

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜ. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ**

Ι. Ε. ΓΙΑΝΝΑΤΣΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2004

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Σχημάτων	iii
Ευρετήριο Πινάκων	v
Ευχαριστίες	vi
Περίληψη	vii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Τεχνολογίες ΤΚΠ.....	1
1.2 Η Στερεολιθογραφία	4
1.3 Το πρόβλημα της επιλογής παραμέτρων κατασκευής.....	9
1.4 Στόχοι και δομή της διατριβής	10
2. Ανάλυση του προβλήματος	12
2.1 Ποιότητα κατασκευής αντικειμένου.....	12
2.2 Κατασκευαστικό κόστος και χρόνος	17
2.3 Κατασκευαστικές παράμετροι και μεταβλητές	19
3. Ανασκόπηση βιβλιογραφίας και χαρακτηριστικά προτεινόμενου συστήματος	24
3.1 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....	24
3.2 Συνοπτική παρουσίαση βιβλιογραφίας.....	28
3.3 Χαρακτηριστικά προτεινόμενου συστήματος επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων	30
4. Χρόνος κατασκευής αντικειμένου	34
4.1 Εισαγωγή	34
4.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....	35
4.3 Θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης χρόνου κατασκευής.....	36
4.4 Πειραματικός έλεγχος θεωρητικού μοντέλου.....	39
4.5 Εκτίμηση συνολικού μήκους σάρωσης περιγράμματος-εσωτερικού βάσει STL αρχείων	45
4.6 Δοκιμές πρόβλεψης χρόνου κατασκευής.....	48
5. Ποιότητα επιφανειών αντικειμένου	52
5.1 Εισαγωγή	52
5.2 Θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης τραχύτητας	53
5.3 Πειραματικός έλεγχος θεωρητικού μοντέλου.....	56
6. Ακρίβεια κατασκευής αντικειμένου	63
6.1 Εισαγωγή	63
6.2 Ακρίβεια οριζόντιων διαστάσεων.....	66
6.3 Ακρίβεια μη οριζόντιων διαστάσεων	73
7. Ανάπτυξη Συστήματος	79

7.1	Εισαγωγή	79
7.2	Το πρότυπο γεωμετρικής αναπαράστασης STL.....	79
7.3	Δομή του ΣΥΕΚΑΠ.....	81
7.3.1	Προσδιορισμός βασικών λύσεων	83
7.3.2	Αξιολόγηση των λύσεων.....	84
7.3.3	Παρουσίαση των πληροφοριών.....	86
8. Παρουσίαση Συστήματος		88
8.1	Εισαγωγή	88
8.2	Αντικείμενο «Α».....	89
8.3	Αντικείμενο «Β».....	94
8.4	Αντικείμενο «Γ»	97
9. Σύνοψη και Μελλοντική Έρευνα		100
9.1	Σύνοψη εργασίας.....	100
9.2	Μελλοντική έρευνα.....	104
Βιβλιογραφία.....		106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....		113
Π1. Σύστημα Στερεολιθογραφίας EOS - Stereos Desktop S		113
P1.1	Χαρακτηριστικά συστήματος EOS - Stereos Desktop S	113
P1.2	Φωτοπολυμεριζόμενη Ρητίνη DSM - Somos 7110.....	114
P1.3	Παράμετροι σάρωσης δοκιμίων	115
Π2. Δοκίμιο & Μετρήσεις Ακριβείας		116
P2.1	Εξωτερικές διαστάσεις παράλληλες X & Y	116
P2.2	Εσωτερικές X & Y και διαμετρικές διαστάσεις.....	116
P2.2	Εσωτερικές X & Y και διαμετρικές διαστάσεις.....	117
P2.3	Εσωτερικές και εξωτερικές διαστάσεις X 135°	118
P2.4	Εσωτερικές και εξωτερικές διαστάσεις X 45°	119
P2.5	Μετρούμενες αποκλίσεις διαστάσεων δοκιμίου ακριβείας ανά επίπεδο μέτρησης.....	120
Π3. Χαρακτηριστικά κατασκευαστικών λύσεων.....		122
P3.1.	Χαρακτηριστικά κατασκευαστικών λύσεων αντικειμένου «Α».	122
P3.2.	Χαρακτηριστικά κατασκευαστικών λύσεων αντικειμένου «Β».	122
P3.3.	Χαρακτηριστικά κατασκευαστικών λύσεων αντικειμένου «Γ».....	123
Π4. Πρότυπα περιγραφής γεωμετρικών δεδομένων		124
P4.1	Πρότυπο CLI	124
P4.2	Πρότυπο VRML.....	125

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Ταξινόμηση των τΤΚΠ σύμφωνα με την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη.	2
Σχήμα 1.2. Σχηματική αναπαράσταση μηχανής Στερεολιθογραφίας.	5
Σχήμα 1.3. Η διαδικασία παραγωγής με την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας.	6
Σχήμα 1.4. Παράδειγμα πολυεδρικής STL αναπαράστασης σφαίρας.	7
Σχήμα 1.5. Πλέγμα στήριξης για διαφορετικούς προσανατολισμούς κατασκευής φιάλης.	7
Σχήμα 2.1. Σχηματική απεικόνιση STL προσέγγισης κυλινδρικής επιφάνειας.	13
Σχήμα 2.2. Σχηματική απεικόνιση του ύψους «οδόντωσης» επικλινών επιπέδων επιφανειών.	14
Σχήμα 2.3. Σφάλμα τεμαχισμού αρνητικό (α) και θετικό (β).	14
Σχήμα 2.4. Τύποι εδρών ανάλογα με τον προσανατολισμό κατασκευής.	15
Σχήμα 2.5. Σχηματική αναπαράσταση της υπερστερεοποίησης.	15
Σχήμα 2.6. Σχηματική αναπαράσταση της γραμμικής συρρίκνωσης.	16
Σχήμα 2.7. Θεωρητική (α) και τελική μορφής (β) παραλληλεπίπεδου λόγω κύρτωσης.	17
Σχήμα 2.8. Σχηματική αναπαράσταση του προβλήματος δοχείου.	17
Σχήμα 2.9. Ταξινόμηση κατασκευαστικών παραμέτρων για το σύστημα <i>EOS-Stereos Desktop S...</i>	20
Σχήμα 2.10. Σχηματική αναπαράσταση ορθογωνικού προτύπου και παραμέτρων σάρωσης.	20
Σχήμα 2.11. Σχηματική αναπαράσταση γραμμής σάρωσης.	21
Σχήμα 2.12. Σάρωση στρωμάτων με μεγάλο (α) και μικρό (β) διάστημα σάρωσης.	22
Σχήμα 4.1. Σχηματική αναπαράσταση τομής.	38
Σχήμα 4.2. Τομές Α'-Ε' (οι διαστάσεις σε mm)	40
Σχήμα 4.3. Χρονικές αποκλίσεις τομών Α-Ε.	41
Σχήμα 4.4. Τομές ΣΤ'-Θ' (οι διαστάσεις σε mm)	42
Σχήμα 4.5. Χρονικές αποκλίσεις τομών ΣΤ'-Θ'.	43
Σχήμα 4.6. Ενδεικτικά μοντέλα πρωτοτύπων/προϊόντων.	47
Σχήμα 4.7. Καταγεγραμμένη ισχύς laser ανά στρώμα για αντιπροσωπευτικές εργασίες.	50
Σχήμα 5.1. Σχηματική αναπαράσταση της μέσης τραχύτητας επιφάνειας.	54
Σχήμα 5.2. Σχηματική αναπαράσταση της θεωρητικής τραχύτητας σε άνω επικλινή επιφάνεια.	54
Σχήμα 5.3. Δοκίμιο μέτρησης τραχύτητας επιφανειών	56
Σχήμα 5.4. Θεωρητική και πειραματικά μετρηθείσα τραχύτητα επιφανειών δοκιμίου «0.20».	57
Σχήμα 5.5. Θεωρητική και πειραματικά μετρηθείσα τραχύτητα επιφανειών δοκιμίου «0.15».	58
Σχήμα 5.6. Θεωρητική και πειραματικά μετρηθείσα τραχύτητα επιφανειών δοκιμίου «0.10».	58
Σχήμα 5.7. Σύγκριση τραχύτητας δοκιμίων και αποτελεσμάτων μελέτης Reeves-Cobb.	59
Σχήμα 5.8. Σύγκριση μετρήσεων τραχύτητας δοκιμίων και προσαρμοσμένου θεωρητικού μοντέλου για πάχος στρώματος 0.20 mm.	61
Σχήμα 5.9. Σύγκριση μετρήσεων τραχύτητας δοκιμίων και προσαρμοσμένου θεωρητικού μοντέλου για πάχος στρώματος 0.15 mm.	61
Σχήμα 5.10. Σύγκριση μετρήσεων τραχύτητας δοκιμίων και προσαρμοσμένου θεωρητικού μοντέλου για πάχος στρώματος 0.20 mm.	62

Σχήμα 6.1 Ταξινόμηση των διαστάσεων ενός αντικειμένου ανάλογα με τον διεύθυνσή τους.....	64
Σχήμα 6.2 Δοκίμιο ακρίβειας "User Part".	65
Σχήμα 6.3 Δοκίμιο ακρίβειας οριζόντιων διαστάσεων.	67
Σχήμα 6.4 Φωτογραφία της χρησιμοποιηθείσας μηχανής CMM	68
Σχήμα 6.5. Κατανομή αποκλίσεων μεταξύ πραγματικών και ονομαστικών οριζόντιων διαστάσεων.	69
Σχήμα 6.6. Αθροιστική κατανομή απόλυτων αποκλίσεων οριζόντιων διαστάσεων.	69
Σχήμα 6.7. Κατανομή σχετικών απόλυτων αποκλίσεων οριζόντιων διαστάσεων.....	70
Σχήμα 6.8. Αποκλίσεις διαμετρικών διαστάσεων.....	71
Σχήμα 6.9. Αποκλίσεις διαστάσεων παράλληλων στους X και Y άξονες.	71
Σχήμα 6.10. Αποκλίσεις οριζόντιων διαγώνιων διαστάσεων.	72
Σχήμα 6.11. Μέθοδοι σχηματισμού του στρώματος κάτω (α) και άνω της τομής (β).	74
Σχήμα 6.12. Αναμενόμενο σφάλμα διαγώνιας στο XZ επίπεδο διάστασης.....	74
Σχήμα 6.13. Απόκλιση μη οριζόντιων διαστάσεων δοκιμίου τραχύτητας «0.20».	76
Σχήμα 6.14. Απόκλιση μη οριζόντιων διαστάσεων δοκιμίου τραχύτητας «0.15».	77
Σχήμα 6.15. Απόκλιση μη οριζόντιων διαστάσεων δοκιμίου τραχύτητας «0.10».	77
Σχήμα 7.1 Αναπαράσταση και περιγραφή τριγώνου σύμφωνα με το πρότυπο STL.....	80
Σχήμα 7.2 Δομή και βασικές λειτουργίες του ΣΥΕΚΑΠ.....	82
Σχήμα 7.3. Βέλτιστος προσανατολισμός για επίπεδη (α) και κυλινδρική (β) επιφάνεια.....	83
Σχήμα 8.1. Ισομετρικές (προοπτικές) όψεις των τριών υπό εξέταση αντικειμένων	88
Σχήμα 8.2 Προτεινόμενοι προσανατολισμοί κατασκευής για το αντικείμενο «Α».....	89
Σχήμα 8.3. Μοντέλο VRML φαινομένου κλίμακας αντικ. «Α» για προσανατολισμό κατασκευής α	90
Σχήμα 8.4. VRML μοντέλα τραχύτητας αντικειμένου «Α» για λύσεις α) $c-0.20$ και β) $b-0.10$	94
Σχήμα 8.5. Μορφή και κρίσιμα μορφολογικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου «Β».	95
Σχήμα 8.6. Προτεινόμενοι προσανατολισμοί κατασκευής αντικειμένου «Β».	95
Σχήμα 8.7. VRML μοντέλα φαινομένου κλίμακας αντικ. «Β» για προσανατολισμό α) e και β) b	96
Σχήμα 8.8. VRML μοντέλα τραχύτητας αντικειμένου «Β», για λύσεις α) $a-0.15$ και β) $a-0.20$	97
Σχήμα 8.9. Ισομετρική όψη του αντικειμένου «Γ».....	98
Σχήμα 8.10. VRML μοντέλα φαινομένου κλίμακας προσανατολισμών κατασκευής αντικ. «Γ».	98
Σχήμα 8.11. VRML μοντέλα τραχύτητας αντικειμένου «Γ», για λύσεις α) $a-0.10$ και β) $d-0.10$	99
Σχήμα Π4.1 Αναπαράσταση τομής κατά το πρότυπο CLI.....	124
Σχήμα Π4.2 Αναπαράσταση διανυσμάτων σάρωσης κατά το πρότυπο CLI.	124

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1. Κριτήρια και δείκτες προηγούμενων μελετών	29
Πίνακας 4.1. Προβλεπόμενος και μετρηθείς χρόνος σάρωσης για τετράγωνη τομή 50 mm.	40
Πίνακας 4.2. Στοιχεία γραμμικής παλινδρόμησης καθυστερήσεων.	42
Πίνακας 4.3. Συντελεστές και δεδομένα γραμμικής συσχέτισης αποκλίσεων και μήκους σάρωσης.	44
Πίνακας 4.4. Μήκος σάρωσης εσωτερικού και περιγράμματος βάσει STL και CLI αρχείων.	46
Πίνακας 4.5. Συνολικό μήκος σάρωσης στηριγμάτων βάσει STL και CLI αρχείων.	48
Πίνακας 4.6. Πραγματικός και προβλεπόμενος χρόνος κατασκευής για διάφορες εργασίες.	51
Πίνακας 6.1. Κατηγορίες διαστάσεων του δοκιμίου οριζόντιας ακρίβειας.	68
Πίνακας 6.2. Χαρακτηριστικά αθροιστικής κατανομής αποκλίσεων (mm).	70
Πίνακας 8.1. Αποτελέσματα ανάλυσης κατασκευής αντικειμένου «Α» με προσανατολισμό a.	91
Πίνακας 8.2 Κατάταξη των λύσεων κατασκευής αντικειμένου «Α» για διαφορετικά σενάρια.	92
Πίνακας 8.3. Κατάταξη λύσεων κατασκευής αντικειμένου «Β» για διαφορετικά σενάρια.	96
Πίνακας 8.4. Κατάταξη λύσεων κατασκευής αντικειμένου «Γ» για διαφορετικά σενάρια.	99

