών διατομών που παράγονται κατά την διαδικασία του slicing. Ως αποτέλεσμα η συγκεκριμένη μεθοδολογία οδηγεί σε δοκίμια μεγαλύτερης ακρίβειας. Παρόλα αυτά ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται είναι πολύπλοκος και ακριβός υπολογιστικά και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκύψουν προβλήματα τα οποία να επηρεάσουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα. Σε αντίθεση με την μεθοδολογία της πλήρωσης με παράλληλη κατεύθυνση, όπου η διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το εργαλείο είναι σπασμένη σε μικρότερες διαδρομές. Οι διαδρομές αυτές στην πραγματικότητα αποτελούν επαναλαμβανόμενες κινήσεις του εργαλείου προς-πίσω στην περιοχή όπου πρέπει να γίνει πλήρωση υλικού. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ενώ είναι εύκολη στη εφαρμογή και δίνει γρήγορα αποτελέσματα, υστερεί σημαντικά σε ποιότητα. Αρκετοί ερευνητές θέλοντας να αξιοποιήσουν τα θετικά και των δύο μεθοδολογιών οδηγήθηκαν στην ιδέα της εκτύπωσης δοκιμίων στα οποία το εξωτερικό περίγραμμα θα γίνεται με πλήρωση με παράλληλο περίγραμμα, έτσι ώστε να δημιουργούνται λείες εξωτερικές επιφάνειες, και με πλήρωση με παράλληλη κατεύθυνση θα δημιουργείται το εσωτερικό για την απόκτηση της επιθυμητής ακρίβειας και ανθεκτικότητας.

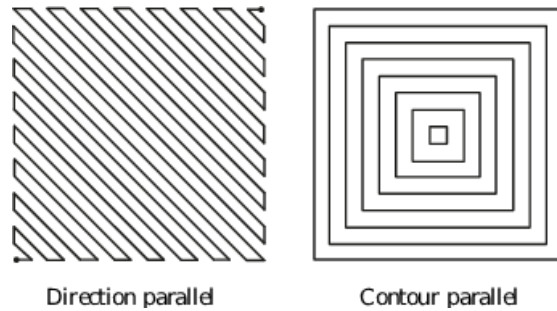


Figure 2. Βασικές μεθοδολογίες πλήρωσης δοκιμίων κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση [5]

Βασιζόμενοι σε αυτό, οι [6] χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο προσαρμογής καθόρισαν την καμπύλη του περιγράμματος με βάση τις NURBS στα αρχικά όρια πριν από την δημιουργία των σημείων ελέγχου των καμπυλών περιγράμματος. Έτσι ορίστηκαν οι διαδρομές των εργαλείων κατά μήκος του ορίου, ενώ η εσωτερική περιοχή του μοντέλου κατασκευάστηκε στην συνέχεια με την μέθοδο της πλήρωσης με παράλληλη κατεύθυνση. Στηριζόμενοι στην μεθοδολογία των [6] οι [7] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία η οποία κυρίως χρησιμοποιείται για την δημιουργία διαδρομών εργαλείων με παράλληλη κατεύθυνση βασισμένη στα εκάστοτε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις του δοκιμίου. Χωρίζοντας την διαδικασία σε τρία βασικά μέρη, προσδιορισμός της κλίσης, δημιουργία της διαδρομής του εργαλείου για κάθε υποπεριοχή και τέλος σύνδεση των μεμονωμένων υποδιαδρομών, κατάφεραν να μελετήσουν τις απαιτήσεις κάθε σταδίου και να επέμβουν στα σημεία που χρειαζόταν. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία δοκιμίων μεγάλης ακρίβειας χωρίς όμως να έχει επιτευχθεί ο βέλτιστος δυνατός χρόνος εκτύπωσης (εξαιτίας της χρήση αλγόριθμου απληστίας).

Άλλοι ερευνητές επικεντρώθηκαν περισσότερο στην εύρεση του κατάλληλου αλγορίθμου που θα ελαχιστοποιούσε τον συνολικό χρόνο εκτύπωσης χωρίς να δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στην γεωμετρία του τελικού αντικειμένου. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι [8] οι οποίοι μελέτησαν την μείωση του συνολικού χρόνου διεργασίας με την μέθοδο εξώθησης υλικού (FDM) για την κατασκευή ηλεκτρονικών πλακετών (Printed Circuit Board - PCB). Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι η εκτύπωση πραγματοποιείται σε στρώσεις όπου ο extruder πρέπει να ακολουθήσει μια προδιαγεγραμμένη πορεία για κάθε επίπεδο, εφάρμοσαν τρεις διαφορετικούς αλγορίθμους εύρεσης ελάχιστης διαδρομής. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι ο πλανόδιος πωλητής (travelling salesman) και ο πλησιέστερος γείτονας (Nearest Neighbor Algorithm). Σε κάθε επίπεδο ήταν γνωστές οι διαστάσεις του τεμαχίου προς εκτύπωση καθώς και η διαδρομή που προτείνεται από το ίδιο το λογισμικό τεμαχισμού που διαθέτει ο εκτυπωτής (slicer program). Γνωρίζοντας αυτά, εφάρμοσαν τους προαναφερθέντες αλγορίθμους ώστε να βρεθεί η ελάχιστη διαδρομή που έπρεπε να ακολουθήσει ο extruder. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως μόνο με την εφαρμογή του αλγορίθμου του πλανόδιου πωλητή ο συνολικός χρόνος εκτύπωσης αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται και η συνολική απόσταση που πρέπει να διανύσει ο extruder, μιας και γίνεται σειριακή προσπέλαση των σημείων είτε κατά τον οριζόντιο είτε κατά τον κάθετο άξονα. Συνδυάζοντας όμως τους δύο αλγορίθμους κατάφεραν να ελαχιστοποιήσουν σημαντικά τον χρόνο εκτύπωσης για κάθε επίπεδο (layer) και για το τελικό δοκίμιο. Πιο συγκεκριμένα, η απόσταση που διανύθηκε από την συνδυαστική μεθοδολογία ήταν κατά 21.64% μικρότερη σε σχέση με το αρχικό πρόγραμμα για την εκτύπωση ενός επιπέδου και ο χρόνος που απαιτήθηκε μειώθηκε κατά 1.1 s. Αυτό οδήγησε στην μείωση του συνολικού χρόνου εκτύπωσης του δοκιμίου κατά 55s.

Ανάλογη μεθοδολογία εφαρμόστηκε και από τους [9] οι οποίοι με την προσθήκη του αλγορίθμου του Hierholzer και τον Blossom algorithm κατάφεραν να «τυπώσουν» εξάγωνα πολλαπλών μεγεθών σε χρόνο σημαντικό μικρότερο από τον χρόνο που χρειάστηκε το βασικό πρόγραμμα του εκτυπωτή Slicer. Ενδεικτικά, για μέγεθος κανάβου 2x2 ο αρχικός προγραμματισμός απαιτούσε 4min 35s ενώ η μεθοδολογία τους απαιτούσε 1min 33s. Εκτός από την μελέτη με το συμβατικό λογισμικό τεμαχισμού slicer, πραγματοποίησαν και μελέτη με το ORNL slicer. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιείται για την εκτύπωση δοκιμών μεγάλων διαστάσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμα και με το συγκεκριμένο εργαστηριακό λογισμικό τεμαχισμού slicer, ο βελτιωμένος αλγόριθμος του Chinese postman καταφέρνει να εκτυπώσει τα συγκεκριμένα εξάγωνα σε χρόνους σημαντικά μικρότερους. Για κανάβο μεγέθους 9x9 ο αρχικός προγραμματισμός απαιτούσε 16min 9s ενώ η μεθοδολογία τους απαιτούσε 5min 26s. Θα πρέπει να τονιστεί πως τα συγκεκριμένα εξάγωνα που δημιουργήθηκαν, αναλύθηκαν ως «μονοπάτια πλάτους» (single-bead-wide paths) και το τελικό αποτέλεσμα ήταν ποιοτικά ανώτερο από τις συνηθισμένες τεχνικές καθώς τα απλά λογισμικά τεμαχισμού slicer δεν είναι σε θέση να εκτυπώσουν με ικανοποιητική ποιότητα μονές στρώσεις δοκιμών (μονοπάτια πλάτους) μιας και δημιουργούνται κενά τα οποία πασχίζουν να καλύψουν με τυχαίο και μη ικανοποιητικό τρόπο.

Αξίζει να σημειωθεί πως τα μοτίβα που ακολουθούνται κατά την διαδικασία του φρεζαρίσματος ποκέτας (milling in pocket areas) είναι παρόμοια με τα μοτίβα που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή. Για τον λόγο αυτό αρκετές από τις ανεπτυγμένες μεθοδολογίες στηρίζονται σε μοτίβα που ακολουθούνται κατά την διαδικασία του φρεζαρίσματος όπως: ζιγκ ζαγκ (zig-zag), σπείρες και περιγράμματα (Εικόνα 3).

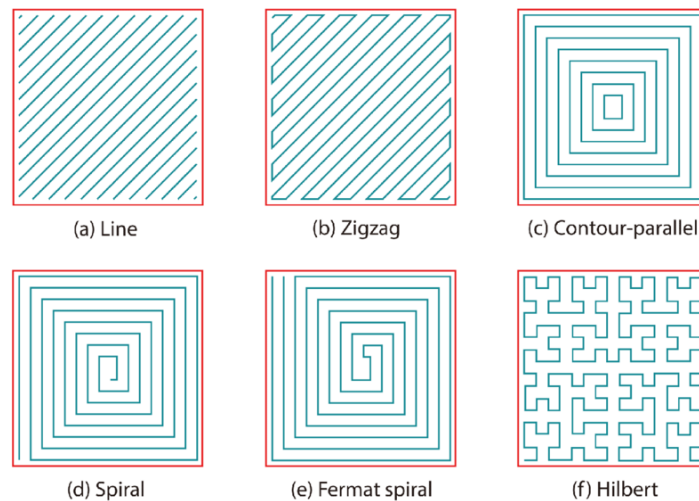


Figure 3. Μοτίβα πλήρωσης δοκιμών

Εκτός από την μεθοδολογία εξώθησης υλικού (FDM) και σε άλλες μεθοδολογίες προσθετικής κατασκευής έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχες μεθοδολογίες. Οι [10] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία βελτιστοποίησης του υπάρχοντος συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης μεταλλικών αντικειμένων. Το πρόγραμμα αυτό δέχεται ως είσοδο τον G κώδικα που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο στάδιο από το πρόγραμμα τεμαχισμού (Slicer) και στην συνέχεια ο χρήστης μπορεί



να αλλάζει διάφορες παραμέτρους όπως η ταχύτητα εναπόθεσης υλικού σε κάθε επίπεδο και για κάθε γεωμετρία που ο ίδιος επιθυμεί. Στην ουσία το συγκεκριμένο εργαλείο αποτελεί ένα εργαλείο βελτιστοποίησης του δοκιμίου που πρόκειται να εκτυπωθεί καθώς ο χρήστης έχει την ικανότητα να βλέπει στον υπολογιστή τον αντίκτυπο των αλλαγών που πραγματοποιεί με στόχο να πετύχει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.

Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες στις οποίες η βελτιστοποίηση δεν στοχεύει τόσο στην εύρεση της ελάχιστης-βέλτιστης διαδρομής αλλά στην ποιοτική βελτίωση του δοκιμίου. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με την χρήση βοηθητικών αλγορίθμων που επεμβαίνουν απευθείας στο πρόγραμμα μορφής G-κώδικα του εκτυπωτή. Στον κώδικα αυτόν περιέχονται πληροφορίες σχετικές με την θέση της κεφαλής εκτύπωσης, της θερμοκρασίας αυτής, της ταχύτητας κίνησης καθώς και το μήκος του υλικού εξώθησης. Συνεπώς, με την επιτυχή διαχείριση του G-κώδικα μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη οριοθέτηση των παραπάνω παραμέτρων ώστε να δημιουργηθούν ποιοτικά ανώτερες επιφάνειες. Προφανώς, η άμεση χειροκίνητη επέμβαση στον κώδικα δεν ενδείκνυται καθώς για την κατασκευή του απλούστερου δυνατού δοκιμίου απαιτούνται αρκετές εκατοντάδες έως χιλιάδες γραμμές κώδικα.

Οι [11] ανέπτυξαν ένα υποπρόγραμμα το Fabrix το οποίο είναι βασισμένο στο Adobe Illustrator™. Σύμφωνα με το πρόγραμμα αυτό, ο χειριστής, αφού εισάγει τον G κώδικα έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί την ταχύτητα και το πάχος εκτύπωσης ενώ παράλληλα μπορεί να βλέπει στην οθόνη του υπολογιστή το αποτέλεσμα που πρόκειται να προκύψει με την εφαρμογή των εκάστοτε αλλαγών. Επιπλέον, στο συγκεκριμένο πρόγραμμα στην περίπτωση εισαγωγής σχεδίου που φέρει μόνο το εξωτερικό περίβλημα (κενό εσωτερικά) τότε υπάρχει η δυνατότητα ελεύθερης σχεδίασης της διαδρομής που θα ακολουθήσει ο extruder κατά την εκτύπωση του εσωτερικού του δοκιμίου εφόσον αυτό είναι θεμιτό. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω το συγκεκριμένο πρόγραμμα υποστηρίζει τον σχεδιασμό αλλά και την εκτύπωση δοκιμίων με πολλαπλά υλικά για εκτυπωτές που διαθέτουν διπλές κεφαλές εξώθησης. Ως αποτέλεσμα ο χρήστης μπορεί να εκμεταλλευτεί τα χαρακτηριστικά του κάθε υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιήσει και να ορίσει μέσω του προγράμματος τα σημεία στα οποία θα επέμβει για την βελτίωση του G-κώδικα που με την σειρά του θα οδηγήσει σε ποιοτικώς ανώτερα τελικά δοκίμια.

Τέλος, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες οι οποίες δεν μελετούν το αντικείμενο σε οριζόντιες-παράλληλες στρώσεις αλλά εστιάζουν στην κίνηση του εργαλείου εξώθησης σε πολλαπλούς άξονες. Η εν λόγω μεθοδολογία είναι γνωστή ως προσθετική κατασκευή πολλαπλών αξόνων (Multi-Axis Additive Manufacturing (MAAM)) και έχει ως κύριο στόχο την δημιουργία καμπύλων κυρίως δοκιμίων που είναι βέλιστα για το φορτίο που πρόκειται να υποστούν καθώς επίσης και την ελαχιστοποίηση του φαινομένου της σκάλας (Staircase effect). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν υπάρχει κλίση της γεωμετρίας κατά της διεύθυνση του τεμαχισμού. Ως αποτέλεσμα, ο extruder μετακινείται όχι μόνο προς τα πάνω αλλά ταυτόχρονα και στην κάθετη προς αυτή διεύθυνση σε κάθε στρώμα. Οι συνεχείς μετακινήσεις του extruder στο τελικό δοκίμιο δίνουν την αίσθηση της ραφής καθώς κατά την μετάβαση από το ένα επίπεδο στο επόμενο σχηματίζεται μια δισδιάστατη σκάλα εξ' ου και το φαινόμενο της σκάλας (Εικόνα 4).

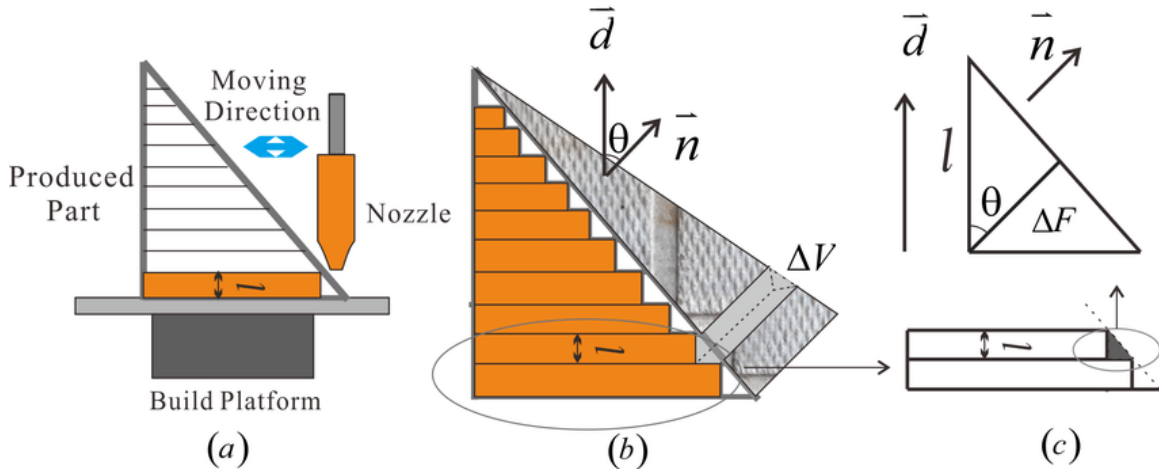


Figure 4. Ανάλυση φαινομένου σκάλας: (a) Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης. (b) Σφάλμα όγκου μεταξύ δύο στρώσεων. (c) Εκτίμηση σφάλματος όγκου [12]

Οι [13] ανέπτυξαν ένα λογισμικό που σχεδιάζει την κίνηση του εργαλείου κατά την εκτύπωση δοκιμίων σε πολλαπλούς άξονες. Το συγκεκριμένο λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών καθώς αποτελεί γενική μεθοδολογία βελτιστοποίησης σε αντίθεση με παλαιότερα εργαλεία που ήταν σχεδιασμένα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Πιο αναλυτικά, είναι γνωστό ότι στην κατεργασία προσθετικής κατασκευής με χρήση τήγματος (FDM) το ίδιο το πρόγραμμα σχεδίασης καθώς και το λογισμικό τεμαχισμού slicer χωρίζουν την γεωμετρία του επιθυμητού τελικού δοκιμίου σε επιμέρους μικρότερες γεωμετρίες έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι το βέλτιστο δυνατό. Παρόλα αυτά κάτι αντίστοιχο δεν είχε εφαρμοστεί στην προσθετική κατασκευή με χρήση πολλαπλών αξόνων εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο γίνεται η εκτύπωση, όπου υπάρχει μία ενιαία γεωμετρία που θα οδηγήσει στο τελικό αποτέλεσμα.

### 3. Μεθοδολογία

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται από τον εκτυπωτή θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα των δύο αλγορίθμων εύρεσης βέλτιστων διαδρομών. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο Nearest Neighbor και ο Chinese Postman.

Βασίζόμενοι στο γεγονός ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση πραγματοποιείται σε επίπεδα (layers) κατά τον άξονα Z, ο εκάστοτε αλγόριθμος θα εφαρμόζεται κάθε φορά σε κάθε επίπεδο με στόχο την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής στο επίπεδο αυτό.

Στην συγκεκριμένη ενότητα αναλύεται σε βάθος η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στους αλγορίθμους που χρησιμοποιήθηκαν καθώς επίσης και στον τρόπο ενσωμάτωσής τους στο περιβάλλον του Matlab.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που ακολουθήθηκε κατά την ανάπτυξη της μεθοδολογίας. Σε αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο διεξήχθη η παρούσα μελέτη.

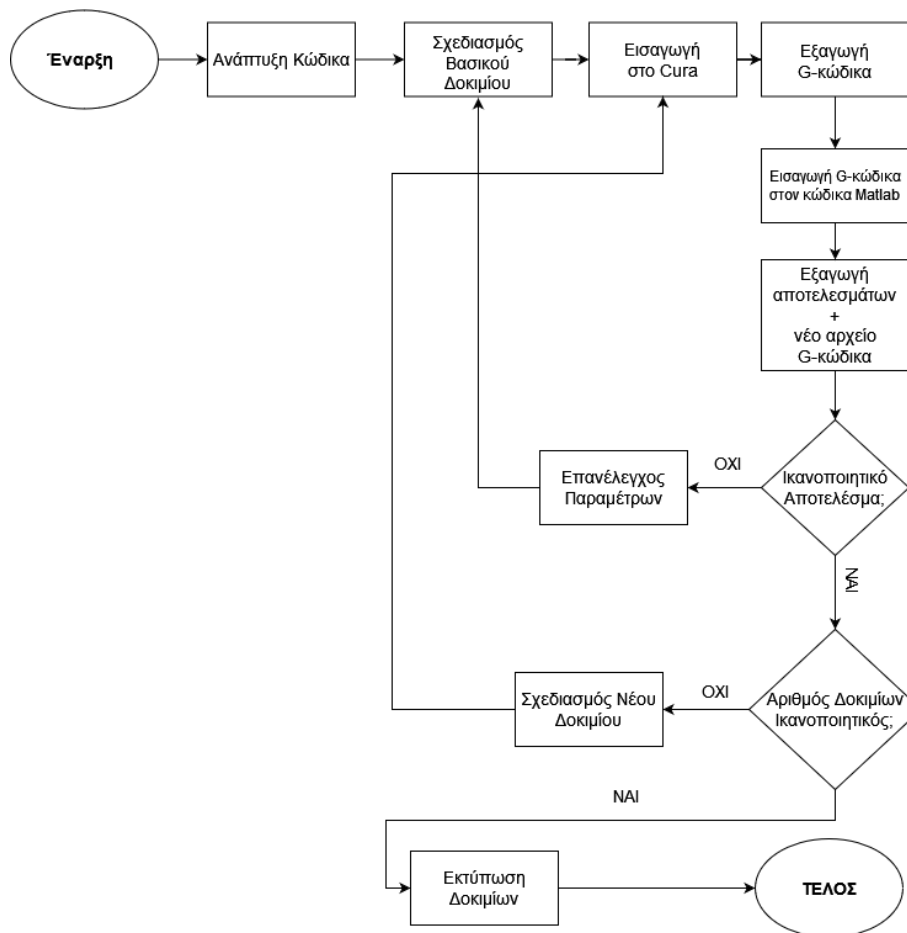


Figure 5. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας

### 3.1 Nearest Neighbor

Ο αλγόριθμος Nearest Neighbor αποτελεί έναν από τους πρώτους αλγορίθμους που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος του πλανόδιου πωλητή (Travelling Salesman Problem).

Αν και υπάρχει πληθώρα αλγορίθμων που μπορούν να λύσουν το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιλέχθηκε καθώς αποτελεί έναν από τους πιο βασικούς αλγορίθμους για εύρεση βέλτιστων/ελάχιστων διαδρομών. Επιπλέον, η μεθοδολογία εκτύπωσης με την χρήση τηγμένου νήματος εναρμονίζεται πλήρως με την μεθοδολογία του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα του, λόγω της χαμηλής πολυπλοκότητάς του, δεν δίνουν πάντα το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει περίπτωση ο αλγόριθμος να μην καταφέρει να δώσει κάποιο αποτέλεσμα ακόμα και αν υπάρχει βέλτιστη διαδρομή [14] [15].

Ο αλγόριθμος αποτελείται από τα εξής βήματα [8]:

1. Αρχικοποίηση όλων των κορυφών (σημείων) ότι δεν έχουν προσπελαστεί.
2. Επιλογή μια αυθαίρετης κορυφής, ορισμός της ως τρέχουσα κορυφή  $u$ . Επισήμανση της ότι έχει προσπελαστεί.
3. Εύρεση της συντομότερης άκρης που συνδέει της τρέχουσα κορυφή  $u$  με μια κορυφή  $v$  που δεν έχει προσπελαστεί.
4. Ορισμός κορυφής  $v$  ως τρέχουσα κορυφή  $u$ . Επισήμανση κορυφής  $v$  ότι έχει προσπελαστεί.
5. Αν όλες οι κορυφές στο χώρο έχουν προσπελαστεί τότε τερματισμός αλγορίθμου. Αλλιώς, μετάβαση στο βήμα 3.

Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι η ακολουθία των κορυφών που προσπελάστηκαν.

### 3.2 Chinese Postman Problem

Το πρόβλημα του Κινέζου ταχυδρόμου αποτελεί μια παραλλαγή του κυκλώματος Euler (Eulerian path) για μη προσανατολισμένους γράφους. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, αν και δεν έχει ευρεία εφαρμογή στην προσθετική κατασκευή, μπορεί, σύμφωνα με τα τωρινά δεδομένα να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Εφόσον ο στόχος του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι η μετάβαση σε όλους τους κόμβους ενός γραφήματος, η μεταφορά του στην τρισδιάστατη εκτύπωση συνιστά την μείωση του κενού χρόνου στον οποίο ο extruder βρίσκεται στον «αέρα» και στην ουσία θα πραγματοποιούσε μια γρήγορη κίνηση μετάβασης σε κάποιο σημείο για την συνέχιση της διαδικασίας [9].

Ο αλγόριθμος αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Έλεγχος αν το γράφημα είναι Eulerian. Eulerian γράφημα είναι το γράφημα το οποίο περιέχει ένα Eulerian μονοπάτι. Στο μονοπάτι αυτό είναι δυνατή η προσπέλαση όλων των κορυφών ακριβώς μία φορά. Σε περίπτωση που η αρχή και το τέλος του μονοπατιού αυτού ταυτίζονται τότε μιλάμε για Eulerian κύκλωμα. Ο έλεγχος γίνεται με την χρήση του αλγορίθμου του Hierholzer

2. Αν το γράφημα είναι Eulerian τότε γίνεται εύρεση του αριθμού των κορυφών. Αν δεν είναι, τότε απαιτείται η χρήση του αλγορίθμου Blossom.
3. Εύρεση των κορυφών που συνδέονται μεταξύ τους με μονό αριθμό.
4. Εύρεση όλων των διαδρομών μεταξύ των κορυφών του βήματος 3
5. Υπολογισμός του «κόστους μετάβασης» των παραπάνω διαδρομών
6. Εύρεση του ελάχιστου αθροίσματος
7. Υπολογισμός συνολικής απόστασης για μετάβαση σε όλες τις κορυφές
8. Υπολογισμός τελικού αποτελέσματος αθροίζοντας τα αποτελέσματα των βημάτων 6 και 7

Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι η ακολουθία των κορυφών που προσπελάστηκαν.

### 3.3 Ανάλυση κώδικα Matlab

Κατά την έναρξη του προγράμματος φορτώνονται τα txt αρχεία που περιέχουν τον G-κώδικα για κάθε δοκίμιο. Στην συνέχεια γίνεται επιλογή των γραμμών του 1<sup>ου</sup> layer (εξαιρουμένης της βοηθητικής ποδιάς). Τα δεδομένα φορτώνονται σε πίνακες στο Matlab και στην συνέχεια γίνεται η έναρξη των αλγορίθμων. Στους πίνακες αυτούς αποθηκεύονται οι τιμές των μεταβλητών X Y Z για κάθε γραμμή G κώδικα., του 1<sup>ου</sup> layer.

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή των δύο αλγορίθμων απαραίτητη κρίνεται η γραφική αναπαράσταση του 1<sup>ου</sup> επιπέδου του δοκιμίου σύμφωνα με τον προτεινόμενο από τον εκτυπωτή αλγόριθμο. Επιπλέον, για την ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων υπολογίζεται κάθε φορά η συνολική απόσταση που διανύεται κατά την εκτέλεση του αρχικού προγράμματος, ενώ ταυτόχρονα από τον G-κώδικα μπορεί να προκύψει ο χρόνος που απαιτείται από τον εκτυπωτή για την εκτύπωση του συγκεκριμένου επιπέδου.

#### 3.3.1 Εφαρμογή αλγορίθμου Nearest neighbor

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα αποτελέσματα του αλγορίθμου nearest neighbor εξαρτώνται από την επιλογή του αρχικού σημείου για την εκκίνησή του. Στο πρόγραμμα που δημιουργήθηκε η επιλογή του αρχικού σημείου δεν έγινε αυθαίρετα. Ως αρχικό σημείο χρησιμοποιήθηκε το σημείο που έχει επιλεγεί από το πρόγραμμα τεμαχισμού Slicer κατά την εκτύπωση του συγκεκριμένου layer.

Το Matlab διαθέτει ενσωματωμένη συνάρτηση για τον υπολογισμό του αλγορίθμου Nearest Neighbor. Εκτελώντας την συνάρτηση αυτή προκύπτει ως αποτέλεσμα ένα διάνυσμα idx το οποίο δείχνει το πλησιέστερο σημείο σε κάθε θέση που πρέπει να μετακινηθεί ο extruder για να διανύσει την μικρότερη απόσταση. Ακολουθώντας τα σημεία σύμφωνα με την προτεινόμενη από τον αλγόριθμο σειρά προκύπτει η πορεία που θα πρέπει να ακολουθήσει ο extruder κατά την εκτύπωση. Επιπλέον, υπολογίζεται για κάθε δοκίμιο η συνολική απόσταση που διανύθηκε από τον Nearest Neighbor για την εκτύπωση του συγκεκριμένου επιπέδου καθώς επίσης και ο απαιτούμενος χρόνος, εφόσον είναι γνωστή η πρόωση F.

### 3.3.2 Εφαρμογή αλγορίθμου Chinese Postman

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου Chinese Postman απαιτείται πρώτα να γίνει έλεγχος του γραφήματος αν υπάρχει Eulerian, μονοπάτι ή κύκλος. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον συγκεκριμένο έλεγχο είναι βασισμένος στον κώδικα του Sergii Iglin [16] που είναι διαθέσιμος στο διαδίκτυο.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου εμφανίζεται ως μήνυμα στον χρήστη στην οθόνη του Matlab. Τα πιθανά αποτελέσματα είναι 3: Eulerian, semi-Eulerian and non Eulerian. Σε συνδυασμό με το μήνυμα που εμφανίζεται στην οθόνη, ο αλγόριθμος δίνει και το αποτέλεσμα του ελέγχου σε γράφημα.

Σε περίπτωση που δεν βρεθεί Eulerian μονοπάτι, προτείνονται από την βιβλιογραφία άλλοι αλγόριθμοι για την εύρεση κλειστών μονοπατιών. Ενδεικτικά, οι [9] έκαναν χρήση του αλγορίθμου Blossom. Με την εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου επιτυγχάνεται πάντα, με κάποιες παραδοχές και υποχωρήσεις, η εύρεση ενός Eulerian μονοπατιού στο οποίο έπειτα καθίσταται δυνατή η εφαρμογή του αλγορίθμου Chinese Postman. Παρόλα αυτά, δεδομένου πως ένα απλό layer οποιουδήποτε δοκιμίου αποτελείται από πολύ μεγάλο αριθμό σημείων, μειώνει σημαντικά την πιθανότητα να μην βρεθεί ένα Eulerian μονοπάτι. Στην παρούσα διπλωματική βασιζόμενοι στην παραπάνω σκέψη δεν έγινε εφαρμογή του αλγορίθμου Blossom. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρήθηκε ότι βρέθηκαν Eulerian ή semi-Eulerian μονοπάτια χωρίς την χρήση του.

Εφόσον ολοκληρωθεί ο παραπάνω έλεγχος, ο αλγόριθμος συνεχίζει υπολογίζοντας τα σημεία στα οποία θα πρέπει να περάσει ο extruder για να πραγματοποιήσει την ελάχιστη διαδρομή. Η σειρά των σημείων εμφανίζεται στο διάγραμμα cEu. Ακολουθώντας τα σημεία σύμφωνα με την σειρά αυτή προκύπτει η πορεία που θα πρέπει να ακολουθήσει ο extruder κατά την εκτύπωση. Επιπλέον, υπολογίζεται για κάθε δοκίμιο η συνολική απόσταση που διανύθηκε από τον Chinese Postman για την εκτύπωση του συγκεκριμένου επίπεδου καθώς επίσης και ο απαιτούμενος χρόνος, εφόσον είναι γνωστή η πρόωση F.

### 3.3.3 Δημιουργία και εξαγωγή G-κώδικα

Μετά την υλοποίηση και την θεωρητική εφαρμογή των αλγορίθμων απαραίτητη κρίνεται η πρακτική εφαρμογή τους μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσής τους. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για την εκτύπωση ενός δοκιμίου απαιτείται ο G-κώδικας που προκύπτει από το εκάστοτε πρόγραμμα τεμαχισμού Slicer.

Στην παρούσα εργασία τα δεδομένα του αρχικού δοκιμίου έχουν προκύψει από την χρήση ενός προγράμματος τεμαχισμού Slicer. Παρόλα αυτά, οι δύο αλγόριθμοι που δοκιμάστηκαν επειδή στηρίζονται στα σημεία του αρχικού προγράμματος, θα πρέπει για την εξαγωγή του G-κώδικα να ακολουθηθεί μια αντίστροφη διαδικασία.

Στην ενότητα που ακολουθεί γίνεται αναλυτική επεξήγηση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την δημιουργία του G-κώδικα των δύο αλγορίθμων.

Αρχικά, από την εφαρμογή των δύο αλγορίθμων, τα αποτελέσματα που προκύπτουν αποτελούν τα σημεία X και Y που θα ακολουθήσει ο extruder. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παρούσας εργασίας, το Z το θεωρούμε σταθερό εφόσον η μελέτη μας γίνεται σε ένα επίπεδο (layer) την φορά.

Μια άλλη σημαντική τιμή που απαιτείται για την εκτύπωση των δοκιμών είναι το E, που αποτελεί το extrusion value. Οι εντολές E καθορίζουν την ποσότητα υλικού που πρέπει να εκτυπωθεί. Ανάλογα με τον εκτυπωτή, η αριθμητική τιμή της εντολής αναφέρεται είτε στο μήκος του νήματος, σε mm, που πρέπει να εξωθηθεί, είτε στον όγκο του νήματος, σε mm<sup>3</sup>. Στην περίπτωση μας, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Ultimaker S5 και το E αναφέρεται στο μήκος του νήματος σε mm.

Οι τιμές του E που δίνονται από τον αρχικό G-κώδικα υπολογίζονται εκ νέου μιας και η αλληλουχία των σημείων που έχουν προκύψει είναι διαφορετική από την αρχική, άρα και οι αποστάσεις τους διαφέρουν σε σχέση με τον αρχικό κώδικα. Για τον υπολογισμό του E αναπτύχθηκε η ακόλουθη μεθοδολογία που συνδέει την ποσότητα του υλικού που εξωθείται με βάση την διαδρομή που διανύεται.

### 3.3.4 Μεθοδολογία υπολογισμού E (Extrusion Value)

Αρχικά γίνεται η αρχικοποίηση του E=0. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά κανόνα οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές υπολογίζουν το E με απόλυτες τιμές και όχι σχετικές. Αυτό σημαίνει πως σε κάθε γραμμή το αποτέλεσμα του E αποτελεί άθροισμα των προηγούμενων τιμών που βρέθηκαν συν την τιμή της υπάρχουσας θέσης. Αυτό το σκεπτικό ενσωματώθηκε στην μεθοδολογία που αναπτύχθηκε.

Η διαθέσιμη βιβλιογραφία που σχετίζεται με τον υπολογισμό του E είναι αρκετά περιορισμένη. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι εταιρείες που είναι υπεύθυνες για την δημιουργία των προγραμμάτων τεμαχισμού Slicer και του συνόλου της διαδικασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν δημοσιεύουν τους κώδικες τους ούτε τις μεθοδολογίες που ακολουθούν. Αυτό έκανε τον υπολογισμό της συγκεκριμένης μεταβλητής αρκετά δύσκολο. Βασιζόμενοι σε ορισμένες παραδοχές καταφέραμε να δημιουργήσουμε μια μεθοδολογία η οποία συγκρινόμενη με τα αποτελέσματα του αρχικού προγράμματος slicing έχει πολύ μικρές αποκλίσεις. Οι παραδοχές που εφαρμόστηκαν για την εκτύπωση των δοκιμών σε εκτυπωτή Ultimaker S5 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Table 1. Παραδοχές μεταβλητών για τον υπολογισμό του E σε εκτυπωτή Ultimaker S5

Ορισμός μεταβλητών για τον εκτυπωτή Ultimaker S5	
<b>Διάμετρος Filament</b>	d=2.85 mm
<b>Πολλαπλασιαστής Εξώθησης (Extrusion Multiplier)</b>	x=1
<b>Απόσταση μεταξύ των σημείων</b>	L, χρήση Ευκλείδειας απόστασης (σε mm)
<b>Πλάτος εξώθησης (Extrusion Width)</b>	w=0.4 mm
<b>Ύψος επιπέδου (Layer height)</b>	h=0.15 mm

$$Volume_{in} = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * E * x = \frac{\pi * d^2}{4} * E * x \xrightarrow{d=2.85, x=1} Volume_{in} = 6.3761625 * E \quad (1)$$

όπου  $d$  = διάμετρος filament,  $x$  = extrusion multiplier

$$Volume_{out} = (A_{road} * L) \quad (2)$$

όπου  $L$  απόσταση μεταξύ των σημείων κάθε φορά

$$A_{road} = (w - h) * h + \pi * \left(\frac{h}{2}\right)^2 \xrightarrow{w=0.4, h=0.15} A_{road} = 0.0551625(3)$$

όπου  $w$  = extrusion width,  $h$  = layer height

$$\text{Αντικαθιστώντας την (3) η (2) έχουμε: } (2) \xrightarrow{(3)} Volume_{out} = 0.0551625 * L \quad (4)$$

$$\text{Γνωρίζουμε πως γενικά ισχύει: } Volume_{in} = Volume_{out} \xrightarrow{(1), (4)} E = 0.0087 * L \quad (5)$$

Από την σχέση (5) προκύπτει μια αναλογία μεταξύ της τιμής του υλικού που εξωθείται  $E$  με την απόσταση  $L$  ανάμεσα σε δύο σημεία κάθε φορά. Στο πρόγραμμα υπολογίζεται για κάθε ζεύγος σημείων η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ τους. Στην συνέχεια εφαρμόζεται το αποτέλεσμα του  $L$  στην σχέση (5) και προκύπτει το  $E$  για κάθε σημείο. Τα αποτελέσματα αθροίζονται κάθε φορά με τα προηγούμενα καθώς όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το  $E$  αποτελεί απόλυτη τιμή. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 οι πρώτες δέκα τιμές του  $E$  που υπολογίστηκε και πραγματοποιείται σύγκριση με τις τιμές του  $E$  που περιέχονται στον G-κώδικα. Αξίζει να σημειωθεί πως επειδή στον G-κώδικα του δοκιμίου περιέχονται επιπλέον βοηθητικά επίπεδα τα οποία δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση των τιμών του  $E$ . Με αυτόν τον τρόπο γίνεται απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων των τιμών σαν να πραγματοποιούσαμε μόνο την εκτύπωση του 1<sup>ου</sup> επιπέδου με την αρχική μεθοδολογία του εκτυπωτή.

Table 2. Σύγκριση αποτελεσμάτων  $E$  που προέκυψαν με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε σύγκριση με τον αρχικό αλγόριθμο για το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο

A/A	Τιμή $E$ με νέα μεθοδολογία	Μεταβολή $E$ ανά γραμμή με την νέα μεθοδολογία	Τιμή $E$ αρχικού αλγορίθμου (με κανονικοποίηση)	Μεταβολή $E$ ανά γραμμή αρχικού αλγορίθμου
<b>1</b>	0	0.5039	0	0.5447
<b>2</b>	0.5039	0.6343	0.5447	0.6857
<b>3</b>	1.1382	0.5038	1.2304	0.5447
<b>4</b>	1.6420	0.6378	1.7751	0.6933
<b>5</b>	2.2798	0.5109	2.4684	0.5522
<b>6</b>	2.7907	0.6412	3.0206	0.6933
<b>7</b>	3.4319	0.5108	3.7139	0.5522
<b>8</b>	3.9427	0.6448	4.2661	0.7008
<b>9</b>	4.5875	0.5178	4.9669	0.5597
<b>10</b>	5.1053		5.5266	



Από τον Πίνακα 2 γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές που υπολογίστηκαν παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από τις τιμές του E του αρχικού αλγορίθμου. Παρατηρούμε όμως ότι σταδιακά η απόκλιση αυτή μεγαλώνει. Αυτό οφείλεται κυρίως σε βελτιστοποιήσεις και μεταβολές ταχυτήτων που πραγματοποιεί το πρόγραμμα τεμαχισμού για να δώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα, καθώς επίσης και σε στρογγυλοποιήσεις που έχουν γίνει κατά τους υπολογισμούς. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέγιστη απόκλιση ανάμεσα στις δύο τιμές του E παρουσιάζεται κάθε φορά στην τελευταία τιμή για την εξώθηση. Παρόλα αυτά αν γίνει σύγκριση των μεταβολών των τιμών από την μία γραμμή στην επόμενη και για τις δύο μεθοδολογίες, γίνεται αντιληπτό πως η νέα μεθοδολογία υστερεί κατά βάση στο 2<sup>ο</sup> δεκαδικό ψηφίο σε σχέση με τις τιμές του αρχικού προγράμματος. Αυτό ισχύει για όλες τις τιμές που προέκυψαν και όχι μόνο για τις 10 που παρουσιάζονται.

Έπειτα από τον υπολογισμό του E απαιτείται η γενική σύνθεση του αρχείου με τον G-κώδικα και για τους δύο αλγορίθμους. Παρατηρώντας κανείς ένα αρχείο G-κώδικα είναι φανερό πως κατά την έναρξη και την λήξη του κώδικα περιέχονται ορισμένες «σταθερές» εντολές. Οι εντολές αυτές αποτελούν την αρχικοποίηση του κώδικα δίνοντας βασικές εντολές στον εκτυπωτή για την θέρμανση της κεφαλής, την έναρξη του υλικού για την δημιουργία τήγματος κ.α. Επιπλέον ορίζεται το είδος των συντεταγμένων, βασικά χαρακτηριστικά της «γλώσσας» του εκτυπωτή και οτιδήποτε σχόλιο κρίνεται απαραίτητο ότι πρέπει να συμπεριληφθεί. Ενώ στο κλείσιμο πραγματοποιούνται όλες οι απαραίτητες διεργασίες για τον τερματισμό του προγράμματος και την αδρανοποίηση του εκτυπωτή.

Στο αρχείο G-κώδικα που δημιουργήθηκε, ενσωματώθηκαν οι προαναφερθείσες εντολές που επαναλαμβάνονται σε κάθε εκτύπωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε εκτυπωτής πέραν του συνόλου των εντολών, φέρει εντολές που είναι μοναδικές για την αρχικοποίηση και τον τερματισμό του. Στην συνέχεια για σταθερή πρόωση F και ταχύτητα περιστροφής S, δημιουργήθηκαν οι αλληλουχίες των διαδρομών που θα πρέπει να ακολουθηθούν. Τα αποτελέσματα εξάγονται σε δύο αρχεία txt, `g_code_nrst.txt` και `g_code_chinese.txt`, τα οποία εύκολα μπορούν να εισαχθούν σε οποιοδήποτε εκτυπωτή για εκτύπωση.

Οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαθέσιμοι στο Παράρτημα Β της παρούσας εργασίας.

## 4. Υλοποίηση Μεθοδολογίας

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα δοκίμια που σχεδιάστηκαν για την υλοποίηση της μεθοδολογίας καθώς επίσης και όλη η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προετοιμασία των δοκιμίων και η εκτέλεση της μεθοδολογίας.

### 4.1 Επιλογή και σχεδιασμός κατάλληλων δοκιμίων

Για την μελέτη της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκαν κάποια βασικά γεωμετρικά σχήματα καθώς και ορισμένα μηχανολογικά εξαρτήματα. Τα γεωμετρικά σχήματα επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι εμφανή τα αποτελέσματα των διάφορων μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν καθώς και πως αυτές επιδρούν σε διαφορετικές μορφολογίες. Έπειτα σχεδιάστηκαν ορισμένα μηχανολογικά εξαρτήματα, καθώς φέρουν πληθώρα διαφορετικών μορφολογιών και αποτελούν ρεαλιστικά και χρηστικά παραδείγματα δοκιμίων που θα μπορούν μελλοντικά να προκύψουν από κατεργασίες προσθετικής κατασκευής. Η σχεδίαση όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού Solidworks2020™ [17]. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες εικόνες από τα δοκίμια που σχεδιάστηκαν μαζί με τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Στο Παράρτημα Α είναι διαθέσιμα τα μηχανολογικά σχέδια των δοκιμίων που σχεδιάστηκαν.

- Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο

Αρχικά, για τον σωστό ορισμό και ανάπτυξη της μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί δημιουργήθηκε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο χωρίς οπές. Στο συγκεκριμένο σχήμα βασίστηκε η ανάπτυξη της μεθοδολογίας των βέλτιστων διαδρομών. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται σε δύο όψεις το σχέδιο του ορθογωνίου που αναπτύχθηκε.

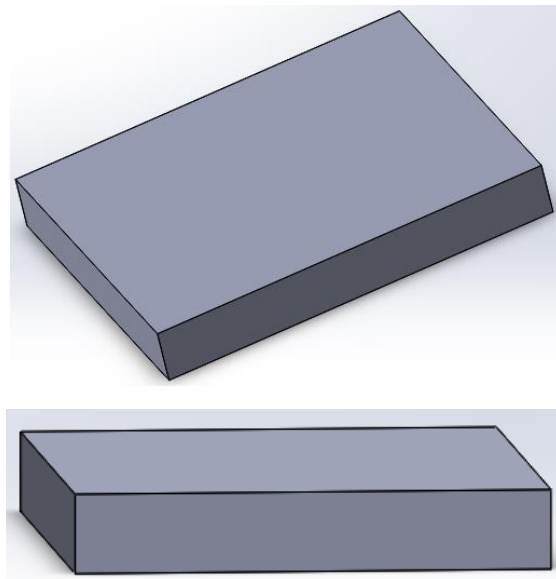


Figure 6. Απεικόνιση βασικού πολυγώνου

- Οδοντωτός Τροχός (Γρανάζι)

Οι οδοντωτοί τροχοί χρησιμοποιούνται για την μετάδοση κίνησης και ισχύος με ακρίβεια μεταξύ αξόνων παράλληλων (μετωπικοί, ελικοειδείς), αξόνων τεμνόμενων (κωνικοί τροχοί) και αξόνων ασύμβατων (ιπποειδείς) [18]. Οι οδοντωτοί τροχοί στην καθομιλουμένη ονομάζονται γρανάζια και συνήθως η λειτουργία τους γίνεται ανά ζεύγη.

Στην τρισδιάστατη εκτύπωση η επιτυχής κατασκευή λειτουργικών οδοντωτών τροχών αποτελεί πρόκληση μιας και μέχρι πρότινος οι διάφορες μεθοδολογίες της προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή πρωτοτύπων. Παρόλα αυτά υπάρχουν τομείς της προσθετικής κατασκευής στους οποίους παρατηρούνται υποσχόμενα αποτελέσματα στο κομμάτι της κατασκευής/εκτύπωσης οδοντωτών τροχών. Ο βασικότερος από αυτούς τους τομείς είναι η μεταλλική προσθετική κατασκευή (Metal Additive Manufacturing) [19]. Οι λόγοι για τους οποίους η κατασκευή οδοντωτών τροχών δεν είναι τόσο ανεπτυγμένη με τις μεθόδους της προσθετικής κατασκευής στηρίζονται κυρίως στο ίδιο το υλικό το οποίο απαιτείται. Τα περισσότερα από τα κράματα μετάλλων που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές κατεργασίες δεν είναι ακόμα εύκολα διαθέσιμα για χρήση στην τρισδιάστατη εκτύπωση, χωρίς αυτό όμως να σημαίνει πως δεν εισέρχονται καθημερινά στην αγορά νέα υλικά. Ένα άλλο πρόβλημα είναι οι εκτεταμένες διεργασίες αποπεράτωσης και φινιρίσματος που απαιτούνται έτσι ώστε το δοκίμιο να αποκτήσει την επιθυμητή τελική μορφή. Στις διεργασίες αυτές συνήθως περιλαμβάνεται και θερμική επεξεργασία του δοκιμίου. Παρόλα αυτά, η κατασκευή οδοντωτών τροχών με τέτοιου είδους μεθοδολογίες χαρακτηρίζεται από μια πληθώρα πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με τις συμβατικές κατεργασίες. Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα κατασκευής σύνθετων γεωμετριών. Οι σχεδιαστές πλέον είναι σε θέση να δημιουργούν περίπλοκα δοκίμια τα οποία δεν θα ήταν ποτέ δυνατόν να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθοδολογίες. Επιπλέον, στην προσθετική κατασκευή παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής εσωτερικών καναλιών ψύξης και λίπανσης του δοκιμίου στα σημεία εκείνα που θεωρείται ότι θα ασκηθούν τα μεγαλύτερα φορτία δυνάμεων. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω είναι δυνατό να δημιουργηθούν νέες γεωμετρίες οδοντωτών τροχών στους οποίους θα γίνεται μείωση της αδράνειας του συστήματος. Τέλος, οι μεθοδολογίες αυτές εκτός από την ποιοτική αναβάθμιση του τελικού δοκιμίου στοχεύουν και στην ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής.

Στην συνέχεια, στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται τα σχέδια του οδοντωτού τροχού που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

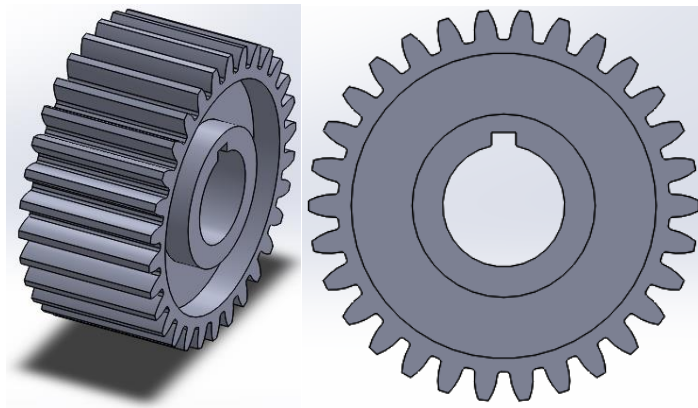


Figure 7. Απεικόνιση γραναζιού

- Κοχλίας (Βίδα) - Περικόχλιο (παξιμάδι)

Οι κοχλίες, γνωστοί κοινώς ως βίδες, αποτελούν στοιχεία μηχανών και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ως προς τον τρόπο χρήσης τους σε: κοχλίες συνδέσεως και κοχλίες κινήσεως. Οι κοχλίες συνδέσεως χρησιμοποιούνται για την ασφαλή και μη μόνιμη σύνδεση μεταξύ των ανεξάρτητων στοιχείων μιας κατασκευής ή μιας μηχανής. Οι κοχλίες κινήσεως μετατρέπουν την περιστροφική κίνηση του κορμού τους σε ευθύγραμμη κίνηση του περικόχλιου τους, όπως ο τόννος [18].

Ο τυπικός κοχλίας αποτελείται από την κεφαλή και τον κορμό. Ο κορμός φέρει πάνω του, στην εξωτερική πλευρά, ελικοειδές σπείρωμα. Η Εικόνα 8 αποτελεί την αναπαράσταση ενός σπειρώματος κοχλίας. Στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε περικόχλια, τότε το σπείρωμα αυτό βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά και αποτελεί το θηλυκό σπείρωμα στο οποίο θα κουμπώσει το αρσενικό σπείρωμα που βρίσκεται πάνω στον κοχλία. Επιπλέον γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι ο άξονας σπειρώματος που αποτελεί την νοητή γραμμή που περνάει μέσα από το κέντρο του κυλίνδρου που φέρει το σπείρωμα, το κάτω μέρος του αυλακιού που διατρέχει το σώμα του σπειρώματος (Root), το ψηλότερο σημείο του προφίλ του σπειρώματος (Crest), η μεγάλη και η μικρή διάμετρος καθώς και οι γωνίες σπειρώματος. Γνωρίζοντας τα συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, είναι δυνατή η επιτυχής κατασκευή ενός σετ κοχλία-περικόχλιου.