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Λάμπρο Λάιο και τον Αναπλ. Καθηγητή κ. Βασίλη Δεδούση για την καθοδήγηση, υποστήριξη και βοήθειά τους, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Δίπλα τους έμαθα πολλά και νιώθω πολύ τυχερός που συνεργάστηκα μαζί τους. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Επίκ. Καθηγητή κ. Δημήτρη Καραλέκα για τα εποικοδομητικά σχόλια σε διάφορα σημεία της ερευνητικής μου εργασίας και τις πολύτιμες κατευθύνσεις που μου παρείχε σε θέματα υλικών. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Μιχαήλ Σφαντζικόπουλο που μου επέτρεψε να χρησιμοποιήσω τον μετρητικό εξοπλισμό του εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., καθώς και τους κ.κ. Σταμάτη Πολύδωρα και Γιώργιο Καϊσαρλή, χωρίς την βοήθεια των οποίων μεγάλο μέρος των πειραματικών μετρήσεων δεν θα είχε πραγματοποιηθεί.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης σε όλα τα παιδιά των εργαστηρίων του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας που εκτός από συνεργάτες υπήρξαν πραγματικοί φίλοι όλα αυτά τα χρόνια. Πρώτο από όλους ευχαριστώ τον Βαγγέλη Καλάθα που με εισήγαγε στον χώρο των Η/Υ και των εμπορικών συστημάτων CAD/CAM & RP, βοηθώντας με σημαντικά στα πρώτα μου βήματα. Ένα μεγάλο ευχαριστώ επίσης στον Παναγιώτη Σιότρωπο, χωρίς την βοήθεια του οποίου θα είχα δαπανήσει άπειρες ώρες προσπαθώντας να βρω τι έπαθε (πάλι) το PC μου και ο εκτυπωτής. Ευχαριστώ επίσης θερμά τους Νίκο Μαντζουράτο, Άγγελο Αγγελόπουλο, Βασίλη Κανελλίδη και την Λιλή Τασιά για την βοήθειά τους όποτε και όπου την χρειάστηκα, καθώς και για όλους τους εποικοδομητικούς καφέδες που ήπιαμε.

Ευχαριστώ επίσης με όλη μου την καρδιά όλους τους φίλους μου και ειδικά την Εύη που στάθηκε κοντά μου από την πρώτη στιγμή που γνωριστήκαμε και μου έδωσε, όταν χρειάστηκε, την δύναμη και την ώθηση να συνεχίσω. Τέλος ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, χωρίς την υποστήριξη και την αγάπη της όχι μόνο η παρούσα διατριβή αλλά τίποτα από όσα έχω καταφέρει μέχρι σήμερα δεν θα ήταν δυνατά. Τους οφείλω πολλά και τους ευγνωμονώ.

Περίληψη

Η Στερεολιθογραφία αποτελεί μία από τις πλέον γνωστές και διαδεδομένες τεχνικές Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων-ΤΤΚΠ (Rapid Prototyping-RP), μία σχετικά νέα ομάδα μεθόδων κατασκευής προϊόντων από διαδοχικά στρώματα υλικού. Ως πρώτη ύλη στην περίπτωση της Στερεολιθογραφίας χρησιμοποιείται φωτοπολυμεριζόμενη υγρή ρητίνη (photopolymer resin) που στερεοποιείται-πολυμερίζεται μέσω ελεγχόμενης έκθεσης σε ακτινοβολία laser. Η κατασκευή ενός αντικειμένου εκτελείται αυτόματα από το σύστημα Στερεολιθογραφίας με βάση γεωμετρικά δεδομένα που προέρχονται από το αντίστοιχο τριδιάστατο ψηφιακό μοντέλο (3D virtual model) και κατασκευαστικές παραμέτρους που ορίζονται από τον χειριστή του συστήματος.

Βασικό στόχο του χειριστή κατά την επιλογή των παραμέτρων αποτελεί η καλύτερη δυνατή ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας και κόστους, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με την αναμενόμενη χρήση του τελικού προϊόντος (π.χ. πρωτότυπο σχεδιασμού, πρότυπο χύτευσης, εργαλείο παραγωγής μικρών παρτίδων κλπ.). Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων συγκεκριμένων επιλογών στο κόστος και την ποιότητα κατασκευής στηρίζεται συνήθως στην εμπειρία του χειριστή και σε ελάχιστες περιπτώσεις σε αναλυτικά/ποσοτικά δεδομένα.

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός συστήματος υποβοήθησης του χειριστή μηχανής Στερεολιθογραφίας κατά την φάση της επιλογής των κατασκευαστικών παραμέτρων. Σκοπός του συστήματος αυτού είναι η αξιολόγηση των διαφορών εναλλακτικών επιλογών βάσει αντικειμενικών/ποσοτικών δεδομένων που αφορούν την αναμενόμενη κατασκευαστική ποιότητα και κόστος του τελικού προϊόντος. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η επιλογή των αντικειμενικά βέλτιστων παραμέτρων για ένα δεδομένο προϊόν ακόμα και από χειριστές με ελάχιστη εμπειρία.

Το κύριο μέρος της διατριβής συνιστά ο προσδιορισμός των βασικών κατασκευαστικών παραμέτρων και των σχέσεων που τις συνδέουν με τα κριτήρια λήψης της απόφασης, την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο κατασκευής. Η μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας οδήγησε στην αναγνώριση δύο βασικών κατασκευαστικών παραμέτρων, του προσανατολισμού του αντικειμένου στον χώρο της μηχανής και του πάχους στρώματος. Ως βασικά κριτήρια επιλογής λαμβάνονται η τραχύτητα των επιφανειών, η ακρίβεια και ο χρόνος κατασκευής - που συνδέεται άμεσα με το κόστος κατασκευής - του μοντέλου Στερεολιθογραφίας. Οι σχέσεις μεταξύ των κατασκευαστικών παραμέτρων και των κριτηρίων λήψης της απόφασης εξήχθησαν βάσει πειραματικών δεδομένων και θεωρητικής ανάλυσης.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και την θεωρητική ανάλυση αναπτύχθηκε το ΣΥΕΚΑΠ (ΣΥστημα Επιλογής Κατασκευαστικών Παραμέτρων), το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χειριστή της μηχανής Στερεολιθογραφίας να εκτιμήσει τον χρόνο/κόστος κατασκευής, την ποιότητα των

επιφανειών και την ακρίβεια κατασκευής ενός μοντέλου Στερεολιθογραφίας, ανάλογα με τον επιλεχθέντα προσανατολισμό και πάχος στρώματος. Για την αξιολόγηση των πιθανών λύσεων και την εύρεση των κατασκευαστικών παραμέτρων που ικανοποιούν περισσότερα του ενός κριτήρια χρησιμοποιείται η μέθοδος της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης, στην οποία τα επιμέρους κριτήρια συνυπολογίζονται σύμφωνα με τον συντελεστή βαρύτητας που τους αποδίδεται. Ο συντελεστής βαρύτητας κάθε κριτηρίου καθορίζεται από τον χειριστή ανάλογα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και την αναμενόμενη χρήση του μοντέλου Στερεολιθογραφίας.

Το ΣΥΕΚΑΠ δίνει επίσης στον χειριστή την δυνατότητα να αξιολογήσει τις πιθανές λύσεις μέσω της εξέτασης τριδιάστατων ψηφιακών μοντέλων VRML, στα οποία απεικονίζεται χρωματικά κωδικοποιημένη η αναμενόμενη ποιότητα/τραχύτητα των επιφανειών του μοντέλου Στερεολιθογραφίας. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατός ο εκ των προτέρων έλεγχος της ποιότητας κρίσιμων επιφανειών και η εκτίμηση της έκτασης και του βαθμού δυσκολίας των μεταπαρασκευαστικών εργασιών, ειδικά για πολύπλοκα γεωμετρικά μοντέλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Τεχνολογίες ΤΚΠ

Μέχρι σχετικά πρόσφατα οι μέθοδοι παραγωγής μπορούσαν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες βάσει του τρόπου σχηματισμού του προϊόντος:

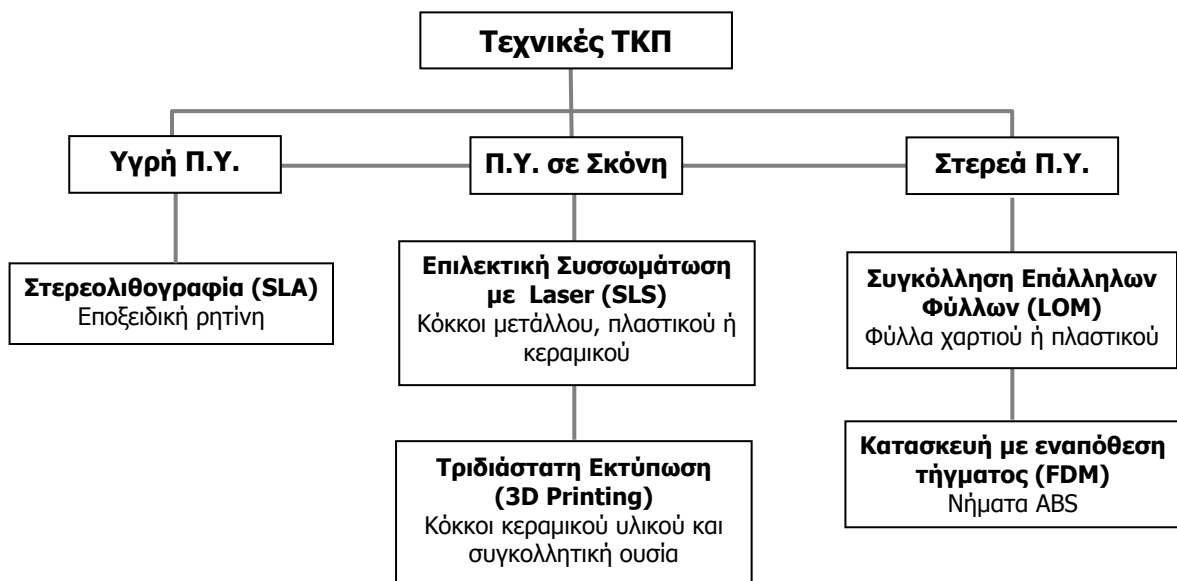
- τις μεθόδους μορφοποίησης (*forming processes*), στις οποίες δεδομένη ποσότητα πρώτης ύλης (σε υγρή ή στερεά μορφή) μορφοποιείται και λαμβάνει το απαιτούμενο σχήμα με την χρήση ειδικών εργαλείων (καλούπια, μήτρες, κ.α.), χωρίς την αφαίρεση ή προσθήκη υλικού, και
- τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (*material removal processes*), όπου το αντικείμενο σχηματίζεται μέσω της αφαίρεσης του πλεονάζοντος υλικού από τον βασικό όγκο στερεάς πρώτης ύλης.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν όλες οι γνωστές μέθοδοι χύτευσης αλλά και κατεργασίες όπως η σφυρηλάτηση, η εξέλαση κλπ. Αντίστοιχα στην δεύτερη συμπεριλαμβάνονται οι παραδοσιακές κατεργασίες κοπής (*cutting processes*) που εκτελούνται σε εργαλειομηχανές, όπως ο τόρνος, η φρέζα ή η πλάνη αλλά και νεότερες κατεργασίες όπως η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) και η κοπή με τη χρήση Laser.

Στις δύο παραπάνω κατηγορίες προστέθηκε στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας μία ακόμα, αυτή των κατεργασιών πρόσθεσης υλικού (*additive fabrication processes*). Βασικά μέλη της νέας κατηγορίας αποτελούν οι **τεχνικές Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων - τΤΚΠ** (*Rapid Prototyping technologies - RPt*), ή καλύτερα *τεχνικές Στρωματικής Κατασκευής* (*Layer Manufacturing Technologies – LMt*). Κοινό γνώρισμα των τΤΚΠ αποτελεί η κατασκευή του αντικειμένου-προϊόντος με διαδοχική πρόσθεση λεπτών στρωμάτων κατάλληλα διαμορφωμένης πρώτης ύλης. Πρότυπο για την κατασκευή του αντικειμένου αποτελεί το αντίστοιχο τριδιάστατο (3D) ψηφιακό μοντέλο, σχεδιασμένο συνήθως σε κάποιο σύστημα μηχανολογικής ή βιομηχανικής σχεδίασης (CAD - Industrial Design system). Σε αντίθεση με ότι ισχύει για τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής στις τΤΚΠ δεν απαιτείται κάποιο εξειδικευμένο κατασκευαστικό εργαλείο

(καλούπι, μήτρα ή ιδιοσυσκευή) ούτε ο σχεδιασμός κάποιου πλάνου κατεργασιών για την κατασκευή του αντικειμένου. Αντίθετα η κατασκευή ολοκληρώνεται αυτόματα από την μηχανή χωρίς επιπλέον την ανάγκη επίβλεψης. Συνέπεια των παραπάνω αποτελεί η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων μεγάλης γεωμετρικής πολυπλοκότητας ταχύτερα και φθηνότερα απ' ότι χρησιμοποιώντας κάποια από τις συμβατικές κατεργασίες.

Η οικογένεια των τΤΚΠ περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό τεχνικών που διαφοροποιούνται με βάση την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη καθώς και τη μέθοδο σχηματισμού και συνένωσης των διαδοχικών στρωμάτων. Οι πλέον γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες τΤΚΠ είναι η Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SL), η Επιλεκτική Συσσωμάτωση με τη χρήση Laser (Selective Laser Sintering - SLS), η Κατασκευή Μοντέλου με Εναπόθεση Τήγματος (Fused Deposition Modeling - FDM), η Κατασκευή με Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing - LOM) και η Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing). Μία απλή ταξινόμηση των τΤΚΠ με βάση την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη (Π.Υ) καθώς και οι αντιπροσωπευτικότερες τεχνολογίες ανά κατηγορία παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Εκτενείς αναφορές σχετικά με τις τΤΚΠ και τα χαρακτηριστικά τους μπορεί ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης να βρει σε εκτενώς στα [1,2,3,4,5]. Σε συνοπτική επίσης μορφή οι τΤΚΠ παρουσιάζονται στα [6,7,8,9].



Σχήμα 1.1. Ταξινόμηση των τΤΚΠ σύμφωνα με την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη.