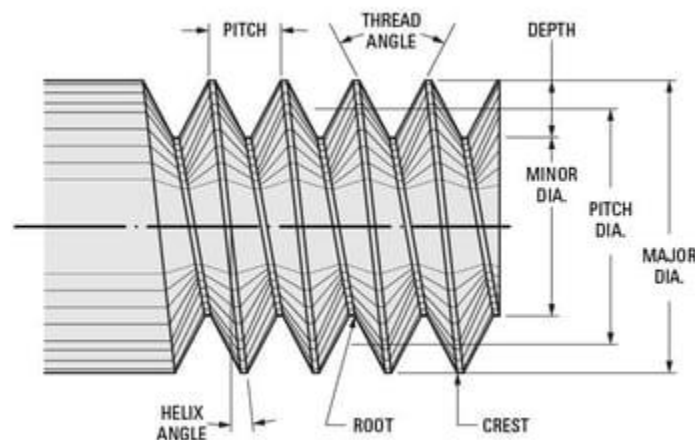


Figure 8: Ένα σπείρωμα κοχλίας [20]

Στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η κατασκευή ζευγαριών κοχλίας-περικόχλιου αποτελεί μεγάλη πρόκληση καθώς σε όλες τις μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης το τελικό αντικείμενο παρουσιάζει διαφορές ως προς τις τελικές διαστάσεις, κυρίως λόγω φαινομένων συστολής και διαστολής του υλικού εκτύπωσης κατά την ψύξη και θέρμανση του αντίστοιχα. Παράλληλα, σημαντικό ρόλο στο δυνατό μέγεθος εκτύπωσης των κοχλιών και του περικόχλιου αποτελούν οι διαθέσιμες μύτες/στόμια που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, κατά την εκτύπωση ενός εσωτερικού σπειρώματος για ένα σχετικά μεγάλο δοκίμιο, η κίνηση του extruder δεν θα αποτελέσει πρόβλημα καθώς υπάρχει διαθέσιμος χώρος ώστε να κινηθεί και να δοθεί ο απαραίτητος χρόνος ψύξης του αντικειμένου. Αντιθέτως, στην περίπτωση κατασκευής εξωτερικού σπειρώματος ο extruder δεν έχει τον απαραίτητο χώρο

κίνησης έτσι ώστε το δοκίμιο να ψυχθεί επαρκώς, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα σύνδεσης ανάμεσα στον κοχλία και το περικόχλιο [21].

Στην συνέχεια, στις Εικόνες 9 και 10 παρουσιάζονται τα σχέδια των σετ κοχλία-περικόχλιου που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

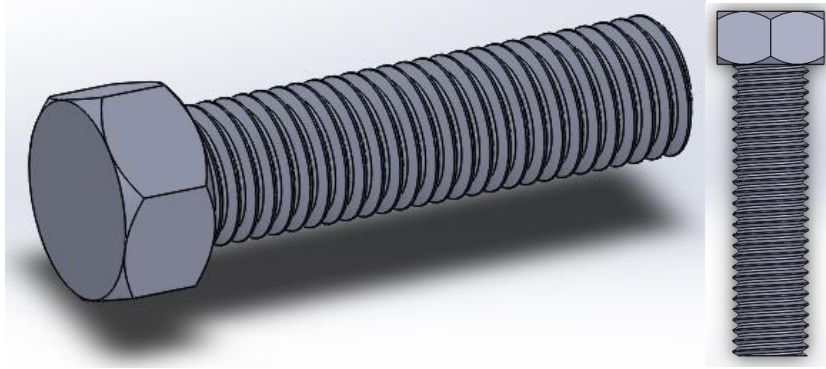


Figure 9. Απεικόνιση κοχλία

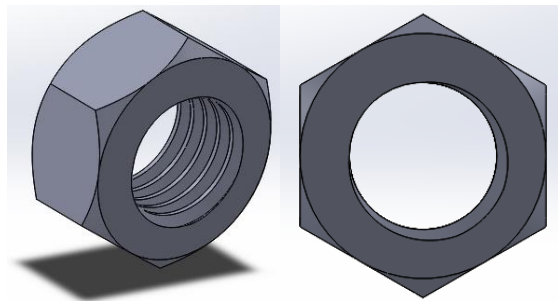


Figure 10. Απεικόνιση περικόχλιου

- Σφήνα

Οι σφήνες είναι στοιχεία μηχανής που χρησιμοποιούνται για την ασφάλιση έναντι περιστροφής ενός στοιχείου που είναι συνδεδεμένο πάνω σε άξονα. Τα δύο βασικά είδη σφηνών είναι οι σφήνες Woodruff και οι τετραγωνικές και επίπεδες σφήνες. Οι πρώτες είναι σχεδιασμένες για να διευκολύνουν την αποσυναρμολόγηση των τροχαλιών από τους άξονες και δεν χρησιμοποιούνται ως σφήνες ολίσθησης (Εικόνα 11). Αξίζει να σημειωθεί πως και τα δύο είδη σφηνών εξαιτίας του τρόπου χρήσης τους καταπονούνται σε διάτμηση [18].

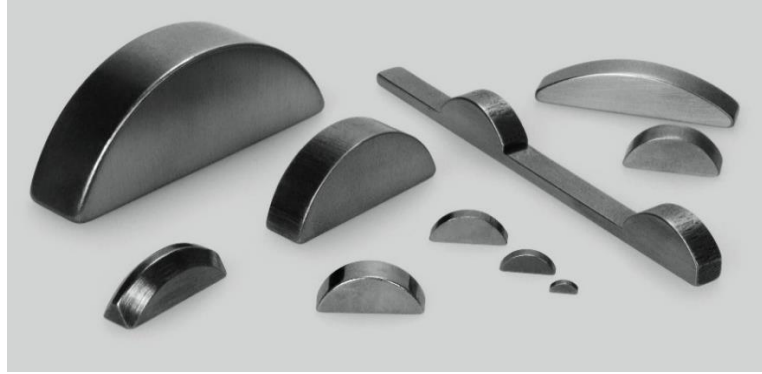


Figure 11: Σφήνες τύπου Woodruff

Στην συνέχεια, στην Εικόνα 12 παρουσιάζονται τα σχέδια της σφήνας που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Ο τύπος της σφήνας που επιλέχθηκε είναι Woodruff εξαιτίας της γεωμετρίας του. Η καμπύλη επιφάνεια που φέρει στο πάνω μέρος της η συγκεκριμένη σφήνα αποτελεί πρόκληση κατά την εκτύπωση. Μετά το πέρας της εκτύπωσης θα είναι δυνατός ο ποιοτικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν καθώς το συγκεκριμένο δοκίμιο χαρακτηρίζεται από βασικές γεωμετρίες οι οποίες θα υποδείξουν στον μέγιστο βαθμό τυχόν αδυναμίες ή πλεονεκτήματα.

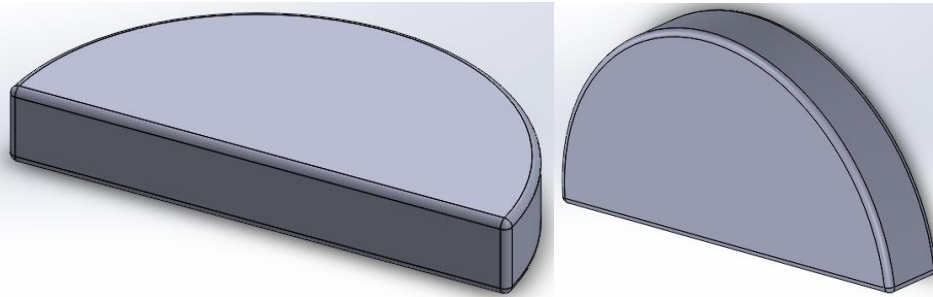
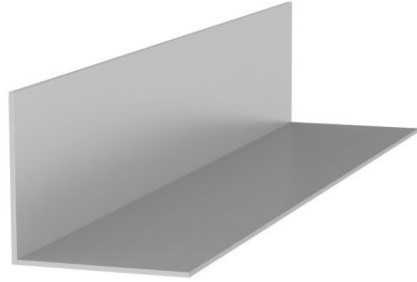


Figure 12. Απεικόνιση σφήνας τύπου Woodruff

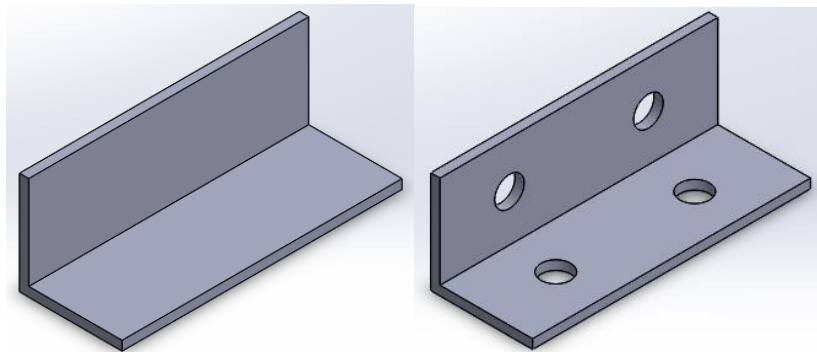
- Προφίλ σχήματος L/Γωνιά (L shaped profile)

Τα προφίλ σχήματος L αν και αποτελούν εύκολες γεωμετρίες, χαρακτηρίζονται από πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους μηχανολογικούς τομείς. Τα προφίλ αυτά κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο (Εικόνα 13). Στην βιομηχανία, τα προφίλ αλουμινίου χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, όπου δεν είναι πολύ σημαντική η ακαμψία ή η ποιότητα της επιφάνειάς τους, αλλά ένας συνδυασμός και των δύο μαζί [22]. Στην προσθετική κατασκευή η δημιουργία τέτοιων προφίλ βρίσκει χρήση μόνο σε κατασκευές μοντελισμού ή ως καλούπι για την μετέπειτα δημιουργία προφίλ με συμβατικές κατεργασίες. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των διαθέσιμων, μέχρι στιγμής, υλικών κατασκευής, τα οποία δεν χαρακτηρίζονται από υψηλές αντοχές σε σχέση με τα κράματα που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές κατεργασίες. Επιπλέον, η δημιουργία προφίλ βιομηχανικής κλίμακας απαιτεί ογκώδη και αρκετά ακριβά μηχανήματα τα οποία καταστούν την βιομηχανική παραγωγή τους αδύνατη μέχρι στιγμής.



*Figure 13: Γωνιά αλουμινίου*

Στην συνέχεια, στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται τα σχέδια του προφίλ σχήματος L που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Το συγκεκριμένο σχέδιο επιλέχθηκε να μελετηθεί με τις μεθοδολογίες που θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο καθώς αν και χαρακτηρίζεται από απλές/βασικές γεωμετρίες, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για την μελέτη της κίνησης του extruder κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση. Επιπλέον, πρόκληση θα αποτελέσει κατά την εκτύπωση η κάθετη στο επίπεδο εκτύπωσης πλευρά η οποία ενδεχομένως να χρειαστεί επιπλέον στηρίγματα για την σωστή εκτύπωσή της.



*Figure 14. Απεικόνιση προφίλ σχήματος L και μεντεσέ*

## 4.2 Δημιουργία G-κώδικα και εξαγωγή βασικών πληροφοριών των δοκιμίων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εισαγωγή των δοκιμίων στο πρόγραμμα Ultimaker Cura έτσι ώστε να προκύψει ο G-κώδικας. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά που ορίστηκαν κατά την παρούσα μελέτη.

### 4.2.1 Εισαγωγή δοκιμίων στο πρόγραμμα Ultimaker Cura

Εφόσον τα δοκίμια σχεδιάστηκαν ήταν πλέον δυνατή η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα που θα γίνει εξαγωγή του G-κώδικα και στην συνέχεια η εκτύπωσή τους. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ultimaker Cura της εταιρίας Ultimaker [23].

Αρχικά, για την εισαγωγή των δοκιμίων στο πρόγραμμα απαιτείται η μετατροπή των αρχείων σε αρχεία stl (Standard Tessellation Language). Τα συγκεκριμένα αρχεία αποτελούν την πλέον ευρέως διαδεδομένη μορφή αρχείων στην προσθετική κατασκευή καθώς σε αυτά περιγράφονται μόνο οι επιφανειακές γεωμετρίες ενός τρισδιάστατου αντικειμένου παραλείποντας άλλα χαρακτηριστικά του μοντέλου που παρέχονται στα λογισμικά τύπου CAD, όπως το χρώμα, η υφή, το υλικό κλπ. [24].

Έπειτα από την εξαγωγή του δοκιμίου, από το SolidWorks, σε αρχείο μορφής stl, γίνεται η εισαγωγή του στο πρόγραμμα Cura. Σημαντικό ρόλο κατά την εισαγωγή του δοκιμίου αποτελεί ο σωστός προσανατολισμός του αντικειμένου, μιας και αυτό επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του τελικού δοκιμίου. Οι εκτυπωτές FDM εκτυπώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα στους άξονες X και Y από ότι στον άξονα Z. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η ποσότητα του υποστηρικτικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί καθώς ανάλογα με τον τρόπο (προσανατολισμός) με τον οποίο θα τοποθετηθεί το δοκίμιο, η ποσότητα του υποστηρικτικού υλικού μπορεί να διαφέρει σημαντικά και να αποφανθεί κοστοβόρο [25], [26]. Παράλληλα, σε ένα μοντέλο που πρόκειται να κατασκευασθεί με προσθετική κατασκευή, κάθε φορά που υπάρχει μια εξοχή αυτή θεμιτό είναι να φέρει ένα κάθετο στήριγμα ώστε να μην αλλοιώνεται η ποιότητα του δοκιμίου. Αξίζει να σημειωθεί πως πολλές φορές οι αποφάσεις που καλείται να πάρει κανείς σχετικά με τον προσανατολισμό του δοκιμίου μπορεί να είναι αντιφατικές μεταξύ τους, αν ακολουθήσει κανείς τις παραπάνω οδηγίες, για αυτό η τελική τοποθέτηση του δοκιμίου έγκειται στην κρίση του σχεδιαστή. Στην συνέχεια, στην Εικόνα 15 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι φωτογραφίες της τοποθέτησης των δοκιμίων που σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα εκτύπωσης.



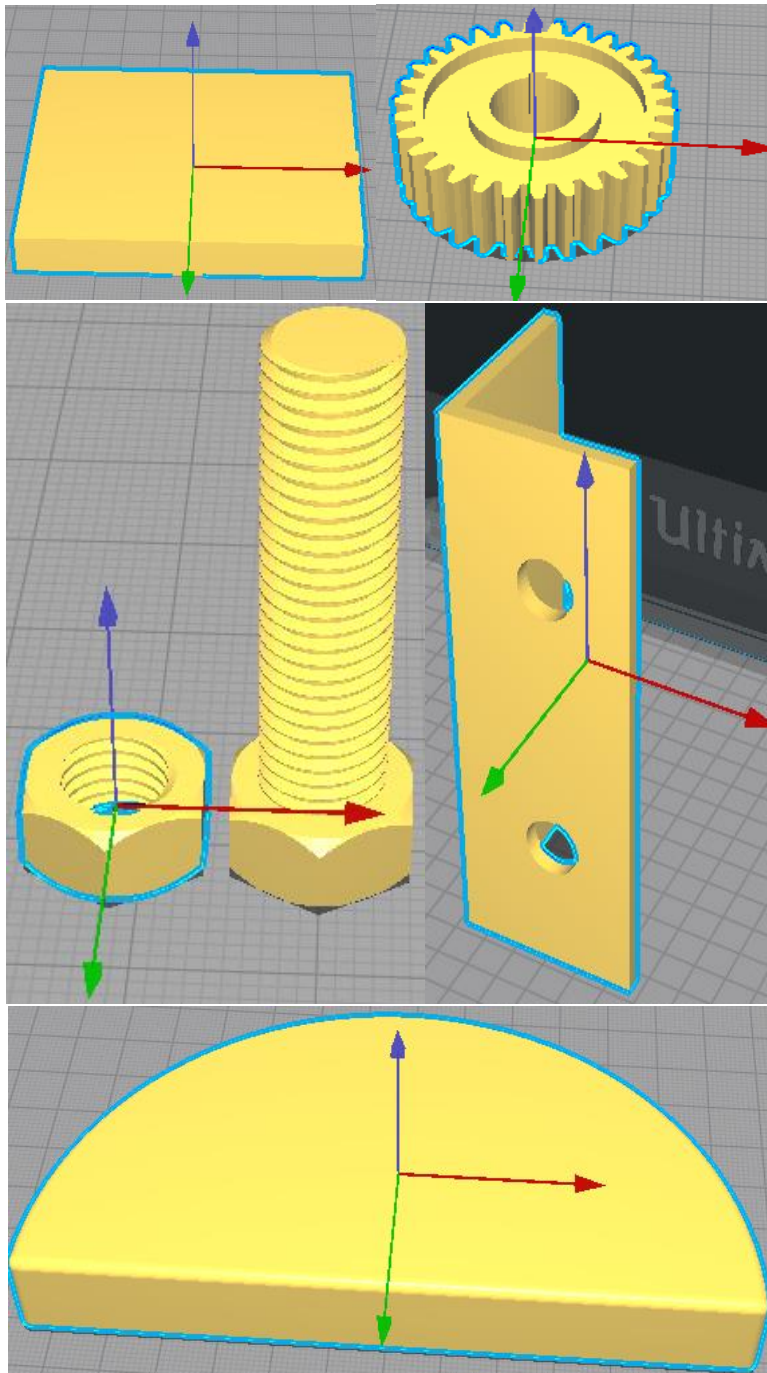


Figure 15. Προσανατολισμός δοκιμίων κατά την τοποθέτησή τους στο Ultimaker Cura (X άξονας κόκκινο χρώμα, Y άξονας πράσινο χρώμα, Z άξονας μπλε χρώμα)

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να αναγνωρίζει τις γεωμετρίες που θα χρειαστούν στηρίγματα για την σωστή εκτύπωση τους. Επιπλέον, μίας και το πρώτο επίπεδο της εκτύπωσης αποτελεί την βάση για όλο το δοκίμιο και αυτό πρέπει να είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, το Cura δίνει την δυνατότητα τοποθέτησης στο κάθε δοκίμιο μιας ποδιάς. Η ποδιά αυτή αποτελεί ένα επιπλέον προστατευτικό περίβλημα του δοκιμίου που συμβάλλει στην αποφυγή μετακίνησης του. Μετά το πέρας της εκτύπωσης, η ποδιά αποσπάται εύκολα από το

τελικό δοκίμιο χωρίς να χρειάζεται ιδιαίτερη επεξεργασία. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα δοκιμίου που φέρει ποδιά και υποστήριξη.

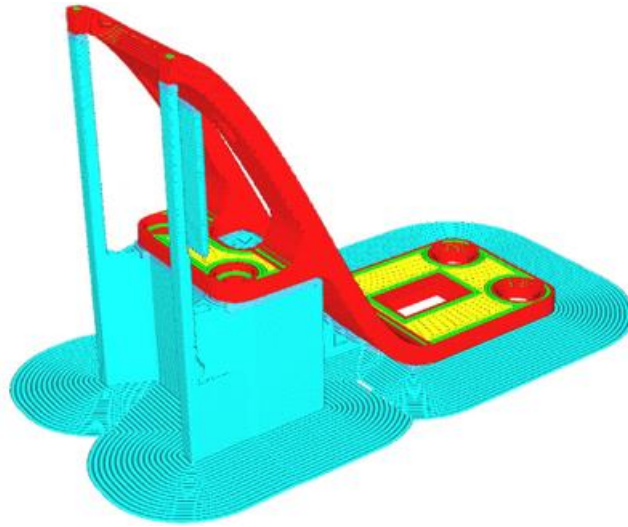


Figure 16. Παράδειγμα δοκιμίου που φέρει ποδιά και υποστήριξη [27]

Παρόλα αυτά, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής όπου γίνεται σύγκριση μεταξύ των μεθόδων εύρεσης βέλτιστων διαδρομών, δεν λαμβάνεται υπόψη η χρήση ή μη της ποδιάς. Όλες οι συγκρίσεις γίνονται σε ένα layer του δοκιμίου κάθε φορά (συνήθως το 1<sup>ο</sup>) εξαιρουμένης της ποδιάς.

#### 4.2.2 Εξαγωγή G-κώδικα – Βασικά χαρακτηριστικά εκτύπωσης (παραδοχές)

Εφόσον λοιπόν πραγματοποιηθεί η σωστή τοποθέτηση των δοκιμίων τότε γίνεται η εξαγωγή του G-κώδικα. Για την εξαγωγή, αρχικά απαιτείται να ορισθεί ο τύπος του τρισδιάστατου εκτυπωτή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, το υλικό εκτύπωσης καθώς επίσης το επιθυμητό πάχος και γέμισμα του δοκιμίου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε έγινε σε περιβάλλον Matlab και Ultimaker Cura. Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Ultimaker S5 και εκτύπωση πραγματοποιήθηκε με υλικό PLA χρώματος λευκού με διάμετρο στα 2.85 mm. Για την πλήρωση των δοκιμίων ορίστηκε Infill Density στο 20%. Η συγκεκριμένη τιμή από την βιβλιογραφία ορίζεται για δοκίμια που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν με οπτικό σκοπό, ενώ υψηλότερες πυκνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξαρτήματα τελικής-χρήσης [23].

Εφόσον ορίστηκαν τα παραπάνω κατέστη πλέον δυνατή η εξαγωγή του G-κώδικα και η αποθήκευσή του. Από τα προαναφερθέντα, γίνεται αντιληπτό πως ο κώδικας που εξήχθη είναι μοναδικός για τις συγκεκριμένες παραδοχές που ορίστηκαν. Ενδεχόμενη μετατόπιση, αλλαγή προσανατολισμού των δοκιμίων, αλλαγή εκτυπωτή κλπ. επιφέρει αλλαγή στον παραγόμενο G-κώδικα. Ο G-κώδικας που δημιουργήθηκε, μπορεί να ανοιχθεί και να διαβαστεί γρήγορα με την βοήθεια ενός προγράμματος σε μορφή txt. Στην Εικόνα 17 που ακολουθεί παρουσιάζεται τμήμα του G-κώδικα του 1<sup>ου</sup> επιπέδου του δοκιμίου που προέκυψε από το slicing.

```

;TIME_ELAPSED:500.741857
;LAYER:1
M106 S85
M204 S750
M205 X17.5 Y17.5
;TYPE:WALL-INNER
;MESH:cube.STL
G1 F1500 X128.546 Y148.958 E144.85717
G1 X128.546 Y91.042 E145.40188
G1 X201.454 Y91.042 E146.0876
G1 X201.454 Y148.958 E146.63232
M204 S2812
M205 X29.17 Y29.17
G0 F7500 X201.854 Y149.358
M204 S750
M205 X17.5 Y17.5
G1 F1500 X128.146 Y149.358 E147.32556
G1 X128.146 Y90.642 E147.8778
G1 X201.854 Y90.642 E148.57105
G1 X201.854 Y149.358 E149.12329
M204 S2812
M205 X29.17 Y29.17
G0 F7500 X202.254 Y149.758
M204 S500
M205 X17.5 Y17.5

```

Figure 17. Τμήμα G-κώδικα του 1ου επιπέδου (layer) ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου

#### 4.2.3 Υπολογισμός χρόνου εκτέλεσης και τελικής ποιότητας

Κατά την δημιουργία του G-κώδικα, με βάση τις εκάστοτε ορισμένες από τον χρήστη ρυθμίσεις (βλ. ενότητα 4.2.2), δίνεται από το πρόγραμμα ο απαιτούμενος χρόνος εκτύπωσης καθώς επίσης και ορισμένες δυσκολίες που ενδέχεται να προκύψουν κατά την εκτύπωση όπου ο χρήστης θα πρέπει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή. Στην περίπτωση του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου επειδή δεν υπάρχουν πολύπλοκες γεωμετρίες, το πρόγραμμα δεν επισημαίνει κάποιο σημείο ως πιο προβληματικό. Στα αποτελέσματα του προγράμματος με βάση τα χαρακτηριστικά που ορίστηκαν προκύπτει ότι για την πλήρη εκτύπωση του συγκεκριμένου δοκιμίου απαιτούνται 3 ώρες και 11 λεπτά και 25γρ. τήγματος που αντιστοιχεί σε 3,14 m μήκους υλικού. Σε αντίθεση με το πολύγωνο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά το slicing του γραναζιού διαφέρουν τόσο ως προς τις ταχύτητες εκτύπωσης, την χρήση στηρίγματος και του τελικού απαιτούμενου χρόνου. Αρχικά, λόγω της μεγάλης λεπτομέρειας που έχει το γρανάζι παρατηρούμε ότι ο εκτυπωτής για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κινείται με χαμηλή ταχύτητα (κόκκινες γραμμές Εικόνα 19). Επιπλέον, ο τελικός χρόνος εκτέλεσης ολόκληρου του δοκιμίου είναι 58 λεπτά και απαιτούνται 7γρ. τήγματος που αντιστοιχεί σε 0.88 m μήκους υλικού. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, παρατηρήθηκε πως το πρόγραμμα Slicing προτείνει την χρήση υποστηρικτικού υλικού σε ορισμένα σημεία του δοκιμίου για την επίτευξη της ζητούμενης λεπτομέρειας. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση τις ορισθείσες ρυθμίσεις (Εικόνες 18 και 19).

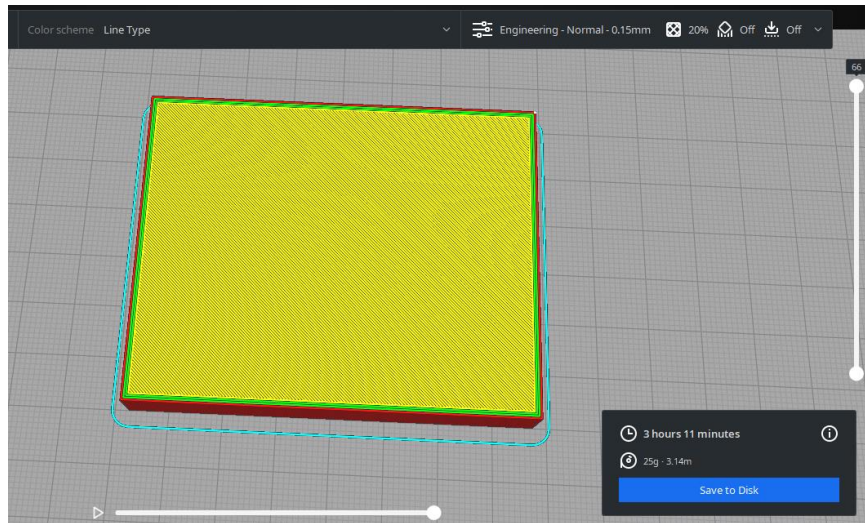


Figure 18. Αποτέλεσμα slicing ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου

Αξίζει να σημειωθεί πως σε επόμενο κεφάλαιο που γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων στα δοκίμια, ο χρόνος που μετρείται είναι ο χρόνος που απαιτείται για την εκτύπωση ενός επιπέδου και όχι το σύνολο.