Η περιοχή των τΤΚΠ αποτελεί ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον διεπιστημονικό ερευνητικό πεδίο καθώς ο ιδιαίτερος χαρακτήρας τους έφερε στο προσκήνιο μία σειρά από ερευνητικά ζητήματα που αφορούν καθαρά τεχνικά θέματα όπως η ποιότητα και οι ιδιότητες των υλικών, η ακρίβεια και η αποδοτικότητα των συστημάτων, ο τρόπος μεταφοράς και οι αλγόριθμοι επεξεργασίας των γεωμετρικών δεδομένων καθώς και θέματα οργανωτικής/διοικητικής φύσεως που αφορούν την εισαγωγή τΤΚΠ στην λειτουργία της βιομηχανικής επιχείρησης αλλά και τον τρόπο εκμετάλλευσης των πλεονεκτημάτων τους [10,11].

Βασικό πεδίο εφαρμογής των τΤΚΠ αποτελεί η κατασκευή φυσικών πρωτοτύπων / μοντέλων νέων προϊόντων που βρίσκονται στην φάση του Σχεδιασμού / Ανάπτυξης [12] γεγονός που ερμηνεύει και την κάπως «στενή» αλλά διεθνώς επικρατούσα ονομασία τους. Στα πλαίσια της διαδικασίας Σχεδιασμού / Ανάπτυξης νέων προϊόντων ο όρος *φυσικό πρωτότυπο* (prototype) χρησιμοποιείται για την περιγραφή υλικών τεχνουργημάτων* (tangible artifacts) που προσεγγίζουν το τελικό προϊόν ως προς τη μορφή, τις γεωμετρικές του διαστάσεις ή την λειτουργία του [13]. Τα φυσικά πρωτότυπα αποτελούν εξαιρετικά χρήσιμα εργαλεία σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας Σχεδιασμού / Ανάπτυξης καθώς βοηθούν στον έλεγχο σημαντικών διαστάσεων του προϊόντος όπως λειτουργικότητα [14,15], αισθητική [16,17], εργονομία [18], πολυπλοκότητα συναρμολόγησης [19] κ.α. ενώ ταυτόχρονα διευκολύνουν την επικοινωνία τόσο εντός της ομάδας σχεδιασμού [20] όσο και με εξωτερικούς συνεργάτες (προμηθευτές, υπερβολάβους κλπ.) και πελάτες. Ο εντεινόμενος διεθνής αλλά και εθνικός ανταγωνισμός πιέζει τις επιχειρήσεις να αυξήσουν το βαθμό καινοτομίας που εμπεριέχεται στα προϊόντα τους μειώνοντας ταυτόχρονα το χρόνο εισαγωγής ενός νέου προϊόντος στην αγορά [21]. Οι τΤΚΠ παρέχοντας την δυνατότητα κατασκευής φυσικών πρωτοτύπων σύντομα και με μικρό κόστος διευκολύνουν σημαντικά την επίτευξη αυτών των στόχων [22]. Ειδικά στα πρώτα στάδια της διαδικασίας όπου σύμφωνα με εκτιμήσεις καθορίζεται το 70% του κόστους παραγωγής [23] η συμβολή των τΤΚΠ μπορεί να αποδειχθεί καθοριστική καθώς:

- επιτρέπουν την γρήγορη εξέταση και αξιολόγηση περισσότερων σχεδιαστικών λύσεων αυξάνοντας την πιθανότητα εισαγωγής καινοτομιών στο νέο προϊόν
- αυξάνουν την δυνατότητα εντοπισμού σχεδιαστικών λαθών, η διόρθωση των οποίων σε ένα μεταγενέστερο στάδιο της διαδικασίας θα απαιτούσε μεγαλύτερη προσπάθεια και θα είχε συγκριτικά μεγαλύτερο κόστος
- επιταχύνουν σε κάποιες περιπτώσεις την ολοκλήρωση μεταγενέστερων εργασιών ή φάσεων, όπως το χρόνο κατασκευής του καλουπιού ενός πολύπλοκου γεωμετρικά προϊόντος.

Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια για την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι τΤΚΠ αποτελεί η υιοθέτηση μίας διαφορετικής φιλοσοφίας σχετικά με τον ρόλο και την θέση των πρωτοτύπων κατά την διαδικασία Σχεδιασμού [24,25].

Σημαντικό πεδίο εφαρμογής των τΤΚΠ αποτελεί επίσης η **Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων Παραγωγής - ΤΚΕ** (Rapid Tooling - RT), όπως καλουπιών και μητρών. Αυτά τα κατασκευαστικά εργαλεία διαθέτουν συνήθως μικρότερη αντοχή από τα αντίστοιχα συμβατικά κατασκευασμένα εργαλεία, κατασκευάζονται όμως ταχύτερα και με σημαντικά μικρότερο κόστος. Έτσι η ΤΚΕ αποτελεί ιδανική μέθοδο παραγωγής εργαλείων για παραγωγή μικρού αριθμού κομματιών, όπως η παραγωγή μικρού αριθμού τελικών πρωτοτύπων ενός νέου προϊόντος (pre-production prototypes)

* Σε αντίθεση με τα αναλυτικά πρωτότυπα (analytical prototypes) όπως τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, τα μαθηματικά μοντέλα λειτουργικής προσομοίωσης ή τα εικονικά / ψηφιακά μοντέλα.

ή η παραγωγή τμημάτων και εξαρτημάτων ειδικών συσκευών [26]. Οι μέθοδοι Ταχείας Κατασκευής Εργαλείων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- τις μεθόδους άμεσης κατασκευής των εργαλείων, όπου το εργαλείο παράγεται απ' ευθείας με τη χρήση μίας τΤΚΠ, π.χ. μητρών ηλεκτροδιάβρωσης [27] και
- τις μεθόδους έμμεσης κατασκευής όπου οι τΤΚΠ χρησιμοποιούνται είτε για την κατασκευή των μοδέλλων/προτύπων (patterns) για την αποτύπωση της γεωμετρίας σε παραδοσιακές διαδικασίες χύτευσης - όπως η χύτευση εν κενώ [28], σε άμμο ή με τη μέθοδο του χαμένου κεριού [29] - είτε για την κατασκευή μίας ενδιάμεσης μορφής του εργαλείου το οποίο όμως υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία έτσι ώστε να αυξηθεί η αντοχή του [30].

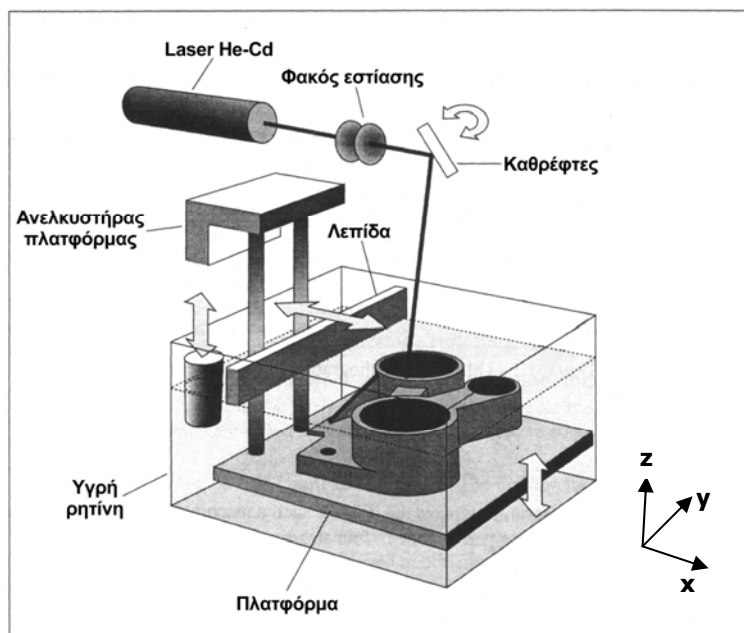
Καθώς οι τΤΚΠ εξελίσσονται συνεχώς από άποψη ακρίβειας, κόστους και αντοχής επεκτείνεται σταδιακά και η χρήση τους στην άμεση παραγωγή τελικών προϊόντων [31,32]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα άμεσης παραγωγής αποτελεί η κατασκευή ιατρικών συσκευών ή βοηθημάτων όπως ορθοδοντικών βοηθημάτων [33], μασκών απόλυτης εφαρμογής για θεραπεία εγκαυμάτων και τεχνητών μελών [34]. Τα προϊόντα αυτά κατασκευάζονται βάσει δεδομένων μαγνητικής τομογραφίας έτσι ώστε να εφαρμόζουν απόλυτα στον ασθενή. Αντίστοιχο παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή εξαρτημάτων υψηλής αντοχής για ειδικά οχήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας [35] και της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, καθώς και εξαρτημάτων πολύ μικρού μεγέθους [36].

Η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων οποιασδήποτε γεωμετρικής πολυπλοκότητας συνεπάγεται τεράστιο πεδίο πιθανών εφαρμογών των τΤΚΠ πέρα του μηχανολογικού σχεδιασμού και της κατασκευαστικής βιομηχανίας γενικότερα. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών αποτελούν η κατασκευή αρχιτεκτονικών μοντέλων και μακετών [37, 38, 39], μοντέλων πραγματικών ή φανταστικών χαρακτήρων κινηματογραφικών ταινιών, ιατρικών μοντέλων για τον προ-εγχειρητικό προγραμματισμό [40], παλαιοντολογικών μοντέλων [41], καθώς και αντικειμένων καλλιτεχνικής φύσεως [42]. Η χρησιμοποίηση συστημάτων ΤΚΠ μάλιστα αναμένεται να επεκταθεί ακόμα περισσότερο όσο επεκτείνεται η ιδέα της παραγωγής και ανάπτυξης προϊόντων από απόσταση μέσω του Διαδικτύου [43].

1.2 Η Στερεολιθογραφία

Η Στερεολιθογραφία αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και γνωστή τΤΚΠ, καθώς ήταν η πρώτη τεχνική η οποία αξιοποιήθηκε εμπορικά (το πρώτο εμπορικό σύστημα Στερεολιθογραφίας τέθηκε σε λειτουργία το 1989). Πρώτη ύλη για την τεχνική της Στερεολιθογραφίας αποτελούν διάφοροι τύποι φωτοπολυμεριζόμενων εποξειδικών ρητινών, πολυμερών υγρής μορφής που έχουν την ιδιότητα να στερεοποιούνται (πολυμερίζονται) εάν εκτεθούν σε ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος. Το αντικείμενο κατασκευάζεται μέσα σε ένα δοχείο υγρής ρητίνης με διαδοχική στερεοποίηση των στρωμάτων του από κάτω προς τα πάνω (Σχήμα 1.2). Η διαδικασία κατασκευής ξεκινά με την

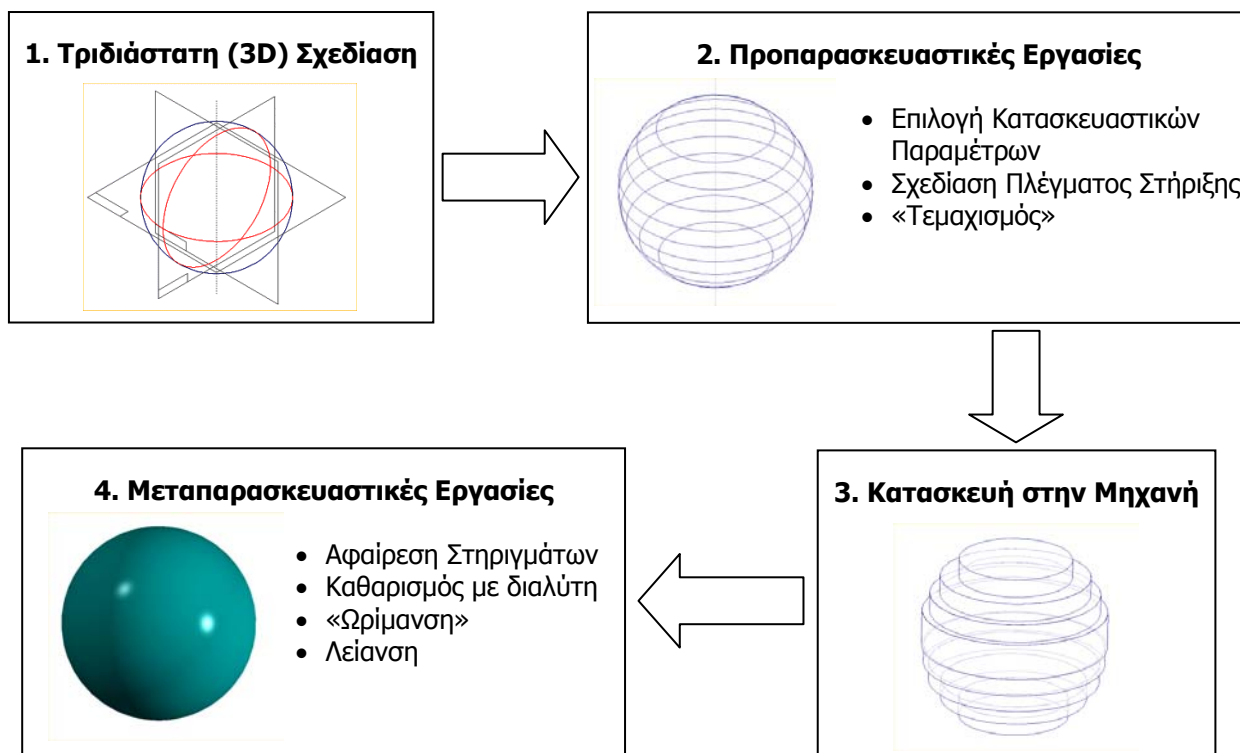
πλατφόρμα της μηχανής, πάνω στην οποία θα κατασκευασθεί το αντικείμενο, βυθισμένη ελάχιστα κάτω από τη στάθμη της ρητίνης. Σε αυτή τη θέση πραγματοποιείται η στερεοποίηση του πρώτου στρώματος του αντικειμένου, κατά την οποία η ηλεκτρονικά καθοδηγούμενη εστιασμένη ακτίνα laser σαρώνει το εσωτερικό της πρώτης από τις εγκάρσιες τομές του αντικειμένου διαγράφοντας διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα. Η σάρωση (scanning) έχει ως αποτέλεσμα την στερεοποίηση / πολυμερισμό ενός λεπτού στρώματος στην περιοχή της συγκεκριμένης τομής ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια παραμένει σε υγρή κατάσταση.



Σχήμα 1.2. Σχηματική αναπαράσταση μηχανής Στερεολιθογραφίας.

Στη συνέχεια η πλατφόρμα βυθίζεται ελάχιστα (0.05-0.25 mm) μέσα στη δεξαμενή και καλύπτεται από ένα νέο στρώμα υγρής ρητίνης. Λόγω του υψηλού ιξώδους της ρητίνης και για να επιτευχθεί η ομοιόμορφη επικάλυψη των ήδη στερεοποιημένων στρωμάτων, χρησιμοποιείται μία λεπίδα η οποία διατρέχει την επιφάνεια κατά μήκος της πλατφόρμας ομαλοποιώντας τη στάθμη της ρητίνης και επικαλύπτοντας τα προηγούμενα στρώματα, μέσω μικρών οπών από όπου ρέει μικρή ποσότητα ρητίνης. Ακολουθεί η σάρωση της δεύτερης τομής του αντικειμένου, έτσι ώστε να σχηματισθεί το δεύτερο στρώμα το οποίο πολυμεριζόμενο προστίθεται στο πρώτο. Ο κύκλος επίστρωσης (recoating) – σάρωσης επαναλαμβάνεται για κάθε στρώμα ωσότου να ολοκληρωθεί το «χτίσιμο» του αντικειμένου μέσα στο κάδο της ρητίνης.

Η κατασκευή ωστόσο του αντικειμένου από την μηχανή είναι ένα από τα στάδια της συνολικής διαδικασίας παραγωγής ενός προϊόντος με την τεχνική της Στερεολιθογραφίας, ίσως μάλιστα και το απλούστερο καθώς η λειτουργία της μηχανής είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής συνολικά καθώς και οι εργασίες που επιτελούνται σε κάθε φάση της διαδικασίας.

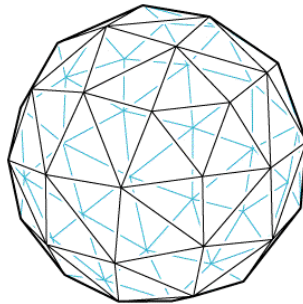


Σχήμα 1.3. Η διαδικασία παραγωγής με την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας.

Το πρώτο στάδιο, όπως ισχύει και για κάθε τΤΚΠ, αποτελεί η σχεδίαση του 3D (ψηφιακού) μοντέλου του αντικειμένου μέσω ενός συστήματος μηχανολογικής ή βιομηχανικής σχεδίασης. Η τριδιάστατη σχεδίαση είναι μία σχετικά συνηθισμένη πλέον εργασία για ένα πλήθος εφαρμογών που εκτείνονται από την απλή απεικόνιση μιας ιδέας μέχρι τον λειτουργικό, μηχανικό και υδροδυναμικό έλεγχο εξαρτημάτων και προϊόντων [44]. Σε αντίθεση με κάποιες από τις προηγούμενες εφαρμογές στην περίπτωση των τΤΚΠ υπάρχει η επιπλέον απαίτηση το 3D μοντέλο να είναι «στερεό». Ως *στερεό* μοντέλο ορίζεται το 3D μοντέλο του οποίου ο όγκος καθορίζεται απόλυτα και σαφώς (unambiguously) από τις περιβάλλουσες επιφάνειες, είναι δηλαδή εντελώς «κλειστό» έτσι ώστε να είναι σαφές πιο τμήμα του χώρου είναι εντός του μοντέλου και πιο εκτός. Σε ένα στερεό μοντέλο είναι επίσης σαφώς καθορισμένη δηλαδή η τοπολογία των επιφανειών [45], ποιες δηλαδή επιφάνειες συνδέονται μεταξύ τους και μέσω ποιων ακμών, ενώ δεν επιτρέπονται ελεύθερες ακμές (ακμές που ανήκουν σε μία μόνο επιφάνεια).

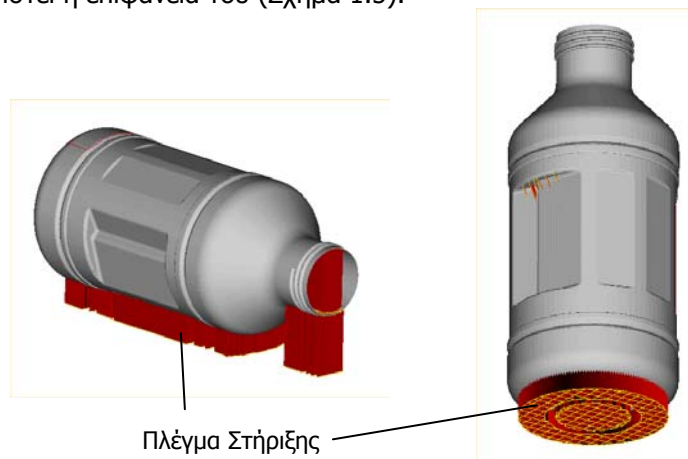
Στο δεύτερο στάδιο το 3D μοντέλο μεταφέρεται στο σύστημα Στερεολιθογραφίας όπου εκτελούνται οι προπαρασκευαστικές εργασίες. Για την μεταφορά των γεωμετρικών δεδομένων χρησιμοποιείται το πρότυπο STL (προέρχεται από το αγγλικό STereoLithography), το οποίο αποτελεί μία ψηφιδωτή (tessellated) / πολυεδρική αναπαράσταση της μορφής του αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα οι επιφάνειες του μοντέλου απεικονίζονται προσεγγιστικά ως ένα σύνολο τριγώνων, των οποίων το μέγεθος καθορίζει την ανάλυση. Κάθε τρίγωνο ορίζεται από τις τρεις κορυφές του και το κάθετο στην επιφάνειά του μοναδιαίο διάνυσμα, το οποίο «δείχνει» το εξωτερικό του μοντέλου. Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται η STL προσέγγιση μίας σφαίρας. Το πρότυπο

STL παρά τα εγγενή μειονεκτήματά του, όπως την επανάληψη των γεωμετρικών πληροφοριών και την προσεγγιστική περιγραφή των παραμετρικών επιφανειών, αποτελεί ουσιαστικά το βασικό πρότυπο μεταφοράς και αποθήκευσης γεωμετρικών δεδομένων για τις ΤΤΚΠ, λόγω κυρίως της απλότητας του [46].



Σχήμα 1.4. Παράδειγμα πολυεδρικής STL αναπαράστασης σφαίρας.

Με βάση το STL μοντέλο του αντικειμένου εκτελούνται οι προπαρασκευαστικές εργασίες με πρώτη την επιλογή προσανατολισμού και παραμέτρων κατασκευής. Ως προσανατολισμό κατασκευής (build orientation) ορίζουμε την θέση του αντικειμένου σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής και ειδικά τον άξονα κατασκευής Z , ο οποίος ορίζει την κατεύθυνση κατά την οποία προστίθενται τα διαδοχικά στρώματα. Εκτός του προσανατολισμού ο χειριστής επιλέγει σε αυτήν την φάση τις παραμέτρους κατασκευής του μοντέλου, σημαντικότερη των οποίων αποτελεί το πάχος στρώματος (layer thickness), το οποίο είναι ενιαίο για όλο το αντικείμενο. Αφού επιλεγούν οι βασικές παράμετροι υπολογίζονται αυτόματα τα σημεία που χρειάζονται στήριξη και δημιουργείται το πλέγμα στήριξης (supports). Το πλέγμα αυτό είναι απαραίτητο έτσι ώστε να διασφαλισθεί ότι η κατασκευή θα είναι στέρεη, ότι τμήματα του αντικειμένου που εξέχουν ή «κρέμονται» σύμφωνα με τον επιλεχθέντα προσανατολισμό δε θα «βουλιάξουν» ή θα παρασυρθούν από τη λεπίδα καθώς και ότι το αντικείμενο δεν θα έρθει σε άμεση επαφή με την πλατφόρμα, και συνεπώς θα μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα και χωρίς τον κίνδυνο να τραυματιστεί η επιφάνειά του (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5. Πλέγμα στήριξης για διαφορετικούς προσανατολισμούς κατασκευής φιάλης.

Τελευταία προπαρασκευαστική εργασία είναι ο τεμαχισμός (slicing) όπου το αντικείμενο και το πλέγμα στηρίξεώς του τέμνονται από διαδοχικά επίπεδα που απέχουν απόσταση ίση με το επιλεχθέν πάχος στρώματος και είναι παράλληλα σε αυτό της πλατφόρμας. Στην περίπτωση του τεμαχισμού είναι ακριβέστερο να χρησιμοποιείται ο όρος «διάστημα τεμαχισμού» αντί του «πάχος στρώματος», καθώς όπως θα φανεί και από την ανάλυση σε επόμενα κεφάλαια το πραγματικό πάχος ενός στρώματος είναι μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών τομών. Ωστόσο για λόγους απλότητας και συμβατότητας με την διεθνή βιβλιογραφία θα χρησιμοποιείται ο διεθνώς καθιερωμένος όρος «πάχος στρώματος». Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι το αρχείο τομών (sliced file), μία ιεραρχημένη από κάτω προς τα πάνω «στοίβα» τομών που περιγράφουν τα στρώματα τα οποία πρέπει να κατασκευασθούν από τη μηχανή για να «χτισθεί» το αντικείμενο.

Στην τρίτη φάση της διαδικασίας, τα αρχεία τομών αντικειμένου και στηριγμάτων εισάγονται στη μηχανή Στερεολιθογραφίας και με τη ρύθμιση κάποιων δευτερευόντων παραμέτρων όπως της ταχύτητας κινήσεως της λεπίδας επικάλυψης ξεκινά η κατασκευή του αντικειμένου. Η φάση αυτή είναι εντελώς αυτοματοποιημένη και δεν απαιτείται η εποπτεία του χειριστή. Με την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής φάσης η πλατφόρμα ανυψώνεται πάνω από τη στάθμη της ρητίνης και το αντικείμενο απομακρύνεται με την βοήθεια ειδικών εργαλείων, ώστε να καθαρισθεί από τα υπάρχοντα στηρίγματα και τα υπολείμματα μη πολυμερισμένης ρητίνης. Στη φάση του καθαρισμού ο χειριστής οφείλει να φορά προστατευτικό εξοπλισμό - γάντια νεοπρενίου, προστατευτικό ένδυμα και σε κάποιες περιπτώσεις μάσκα - καθώς η ρητίνη είναι τοξικής φύσεως ενώ και οι αναθυμιάσεις του χρησιμοποιούμενου διαλύτη, ακετόνης ή TPM, είναι ανθυγιεινές σε μεγάλες ποσότητες.

Με το πέρας του καθαρισμού το αντικείμενο διαθέτει μία σχετική ελαστικότητα και δεν έχει αποκτήσει ακόμα την απαιτούμενη σκληρότητα, είναι ακόμα σύμφωνα με την χρησιμοποιούμενη ορολογία «ανώριμο» (green). Αυτό συμβαίνει διότι δεν έχει ολοκληρωθεί εντελώς η διαδικασία πολυμερισμού της στρωμάτων, διαδικασία η οποία υπό κάποιες συνθήκες μπορεί να συνεχισθεί για αρκετές ώρες ή ακόμα και ημέρες [47]. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία πολυμερισμού το αντικείμενο τοποθετείται εντός του θαλάμου «ωρίμανσης» όπου εκτίθεται για διάστημα 1-5 ωρών σε υπεριώδη ακτινοβολία, προκειμένου να επιτευχθεί ποσοστό πολυμερισμού άνω του 90% και το αντικείμενο να αποκτήσει αντοχή τέτοια που θα επιτρέπει την εκτέλεση των τελικών εργασιών τελειοποίησής του, όπως την λείανση και το βάψιμο των επιφανειών [48].

Η μέθοδος της Στερεολιθογραφίας είναι όπως προαναφέρθηκε η πιο διαδεδομένη, γεγονός που οφείλεται εν μέρει και στο ότι είναι μία από τις παλιότερες ΤΤΚΠ. Πέραν όμως αυτού η διάδοση και αποδοχή της Στερεολιθογραφίας οφείλεται και σε ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε σύγκριση με τις άλλες ΤΤΚΠ [49]. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η σχετικά υψηλή κατασκευαστική ακρίβεια, η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων οποιασδήποτε γεωμετρικής πολυπλοκότητας καθώς και η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων με λεπτά τοιχώματα και υψηλό βαθμό λεπτομέρειας. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συμπεριλαμβάνονται η σχετικά μικρή ταχύτητα κατασκευής αντικειμένων μεγάλου όγκου καθώς και η τοξικότητα και οι

μηχανικές ιδιότητες της πρώτης ύλης. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη νέων ρητινών έχει βελτιωθεί σημαντικά η αντοχή των προϊόντων/πρωτοτύπων, επιτρέποντας έτσι την επέκταση του πεδίου εφαρμογών της τεχνικής.