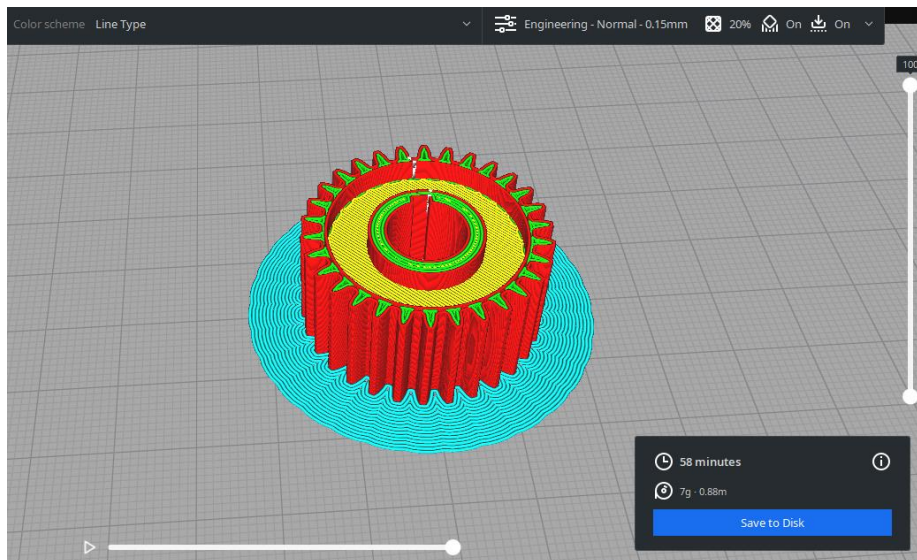


Figure 19. Αποτέλεσμα slicing γραναζιού με χρήση βοηθητικής ποδιάς και υποστηριγμάτων

Εφόσον πραγματοποιήθηκε το Slicing όλων των δοκιμίων, οι G-κώδικες που προέκυψαν εισήχθησαν στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο Matlab και πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων.



## 5. Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμων εύρεσης βέλτιστης διαδρομής

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των αλγορίθμων τόσο στο περιβάλλον του Matlab όσο και των πρακτικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την δοκιμαστική εκτύπωση των δοκιμίων.

### 5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων Matlab

Για ευκολία στην σύγκριση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν γραφήματα τόσο με τις κινήσεις του extruder κατά την κανονική πορεία που ορίστηκε εξ αρχής από το πρόγραμμα τεμαχισμού Slicer όσο με τις κινήσεις που προτείνονται από τους δύο αλγορίθμους. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμίων που εισάχθηκαν στο Matlab.

#### 5.1.1 Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται το γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού για το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο στο συγκεκριμένο δοκίμιο υπάρχει μονοπάτι semi-Eulerian. Με βάση το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει ότι βρέθηκε μονοπάτι στο οποίο γίνεται προσπέλαση όλων των σημείων του αρχικού δοκιμίου αλλά το σημείο έναρξης δεν ταυτίζεται με το σημείο λήξης.

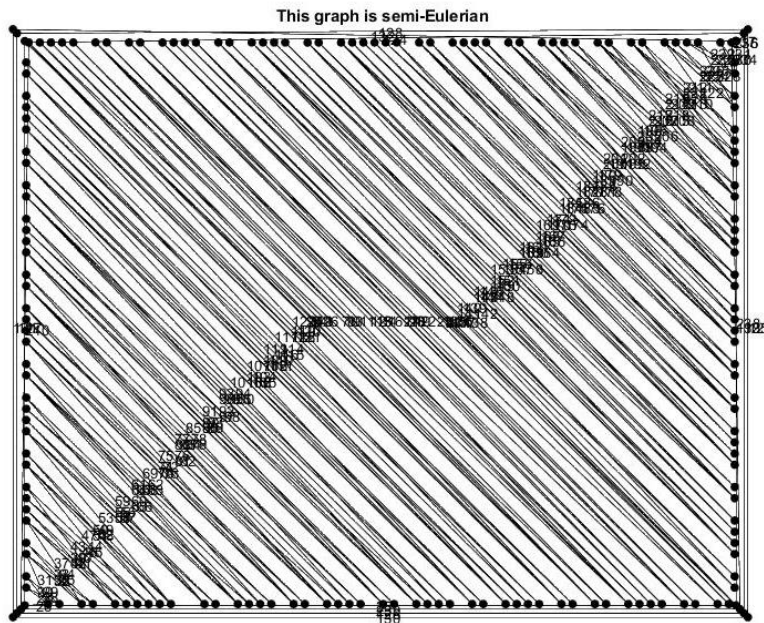


Figure 20. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για το ορθογώνιο

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι προαναφερθείσες πορείες.

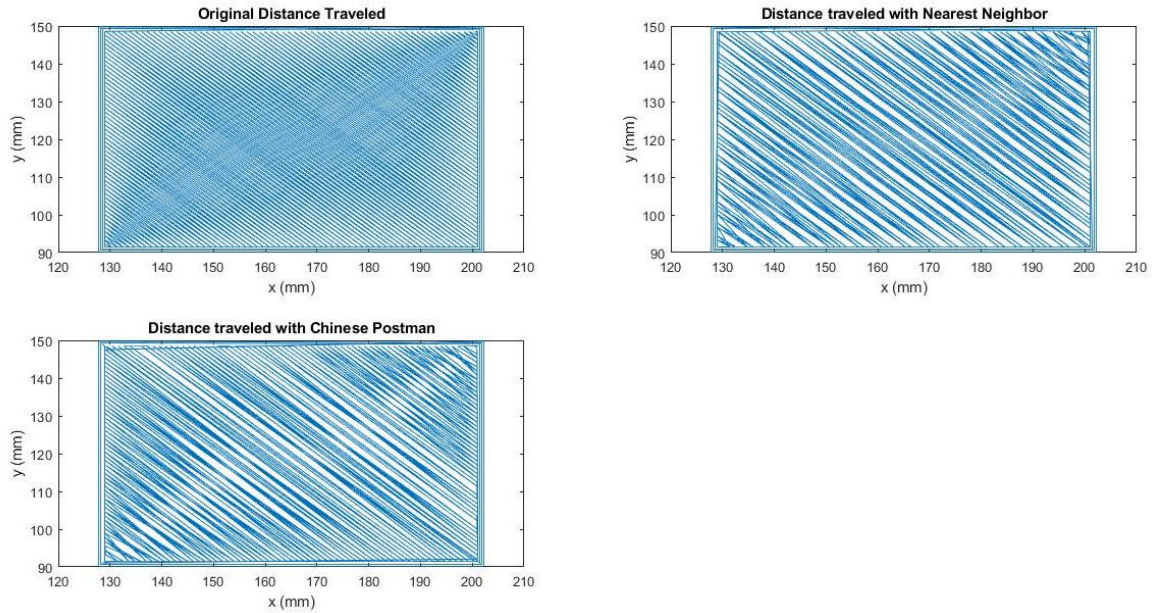


Figure 21. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για το πολύγωνο

Από την γραφική απεικόνιση της πορείας που ακολουθεί ο extruder είναι εμφανές πως μέσω του προτεινόμενου από το πρόγραμμα αλγορίθμου η πορεία που ακολουθεί είναι πιο λεπτομερής και δεν αφήνει ανομοιόμορφα κενά σε σχέση με τους άλλους δύο αλγορίθμους. Στην συνέχεια, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν, παρατηρούμε ότι ο Chinese Postman καλύπτει καλύτερα τις κενές περιοχές σε σχέση με τον Nearest Neighbor. Επιπλέον, στα αποτελέσματα του τελευταίου παρατηρείται ότι υπάρχουν μεγαλύτερες μεταβολές μεταξύ των κινήσεων που οδηγούν σε μεγαλύτερα κενά ενώ ταυτόχρονα ορισμένες κινήσεις τείνουν να επικαλύπτουν άλλες δημιουργώντας έτσι κατά τόπους συμπαγή τμήματα, όπου θα τοποθετηθεί παραπάνω τήγμα, και κενά τμήματα. Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι θα επιδράσει αρνητικά στην ποιότητα του τελικού δοκιμίου.

Πέραν της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με την χρήση των γραφημάτων, πραγματοποιήθηκαν και κάποιοι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό τόσο της απόστασης όσο και του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εκτύπωσης του συγκεκριμένου επιπέδου.

Για τον υπολογισμό της συνολικής απόστασης που διανύθηκε υπολογίστηκαν οι επιμέρους ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών σημείων και έπειτα υπολογίστηκε το συνολικό άθροισμά τους. Δεδομένου πως όλες οι κινήσεις ανάμεσα σε 2 σημεία κάθε φορά είναι ευθύγραμμες, για τον υπολογισμό των αποστάσεων επιλέχθηκε η ευκλείδεια απόσταση καθώς αποτελεί μια βασική μέτρηση για τις αποστάσεις ανάμεσα σε σημεία. Υπολογίζοντας τις αποστάσεις τόσο του αρχικού αλγορίθμου όσο και του nearest neighbor και του Chinese postman προκύπτει ότι, με την χρήση του Chinese postman ο extruder διανύει την μικρότερη συνολική απόσταση, στην συνέχεια ακολουθεί ο αρχικός αλγόριθμος του εκτυπωτή και τελευταίος είναι ο Nearest neighbor. Επιπλέον, εφόσον είναι γνωστή η πρόωση  $F=1500 \text{ mm/min}=25 \text{ mm/s}$ , είναι δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου εκτύπωσης. Για το αρχικό πρόγραμμα ο χρόνος δίνεται μέσα στον G-κώδικα για κάθε επίπεδο. Σχετικά με τον χρόνο εκτύπωσης παρατηρήθηκε ότι και οι δύο

μεθοδολογίες εκτελούνται σε χρόνο μικρότερο από τον απαιτούμενο χρόνο του αρχικού προγράμματος, με την μεθοδολογία του Chinese Postman να είναι συντομότερη κατά σχεδόν 1 λεπτό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Table 3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου

Αλγόριθμος	Συνολική απόσταση επιπέδου (mm)	Χρόνος εκτύπωσης (s)
<b>Αρχικό πρόγραμμα</b>	11194	460.68
<b>Nearest Neighbor</b>	11201	448.04
<b>Chinese Postman</b>	10357	414.28

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι στην θεωρία, ο Chinese Postman αν και διανύει την μικρότερη απόσταση στον μικρότερο χρόνο σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους, ποιοτικά φαίνεται να υστερεί σε σχέση με την ισχύουσα μεθοδολογία του εκτυπωτή. Παράλληλα, ο Nearest Neighbor φαίνεται πως υστερεί συγκριτικά με τις άλλες δύο μεθόδους ως προς την ποιότητα του δοκιμίου, παρόλα αυτά ο χρόνος εκτέλεσής του είναι μικρότερος από τον χρόνο του αρχικού προγράμματος.

### 5.1.2 Γρανάζι

Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται το γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού για το γρανάτζι. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο στο συγκεκριμένο δοκίμιο υπάρχει μονοπάτι semi-Eulerian.

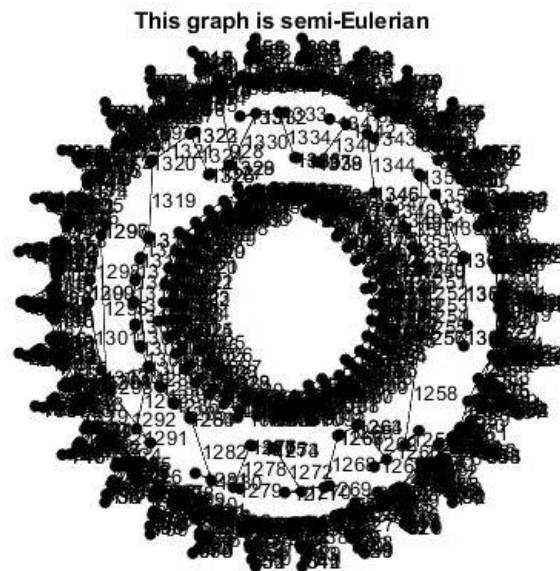


Figure 22. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για το γρανάτζι

Στην Εικόνα 23 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής των 3 αλγορίθμων για το γρανάτζι. Παρατηρούμε ότι για υπό εξέταση επίπεδο ο προτεινόμενος αλγόριθμος κάνει προσπέλαση των σημείων διατηρώντας την επιθυμητή ακρίβεια. Στην συνέχεια είναι ο αλγόριθμος Chinese Postman ο οποίος φαίνεται να διατηρεί έναν σχετικό βαθμό λεπτομέρειας αλλά υστερεί

στα δόντια του γραναζιού. Τέλος, από την γραφική απεικόνιση του γραναζιού με την χρήση του Nearest Neighbor γίνεται αντιληπτό πως το δοκίμιο υστερεί σημαντικά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά.

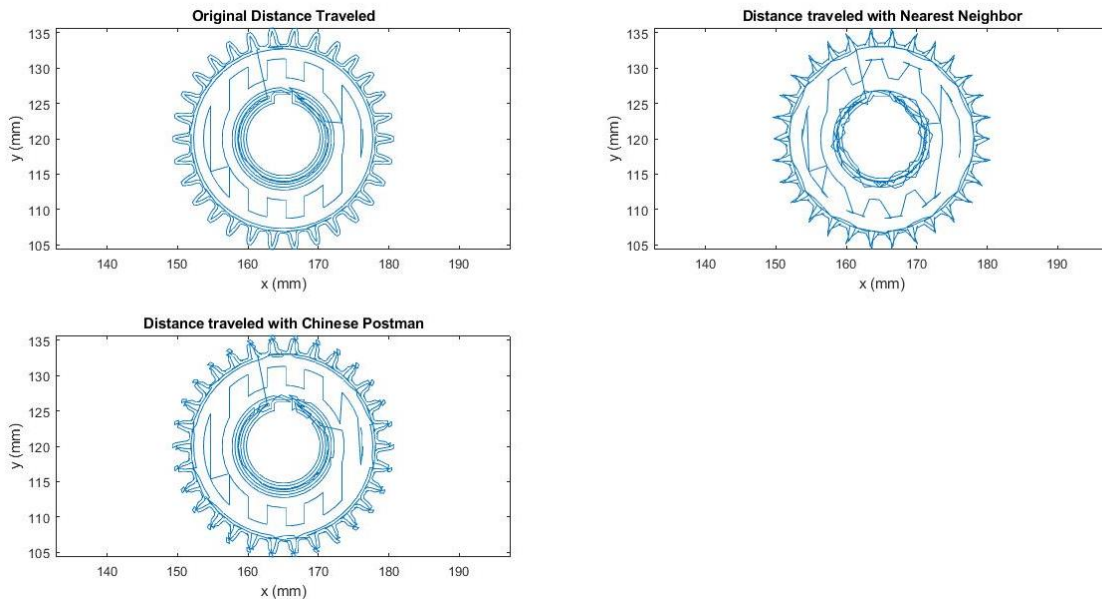


Figure 23. Συγκριτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για γρανάτζι

Σχετικά με τις συνολικές αποστάσεις που διανύθηκαν για κάθε αλγόριθμο υπολογίστηκαν οι Ευκλείδειες αποστάσεις. Παρατηρήθηκε ότι ο αρχικός αλγόριθμος του εκτυπωτή διάνυσε την μικρότερη απόσταση, ακολουθεί ο Nearest Neighbor και τέλος την μεγαλύτερη απόσταση διάνυσε ο Chinese Postman. Σχετικά με τους χρόνους εκτύπωσης παρατηρήθηκε ότι ο Nearest Neighbor εκτελείται γρηγορότερα, έπειτα ο Chinese Postman και τέλος το αρχικό πρόγραμμα. Παρόλα αυτά η χρονική διαφορά ανάμεσα στον Chinese Postman και τον αρχικό αλγόριθμο, είναι της τάξης των 0,27 s με τον 1<sup>ο</sup> όμως να παρουσιάζει εμφανή ποιοτικά μειονεκτήματα. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως για το συγκεκριμένο δοκίμιο ο αρχικός αλγόριθμος του εκτυπωτή υπερτερεί. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Table 4. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του γραναζιού

Αλγόριθμος	Συνολική απόσταση επιπέδου (mm)	Χρόνος εκτύπωσης (s)
<b>Αρχικό πρόγραμμα</b>	964.2285	42.20
<b>Nearest Neighbor</b>	1041.4	41.66
<b>Chinese Postman</b>	1048.3	41.93

### 5.1.3 Κοχλίας – Περικόγλιο

Στην Εικόνα 24 παρουσιάζεται το γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού για τον κοχλία. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο στο συγκεκριμένο δοκίμιο υπάρχει μονοπάτι semi-Eulerian.



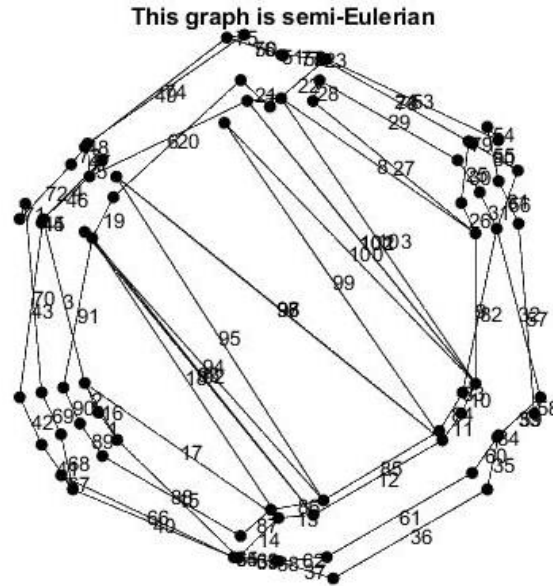


Figure 24. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για τον κοχλία

Στην Εικόνα 25 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής των 3 αλγορίθμων για τον κοχλία. Παρατηρούμε ότι για υπό εξέταση επίπεδο ο προτεινόμενος αλγόριθμος κάνει προσπέλαση των σημείων διατηρώντας την επιθυμητή ακρίβεια. Στην συνέχεια είναι ο αλγόριθμος Chinese Postman ο οποίος φαίνεται να διατηρεί έναν σχετικό βαθμό λεπτομέρειας αλλά υστερεί στο περίγραμμα του κοχλία. Τέλος, από την γραφική απεικόνιση του κοχλία με την χρήση του Nearest Neighbor γίνεται αντιληπτό πως το δοκίμιο υστερεί σημαντικά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά καθώς δεν σχηματίζεται σωστά το περίγραμμα του κοχλία.

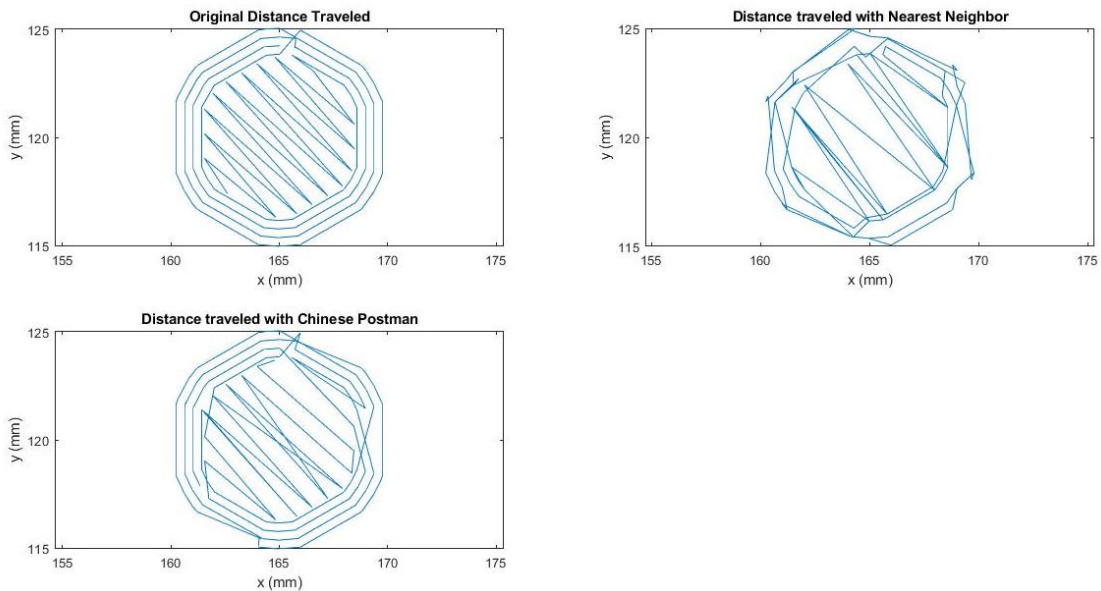


Figure 25. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για τον κοχλία

Σχετικά με τις συνολικές αποστάσεις που διανύθηκαν για κάθε αλγόριθμο υπολογίστηκαν οι Ευκλείδειες αποστάσεις. Παρατηρήθηκε ότι ο Chinese Postman διένυσε την μικρότερη απόσταση, ακολουθεί ο αρχικός αλγόριθμος του εκτυπωτή και τέλος την μεγαλύτερη απόσταση διένυσε ο Nearest Neighbor. Σχετικά με τον χρόνο εκτύπωσης παρατηρήθηκε ότι ο Chinese Postman εκτελείται πιο σύντομα, ακολουθεί ο Nearest Neighbor και τέλος το αρχικό πρόγραμμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως για το συγκεκριμένο δοκίμιο ενώ ο αρχικός αλγόριθμος υπερτερεί ποιοτικά, ο Chinese Postman υπερτερεί τόσο ως προς την συνολική απόσταση που διανύθηκε όσο και ως προς τον χρόνο εκτύπωσης. Παρόλα αυτά δεδομένου ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο αποτελεί ένα μηχανολογικό εξάρτημα όπου η υψηλή ακρίβεια είναι επιθυμητή τότε ο αρχικός αλγόριθμος του εκτυπωτή θεωρητικά προσφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Table 5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του κοχλία

Αλγόριθμος	Συνολική απόσταση επιπέδου (mm)	Χρόνος εκτύπωσης (s)
<b>Αρχικό πρόγραμμα</b>	209.3140	9.45
<b>Nearest Neighbor</b>	220.2501	8.81
<b>Chinese Postman</b>	201.1194	8.04

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται το γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού για το περικόχλιο. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο στο συγκεκριμένο δοκίμιο υπάρχει μονοπάτι semi-Eulerian.

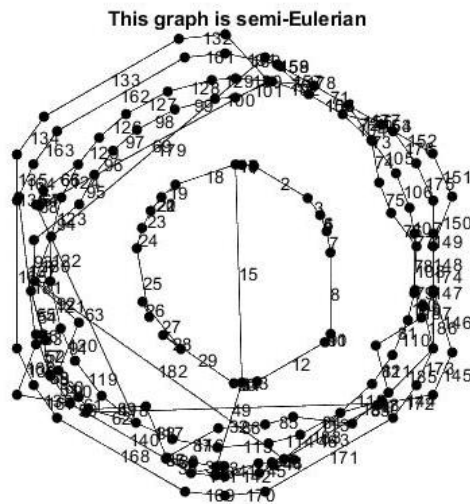


Figure 26. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για το περικόχλιο

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής των 3 αλγορίθμων για το περικόχλιο. Παρατηρούμε ότι για υπό εξέταση επίπεδο ο προτεινόμενος αλγόριθμος κάνει προσπέλαση των σημείων διατηρώντας την επιθυμητή ακρίβεια. Στην συνέχεια είναι ο αλγόριθμος Chinese Postman ο οποίος φαίνεται να μην διαφέρει ως προς τον τρόπο προσπέλασης των σημείων

με τον αρχικό αλγόριθμο. Τέλος, από την γραφική απεικόνιση του περικόχλιου με την χρήση του Nearest Neighbor γίνεται αντιληπτό πως το δοκίμιο υστερεί σημαντικά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά καθώς δεν σχηματίζεται σωστά το περίγραμμα του περικόχλιου.

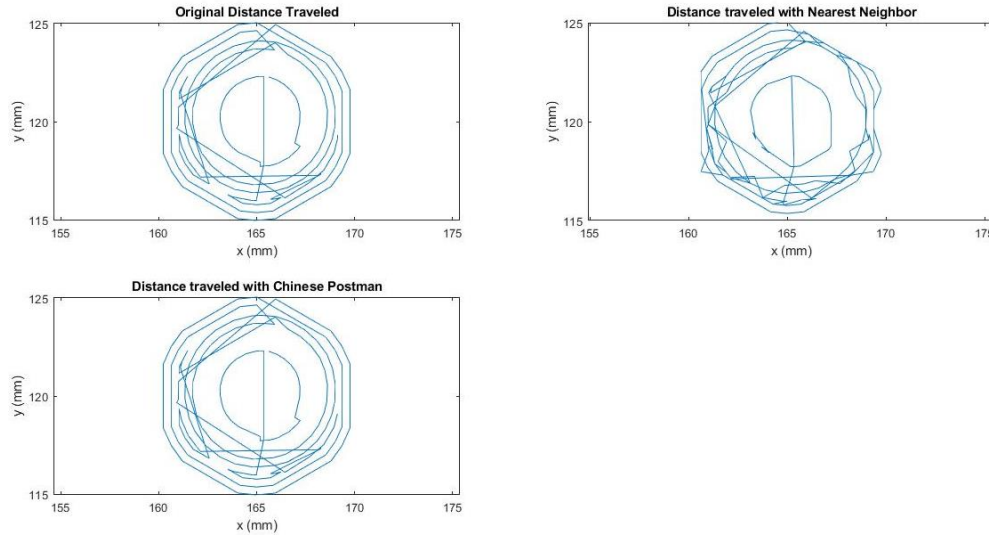


Figure 27. Συγκεντρικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για το περικόχλιο

Σχετικά με τις συνολικές αποστάσεις που διανύθηκαν για κάθε αλγόριθμο υπολογίστηκαν οι Ευκλείδειες αποστάσεις. Παρατηρήθηκε ότι ο Chinese Postman διένυσε την μικρότερη απόσταση, ακολουθεί ο αρχικός αλγόριθμος του εκτυπωτή και τέλος την μεγαλύτερη απόσταση διένυσε ο Nearest Neighbor. Όσον αφορά τον χρόνο εκτύπωσης, ο Chinese Postman εκτελείται πιο σύντομα, ακολουθεί ο Nearest Neighbor και τέλος το αρχικό πρόγραμμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως για το συγκεκριμένο δοκίμιο ο Chinese Postman προσφέρει το ίδιο αποτέλεσμα ποιοτικά διανύοντας ταυτόχρονα μικρότερη απόσταση σε λιγότερο χρόνο. Παρόλα αυτά δεδομένου ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο αποτελεί ένα μηχανολογικό εξάρτημα όπου η υψηλή ακρίβεια είναι επιθυμητή τότε θα πρέπει να εξεταστούν όλα τα επίπεδα του συγκεκριμένου δοκιμίου με τον Chinese Postman για να μπορέσει κάποιος να αποφανθεί με ασφάλεια ως προς την καταλληλότητα χρήσης του.

Table 6. Συγκεντρικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του περικόχλιου

Αλγόριθμος	Συνολική απόσταση επιπέδου (mm)	Χρόνος εκτύπωσης (s)
<b>Αρχικό πρόγραμμα</b>	178.2087	7.91
<b>Nearest Neighbor</b>	189.5848	7.58
<b>Chinese Postman</b>	177.9513	7.12

#### 5.1.4 Σφήνα

Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται το γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού για την σφήνα τύπου Woodtruff. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο στο συγκεκριμένο δοκίμιο υπάρχει μονοπάτι semi-Eulerian.

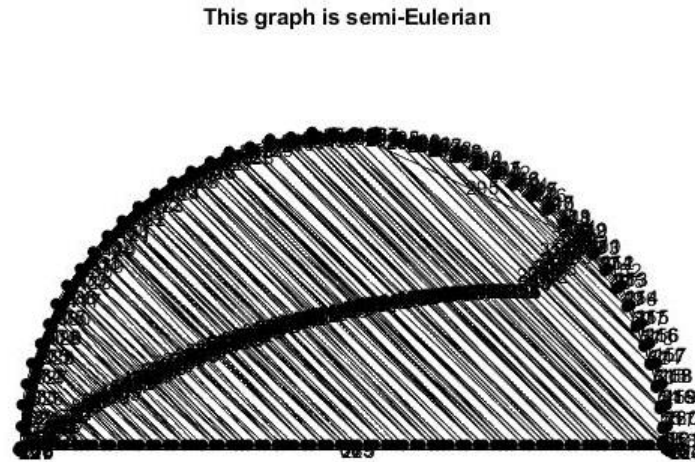


Figure 28. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για την σφήνα τύπου Woodtruff

Στην Εικόνα 29 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής των 3 αλγορίθμων για την σφήνα τύπου Woodtruff. Παρατηρούμε ότι για υπό εξέταση επίπεδο ο προτεινόμενος αλγόριθμος κάνει προσπέλαση των σημείων διατηρώντας την επιθυμητή ακρίβεια. Στην συνέχεια είναι ο αλγόριθμος Chinese Postman ο οποίος φαίνεται να κάνει κάποιες μικρές επικαλύψεις αφήνοντας ορισμένα κενά. Τέλος, από την γραφική απεικόνιση της σφήνας τύπου Woodtruff με την χρήση του Nearest Neighbor γίνεται αντιληπτό πως το δοκίμιο υστερεί σε σχέση με τους προηγούμενους αλγορίθμους καθώς υπάρχουν μεγαλύτερες επικαλύψεις και κενά.

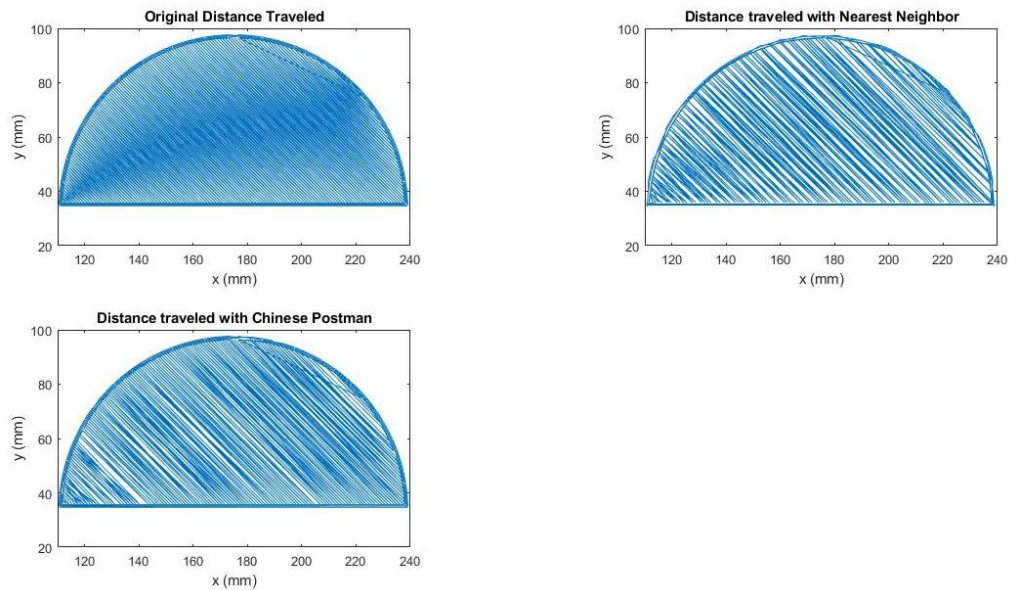


Figure 29. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για την σφήνα τύπου Woodtruff

Σχετικά με τις συνολικές αποστάσεις που διανύθηκαν για κάθε αλγόριθμο υπολογίστηκαν οι Ευκλείδειες αποστάσεις. Παρατηρήθηκε ότι ο Chinese Postman διένυσε την μικρότερη απόσταση, ακολουθεί ο αρχικός αλγόριθμος του εκτυπωτή και τέλος την μεγαλύτερη απόσταση διένυσε ο Nearest Neighbor. Όσον αφορά τον χρόνο εκτύπωσης ο Chinese Postman εκτελείται στον μικρότερο χρόνο, ακολουθεί ο Nearest Neighbor και τέλος το αρχικό πρόγραμμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως για το συγκεκριμένο δοκίμιο ο Chinese Postman διανύει μικρότερη απόσταση υστερώντας ελάχιστα ποιοτικά αλλά σε λιγότερο, κατά 107,41s, χρόνο. Θα πρέπει να γίνει εκτύπωση του δοκιμίου με τις δύο μεθόδους για να καθοριστεί ποιος αλγόριθμος υπερτερεί.

Table 7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου της σφήνας τύπου Woodtruff

Αλγόριθμος	Συνολική απόσταση επιπέδου (mm)	Χρόνος εκτύπωσης
<b>Αρχικό πρόγραμμα</b>	16115	654.61
<b>Nearest Neighbor</b>	16154	646.16
<b>Chinese Postman</b>	13680	547.2

#### 5.1.5 Προφίλ σχήματος L (γωνιά) / Μεντεσές

Στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται το γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού για τον μεντεσέ. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο στο συγκεκριμένο δοκίμιο υπάρχει μονοπάτι Eulerian.

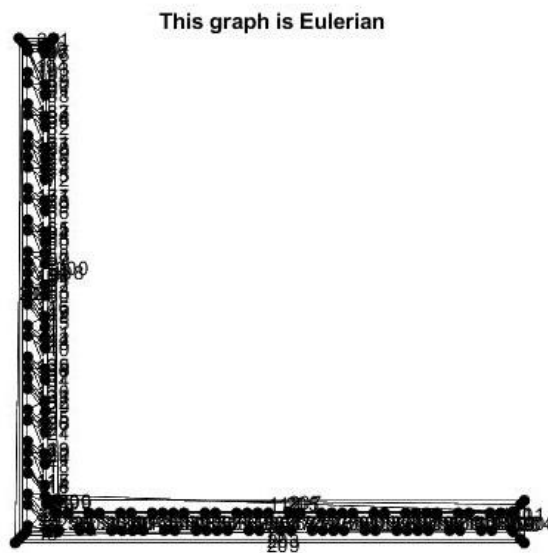


Figure 30. Γράφημα ελέγχου ύπαρξης Eulerian μονοπατιού και της διαδρομής αυτής για τον μεντεσέ

Στην Εικόνα 31 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής των 3 αλγορίθμων για τον μεντεσέ. Παρατηρούμε ότι για υπό εξέταση επίπεδο ο προτεινόμενος αλγόριθμος κάνει προσπέλαση των σημείων διατηρώντας την επιθυμητή ακρίβεια. Στην συνέχεια είναι ο αλγόριθμος



Chinese Postman ο οποίος υστερεί ελάχιστα ως προς την πλήρωση του κάθετου τμήματος του δοκιμίου. Τέλος, από την γραφική απεικόνιση του μεντεσέ με την χρήση του Nearest Neighbor γίνεται αντιληπτό πως το δοκίμιο υστερεί σε έναν βαθμό σε σχέση με τους προηγούμενους αλγορίθμους ως προς την εσωτερική πλήρωση του δοκιμίου χωρίς όμως να ξεφεύγει του περιγράμματος.

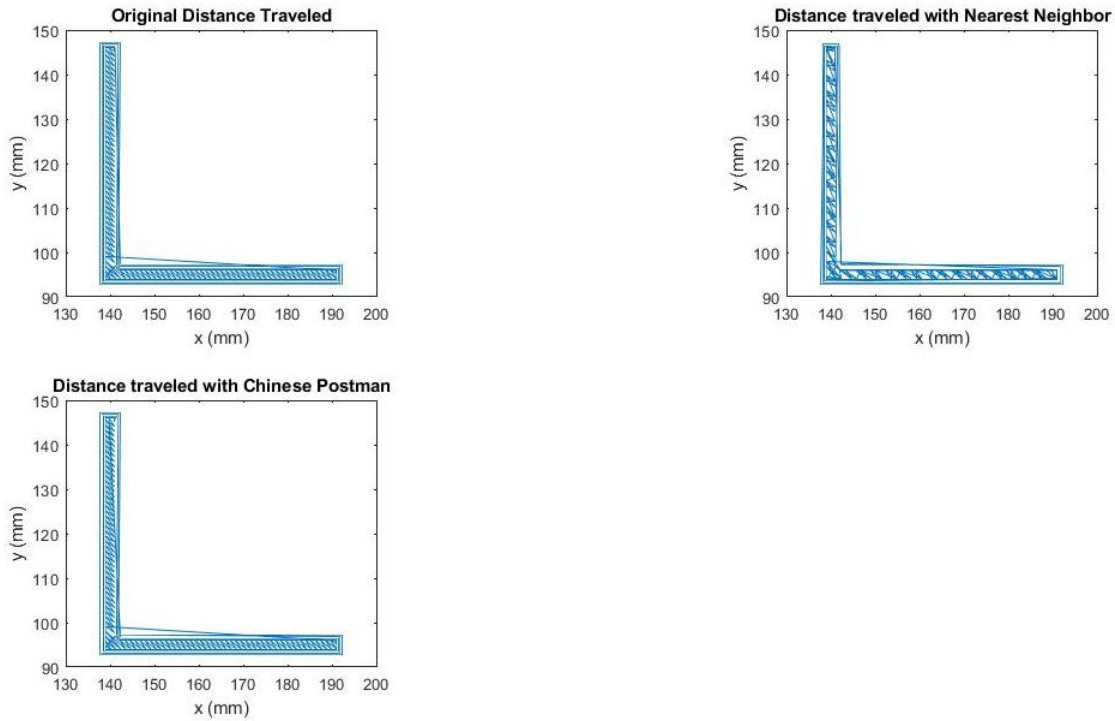


Figure 31. Συγκριτικά αποτελέσματα 3 αλγορίθμων για τον μεντεσέ

Σχετικά με τις συνολικές αποστάσεις που διανύθηκαν για κάθε αλγόριθμο υπολογίστηκαν οι Ευκλείδειες αποστάσεις. Παρατηρήθηκε ότι ο Chinese Postman διένυσε την μικρότερη απόσταση, ακολουθεί ο αρχικός αλγόριθμος του εκτυπωτή και τέλος την μεγαλύτερη απόσταση διένυσε ο Nearest Neighbor. Όσον αφορά τον χρόνο εκτύπωσης, ο Chinese Postman εκτελείται στον μικρότερο χρόνο, ακολουθεί ο Nearest Neighbor και τέλος το αρχικό πρόγραμμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως για το συγκεκριμένο δοκίμιο ο Chinese Postman διανύει μικρότερη απόσταση υστερώντας ελάχιστα ποιοτικά ενώ ταυτόχρονα εκτελείται κατά 10.31s γρηγορότερα. Θα πρέπει να γίνει εκτύπωση του δοκιμίου με τις δύο μεθόδους για να καθοριστεί ποιος αλγόριθμος υπερτερεί.

Table 8. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού συνολικής απόστασης και χρόνου που απαιτείται για την εκτύπωση του 1ου επιπέδου του μεντεσέ

Αλγόριθμος	Συνολική απόσταση επιπέδου (mm)	Χρόνος εκτύπωσης (s)
<b>Αρχικό πρόγραμμα</b>	1339.4	61.74
<b>Nearest Neighbor</b>	1380.6	55.22
<b>Chinese Postman</b>	1285.8	51.43

### 5.1.6 Συγκεντρωτικός σχολιασμός θεωρητικών αποτελεσμάτων

Συγκεντρωτικά, για τα θεωρητικά αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι τα περισσότερα εκ των δοκιμών τείνουν να εκτυπώνονται γρηγορότερα με τους δύο αλγορίθμους που εφαρμόστηκαν σε σχέση με το αρχικό πρόγραμμα. Σε σχέση με την συνολική απόσταση που διανύεται παρατηρήθηκε ότι κατά πλειοψηφία, ο Chinese Postman διανύει τις μικρότερες αποστάσεις ακολουθούμενος από το αρχικό πρόγραμμα και έπειτα τον Nearest Neighbor. Ως προς την γραφική απεικόνιση, κατά βάση, ποιοτικά φαίνεται πως υπερτερεί το αρχικό πρόγραμμα έναντι των δύο αλγορίθμων. Παρόλα αυτά, για να υπάρχει μια πλήρης άποψη ως προς το ποια μεθοδολογία υπερτερεί απαραίτητη κρίνεται η εκτύπωση των δοκιμών.

### 5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων εκτύπωσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτύπωση των δοκιμών. Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για κάθε δοκίμιο. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν εκτυπώθηκαν όλα τα δοκίμια που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.1 καθώς ορισμένα δοκίμια ήδη από την θεωρητική μελέτη φαινόταν ότι δεν διατηρούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά εμφανίζοντας μεγάλες αποκλείσεις.

#### 5.2.1 Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο

Στην Εικόνα 32 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των εκτυπωμένων δοκιμών για το πολύγωνο. Με μια πρώτη ματιά παρατηρούμε πως τα δοκίμια ακολουθούν τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης.

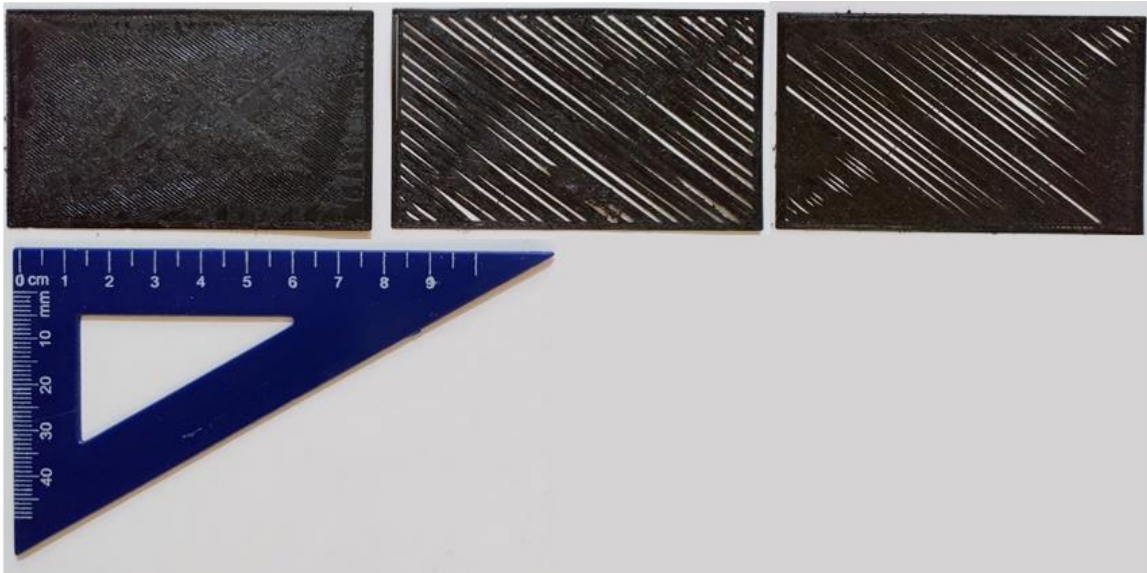
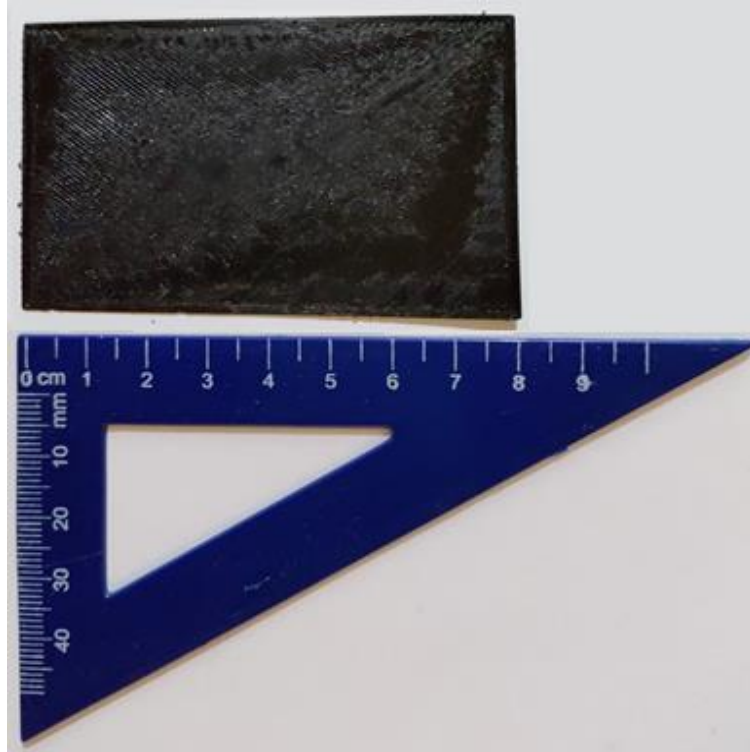


Figure 32. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτύπωσης πολύγωνου και με τους 3 αλγορίθμους

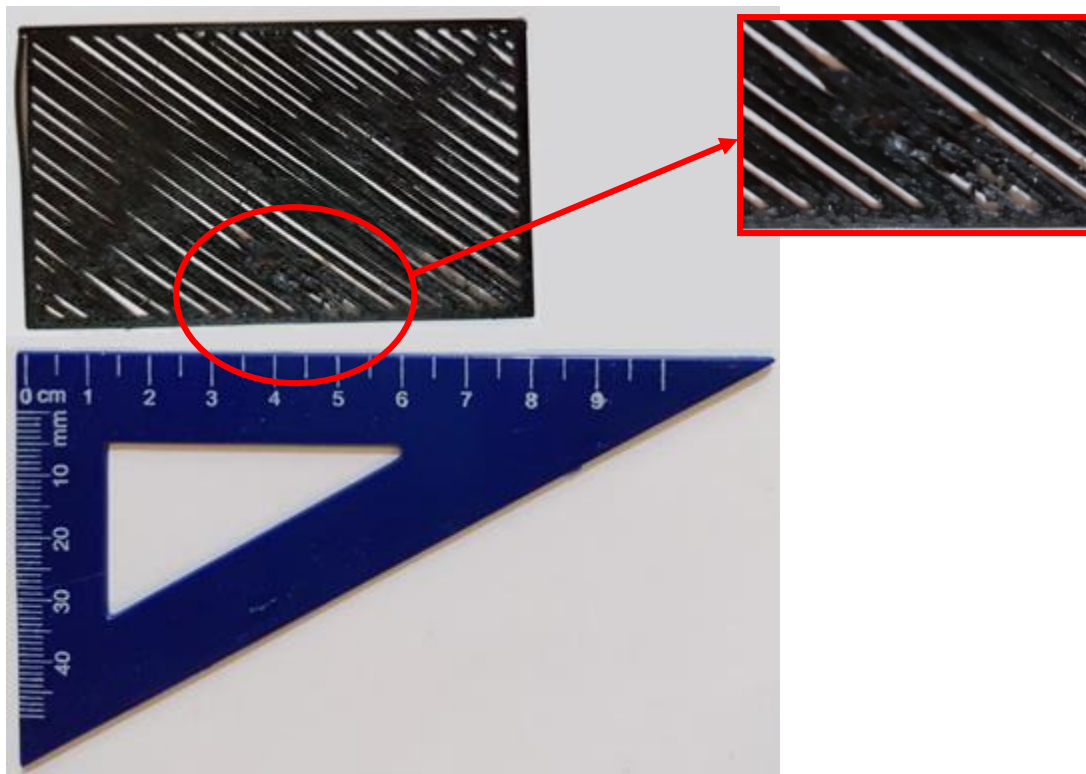
Το αρχικό δοκίμιο που ακολουθεί την μεθοδολογία του εκτυπωτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 33. Το συγκεκριμένο δοκίμιο, όπως στην θεωρητική ανάλυση, είναι συμπαγές, ομοιόμορφο και δεν παρουσιάζει κενά ως προς τον τρόπο πλήρωσής του.



*Figure 33. Αποτέλεσμα εκτύπωσης ορθογωνίου με την προτεινόμενη από τον εκτυπωτή μεθοδολογία*

Το δοκίμιο που ακολουθεί τον αλγόριθμο Nearest Neighbor παρουσιάζεται στην Εικόνα 34. Το συγκεκριμένο δοκίμιο στην θεωρητική ανάλυση παρουσίαζε πληθώρα αλληλοεπικαλύψεων και κενών σε σημεία. Στο εκτυπωμένο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε ότι τα προβλήματα αυτά συνεχίζουν να υπάρχουν κάνοντας το πρώτο επίπεδο διαμπερές. Επιπλέον, το πλαίσιο του δοκιμίου παρουσιάζει κενά σε σημεία. Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως εξαιτίας των αλληλοεπικαλύψεων, το κάτω μέρος του δοκιμίου παρουσιάζει πρόβλημα και δημιουργήθηκε ένα συσσωμάτωμα τήγματος. Αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι ο εκτυπωτής αναγκάζεται να κάνει πολλαπλές αλληλοεπικαλύψεις σε ένα σημείο χωρίς όμως να έχει περάσει ο απαραίτητος χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η θερμοκρασία του υλικού.





*Figure 34. Αποτελέσματα εκτύπωσης ορθογωνίου με την χρήση του αλγορίθμου Nearest Neighbor*

Το δοκίμιο που ακολουθεί τον αλγόριθμο Chinese Postman παρουσιάζεται στην Εικόνα 35. Το συγκεκριμένο δοκίμιο στην θεωρητική ανάλυση παρουσίαζε σημαντικό αριθμό αλληλοεπικαλύψεων και κενών σε σημεία. Στο εκτυπωμένο δοκίμιο φαίνεται πως τα κενά σημεία είναι σημαντικά λιγότερα σε σχέση με το θεωρητικό. Αυτό οφείλεται στην εγγύτητα μεταξύ των σημείων στα οποία έγινε σωστή πλήρωση του τμήματος. Παρόλα αυτά ακόμα παρουσιάζονται κενά στο κεντρικό κυρίως τμήμα του δοκιμίου.

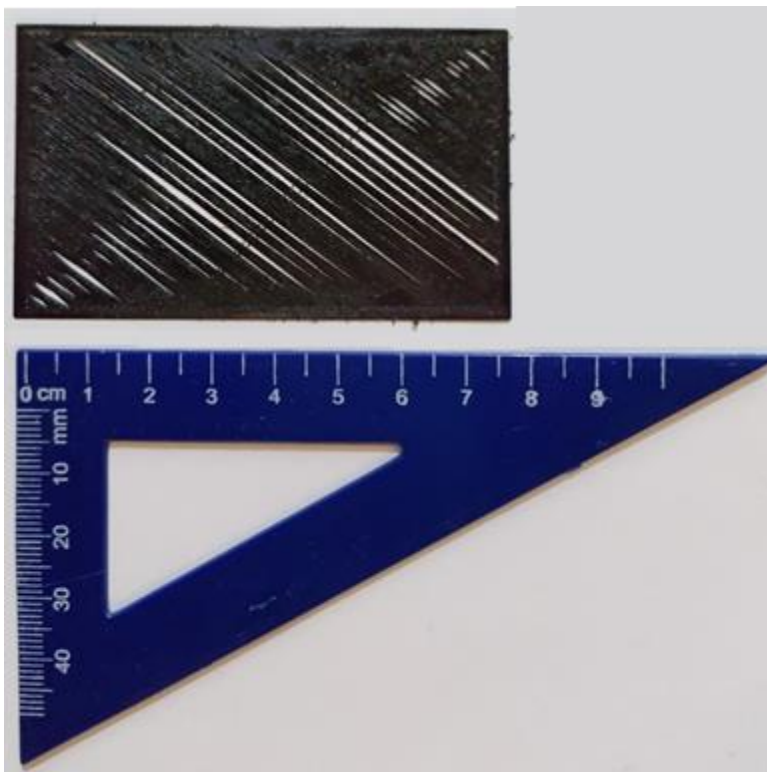
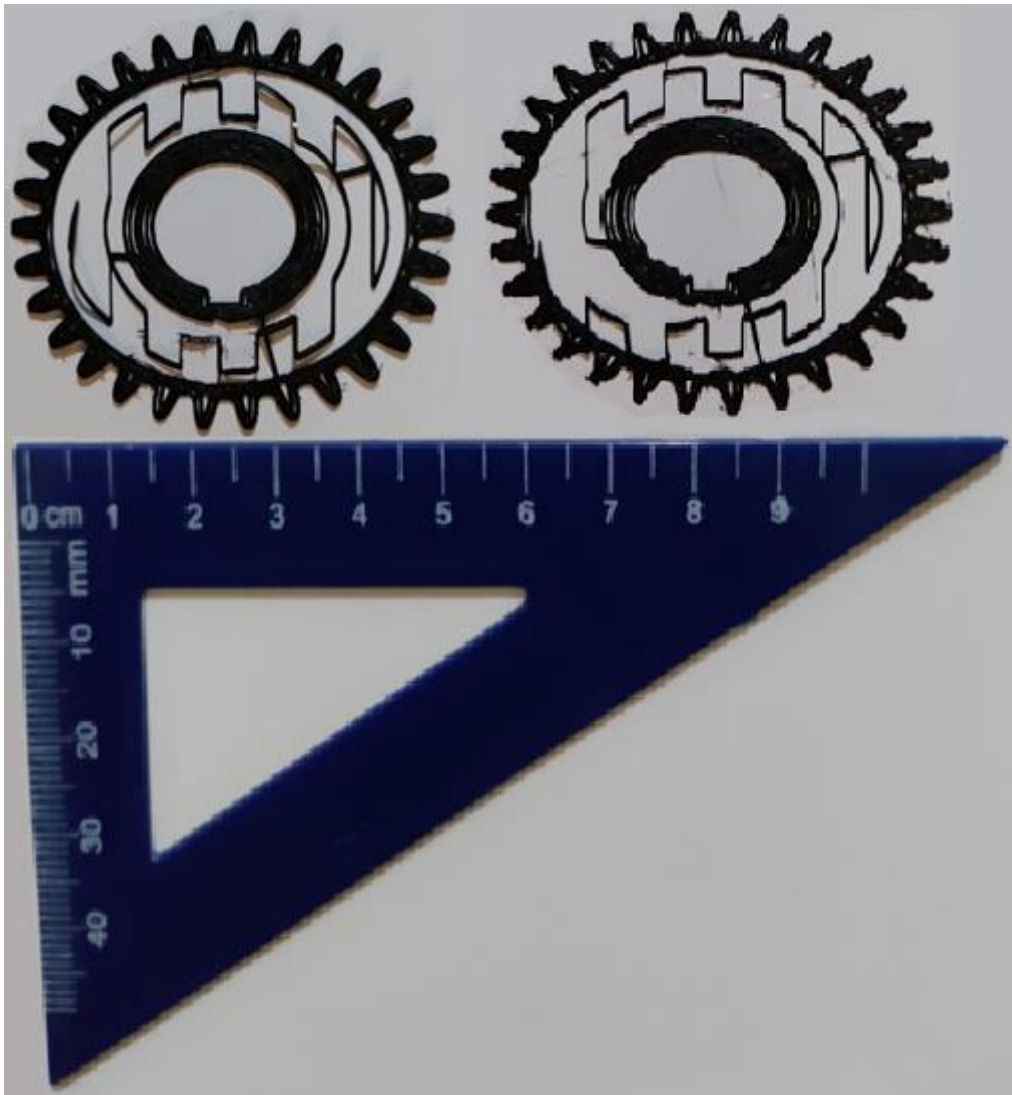


Figure 35. Αποτέλεσμα εκτύπωσης ορθογώνιου με την χρήση του αλγορίθμου Chinese Postman

Συγκεντρωτικά για τα συγκεκριμένο δοκίμιο, μπορούμε να πούμε πως η προτεινόμενη από τον εκτυπωτή μεθοδολογία παρουσιάζει το καλύτερο ποιοτικό αποτέλεσμα διανύοντας όμως μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με τον Chinese Postman που φαίνεται να υστερεί ποιοτικά αλλά να καταναλώνει λιγότερο τήγμα. Τέλος, ο Nearest Neighbor υστερεί και σε ποιότητα και στην συνολική απόσταση που διανύει.