1.3 Το πρόβλημα της επιλογής παραμέτρων κατασκευής

Η διαδικασία της Στερεολιθογραφίας είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος της αυτοματοποιημένη. Καθαρά υπολογιστικές εργασίες όπως η τοποθέτηση στηριγμάτων και ο τεμαχισμός του ψηφιακού μοντέλου εκτελούνται αυτόματα από ειδικό λογισμικό που αναγνωρίζει τις επιφάνειες που χρειάζονται στήριξη σύμφωνα με γενικούς κανόνες και παραμέτρους που έχει προκαθορίσει ο χειριστής. Πλήρως αυτοματοποιημένη είναι και η φάση της κατασκευής του αντικειμένου από τη μηχανή. Εάν θεωρήσουμε την φάση της 3D σχεδίασης ως ανεξάρτητη της διαδικασίας, όπως πρακτικά συμβαίνει, παρατηρείται ότι ουσιαστικά ο χειριστής παρεμβαίνει μόνο κατά την φάση της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων καθώς και στο τέλος της διαδικασίας για τον καθαρισμό και τη λείανση το μοντέλου. Η σημαντικότερη από τις δύο εργασίες είναι αυτή της επιλογής των παραμέτρων κατασκευής, καθώς οι επιλογές του χειριστή κατά τη φάση αυτή καθορίζουν το κόστος, το χρόνο και την ποιότητα κατασκευής του αντικειμένου [50]. Ας σημειωθεί ότι η ποιότητα κατασκευής είναι συνάρτηση διάφορων χαρακτηριστικών του αντικειμένου όπως η διαστασιολογική ακρίβεια, η τραχύτητα επιφανειών, η αντοχή, οι μηχανικές-θερμικές ιδιότητες κλπ. Ο προσανατολισμός κατασκευής και το πάχος στρώματος αποτελούν τις δύο σημαντικότερες κατασκευαστικές παραμέτρους που ο χειριστής καλείται να ορίσει με στόχο την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ποιότητας και την ελαχιστοποίηση του κόστους-χρόνου κατασκευής. Χρόνος και κόστος κατασκευής είναι στενά συνδεδεμένα καθώς ο χρόνος αποτελεί το βασικό παράγοντα καθορισμού του κόστους.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι παραπάνω στόχοι είναι αντικρουόμενοι καθώς καλύτερη ποιότητα κατασκευής συνεπάγεται και υψηλότερο κατασκευαστικό κόστος και χρόνο, με αποτέλεσμα η ταυτόχρονη επίτευξή τους να είναι αδύνατη. Σε αυτή την περίπτωση η σημασία του κάθε κριτηρίου/στόχου καθορίζεται από την χρήση για την οποία προορίζεται το αντικείμενο. Εάν για παράδειγμα πρόκειται για απλό μοντέλο οπτικής ή αισθητικής αξιολόγησης το χαμηλό κόστος και η ταχύτητα κατασκευής αποτελούν τους βασικούς στόχους. Αντίθετα εάν το αντικείμενο προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο χύτευσης είναι σημαντικότερη η επίτευξη καλής ποιότητας κατασκευής. Η συχνότερη ωστόσο απαίτηση είναι η ικανοποίηση και των δύο στόχων στο μέγιστο βαθμό, η βέλτιστη δηλαδή απόδοση της διαδικασίας μέσω ενός συμβιβασμού μεταξύ ποιότητας και κόστους ή χρόνου. Το συγκεκριμένο πρόβλημα παρότι είναι αρκετά κοινό στη γενική του μορφή παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον στην περίπτωση της Στερεολιθογραφίας για δύο κυρίως λόγους:

- ποικιλία προϊόντων - τα προς κατασκευή αντικείμενα ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό, τόσο

από άποψη γεωμετρίας όσο και τελικών εφαρμογών (γεωμετρικά μοντέλα, λειτουργικά πρωτότυπα, πρότυπα χύτευσης κλπ.), με αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται συνεχώς οι κατασκευαστικές απαιτήσεις και περιορισμοί.

- μικρός αριθμός - ο αριθμός των απαιτούμενων αντικειμένων σπάνια ξεπερνά τα δέκα τεμάχια ανά προϊόν.

Η επιλογή της βέλτιστης ομάδας τιμών παραμέτρων από τον χειριστή για ένα συγκεκριμένο μοντέλο προϋποθέτει ότι είναι γνωστό ποιες είναι οι σημαντικότερες παράμετροι (παράγοντες) που καθορίζουν την κατασκευαστική ποιότητα, τον χρόνο και το κόστος καθώς και πως οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τα κριτήρια λήψης απόφασης. Λόγω της πολυπλοκότητας της τεχνικής της Στερεολιθογραφίας και του υψηλού αριθμού παραμέτρων οι απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα δεν είναι προφανείς αλλά είναι αποτέλεσμα της αυξανόμενης εμπειρίας του χειριστή. Η εμπειρία αυτή συνήθως έχει ποιοτική μορφή, π.χ. την μορφή κατασκευαστικών κανόνων (thumb-up rules) και πολύ σπάνια συνδυάζεται με ποσοτικά στοιχεία καθώς δεν είναι σαφώς καθορισμένες οι σχέσεις μεταξύ παραμέτρων και κριτηρίων. Προφανώς η λήψη αποφάσεων αποκλειστικά με βάση την εμπειρία του χειριστή, είναι αρκετά προβληματική και σίγουρα δεν εξασφαλίζει ότι η επιλεγείσα λύση θα είναι αντικειμενικά η βέλτιστη, ακόμα και στην περίπτωση που ο χειριστής έχει κατασκευάσει ίδια η παρόμοια μοντέλα κατά το παρελθόν.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων επίσης, η επιλογή παραμέτρων υπόκειται σε περιορισμούς σχετικούς με το κόστος, την ποιότητα ή τον χρόνο κατασκευής. Η αδυναμία ποσοτικής συσχέτισης μεταξύ παραμέτρων και κριτηρίων δεν επιτρέπει τον έλεγχο αυτών των κατασκευαστικών απαιτήσεων και περιορισμών. Ειδικά για τον χρόνο η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης δεν επιτρέπει επίσης και την βέλτιστη εκμετάλλευση του συστήματος, μέσω σωστού προγραμματισμού εργασιών και μείωσης των νεκρών χρόνων.

1.4 Στόχοι και δομή της διατριβής

Στόχο της παρούσας μελέτης αποτελεί η μελέτη του προβλήματος της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων για την τεχνική της Στερεολιθογραφίας και η ανάπτυξη ενός αντικειμενικού—«ποσοτικού» συστήματος αξιολόγησης των πιθανών επιλογών του χειριστή βάσει των εκάστοτε κατασκευαστικών απαιτήσεων και περιορισμών. Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα τέτοιο σύστημα απαιτείται η πειραματική διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ των βασικών κατασκευαστικών παραμέτρων και των κριτηρίων λήψης της απόφασης που σχετίζονται με την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο κατασκευής.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται εκτενώς το πρόβλημα της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων για την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας. Συγκεκριμένα αναλύονται ο χρόνος, το κόστος και η ποιότητα κατασκευής ενός αντικειμένου και αξιολογείται η σημασία των διαφόρων παραμέτρων κατασκευής, έτσι ώστε να καθοριστούν τα κριτήρια λήψης των αποφάσεων και οι βασικές υπό εξέταση μεταβλητές. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση των σχετικών

μελετών και μια συνοπτική παρουσίαση των διαφόρων μεθοδολογιών προσέγγισης και επίλυσης του προβλήματος, που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Με βάση τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής μελέτης και της ανάλυσης του κεφαλαίου 2 καθορίζονται και τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων, που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή.

Στα κεφάλαια 4, 5 και 6 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης του χρόνου κατασκευής, της ποιότητας των επιφανειών και της γεωμετρικής ακρίβειας ενός αντικειμένου κατασκευασμένου με την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα καθορίζονται οι σχέσεις μεταξύ των κριτηρίων λήψης της απόφασης και των βασικών μεταβλητών που αποτελούν τον πυρήνα του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 7 ερευνώνται τα πρακτικά ζητήματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη του συστήματος και που αφορούν την μορφή των γεωμετρικών δεδομένων την οποία επεξεργάζεται το σύστημα, τη μέθοδο καθορισμού και αξιολόγησης των πιθανών λύσεων και την μέθοδο παρουσίασης των αποτελεσμάτων στον χειριστή.

Μελέτες περιπτώσεων, συγκεκριμένα παραδείγματα λειτουργίας και εφαρμογές του συστήματος επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 8. Τέλος στο κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα και αποτελέσματα της παρούσας μελέτης καθώς και πιθανά θέματα μελλοντικής έρευνας σχετικά με το πρόβλημα της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων, αλλά και τις προπαρασκευαστικές εργασίες των τΤΚΠ γενικότερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανάλυση του προβλήματος

2.1 Ποιότητα κατασκευής αντικειμένου

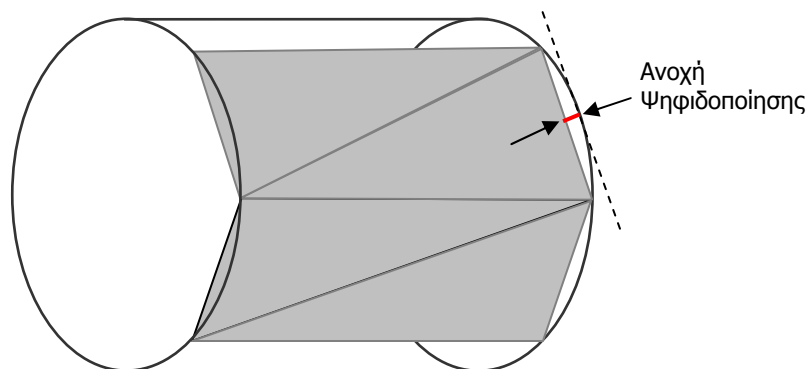
Ο όρος «ποιότητα κατασκευής» περιλαμβάνει συνήθως διάφορα χαρακτηριστικά και ιδιότητες ενός αντικειμένου όπως διαστασιολογική ακρίβεια, τραχύτητα επιφανειών, μηχανικές ιδιότητες, θερμικές ιδιότητες, χημικές ιδιότητες, κλπ. Η σημασία κάθε διάστασης της ποιότητας κατασκευής καθορίζεται από την φύση του αντικειμένου και τον σκοπό κατασκευής του. Στην περίπτωση της Στερεολιθογραφίας ένα μεγάλο μέρος των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος και ειδικά οι μηχανικές, θερμικές και χημικές του ιδιότητες καθορίζονται από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης εποξειδικής ρητίνης και τις αντίστοιχες ιδιοτητές της και κατά μικρότερο βαθμό από τις παραμέτρους κατασκευής [51]. Αντίθετα συνιστώσες που σχετίζονται με την πιστή απόδοση της γεωμετρίας του αντικειμένου όπως η διαστασιολογική ακρίβεια και η τραχύτητα επιφανειών είναι στενά συνδεδεμένες με τις επιλεχθείσες κατασκευαστικές παραμέτρους.

Στην περίπτωση της Στερεολιθογραφίας υπάρχουν έξι πιθανές αιτίες κατασκευαστικών σφαλμάτων και αποκλίσεων στη γεωμετρία και τις διαστάσεις μεταξύ του αρχικού 3D μοντέλου και του τελικού αντικειμένου [52]. Αυτές είναι:

- η ψηφιδοποίηση (tessellation) του CAD μοντέλου
- η κλιμακωτή υφή των επικλινών επιφανειών (staircase effect)
- ο τεμαχισμός με σταθερό διάστημα τεμαχισμού
- η υπερστερεοποίηση (overcure)
- η συρρίκνωση (shrinkage)
- η παγίδευση υγρής ρητίνης εντός του αντικειμένου κατά την κατασκευή ή «πρόβλημα δοχείου» ("trapped/closed volume" effect)

Η ψηφιδοποίηση (tessellation) ή τριγωνισμός (triangulation), η προσεγγιστική δηλαδή απόδοση των επιφανειών του CAD μοντέλου από τρίγωνα κατά το πρότυπο STL, αποτελεί την πρώτη πηγή

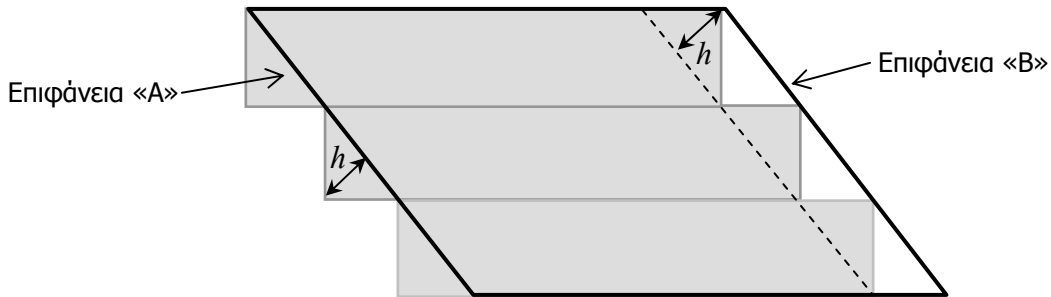
λάθους για κάθε τΤΚΠ. Η ακρίβεια στην απόδοση του αρχικού μοντέλου από το αντίστοιχο πολυεδρικό STL μοντέλο ελέγχεται συνήθως μέσω της ανοχής ψηφιοποίησης (tessellation tolerance), η οποία ορίζεται ως η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ της αρχικής επιφάνειας και των αντίστοιχων τριγωνικών επιφανειών (Σχήμα 2.1). Προφανώς όσο μικρότερη η τιμή της ανοχής τόσο ακριβέστερα αποδίδεται η γεωμετρία του αρχικού μοντέλου CAD και τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των απαιτούμενων για την απεικόνιση τριγώνων, ειδικά στις μη επίπεδες επιφάνειές του (π.χ. καμπύλες και «ελεύθερης μορφής» επιφάνειες). Καθώς το λάθος αυτό οφείλεται στην χρήση του προτύπου STL έχουν προταθεί διάφορες λύσεις για την αντιμετώπισή του, όπως ο απ' ευθείας τεμαχισμός του CAD μοντέλου [53]. Ο απ' ευθείας τεμαχισμός παρότι είναι η προφανέστερη λύση δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμος διότι μεταφέρει το πρόβλημα της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων στο σχεδιαστή CAD, ο οποίος σπάνια είναι και ο χειριστής του συστήματος ή διαθέτει την απαιτούμενη κατασκευαστική εμπειρία. Το λάθος ψηφιοποίησης έχει μειωθεί σημαντικά με την εξέλιξη της τεχνολογίας καθώς οι αυξημένες δυνατότητες των νέων Η/Υ επίλυσαν το πρόβλημα του υπολογιστικού χρόνου που εμφανιζόταν στην επεξεργασία αρχείων STL με μεγάλο αριθμό τριγώνων επιτρέποντας έτσι την χρήση αρκετά μικρής ανοχής ψηφιοποίησης (μικρότερης του 0.01 mm).



Σχήμα 2.1. Σχηματική απεικόνιση STL προσέγγισης κυλινδρικής επιφάνειας.