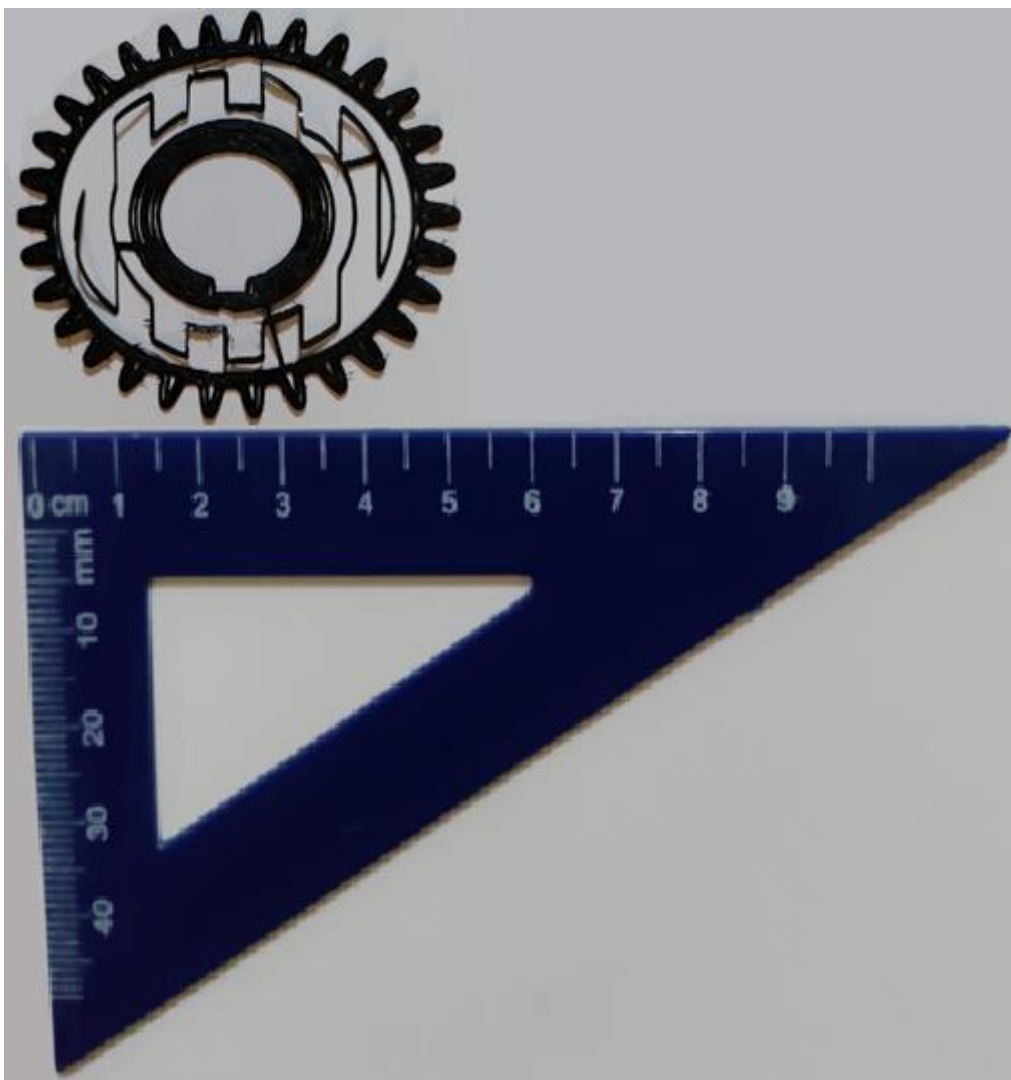
### 5.2.2 Γρανάζι

Στην Εικόνα 36 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των εκτυπωμένων δοκιμών για το γρανάζι. Με μια πρώτη ματιά παρατηρούμε πως τα δοκίμια ακολουθούν τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης. Αξίζει να σημειωθεί πως για την περίπτωση του γραναζιού με την μεθοδολογία του Nearest Neighbor δεν πραγματοποιήθηκε η εκτύπωση του καθώς ήδη από την παρουσίαση των θεωρητικών αποτελεσμάτων τα βασικά χαρακτηριστικά του δεν απεικονίζονταν σωστά με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο.



*Figure 36. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτύπωσης του γραναζιού*

Το αρχικό δοκίμιο που ακολουθεί την μεθοδολογία του εκτυπωτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 37. Το συγκεκριμένο δοκίμιο, όπως στην θεωρητική ανάλυση, διατηρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.



*Figure 37. Αποτέλεσμα εκτύπωσης γραναζιού με την χρήση της προτεινόμενης από τον εκτυπωτής μεθοδολογίας*

Το δοκίμιο που ακολουθεί τον αλγόριθμο Chinese Postman παρουσιάζεται στην Εικόνα 38. Το συγκεκριμένο δοκίμιο στην θεωρητική ανάλυση παρουσίαζε πρόβλημα στις οδοντώσεις. Στο εκτυπωμένο δοκίμιο φαίνεται πως το πρόβλημα αυτό συνεχίζει να υπάρχει αλλά σε μικρότερο βαθμό. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι στο πάνω δεξί τμήμα του γραναζιού φαίνεται πως το εκτυπωμένο δοκίμιο δεν ακολουθεί την θεωρητική ανάλυση. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει, καθώς το συγκεκριμένο τμήμα έχει τυπωθεί κανονικά όπως σχεδιάστηκε αλλά κατά την αποκόλληση και ψύξη του μετατοπίστηκε καταλάθος και δεν είναι δυνατή η επαναφορά του.

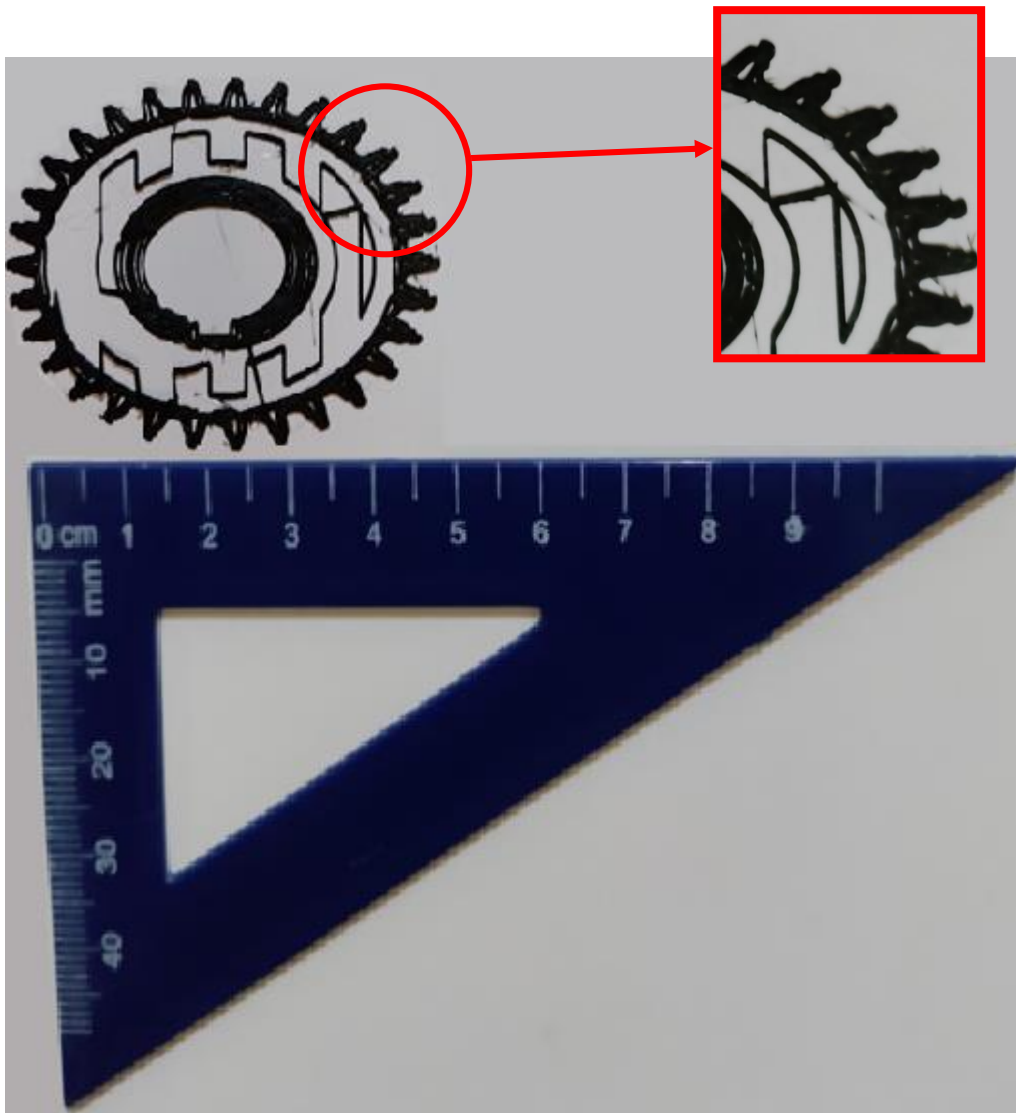


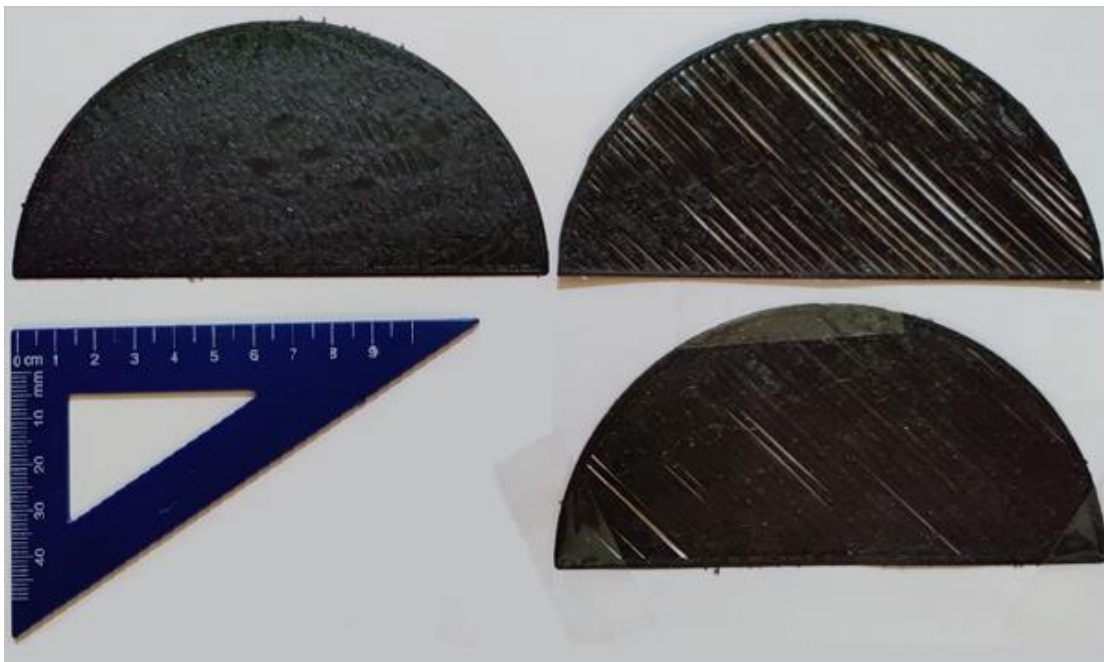
Figure 38. Αποτέλεσμα εκτύπωσης γραναζιού με την χρήση του αλγορίθμου Chinese Postman

Συγκεντρωτικά για τα συγκεκριμένο δοκίμιο, μπορούμε να πούμε πως η προτεινόμενη από τον εκτυπωτή μεθοδολογία παρουσιάζει το καλύτερο ποιοτικό αποτέλεσμα διανύοντας όμως μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με τον Chinese Postman που φαίνεται να υστερεί ποιοτικά αλλά να καταναλώνει λιγότερο τήγμα. Παρόλα αυτά, δεδομένου ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο αποτελεί ένα μηχανολογικό εξάρτημα στο οποίο απαραίτητη κρίνεται η υψηλή ακρίβεια και ποιότητα, τότε η επιλογή της προτεινόμενης από τον εκτυπωτή μεθοδολογίας είναι η ορθότερη λύση.

### 5.2.3 Σφήνα τύπου Woodtruff

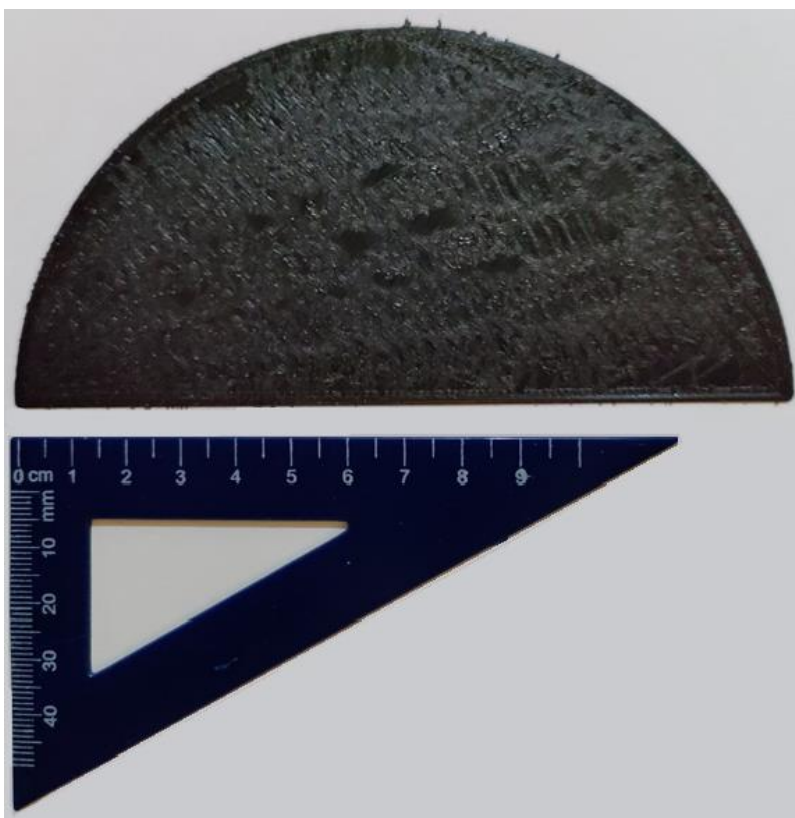
Στην Εικόνα 39 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των εκτυπωμένων δοκιμών για την σφήνα τύπου Woodtruff. Με μια πρώτη ματιά παρατηρούμε πως τα δοκίμια ακολουθούν τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης.





*Figure 39. Συγκριτικά αποτελέσματα εκτύπωσης σφήνας τύπου Woodtruff*

Το αρχικό δοκίμιο που ακολουθεί την μεθοδολογία του εκτυπωτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 40. Το συγκεκριμένο δοκίμιο, όπως στην θεωρητική ανάλυση, διατηρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.



*Figure 40. Αποτέλεσμα εκτύπωσης σφήνας τύπου Woodtruff με την χρήση της προτεινόμενης από τον εκτυπωτή μεθοδολογίας*

Το δοκίμιο που ακολουθεί τον αλγόριθμο Nearest Neighbor παρουσιάζεται στην Εικόνα 41. Το συγκεκριμένο δοκίμιο στην θεωρητική ανάλυση παρουσίαζε πληθώρα αλληλοεπικαλύψεων και κενών σε σημεία. Στο εκτυπωμένο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε ότι τα προβλήματα αυτά συνεχίζουν να υπάρχουν κάνοντας το πρώτο επίπεδο διαμπερές. Επιπλέον, το καμπύλο τμήμα του δοκιμίου δεν έχει την επιθυμητή ποιότητα καθώς υπάρχουν τμήματα τα οποία δημιουργούνται γωνίες.

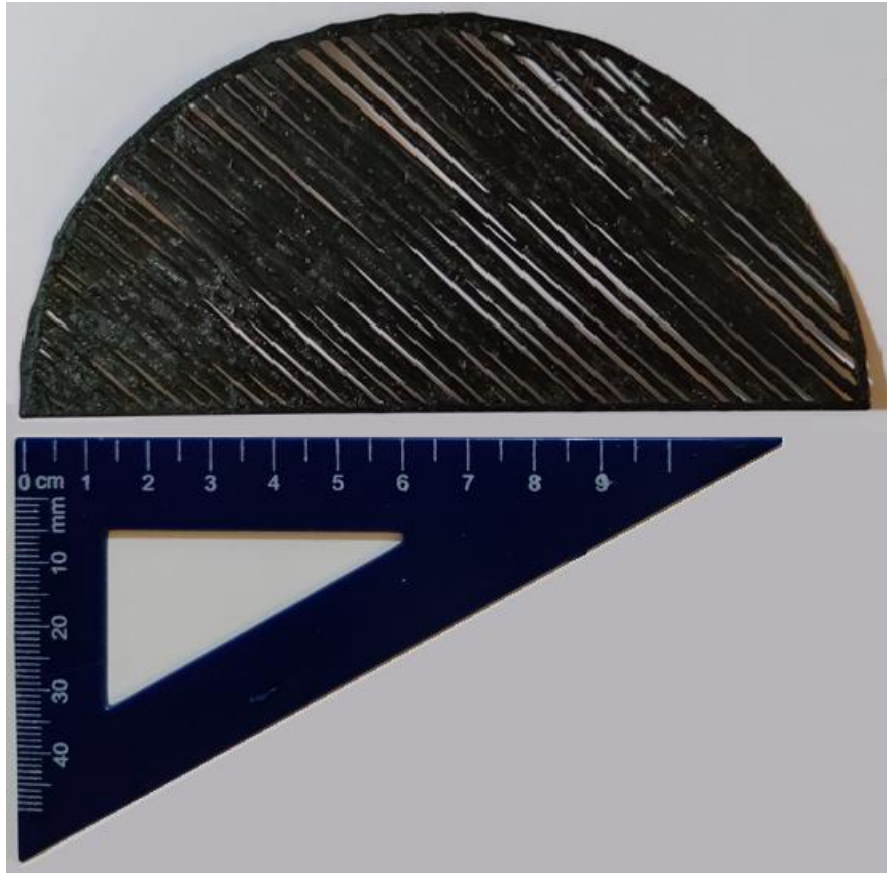


Figure 41. Αποτέλεσμα εκτύπωσης σφήνας τύπου Woodtruff με την χρήση του αλγορίθμου Nearest Neighbor

Το δοκίμιο που ακολουθεί τον αλγόριθμο Chinese Postman παρουσιάζεται στην Εικόνα 42. Το συγκεκριμένο δοκίμιο στην θεωρητική ανάλυση παρουσίαζε σημαντικό αριθμό αλληλοεπικαλύψεων και κενών σε σημεία. Στο εκτυπωμένο δοκίμιο φαίνεται πως τα κενά σημεία είναι σημαντικά λιγότερα σε σχέση με το θεωρητικό. Αυτό οφείλεται στην εγγύτητα μεταξύ των σημείων στα οποία έγινε σωστή πλήρωση του τήγματος. Παρόλα αυτά ακόμα παρουσιάζονται ορισμένα κενά στο δοκίμιο. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως το καμπύλο τμήμα του δοκιμίου είναι ποιοτικά το ίδιο με αυτό του εκτυπωτή.

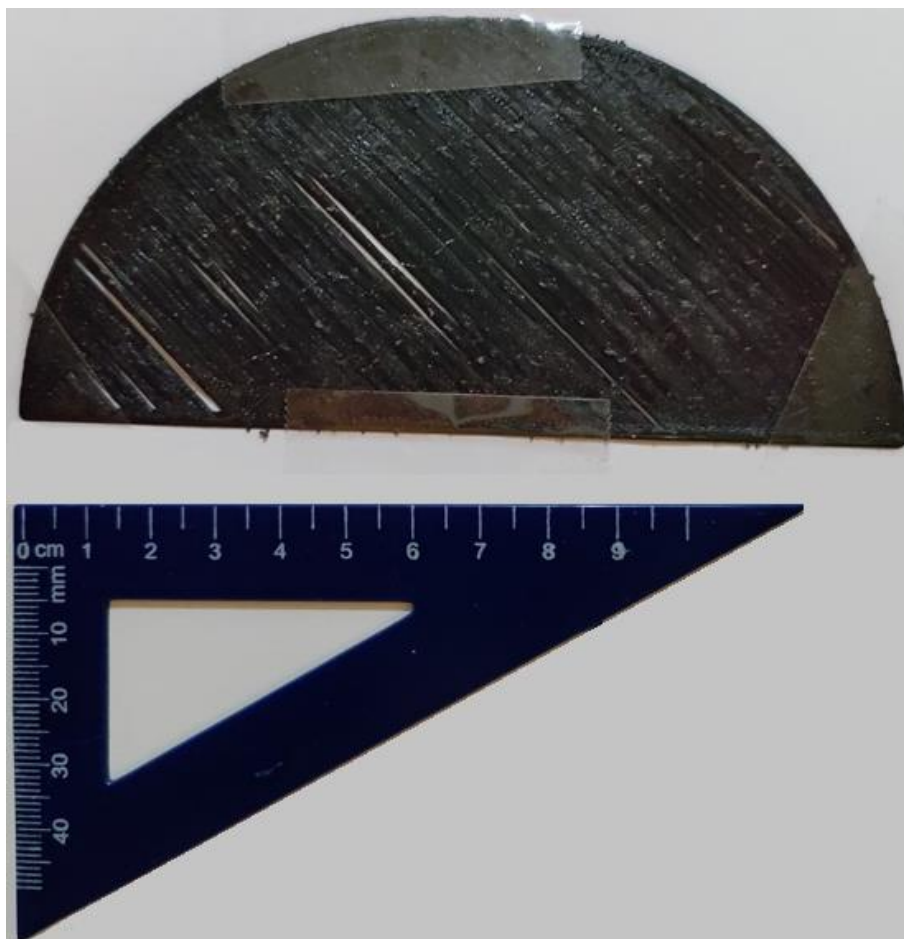


Figure 42. Αποτέλεσμα εκτύπωσης σφήνας τύπου Woodtruff με την χρήση του αλγορίθμου Chinese Postman

Συγκεντρωτικά για τα συγκεκριμένο δοκίμιο, μπορούμε να πούμε πως η προτεινόμενη από τον εκτυπωτή μεθοδολογία παρουσιάζει το καλύτερο ποιοτικό αποτέλεσμα διανύοντας όμως μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με τον Chinese Postman. Ο δεύτερος φαίνεται να υστερεί ελάχιστα ποιοτικά σε σημεία τα οποία ενδεχομένως σε επόμενο επίπεδο εκτύπωσης να καλυφθούν, ενώ ταυτόχρονα διανύει μικρότερη απόσταση. Τέλος, ο Nearest Neighbor υστερεί και σε ποιότητα και στην συνολική απόσταση που διανύει.

#### 5.2.4 Προφίλ σχήματος L (γωνιά)/ Μεντεσές

Στην Εικόνα 43 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των εκτυπωμένων δοκιμίων για τον μεντεσέ. Με μια πρώτη ματιά παρατηρούμε πως τα δοκίμια ακολουθούν τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης.



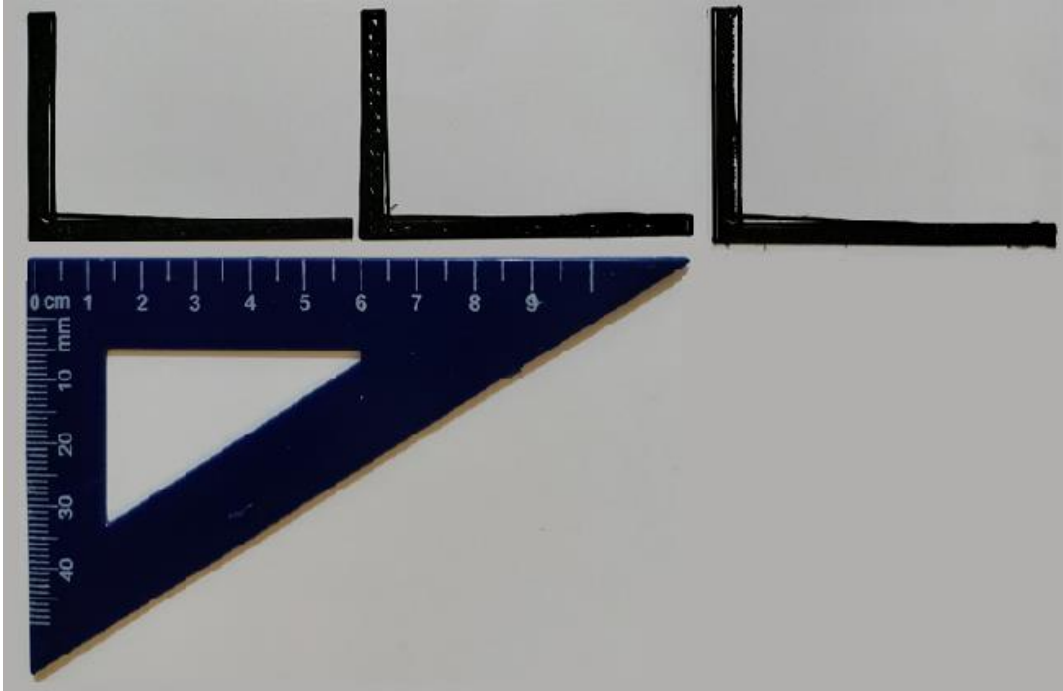
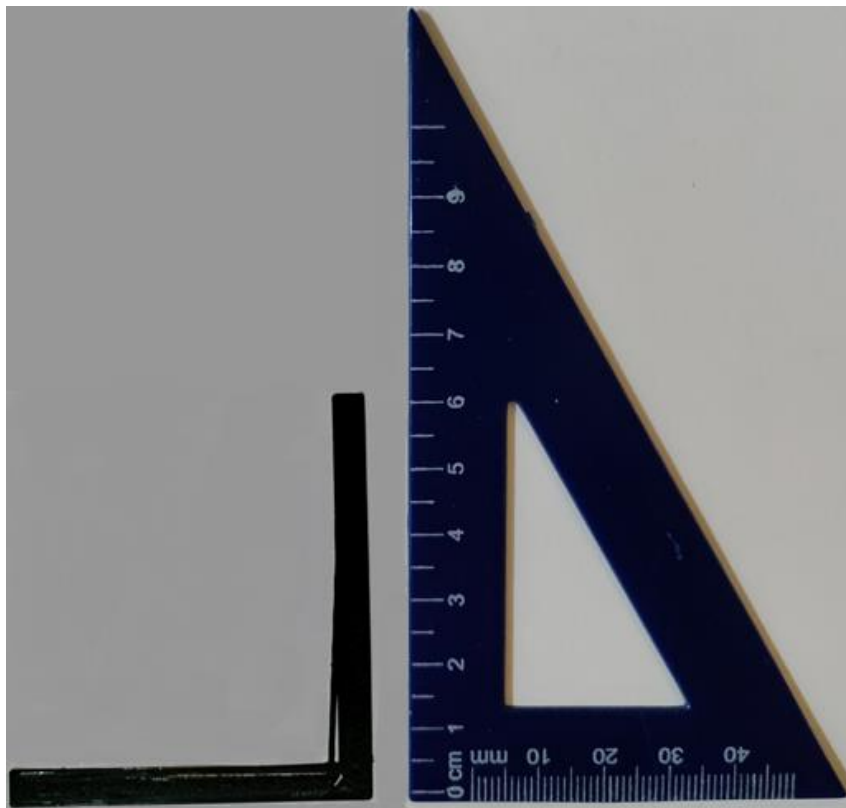


Figure 43. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτύπωσης μεντεσέ και με τους 3 αλγόριθμους

Το αρχικό δοκίμιο που ακολουθεί την μεθοδολογία του εκτυπωτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 44. Το συγκεκριμένο δοκίμιο, όπως στην θεωρητική ανάλυση, διατηρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά, φαίνεται πως κατά τον συγκεκριμένο αλγόριθμο δεν δίνεται εντολή για την πλήρωση ολόκληρου του εσωτερικού του δοκιμίου αλλά παραμένει ένα μέρος στο κάθετο τμήμα στην δεξιά πλευρά του δοκιμίου ακάλυπτο. Από την αρχική ρύθμιση του εκτυπωτή για την πλήρωση του δοκιμίου κατά 20% και με την συνέχιση του κώδικα γίνεται αντιληπτό πως ο εκτυπωτής θα αφήσει ορισμένα τμήματα στο εσωτερικό του δοκιμίου άδεια αλλά το τελικό αποτέλεσμα θα είναι συμπαγές.



*Figure 44. Αποτέλεσμα εκτύπωσης μεντεσέ με την χρήση της προτεινόμενης από τον εκτυπωτή μεθοδολογίας*

Το δοκίμιο που ακολουθεί τον αλγόριθμο Nearest Neighbor παρουσιάζεται στην Εικόνα 45. Το συγκεκριμένο δοκίμιο στην θεωρητική ανάλυση παρουσίαζε έντονα κενά στο εσωτερικό του και αλληλοεπικαλύψεις. Στο εκτυπωμένο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε ότι τα προβλήματα αυτά συνεχίζουν να υπάρχουν σε μικρότερο όμως βαθμό. Όπως και στο αρχικό δοκίμιο, ενδεχόμενη συνέχιση του συγκεκριμένου αλγορίθμου για τα υπόλοιπα επίπεδα θα μπορούσε ίσως να αποφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς παρατηρούμε ότι το περίγραμμα ακολουθείται πιστά σε σχέση με το ζητούμενο δοκίμιο. Παρόλα αυτά ο εν λόγω αλγόριθμος διανύει την μεγαλύτερη απόσταση

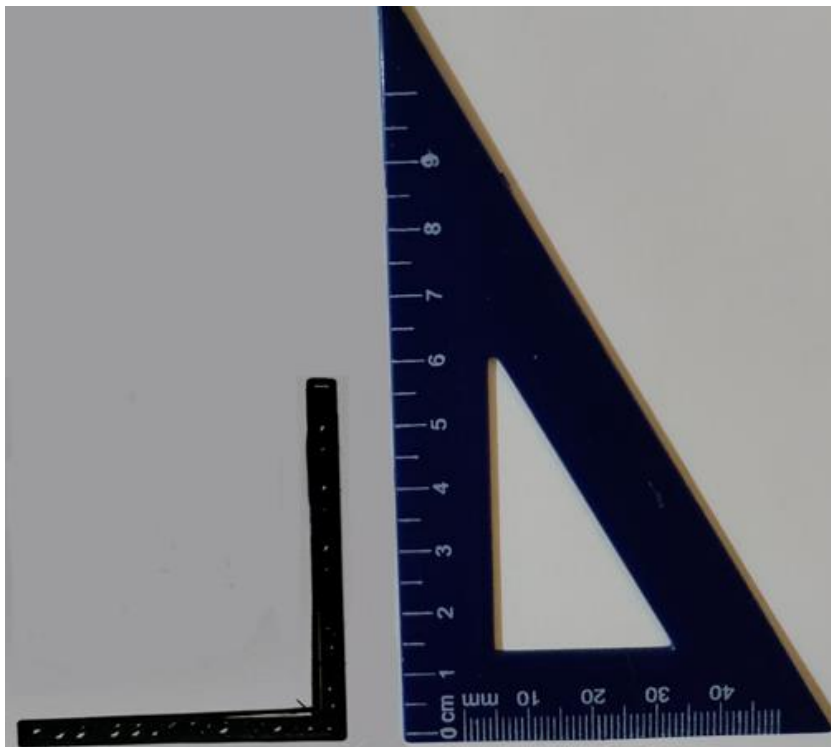


Figure 45. Αποτέλεσμα εκτύπωσης μεντεσέ με την χρήση του αλγορίθμου Nearest Neighbor

Το δοκίμιο που ακολουθεί τον αλγόριθμο Chinese Postman παρουσιάζεται στην Εικόνα 46. Το συγκεκριμένο δοκίμιο στην θεωρητική ανάλυση ήταν σχεδόν ίδιο με το αρχικό δοκίμιο. Στο εκτυπωμένο αποτέλεσμα παρατηρούμε ότι υπάρχει μια βασική διαφορά ως προς την πλήρωση του κάθετου τμήματος του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται κενά μεταξύ του περιγράμματος του δοκιμίου και του εσωτερικού του. Παρατηρώντας, ξανά τα θεωρητικά αποτελέσματα (βλ. Εικόνα 31) φαίνεται πως σε σχέση με το αρχικό δοκίμιο, ο αλγόριθμος δεν πραγματοποιεί δύο κάθετες διαδρομές στο κατακόρυφο τμήμα, σε σχέση με τον αρχικό αλγόριθμο, που οδηγούν στην δημιουργία των εν λόγω κενών. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως κατά την εκτέλεση του Chinese Postman βρέθηκε μονοπάτι Eulerian σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Αυτό σημαίνει πως βρέθηκε μονοπάτι που γίνεται προσπέλαση μίας ακριβώς φορές όλων των σημείων καταλήγοντας στο σημείο έναρξης. Αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική ποιότητα του δοκιμίου καθώς δεν γίνονται περιττές μετακινήσεις.

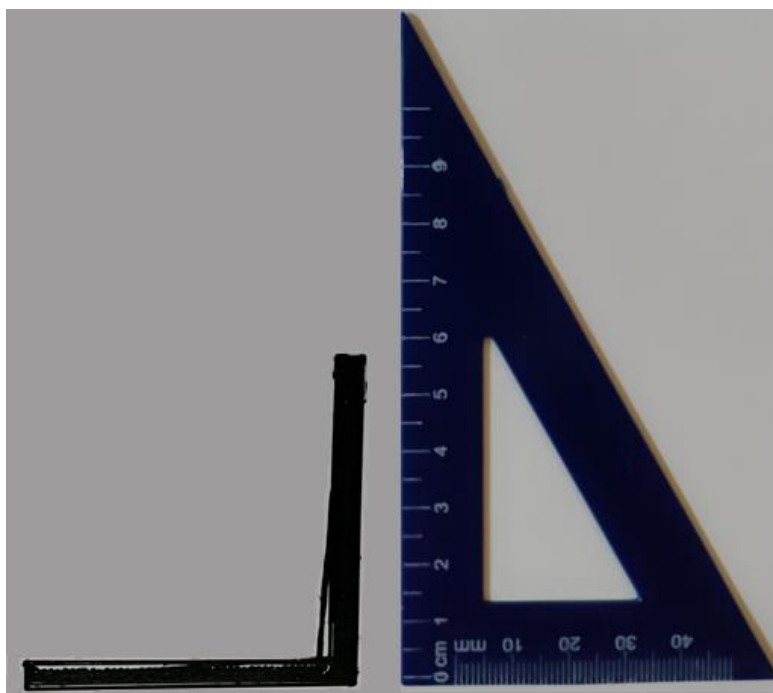


Figure 46. Αποτέλεσμα εκτύπωσης μεντεσέ με την χρήση του αλγορίθμου Chinese Postman

Συγκεντρωτικά για τα συγκεκριμένο δοκίμιο, μπορούμε να πούμε πως η προτεινόμενη από τον εκτυπωτή μεθοδολογία παρουσιάζει το καλύτερο ποιοτικό αποτέλεσμα διανύοντας όμως μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με τον Chinese Postman. Ο δεύτερος φαίνεται να υστερεί ελάχιστα ποιοτικά σε σημεία τα οποία ενδεχομένως σε επόμενο επίπεδο εκτύπωσης να καλυφθούν, ενώ ταυτόχρονα διανύει μικρότερη απόσταση. Τέλος, ο Nearest Neighbor υστερεί και σε ποιότητα και στην συνολική απόσταση που διανύει.

### 5.2.5 Συγκεντρωτικός σχολιασμός αποτελεσμάτων εκτύπωσης των δοκιμίων

Συγκεντρωτικά, για τα αποτελέσματα της εκτύπωσης των δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι κατά βάση ακολουθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Σχετικά με την ποιότητα των δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι το αρχικό πρόγραμμα υπερτερεί έναντι των δύο αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν αλλά χρονικά δεν αποτελεί την βέλτιστη λύση. Ο Nearest Neighbor υστερεί σημαντικά στην τελική ποιότητα των δοκιμίων που εκτυπώθηκαν. Ενώ ο Chinese Postman παρουσιάζει αξιόλογα αποτελέσματα με ελάχιστα χαμηλότερη ποιότητα σε μικρότερο όμως χρόνο εκτύπωσης. Αξίζει να σημειωθεί πως για τον μεντεσέ, όπου βρέθηκε Eulerian μονοπάτι, το τελικό αποτέλεσμα ήταν σχεδόν ίδιο με το αποτέλεσμα του αρχικού προγράμματος ενώ εκτελούνταν σε χρόνο σημαντικά μικρότερο διανύοντας μικρότερη απόσταση. Παρατηρήθηκε δηλαδή ότι για δοκίμια στα οποία γίνεται αναγκαστικά αλλαγή της κατεύθυνσης εκτύπωσης, το αρχικό πρόγραμμα τεμαχισμού υστερεί ποιοτικά. Ο Nearest Neighbor φαίνεται ότι αντιμετωπίζει το εν λόγω πρόβλημα καλύτερα από όλες τις μεθόδους. Ενώ ο Chinese Postman αν και ποιοτικά δίνει σχεδόν ίδια αποτελέσματα με το αρχικό πρόγραμμα τεμαχισμού, παρατηρούμε ότι η εκτύπωση εκτελείται σε λιγότερο χρόνο.

## **6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα**

### **6.1 Συμπεράσματα**

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε το κατά πόσο είναι δυνατό να βελτιστοποιηθεί το πρόγραμμα που δημιουργείται από το λογισμικό τεμαχισμού (slicer) με την χρήση αλγορίθμων εύρεσης βέλτιστων διαδρομών, διατηρώντας ταυτόχρονα ίδια την ποιότητα των τεμαχίων. Οι δύο αλγόριθμοι που μελετήθηκαν ήταν ο Nearest Neighbor και ο Chinese Postman. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν θεωρητικά αλλά και πειραματικά μέσω δοκιμαστικών εκτυπώσεων. Από τα θεωρητικά αποτελέσματα προέκυψε ότι οι δύο αλγόριθμοι υπερτερούν ως προς τον απαιτούμενο χρόνο εκτύπωσης με τον Chinese Postman να υπερτερεί και ως προς την συνολική απόσταση που διανύεται από τον extruder. Με την εκτύπωση των δοκιμίων έγινε αντιληπτό πως ο αρχικός αλγόριθμος αν και παρουσιάζει το καλύτερο ποιοτικά αποτέλεσμα επιδέχεται περιθώρια βελτίωσης καθώς τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν με την χρήση του Chinese Postman ήταν ελάχιστα κατώτερα ποιοτικά ενώ ταυτόχρονα η εκτύπωση τους πραγματοποιούνταν σε μικρότερο χρόνο. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το γεγονός πως οι αλγόριθμοι που μελετήθηκαν μπορεί φαινομενικά να υπερτερούν κατά μερικά δευτερόλεπτα σε σχέση με το αρχικό πρόγραμμα αλλά όταν αυτό ανάγεται σε μερικές δεκάδες επιπέδων που συνήθως απαρτίζουν ένα ολόκληρο δοκίμιο, τότε οι διαφορές αυτές παύουν να είναι αμελητέες. Η εξοικονόμηση χρόνου και πόρων μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Ως προς την επιλογή της μεθοδολογίας που υπερτερεί, θα πρέπει να τονιστεί πως αυτό έγκειται στην χρήση του δοκιμίου καθώς μηχανολογικά δοκίμια που απαιτούν υψηλή ποιότητα και μεγάλη ακρίβεια δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν οι δύο μεθοδολογίες. Παρόλα αυτά, σε περίπτωση δοκιμίων που χρησιμοποιούνται ως πρότυπα για την μελέτη διάφορων μεθοδολογιών ή της συμπεριφοράς του εκτυπωτή σε διάφορες καταστάσεις, τότε ο Chinese Postman μπορεί να δώσει ένα ανεκτό επίπεδο ποιότητας στο οποίο γίνεται σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και τήγματος. Τέλος, σε περιπτώσεις όπου στο υπό εξέταση δοκίμιο παρουσιάζεται αλλαγή της γωνίας-κατεύθυνσης εκτύπωσης στο αρχικό πρόγραμμα τεμαχισμού και από την εφαρμογή του Chinese Postman βρεθεί Eulerian μονοπάτι, τότε το τελικό αποτέλεσμα είναι το βέλτιστο δυνατό, χρονικά και ποιοτικά, ανάμεσα στις 3 μεθοδολογίες.

### **6.2 Μελλοντική Έρευνα**

Το συγκεκριμένο αντικείμενο έρευνας έχει πολύ περιθώριο περαιτέρω μελέτης και ανάπτυξης. Μελλοντικά, επιπλέον αλγόριθμοι εύρεσης βέλτιστων διαδρομών θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και να γίνει σύγκρισή τους με τα παρόντα αποτελέσματα. Επιπλέον, στο κομμάτι του Chinese Postman θα μπορούσε να αναπτυχθεί μεθοδολογία που να ενσωματώνει τον αλγόριθμο Blossom. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να δώσει αποτέλεσμα σε γραφήματα τα οποία δεν φέρουν Eulerian μονοπάτια ή κύκλους. Πηγαίνοντας ένα βήμα παραπέρα την έρευνα, βασιζόμενοι στα υπάρχοντα αποτελέσματα, ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης του δοκιμίου που θα βασίζεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θα μπορούσε να αναπτυχθεί. Ο αλγόριθμος αυτός δυνητικά θα μπορέσει να μειώσει την συνολική κατανάλωση τήγματος και χρόνου ενώ ταυτόχρονα δεν θα υστερεί ποιοτικά μιας και για κάθε περίπλοκη γεωμετρία θα γίνεται υπολογισμός της βέλτιστης μεθοδολογίας που θα μπορέσει να ακολουθηθεί.

## 7. Βιβλιογραφία

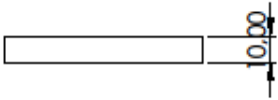
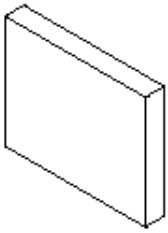
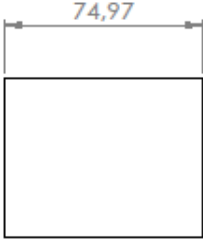
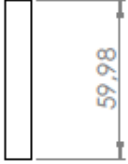
- [1] “LIQUID METAL RECORDER - TELETYPE CORP.” <https://www.freepatentsonline.com/3596285.html> (accessed Nov. 08, 2022).
- [2] R. F. Jones, “Raymond F. Jones Resurrected: Selected Science Fiction Stories of Raymond F. Jones,” p. 402, 2012.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής - Τρισδιάστατη εκτύπωση, ταχεία πρωτοτυποποίηση και άμεση ψηφιακή κατασκευή*. Εκδόσεις Κριτική, 2017.
- [4] G. Komineas, P. Foteinopoulos, A. Papacharalampopoulos, and P. Stavropoulos, “Build Time Estimation Models in Thermal Extrusion Additive Manufacturing Processes,” *Procedia Manuf.*, vol. 21, pp. 647–654, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.167.
- [5] M. Livesu, S. Ellero, J. Martínez, S. Lefebvre, and M. Attene, “From 3D models to 3D prints: an overview of the processing pipeline,” *Comput. Graph. Forum*, vol. 36, no. 2, pp. 537–564, 2017, doi: 10.1111/cgf.13147.
- [6] G. Q. Jin, W. D. Li, and L. Gao, “An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 1, pp. 23–38, 2013, doi: 10.1016/j.rcim.2012.07.001.
- [7] Y. an Jin, Y. He, J. zhong Fu, W. feng Gan, and Z. wei Lin, “Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology,” *Addit. Manuf.*, vol. 1, pp. 32–47, 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.08.004.
- [8] J. I. Aguilar-Duque, J. L. Hernández-Arellano, C. O. Balderrama-Armendariz, and L. Avelar-, “Reduction of the Fused Filament Fabrication Process Time in the Manufacturing of Printed Circuit Board Slots,” *Int. J. Comb. Optim. Probl. Informatics*, vol. 11, no. April, pp. 59–75, 2020.
- [9] G. Dreifus *et al.*, “Path Optimization Along Lattices in Additive Manufacturing Using the Chinese Postman Problem,” *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 4, no. 2, pp. 98–104, 2017, doi: 10.1089/3dp.2017.0007.
- [10] T. H. Duong *et al.*, “G-code Visualization and Editing Program for Inexpensive Metal 3D Printing,” *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 22–28, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.007.
- [11] S. Koda and H. Tanaka, *Novel Way to Design the 3D Printing Path and Its Applications*, vol. 793. Springer International Publishing, 2019.
- [12] H. Guo, J. Xu, S. Zhang, and G. Yi, “Build orientation optimization based on weighted analysis of local surface region curvature,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/app11010304.
- [13] M. Wolf, A. Elser, O. Riedel, and A. Verl, “A software architecture for a multi-axis additive manufacturing path-planning tool,” *Procedia CIRP*, vol. 88, pp. 433–438, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.075.
- [14] G. Gutin, A. Yeo, and A. Zverovitch, “Exponential Neighborhoods and Domination Analysis for the TSP,” pp. 223–256, 2007, doi: 10.1007/0-306-48213-4\_6.
- [15] G. Gutin, R. Holloway, A. Punnen, B. / Dordrecht, and / London, “THE TRAVELING

SALESMAN PROBLEM AND ITS VARIATIONS Edited by.”

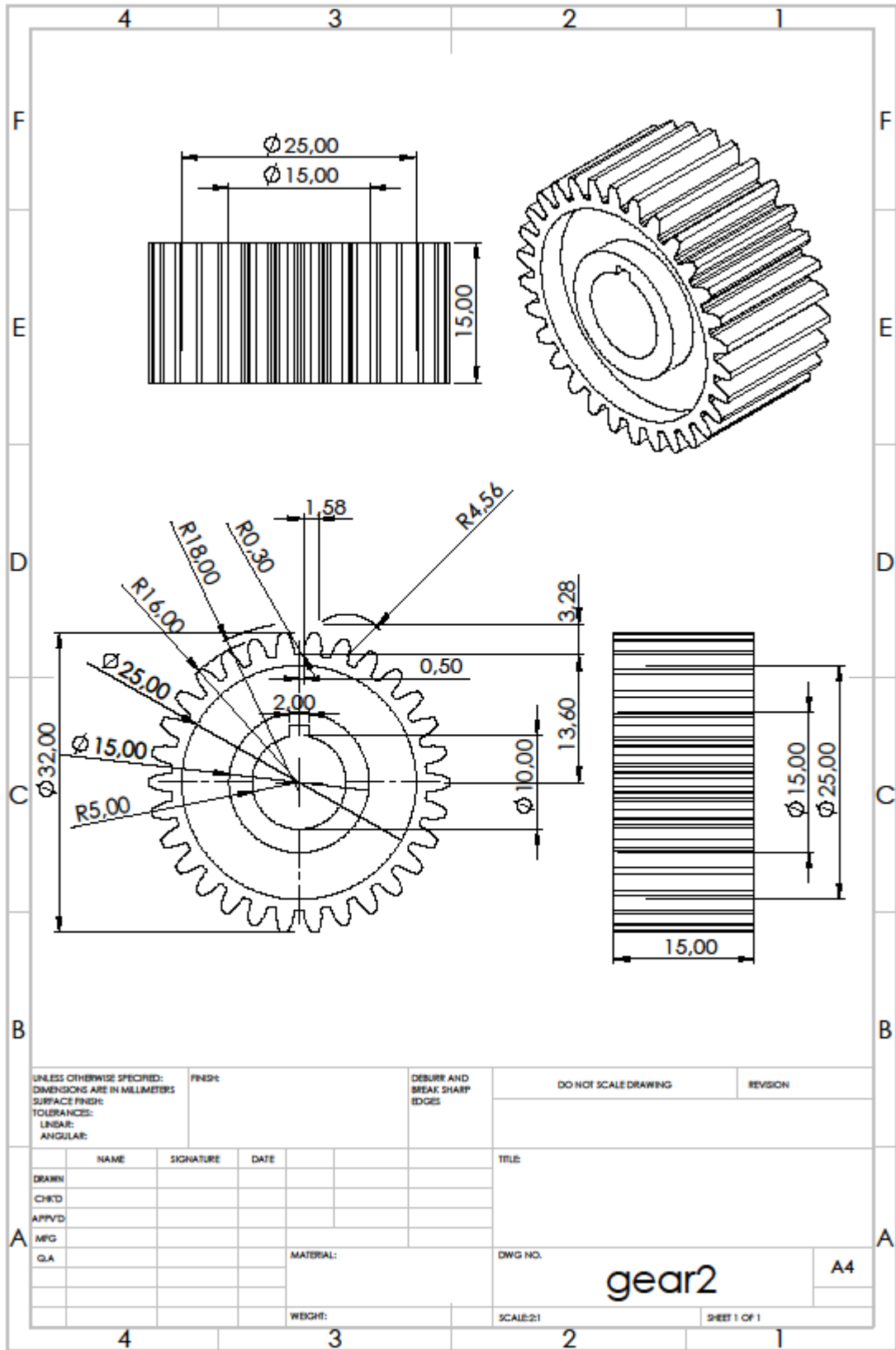
- [16] “grTheory - Graph Theory Toolbox - File Exchange - MATLAB Central.” <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4266-grtheory-graph-theory-toolbox> (accessed Oct. 30, 2022).
- [17] Dassault Systèmes, “INTRODUCING SOLIDWORKS Contents,” *Dassault Systèmes SolidWorks*, p. 128, 2015.
- [18] Χ. Παπαδόπουλος, *Στοιχεία Μηχανών*, 2η Έκδοση. Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.
- [19] “Is anyone printing gears using metal additive manufacturing? | Gear Solutions Magazine Your Resource to the Gear Industry.” <https://gearsolutions.com/features/is-anyone-printing-gears-using-metal-additive-manufacturing/> (accessed Oct. 28, 2022).
- [20] “Screw Thread Terminology Explained | Assembly Fasteners, Inc.” <http://www.afi.cc/?page=customer&file=customer/asfain/customerpages/Blog/ScrewThreadTerminology.htm> (accessed Oct. 28, 2022).
- [21] “3D Printing Threads & Screws – Simple Guide | All3DP.” <https://all3dp.com/2/3d-printing-threads-and-screws-all-you-need-to-know/> (accessed Oct. 28, 2022).
- [22] “Aluminium profiles. Process and Products - Gestión De Compras.” <https://www.gestiondecompras.com/en/products/forming-tubes-and-profiles/aluminium-profiles/> (accessed Oct. 28, 2022).
- [23] Ultimaker, “Ultimaker 3 manual (En) v1.4,” pp. 1–60, 2017, [Online]. Available: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-3>.
- [24] M. Burns, “Automated fabrication : improving productivity in manufacturing,” p. 369, 1993, Accessed: Oct. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.worldcat.org/title/634954895>.
- [25] “Why Orientation is Important to Your 3D Model - Computer Aided Technology.” <https://www.cati.com/blog/how-important-is-orientation-to-your-3d-model/> (accessed Oct. 28, 2022).
- [26] “Starters guide to 3D Printing: Orientation | Latest 3D Printer News Article | 3D Printing Solutions.” <https://www.3dprintingsolutions.com.au/News/Australia/starters-guide-to-3d-printing-orientation> (accessed Oct. 29, 2022).
- [27] “Support settings – Ultimaker Support.” <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012612779-Support-settings> (accessed Oct. 28, 2022).