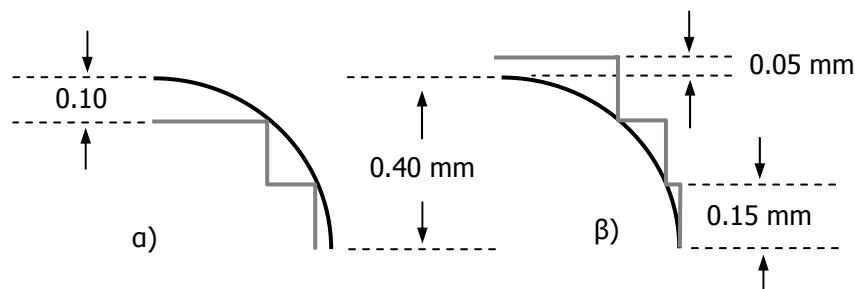
Το φαινόμενο κλίμακας (staircase effect) αποτελεί αναπόφευκτο αποτέλεσμα του «στρωματικού» χαρακτήρα των τΤΚΠ. Παρατηρείται σε όλες τις επικλινείς επιφάνειες, σε όλες δηλαδή τις μη οριζόντιες ή κάθετες επιφάνειες του αντικειμένου σύμφωνα με τον προσανατολισμό κατασκευής. Σχηματικά το φαινόμενο κλίμακας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2, όπου εμφανίζεται η κάθετη τομή (προφίλ) του 3D μοντέλου και του αντίστοιχου μοντέλου Στερεολιθογραφίας ενός αντικειμένου, το οποίο εμφανίζει «σκαλοπάτι» στις επικλινείς του επιφάνειες «Α» και «Β». Για την μέτρηση της έντασης του φαινομένου χρησιμοποιείται συνήθως το ύψος «οδόντωσης» h (cusp height). Το ύψος «οδόντωσης» μίας επιφάνειας εξαρτάται από το πάχος στρώματος και από την κλίση της επιφάνειας, η οποία αντίστοιχα καθορίζεται από τον επιλεχθέντα προσανατολισμό κατασκευής. Εάν το φαινόμενο κλίμακας οδηγεί σε απώλεια όγκου σε σχέση με το 3D μοντέλο, όπως π.χ. στην επιφάνεια «Β» του Σχήματος 2.2 τότε έχουμε αρνητικό σφάλμα κλίμακας. Αντίθετα εάν το φαινόμενο κλίμακας προκαλεί προσθήκη επιπλέον υλικού όπως στην επιφάνεια «Α» τότε

έχουμε θετικό σφάλμα κλίμακας. Η απάλειψη του σφάλματος κλίμακας επιτυγχάνεται μέσω λείανσης των επιφανειών ή κάλυψης (πρόσθεσης υλικού), ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος (αντίστοιχα θετικού ή αρνητικού σφάλματος). Οι εργασίες λείανσης/κάλυψης εκτελούνται συνήθως χειρωνακτικά, γεγονός που προφανώς μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών και των ονομαστικών διαστάσεων ενός αντικειμένου.



Σχήμα 2.2. Σχηματική απεικόνιση του ύψους «οδόντωσης» επικλινών επίπεδων επιφανειών.

Όπως προαναφέρθηκε, στη φάση του τεμαχισμού υπολογίζονται με βάση το ψηφιδωτό (STL) μοντέλο οι διαδοχικές οριζόντιες τομές, οι οποίες περιέχουν ουσιαστικά τις απαραίτητες για την κατασκευή γεωμετρικές πληροφορίες. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών τομών - η οποία ανταποκρίνεται στο πάχος των διαδοχικών στρωμάτων ρητίνης - είναι σταθερή. Συνεπώς υπάρχει πάντα η πιθανότητα να έχουμε απώλεια στην ακρίβεια απόδοσης ορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών (features), είτε γιατί αυτά είναι μικρότερα του χρησιμοποιούμενου πάχους στρώματος, είτε διότι το ύψος στο οποίο βρίσκεται κάποιο μέρος του γεωμετρικού χαρακτηριστικού δεν αποτελεί ακέραιο πολλαπλάσιο της τιμής του πάχους στρώματος (build-quantization error), περίπτωση η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Προφανώς όσο μικρότερο το πάχος στρώματος τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα εμφάνισης ανάλογων λαθών κατά τον τεμαχισμό. Ωστόσο η χρήση πολύ μικρού πάχους στρώματος (≤ 0.1 mm) είναι συνήθως κατασκευαστικά αδύνατη ενώ μπορεί επίσης να επιβαρύνει υπέρογκα το χρόνο και το κόστος κατασκευής.

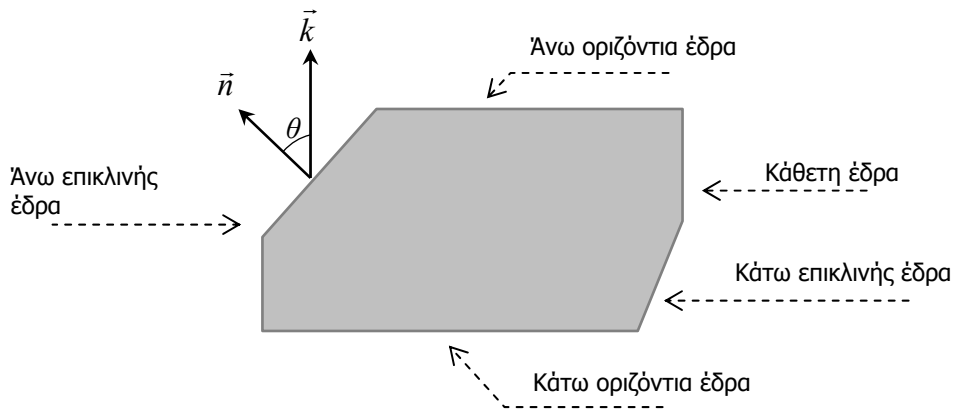


Σχήμα 2.3. Σφάλμα τεμαχισμού αρνητικό (α) και θετικό (β).

Η υπερστερεοποίηση (overcure) των στρωμάτων ρητίνης εμφανίζεται στις «κάτω» (down-facing) επιφάνειες του αντικειμένου έτσι όπως αυτές ορίζονται από τον προσανατολισμό κατασκευής του αντικειμένου. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των εδρών ενός πολυέδρου ανάλογα με την γωνία θ που σχηματίζει το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα \vec{n} της έδρας με

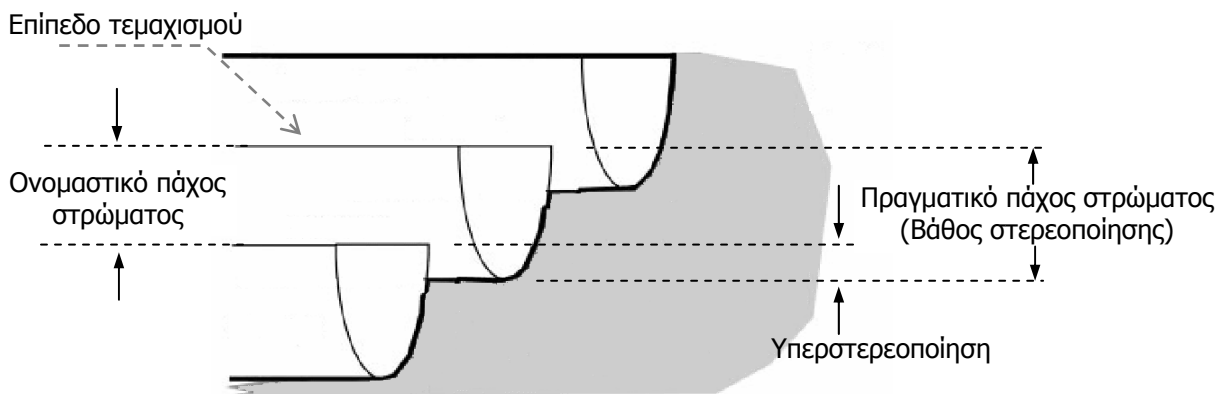
την διεύθυνση κατασκευής, τον άξονα Z δηλαδή της μηχανής (που χαρακτηρίζεται από το μοναδιαίο διάνυσμα \vec{k}). Με βάση λοιπόν το εσωτερικό γινόμενο των δύο διανυσμάτων ορίζονται οι εξής τύποι εδρών:

- άνω οριζόντια έδρα εάν $\vec{n} \cdot \vec{k} = 1$ ($\theta=0^\circ$).
- κάτω οριζόντια έδρα εάν $\vec{n} \cdot \vec{k} = -1$ ($\theta=180^\circ$)
- κάθετη έδρα εάν $\vec{n} \cdot \vec{k} = 0$ ($\theta=90^\circ$)
- άνω επικλινής έδρα εάν $0 < \vec{n} \cdot \vec{k} < 1$ ($\theta < 90^\circ$)
- κάτω επικλινής έδρα εάν $-1 < \vec{n} \cdot \vec{k} < 0$ ($\theta > 90^\circ$)



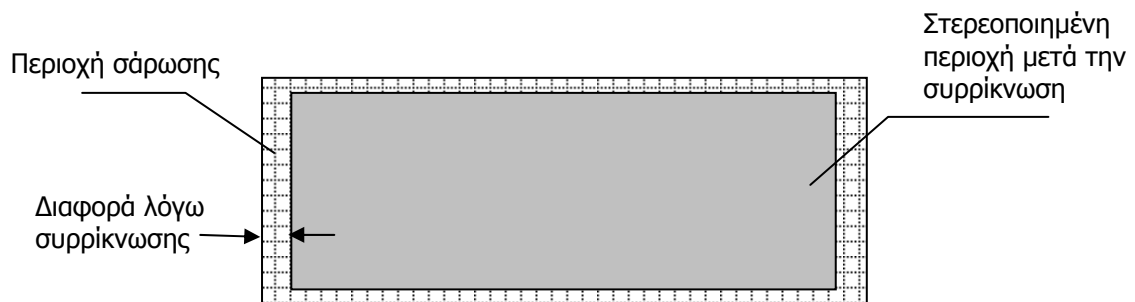
Σχήμα 2.4. Τύποι εδρών ανάλογα με τον προσανατολισμό κατασκευής.

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να γίνει η διάκριση μεταξύ του πραγματικού πάχους στρώματος και του ονομαστικού. Ως ονομαστικό πάχος στρώματος ορίζουμε την κάθετη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών τομών (διάστημα τεμαχισμού) του αντικειμένου, παράμετρο την οποία όπως προαναφέρθηκε καθορίζει ο χειριστής πριν τον γεωμετρικό «τεμαχισμό» του αντικειμένου. Ωστόσο για να υπάρξει σύνδεση και συνεκτικότητα μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων απαιτείται η στερεοποίηση των στρωμάτων σε βάθος μεγαλύτερο του ονομαστικού πάχους στρώματος, με αποτέλεσμα το πραγματικό πάχος (ή βάθος στερεοποίησης) κάθε στρώματος να είναι μεγαλύτερο της ονομαστικής / θεωρητικής του τιμής. Ως υπερστερεοποίηση ορίζουμε την διαφορά μεταξύ του ονομαστικού και του πραγματικού πάχους ενός στρώματος (Σχ. 2.5).



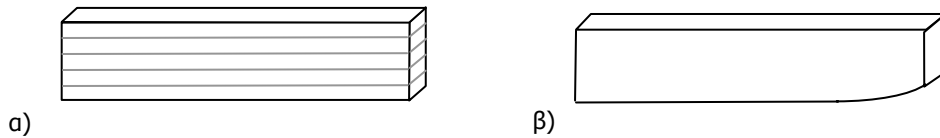
Σχήμα 2.5. Σχηματική αναπαράσταση της υπερστερεοποίησης.

Όπως συμβαίνει με κάθε πολυμερές έτσι και κατά τον πολυμερισμό της ρητίνης Στερεολιθογραφίας εμφανίζεται το φαινόμενο της συρρίκνωσης. Η συρρίκνωση μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας κατασκευής επηρεάζοντας ανάλογα την διαστασιολογική ακρίβεια του αντικειμένου. Αποτέλεσμα της συρρίκνωσης αποτελεί η διαφορά μεταξύ των διαστάσεων κατά την X και Y διεύθυνση (ως XY ορίζουμε το επίπεδο της πλατφόρμας) του τελικού στερεοποιημένου/πολυμερισμένου στρώματος ρητίνης και των αντίστοιχων διαστάσεων της περιοχής, η οποία εκτίθεται σε ακτινοβολία - σαρώνεται, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Η απώλεια στις διαστάσεις είναι ευθέως ανάλογη των διαστάσεων της περιοχής που σαρώνεται και για αυτό το λόγο το παρατηρούμενο φαινόμενο ονομάζεται γραμμική συρρίκνωση (linear shrinkage). Εκτός της γραμμικής συρρίκνωσης παρατηρείται σε κάποιες περιπτώσεις μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας «χτισίματος» του αντικειμένου το φαινόμενο της ογκομετρικής συρρίκνωσης (volumetric shrinkage), το οποίο μπορεί να προκαλέσει παραμορφώσεις στην γεωμετρική μορφή του αντικειμένου. Το μέγεθος των παραμορφώσεων είναι αντιστρόφως ανάλογο του βαθμού πολυμερισμού που επιτυγχάνεται κατά την στερεοποίηση των στρωμάτων από την μηχανή [54]. Με τον όρο βαθμός ή ποσοστό πολυμερισμού ορίζεται το ποσοστό του όγκου του αντικειμένου που έχει πολυμεριστεί πλήρως σε σχέση με το συνολικό όγκο του.



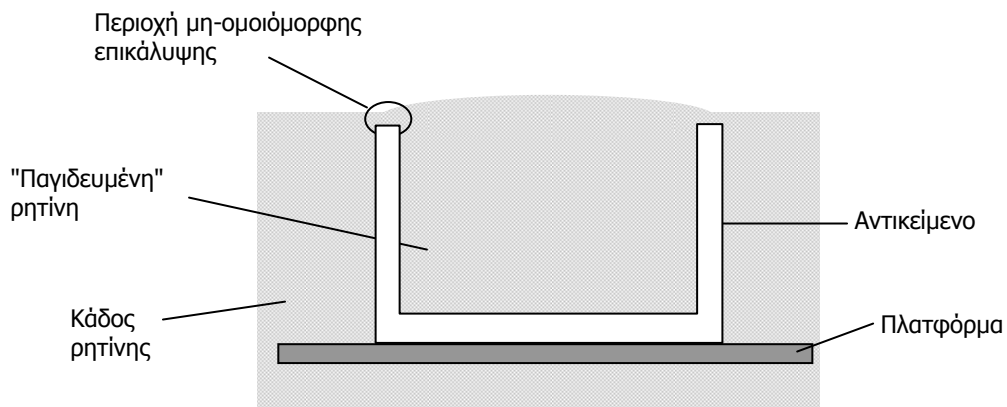
Σχήμα 2.6. Σχηματική αναπαράσταση της γραμμικής συρρίκνωσης.