## Παράρτημα Α

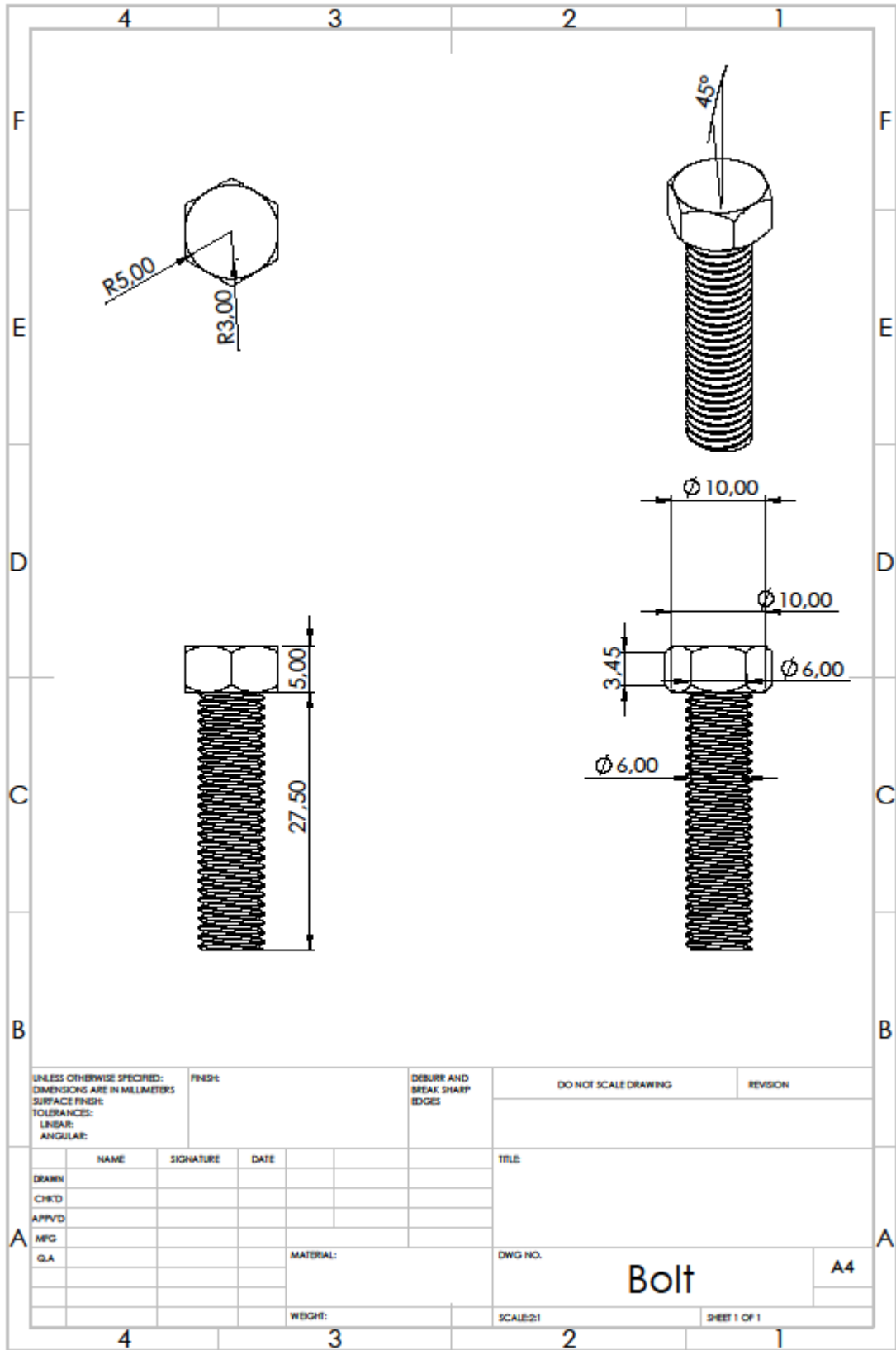
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τα μηχανολογικά σχέδια των δοκιμίων που σχεδιάστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

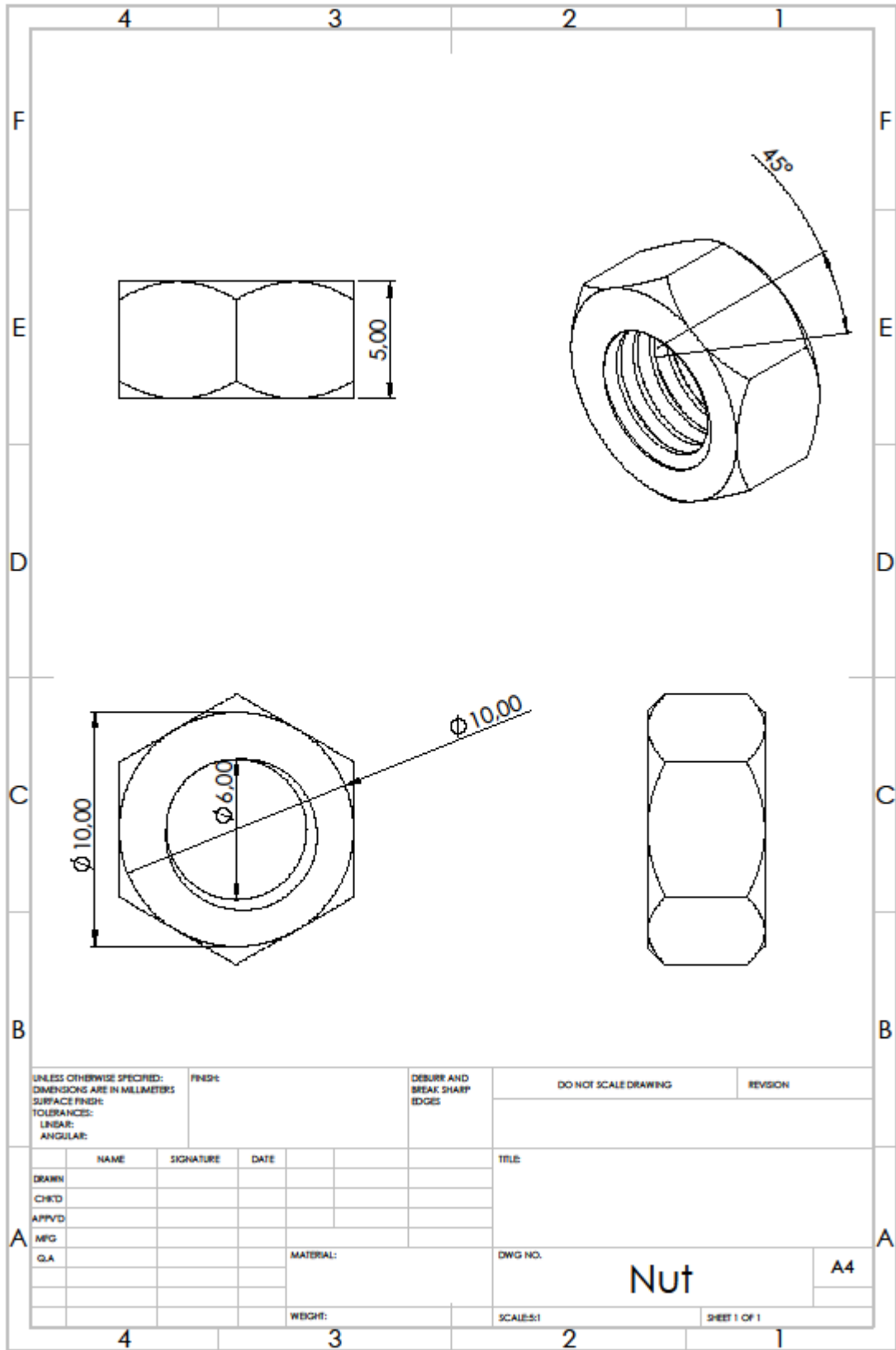
4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
C			C
B			B
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES
		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE
CHKD			
APPVD			
MFG			
Q.A		MATERIAL:	DWG NO.
			cube
		WEIGHT:	A4
			SCALE:1:2      SHEET 1 OF 1
4	3	2	1
A			A



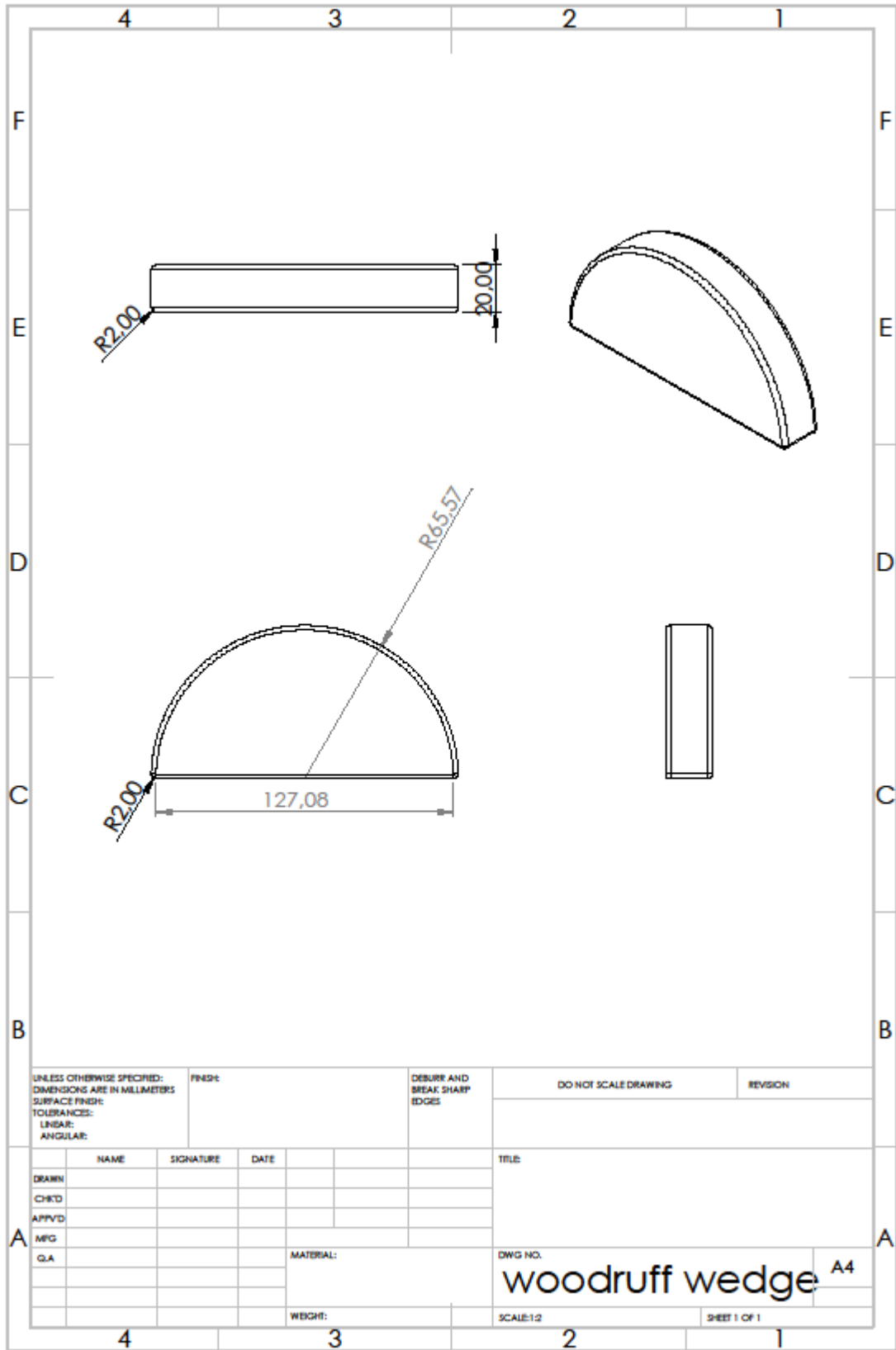


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DESURE AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A.						MATERIAL:		DWG NO.	
								gear2	
								A4	
						WEIGHT:		SCALE:2:1	
								SHEET 1 OF 1	

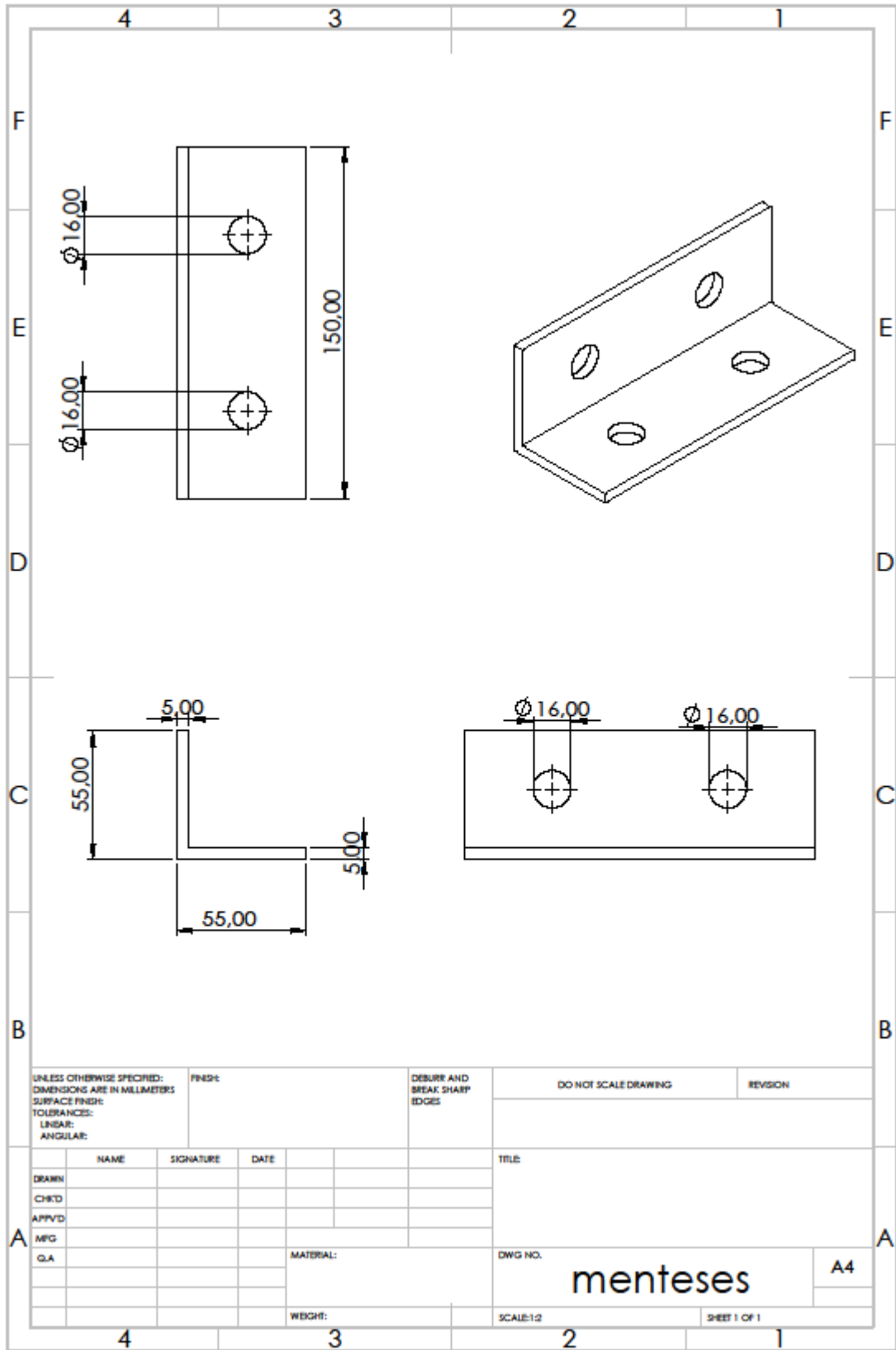




UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DESURE AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
MFG						DWG NO.		A4	
Q.A.						NUT			
				WEIGHT:		SCALE:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DESURE AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A.						MATERIAL:		DWG NO.	
								woodruff wedge A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:2	
								SHEET 1 OF 1	



## Παράρτημα Β

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή και την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αλγορίθμων, του Nearest Neighbor και του Chinese Postman, με το αρχικό πρόγραμμα του εκτυπωτή, σε περιβάλλον Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για όλα τα δοκίμια ήταν ο ίδιος, αυτό που διέφερε είναι το αρχείο που φορτωνόταν κάθε φορά στο Matlab καθώς επίσης και οι σειρές που αποτελούν το 1<sup>ο</sup> επίπεδο του κάθε δοκιμίου.

```
%DPMS Master Thesis
%Foteini Vandorou
%A.M.:02119102
clear all
close all
clc

str =
fileread('C:\Users\User\Documents\DPMS\cube_test\UMS5_cube_test.txt');
rgx = sprintf('\s+%c([+-]?\d+\.\d*)', 'XYE');
%rgx = sprintf('\s+%c([+-]?\d+\.\d*)', 'XYZ'); if 'XYZ' then it
reads
% %only the lines that have XYZ!
tkn = regexp(str,rgx,'tokens');
mat = str2double(vertcat(tkn{:}))

% A=[mat(:,1) mat(:,2)]; %All layers!
% B=A';
% idx = nearestneighbour(B);
C=[mat(247:489,1) mat(247:489,2)]; %LAYER 1 only nearestneighbour
L=C; %for Eulerian check (Chinese Postman)

figure(1) %figure of layer as printed by printer
plot(C(:,1),C(:,2))
title('Original Distance Traveled')
xlabel('x (mm)')
ylabel('y (mm)')
C=C';
idx = nearestneighbour(C);

%loop for assigning points X Y following nearestneighbour
A=[C(1,1) C(2,1)];
for n=1:length(idx)
    A(n,1:2)=[C(1,idx(n)) C(2,idx(n))];
    n=n+1;
end

figure(2) %figure of layer using nearestneighbour
plot(A(:,1),A(:,2))
title('Distance Traveled with Nearest Neighbor')
xlabel('x (mm)')
ylabel('y (mm)')

%weight of nodes general
```

```

Ef=[mat(247:489,3)];
W(1,1)=0;
for m=1:(length(idx)-1)
    W(m+1,1)=[Ef(m+1)-Ef(m)];
    m=m+1;
end

% dist_gen=sum(W);
% dist_nearest=
%~~~~~%
%find number of nodes for Chinese Postman
[F,ia,ic] = unique(A(:,1:2), 'rows') %with A 181 nodes (&242 or 243
edges), with L original nodes (path follows nodes)

%~~~~~ Check if graph is eulerian ~~~~~~
disp('Checking if a Eulerian Path or Cycle exists')
V=F;
for f=1:242
    E(f,1:2)=[ic(f) ic(f+1)];
    f=f+1;
end
[eu,cEu]=grIsEulerian(E);
switch eu,
    case 1,
        st='';
        E=[E(cEu,1:2), [1:size(E,1)]];
    case 0.5,
        st='semi-';
        E=[E(cEu,1:2), [1:size(E,1)]];
    otherwise,
        st='not ';
        E=[E(:,1:2), [1:size(E,1)]];
end
grPlot(V,E,'g','','%d');
title(['\bf This graph is ' st 'Eulerian'])
disp([st 'Eulerian path found!'])

if strcmp(st,'not')
    disp('No Eulerian path or cycle found!') %consider proceeding with
Blossom algorithm
else
    disp('Continuing with the Chinese Postman Algorithm')
end

for fot=1:length(cEu)
    Fif(fot,1:2)=[C(1,cEu(fot)) C(2,cEu(fot))];
    fot=fot+1;
end

figure(4) %figure of layer using Eulerian
plot(Fif(:,1),Fif(:,2))
title('Distance Traveled with Chinese Postman')

```

```

xlabel('x (mm)')
ylabel('y (mm)')

%find total distance traversed by each algorithm
for s=1:(length(L)-1)
    Dist(s,1)=sqrt(sum(((L(s+1,1)-L(s,1)).^2)+((L(s+1,2)-L(s,2)).^2)));
    s=s+1;
end
orgl_dist=sum(Dist); %original distance provided by the printer

for q=1:(length(A)-1)
    Dist_nearest(q,1)=sqrt(sum(((A(q+1,1)-A(q,1)).^2)+((A(q+1,2)-
A(q,2)).^2)));
    q=q+1;
end
nearest_dist=sum(Dist_nearest); %distance with nearest neighbour

for w=1:(length(Fif)-1)
    Dist_postman(w,1)=sqrt(sum(((Fif(w+1,1)-Fif(w,1)).^2)+((Fif(w+1,2)-
Fif(w,2)).^2)));
    w=w+1;
end
Postman_dist=sum(Dist_postman); %distance with Chinese Postman

for sa=1:length(A)
    line_number(sa,1)="N"+sa;
end
extrusion_nrst(1,1)="E0";
% for bi=2:length(A)
%     extrusion_nrst(bi,1)="E"+Dist_nearest(bi-1,1);
% end

%~~~~~%testing for Extrusion value~~~~~%
E_calc_nrst(1,1)=0;
extrusion_nrst(1,1)="E"+E_calc_nrst(1,1);
for co=2:length(A)
    E_calc_nrst(co,1)=0.0087*Dist_nearest(co-1,1)+E_calc_nrst(co-1,1);

    extrusion_nrst(co,1)="E"+E_calc_nrst(co,1);
end
%~~~~~%

%g_code=line_number + " G01 " +A_test
% writematrix(g_code, 'filename.txt')
A1_test=num2str(A(:,1));
A2_test=num2str(A(:,2));

open_gcode="T0" + newline + "M82 ;absolute extrusion mode" + newline +
"G92 E0" + newline + "M109 S200" + newline + "G280 S1" + newline + "G0
Z20.001" + newline + "G1 F1500 E-6.5" + newline + "M107" + newline +
"M204 S625" + newline + "M205 X8.33 Y8.33" + newline + "G0 F6000
X204.872 Y151.717 Z0.2" + newline + "M204 S500" + newline + "M205 X5
Y5";
writematrix(open_gcode, 'g_code_nrst_cube.txt')
fileID = fopen('g_code_nrst_cube.txt','a+');

```



```

g_code_nrst=" G01 F1500 " +"X"+A1_test +" Y"+A2_test +"
"+extrusion_nrst +newline;
fprintf(fileID, '%s',g_code_nrst);
fclose(fileID);
%line_number +
fileID = fopen('g_code_nrst_cube.txt', 'a+');
cls_gcode="M140 S0" + newline + "M204 S3000" + newline + "M205 X20 Y20"
+ newline + "M107"+ newline + "M82 ;absolute extrusion mode" + newline
+ "M104 S0" + newline + "M104 T1 S0";
fprintf(fileID, '%s',cls_gcode);
fclose(fileID);

for sb=1:length(Fif)
    line_number_ch(sb,1)="N"+sb;
end
extrusion_chinese(1,1)="E0";
% for ce=2:length(Fif)
%     extrusion_chinese(ce,1)="E"+Dist_postman(ce-1,1);
% end

%~~~~~%testing for Extrusion value~~~~~%
E_calc(1,1)=0;
extrusion_chinese(1,1)="E"+E_calc(1,1);
for cf=2:length(Fif)
    E_calc(cf,1)=0.0087*Dist_postman(cf-1,1)+E_calc(cf-1,1);

    extrusion_chinese(cf,1)="E"+E_calc(cf,1);
end
%~~~~~%

Fif1_test=num2str(Fif(:,1));
Fif2_test=num2str(Fif(:,2));
open_gcode="T0" + newline + "M82 ;absolute extrusion mode" + newline +
"G92 E0" + newline + "M109 S200" + newline + "G280 S1" + newline + "G0
Z20.001" + newline + "G1 F1500 E-6.5" + newline + "M107" + newline +
"M204 S625" + newline + "M205 X8.33 Y8.33" + newline + "G0 F6000
X204.872 Y151.717 Z0.2" + newline + "M204 S500" + newline + "M205 X5
Y5";
writematrix(open_gcode, 'g_code_chinese_cube.txt')
fileID = fopen('g_code_chinese_cube.txt', 'a+');
g_code_chinese=line_number_ch +" G01 F1500 " +"X"+Fif1_test +"
Y"+Fif2_test +" "+extrusion_chinese +newline;
fprintf(fileID, '%s',g_code_chinese);
fclose(fileID);
%
fileID = fopen('g_code_chinese_cube.txt', 'a+');
cls_gcode="M140 S0" + newline + "M204 S3000" + newline + "M205 X20 Y20"
+ newline + "M107"+ newline + "M82 ;absolute extrusion mode" + newline
+ "M104 S0" + newline + "M104 T1 S0";
fprintf(fileID, '%s',cls_gcode);
fclose(fileID);

```

figure(5)

```
subplot(2,2,1)
plot(L(:,1),L(:,2))
ylim([90,150]);
xlim([120,210]);
xlabel('x (mm)')
ylabel('y (mm)')
title('Original Distance Traveled')
subplot(2,2,2)
plot(A(:,1),A(:,2))
xlabel('x (mm)')
ylabel('y (mm)')
title('Distance traveled with Nearest Neighbor')
subplot(2,2,3)
plot(Fif(:,1),Fif(:,2))
xlabel('x (mm)')
ylabel('y (mm)')
title('Distance traveled with Chinese Postman')
```