Το ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης μπορεί να υπολογισθεί πειραματικά έτσι ώστε η υπό σάρωση περιοχή να μεγεθυνθεί ανάλογα και να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια διαστάσεων του στρώματος. Λόγω όμως της γραμμικής συρρίκνωσης και της απαίτησης για υπερστερεοποίηση των στρωμάτων υγρής ρητίνης παρατηρείται επιπλέον η εμφάνιση παραμορφώσεων κύρτωσης (curl distortion). Οι παραμορφώσεις αυτές εμφανίζονται στα όρια (περίγραμμα) των ήδη στερεοποιημένων στρωμάτων, τα οποία παραμορφώνονται κάθετα λόγω των δυνάμεων/τάσεων συρρίκνωσης που αναπτύσσονται στα αμέσως επόμενα στρώματα ρητίνης. Το φαινόμενο των παραμορφώσεων κύρτωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7. Το μέγεθος της παρατηρούμενης κύρτωσης είναι ανάλογο του ποσοστού γραμμικής συρρίκνωσης της ρητίνης και του βάθους στερεοποίησης καθώς όσο αυξάνονται τα δύο αυτά μεγέθη, αυξάνονται αντίστοιχα οι δυνάμεις που ασκούνται κατά την στερεοποίηση ενός στρώματος στο αμέσως προηγούμενό του.



Σχήμα 2.7. Θεωρητική (α) και τελική μορφής (β) παραλληλεπίπεδου λόγω κύρτωσης.

Ο όρος «πρόβλημα δοχείου» (container effect) ή «κλειστού όγκου» (closed volume) χρησιμοποιείται στην περίπτωση παγίδευσης ρητίνης εντός του αντικειμένου κατά την διάρκεια της κατασκευής. Σε αυτή την περίπτωση λόγω των επιφανειακών τάσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της ρητίνης δεν έχουμε ομοιόμορφη κατανομή υγρής ρητίνης στα όρια μεταξύ των ήδη στερεοποιημένων περιοχής και της παγιδευμένης ρητίνης (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8. Σχηματική αναπαράσταση του προβλήματος δοχείου.

Η ένταση του προβλήματος εξαρτάται από δύο παράγοντες, το ιξώδες της ρητίνης (όσο μεγαλύτερο τόσο μεγαλύτερες οι επιφανειακές τάσεις) και την γεωμετρία της περιοχής όπου παγιδεύεται ποσότητα ρητίνης [55]. Στην περίπτωση που το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι αρκετά έντονο υπάρχουν δύο πιθανές λύσεις, είτε η επιλογή ενός προσανατολισμού κατασκευής όπου δεν εμφανίζονται «δοχεία» παγιδευμένης ρητίνης είτε η σχεδίαση οπών διαφυγής στο CAD/STL μοντέλο, έτσι ώστε να μην εμποδίζεται η ροή ρητίνης εκτός της προβληματικής περιοχής [56]. Φυσικά η δεύτερη λύση συνεπάγεται νέα προβλήματα όπως η επιλογή της θέσης και της διαμέτρου των οπών διαφυγής καθώς και το επιπλέον πρόβλημα της κάλυψής τους στη φάση των τελικών εργασιών.

2.2 Κατασκευαστικό κόστος και χρόνος

Το κόστος και ο χρόνος κατασκευής είναι δύο στενά αλληλεξαρτώμενα μεγέθη κυρίως γιατί βασικό παράγοντα καθορισμού του κόστους αποτελεί η διάρκεια κάθε σταδίου της κατασκευής. Το κόστος παραγωγής ενός αντικειμένου με τη μέθοδο της Στερεολιθογραφίας μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερα επιμέρους κόστη, αντίστοιχα με τα βασικά στάδια της διαδικασίας:

- το κόστος σχεδίασης του τριδιάστατου (3D) μοντέλου CAD

- το κόστος προπαρασκευής, το κόστος δηλαδή προετοιμασίας και επεξεργασίας των 3D δεδομένων πριν την κατασκευή
- το κόστος κατασκευής («χτισίματος») του αντικειμένου από το σύστημα της Στερεολιθογραφίας
- το κόστος των τελικών εργασιών (καθαρισμός, λείανση, «ωρίμανση»).

Πρακτικά το κόστος σχεδίασης θεωρείται ανεξάρτητο της διαδικασίας, καθώς το τριδιάστατο μοντέλο CAD μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές (δημιουργία μηχανολογικών σχεδίων, προγραμματισμός εργαλειομηχανών, λειτουργική / μηχανική ανάλυση κλπ.) στις οποίες μπορεί να επιμεριστεί το αντίστοιχο κόστος. Αφαιρώντας λοιπόν το κόστος σχεδίασης έχουμε το καθαρό κόστος παραγωγής, το οποίο όπως προαναφέρθηκε αναλύεται στο κόστος προπαρασκευής, το κόστος κατασκευής στην μηχανή της Στερεολιθογραφίας και το κόστος τελικών εργασιών που αφορά τις εργασίες καθαρισμού, λείανσης και «ωρίμανσης» του αντικειμένου.

Το κόστος προπαρασκευής υπολογίζεται βάσει του χρόνου απασχόλησης του χειριστή και του ωριαίου κόστους χρήσης του σχετικού λογισμικού. Πρακτικά για την ολοκλήρωση της προπαρασκευαστικής φάσης απαιτείται λίγος σχετικά χρόνος (30' - 1 ώρα) ενώ και το ωριαίο κόστος χρήσης του λογισμικού δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό με αποτέλεσμα το προπαρασκευαστικό κόστος να είναι σχετικά μικρό. Αντίστοιχα το κόστος τελικών εργασιών είναι κατά κύριο λόγο συνάρτηση του ωριαίας αμοιβής του τεχνίτη (ο οποίος δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με τον χειριστή της μηχανής Στερεολιθογραφίας) και του κόστους αναλωσίμων και μικροεργαλείων, κόστη τα οποία στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι επίσης αρκετά μικρά.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους συνδέεται με την λειτουργία της μηχανής και ειδικά με το κόστος απόσβεσης και συντήρησής της. Σύμφωνα με τις τωρινές τιμές το κόστος απόκτησης ενός συστήματος Στερεολιθογραφίας (μηχανή Στερεολιθογραφίας και Η/Υ-λογισμικό προπαρασκευαστικών εργασιών) είναι της τάξεως των 200.000 € ενώ το ετήσιο κόστος συντήρησης του εξοπλισμού κυμαίνεται μεταξύ 3.000-15.000 €. Με βάση τα παραπάνω κόστη υπολογίζεται το ωριαίο κόστος λειτουργίας της μηχανής, βάσει του οποίου προκύπτει το κόστος χρήσης της μηχανής. Στον υπολογισμό του συνολικού κόστους κατασκευής πρέπει φυσικά να συμπεριληφθεί και το κόστος της ρητίνης που απαιτείται για το αντικείμενο και το πλέγμα στήριξης, το οποίο είναι επίσης σχετικά υψηλό (220 €/kg) και το οποίο αποτελεί συνήθως το 15-30% του συνολικού κόστους κατασκευής [38].

Όπως είναι προφανές από την παραπάνω ανάλυση το μεγαλύτερο μέρος του κόστους παραγωγής ενός αντικειμένου με την τεχνική της Στερεολιθογραφίας συνδέεται με τον απαιτούμενο χρόνο, ειδικά με τον χρόνο κατασκευής στην μηχανή Στερεολιθογραφίας. Η εκτίμηση συνεπώς του χρόνου κατασκευής είναι ιδιαίτερα σημαντική για μία ακριβή πρόβλεψη του κόστους παραγωγής. Για τον υπολογισμό βέβαια του συνολικού χρόνου παραγωγής χρειάζεται η εκτίμηση και του χρόνου τελικής επεξεργασίας του αντικειμένου. Το θέμα της εκτίμησης του χρόνου τελικής επεξεργασίας δεν αποτελεί αντικείμενο έρευνας στην παρούσα διατριβή. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι ο χρόνος τελικής επεξεργασίας εξαρτάται κυρίως από την εμπειρία και επιδεξιότητα του

τεχνικού, έχει δηλαδή έντονα υποκειμενικό χαρακτήρα, και επηρεάζει ελάχιστα το συνολικό κόστος.

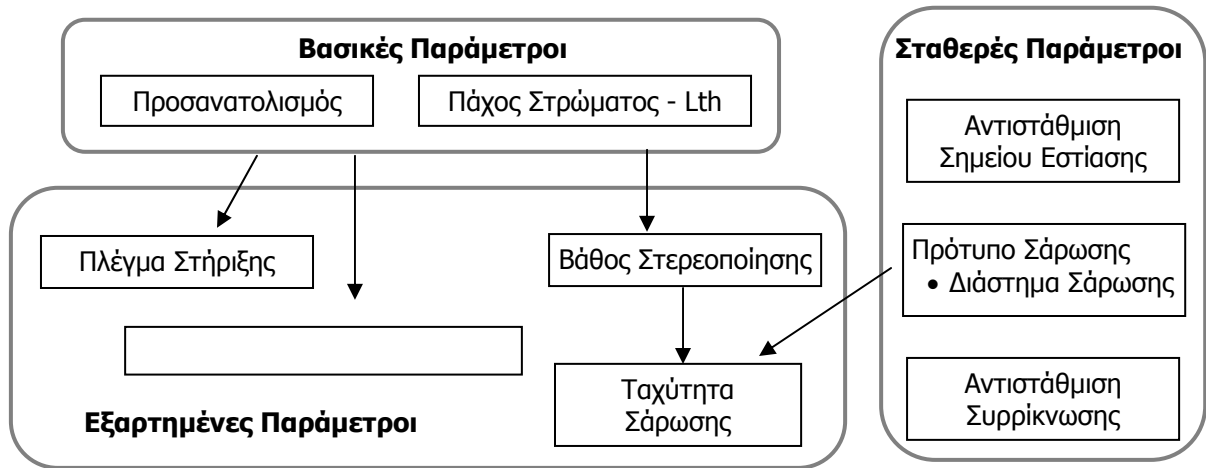
Η δυνατότητα ακριβούς πρόβλεψης του κατασκευαστικού κόστους και χρόνου είναι εξαιρετικά χρήσιμη και για μια σειρά άλλων πρακτικών προβλημάτων, (εκτός του προβλήματος επιλογής προσανατολισμού ή του πάχους στρώματος), όπως ο χρονικός προγραμματισμός λειτουργίας της μηχανής (περιορισμός δηλαδή των «νεκρών» διαστημάτων), η σύνταξη προσφοράς για την κατασκευή ενός αντικειμένου, η ανάλυση σκοπιμότητας χρησιμοποίησης της μεθόδου για μια δεδομένη εφαρμογή κλπ.

2.3 Κατασκευαστικές παράμετροι και μεταβλητές

Τόσο η ποιότητα όσο και ο χρόνος και το κόστος κατασκευής με τη μέθοδο της Στερεολιθογραφίας εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων και μεταβλητών που συσχετίζονται με διάφορους παράγοντες όπως τη γεωμετρία του αντικειμένου, τη χρησιμοποιούμενη ρητίνη, τα χαρακτηριστικά του συστήματος, τον χειριστή ακόμα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Σύμφωνα με την ανάλυση των Schaub et al. [57] οι παράμετροι / μεταβλητές αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες :

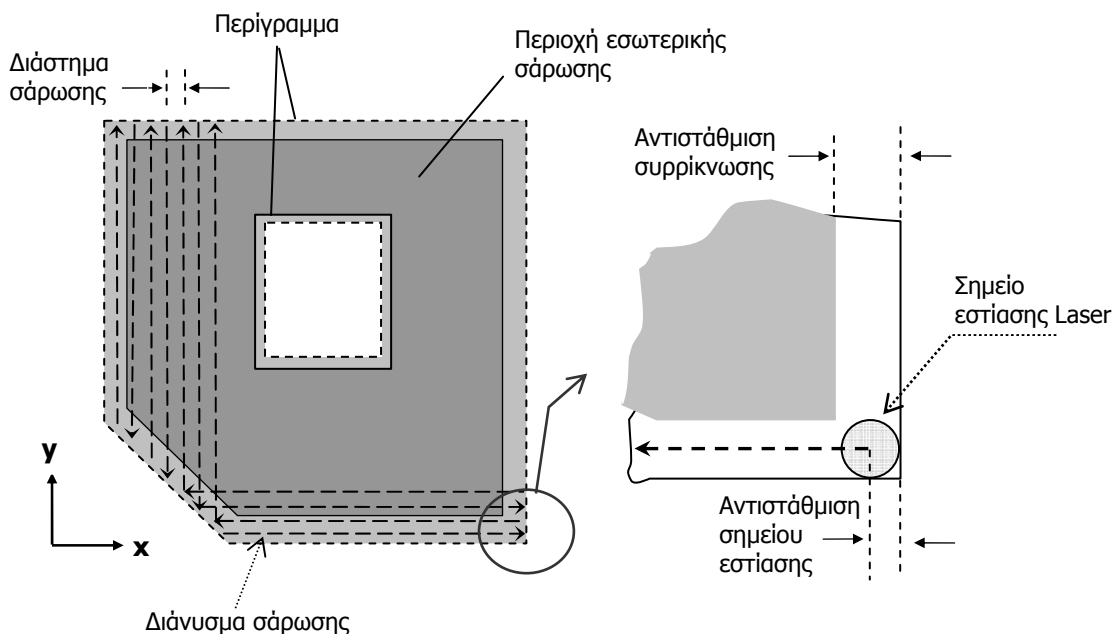
- τις ελεγχόμενες από τον χειριστή παράμετροι (control variables), όπως το πάχος στρώματος και ο προσανατολισμός
- τις σταθερές παραμέτρους (held-constant variables), όπως οι ιδιότητες της ρητίνης και το μέγεθος του σημείου εστίασης του laser
- τις παραμέτρους διατάραξης της λειτουργίας της μηχανής (nuisance variables), όπως η ηλικία του laser και οι περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για να είναι δυνατή η κατασκευή ενός καλού ποιοτικά αντικειμένου με τη μέθοδο της Στερεολιθογραφίας πρέπει αρχικά να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι τιμές των σταθερών παραμέτρων, ενώ σε ό,τι αφορά τις μεταβλητές διατάραξης της λειτουργίας απαιτείται μέτρηση και μερικός έλεγχος των τιμών τους όπου αυτό είναι δυνατό (π.χ. σταθεροποίηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος εντός κάποιων ορίων), περιορίζοντας έτσι την επιρροή τους. Εφόσον μετρηθούν ακριβώς οι τιμές και εξασφαλισθεί ο σχετικός έλεγχος των παραπάνω μεταβλητών απομένει πλέον στο χειριστή να καθορίσει τις τιμές των ελεγχόμενων παραμέτρων, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι κατασκευαστικές απαιτήσεις ακρίβειας, κόστους ή χρόνου. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες του εξεταζόμενου συστήματος (*EOS - Stereos Desktop S*) προτείνεται η ταξινόμηση των ελεγχόμενων κατασκευαστικών παραμέτρων σε τρεις κατηγορίες, τις βασικές, τις σταθερές και τις εξαρτημένες. Οι τρεις κατηγορίες κατασκευαστικών παραμέτρων και οι αντίστοιχες παράμετροι παρουσιάζονται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9. Ταξινόμηση κατασκευαστικών παραμέτρων για το σύστημα *EOS-Stereos Desktop S*.

Ο προσανατολισμός κατασκευής και το πάχος στρώματος είναι οι βασικές ελεγχόμενες μεταβλητές κατασκευής, αυτές που ουσιαστικά καλείται ο χειριστής να καθορίσει στην προπαρασκευαστική φάση. Οι υπόλοιπες μεταβλητές είτε καθορίζονται από τις δύο βασικές είτε έχουν σταθερή τιμή η οποία υπολογίζεται βάσει δοκιμών κατά την εγκατάσταση ή συντήρηση του μηχανήματος. Στις σταθερές παραμέτρους για το εξεταζόμενο σύστημα Στερεολιθογραφίας συγκαταλέγεται το πρότυπο σάρωσης (scanning pattern) καθώς και οι αντισταθμίσεις σημείου εστίασης και συρρίκνωσης, παράμετροι οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.10.

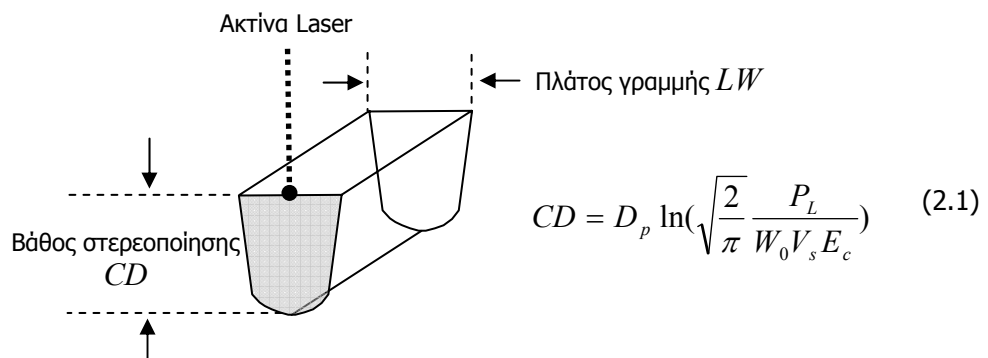


Σχήμα 2.10. Σχηματική αναπαράσταση ορθογωνικού προτύπου και παραμέτρων σάρωσης.

Η σάρωση μίας τομής περιλαμβάνει δύο φάσεις την σάρωση του περιγράμματος και την σάρωση του εσωτερικού. Στην σάρωση του περιγράμματος η ακτίνα διαγράφει το περίγραμμα της τομής (εσωτερικό και εξωτερικό) ενώ στην σάρωση εσωτερικού την περιοχή η οποία περικλείεται από το

περίγραμμα. Η σάρωση εσωτερικού ακολουθεί ένα σταθερό πρότυπο το οποίο στην περίπτωση του συστήματος *Stereos Desktop S* έχει τετραγωνική μορφή, αποτελείται δηλαδή από διαδοχικά διανύσματα παράλληλα στους X και Y άξονες της μηχανής. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παράλληλων διανυσμάτων σάρωσης ορίζεται ως το διάστημα σάρωσης. Για την αντιστάθμιση της γραμμικής συρρίκνωσης (shrinkage compensation) χρησιμοποιείται το ποσοστό συρρίκνωσης, το οποίο ισούται με την ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των διαστάσεων της περιοχής σάρωσης και του τελικού στερεοποιημένου στρώματος. Το ποσοστό συρρίκνωσης για κάθε άξονα όπως και η αντιστάθμιση σημείου εστίασης (beam-width compensation) υπολογίζονται πειραματικά μέσω της κατασκευής και μέτρησης ειδικών δοκιμών [58].

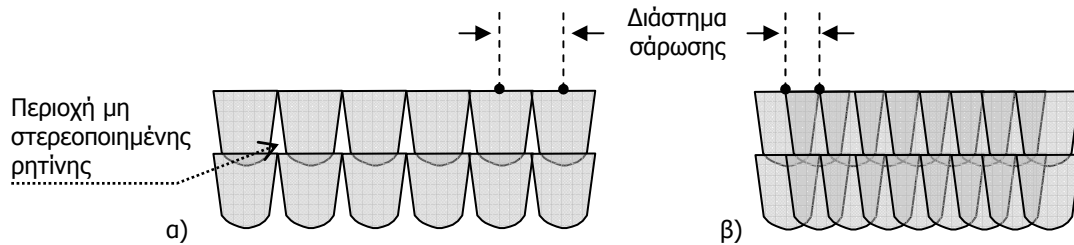
Κατά την σάρωση ενός διανύσματος στερεοποιείται μία λεπτή γραμμή («νήμα») ρητίνης παραβολοειδούς διατομής, όπως απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.11. Η γεωμετρία της διατομής εξαρτάται από παραμέτρους όπως η ισχύς του laser, η διάμετρος του σημείου εστίασης, η ταχύτητα σάρωσης και οι ιδιότητες της ρητίνης. Βασικά χαρακτηριστικά μίας γραμμής σάρωσης αποτελούν το βάθος στερεοποίησης CD (Curing Depth) και το πλάτος της LW (Line Width). Το βάθος στερεοποίησης για μία γραμμή σάρωσης υπολογίζεται βάσει της σχέσης (2.1) η οποία προτάθηκε από τον Jacobs [59], όπου με P_L συμβολίζεται η ισχύς του laser, με W_0 η ακτίνα του σημείου εστίασης, με V_s η ταχύτητα σάρωσης, με D_p το βάθος διαπερατότητας (penetration depth) της ρητίνης και με E_c η κρίσιμη ενέργεια (critical energy) πολυμερισμού της ρητίνης. Η σχέση 2.1 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του βάθους στερεοποίησης στην σάρωση περιγράμματος.



Σχήμα 2.11. Σχηματική αναπαράσταση γραμμής σάρωσης.

Σημαντική παράμετρο για την σάρωση εσωτερικού αποτελεί το διάστημα σάρωσης, το οποίο σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες καθορίζει την ακρίβεια [57,60,61] και προφανώς τον χρόνο σάρωσης μίας τομής. Πειραματικές μελέτες του βαθμού πολυμερισμού και της ακρίβειας απόδοσης κάθε τομής έδειξαν ότι το διάστημα σάρωσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο έτσι ώστε να αποφευχθεί η παρουσία περιοχών μη στερεοποιημένης ρητίνης εντός του αντικειμένου (Σχήμα 2.12), οι οποίες συνεπάγονται επιπλέον συρρίκνωση μετά το πέρας της διαδικασίας κατασκευής [54,62]. Πρακτικά λοιπόν η τιμή του διαστήματος σάρωσης είναι επίσης σταθερή και ισούται με το 60% της ακτίνας του σημείου εστίασης (≈ 0.05 mm για το εξεταζόμενο σύστημα

Στερεολιθογραφίας), έτσι ώστε να υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των διαδοχικών γραμμών σάρωσης [63]. Κατά αυτό τον τρόπο πέρα του μεγάλου βαθμού πολυμερισμού εξασφαλίζεται και μικρή τραχύτητα των άνω και κάτω επιφανειών κάθε στρώματος καθώς και μεγαλύτερη αντοχή/σταθερότητα του «ανώριμου» (green) αντικειμένου [62].



Σχήμα 2.12. Σάρωση στρωμάτων με μεγάλο (α) και μικρό (β) διάστημα σάρωσης.

Η εφαρμογή πολύ μικρού διαστήματος σάρωσης, όπως είναι λογικό, συνεπάγεται μεγαλύτερο βάθος στερεοποίησης από αυτό μίας μεμονωμένης γραμμής καθώς οι γραμμές σάρωσης επικαλύπτονται. Ακόμα μεγαλύτερο βάθος στερεοποίησης θα παρατηρηθεί εάν έχουμε σάρωση και στους δύο άξονες διότι το στρώμα πλέον λαμβάνει διπλάσια ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή το βάθος στερεοποίησης του στρώματος CD_L (layer curing depth) υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$CD_L = D_p \ln\left(\frac{mP_L}{h_s V_s E_c}\right) \quad (2.2)$$

όπου με h_s συμβολίζεται το διάστημα σάρωσης (hatching space) και m είναι ο αριθμός σαρώσεων της τομής (εάν μία τομή σαρωθεί και στις δύο διευθύνσεις $m = 2$). Θεωρώντας το διάστημα σάρωσης σταθερό ο έλεγχος του βάθους στερεοποίησης ενός στρώματος επιτυγχάνεται με προσαρμογή της ταχύτητας σάρωσης V_s . Η βέλτιστη ταχύτητα σάρωσης για δεδομένο πάχος στρώματος καθορίζεται πειραματικά και ισούται με την μέγιστη ταχύτητα σάρωσης με την οποία επιτυγχάνεται συνεκτική σύνδεση κάθε νέου στρώματος με το αμέσως προηγούμενο [58, 59]. Για κάθε λοιπόν τιμή του πάχους στρώσης καθορίζεται πειραματικά το βέλτιστο βάθος στερεοποίησης και η αντίστοιχη βέλτιστη ταχύτητα σάρωσης που εξασφαλίζουν την συνεκτικότητα των στρωμάτων με το μικρότερο δυνατό κόστος. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του συστήματος Stereos Desktop S, οι ιδιότητες της χρησιμοποιούμενης ρητίνης και οι ομάδες παραμέτρων κατασκευής παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π1.

Τις δύο τελευταίες εξαρτημένες παραμέτρους αποτελούν το πλέγμα στήριξης και η ταχύτητα της λεπίδας επικάλυψης, οι οποίες καθορίζονται από τον επιλεχθέντα προσανατολισμό κατασκευής. Ειδικά για το πλέγμα στήριξης ο χειριστής έχει την δυνατότητα επέμβασης διορθωτικού χαρακτήρα για την απλοποίηση ή την ενίσχυση των περιοχών που κρίνει ότι είναι απαραίτητο, ο βασικός όμως όγκος και η θέση των στηριγμάτων καθορίζονται από τον προσανατολισμό κατασκευής, καθώς η

αναγνώριση των επιφανειών που χρειάζονται στήριξη γίνεται με βάση τον προσανατολισμό/κλίση τους.

Όπως είναι σαφές από την προηγηθείσα ανάλυση ο κατασκευαστικός προσανατολισμός και το πάχος στρώματος αποτελούν τις δύο βασικές παραμέτρους ελέγχου που οφείλει να προσδιορίσει ο χειριστής και συνεπώς είναι αυτές που θα μας απασχολήσουν στην παρούσα μελέτη. Προσανατολισμός και πάχος στρώματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τόσο τη διαστασιολογική ακρίβεια όσο και την ποιότητα επιφάνειας του τελικού προϊόντος. Από τον προσανατολισμό κατασκευής εξαρτάται η εμφάνιση και η ένταση των περισσότερων φαινομένων ή λαθών που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.1. Πιο συγκεκριμένα από τον επιλεγθέντα προσανατολισμό εξαρτώνται τα εξής:

- εάν και σε ποιο βαθμό θα έχει μία επιφάνεια κλιμακωτή υφή
- εάν υπάρχουν σημεία όπου σχηματίζεται «δοχείο» παγιδευμένης ρητίνης
- ποιες επιφάνειες χρειάζονται στήριξη
- ποιες διαστάσεις θα επηρεαστούν λόγω υπερστερεοποίησης
- σε ποια σημεία είναι πιθανό να εμφανισθούν καμπύλες παραμορφώσεις / κυρτώσεις
- σε ποια σημεία μπορεί να παρουσιασθούν λάθη λόγω του τεμαχισμού

Αντίστοιχα μεγάλο ρόλο στην εμφάνιση και ένταση των παραπάνω φαινομένων παίζει και η τιμή του πάχους στρώματος. Ειδικά για το φαινόμενο κλίμακας και τα λάθη τεμαχισμού το πάχος στρώματος είναι ιδιαίτερα κρίσιμο δεδομένου ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του τόσο μειώνεται η ένταση και η πιθανότητα εμφάνισης αυτών των λαθών.

Σε ό,τι αφορά τον κατασκευαστικό χρόνο και συνεπώς το αντίστοιχο κόστος ο προσανατολισμός και το πάχος στρώματος αποτελούν επίσης καθοριστικούς παράγοντες καθώς καθορίζουν παραμέτρους που είναι άμεσα συνυφασμένες με τον απαιτούμενο χρόνο, όπως:

- ο αριθμός των απαιτούμενων στρωμάτων,
- το μέγεθος του πλέγματος στήριξης και επομένως ο αντίστοιχος χρόνος κατασκευής και καθαρισμού
- η τραχύτητα των επιφανειών η οποία συναρτάται άμεσα με την διάρκεια των τελικών εργασιών λείανσης

Λόγω του πολυδιάστατου χαρακτήρα του αλλά και της σημασίας του το πρόβλημα της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων και ειδικά του προσανατολισμού κατασκευής προσέλκυσε το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών διεθνώς, οι οποίοι προτείνουν διάφορες λύσεις και προσεγγίσεις του προβλήματος. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία ανασκόπηση των μελετών αυτών καθώς και η λεπτομερής παρουσίαση της μεθόδου ανάπτυξης και των χαρακτηριστικών του προτεινόμενου συστήματος επιλογής των κατασκευαστικών παραμέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανασκόπηση βιβλιογραφίας και χαρακτηριστικά προτεινόμενου συστήματος

3.1 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Το πρόβλημα της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων και ειδικά του προσανατολισμού κατασκευής αποτέλεσε το αντικείμενο αρκετών μελετών διεθνώς. Τα βασικά σημεία διαφοροποίησης μεταξύ των διαφόρων προσεγγίσεων επίλυσης του προβλήματος αποτελούν τα κριτήρια και η μέθοδος αξιολόγησης και επιλογής της βέλτιστης λύσεως. Η απλούστερη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος είναι η επιλογή ενός κριτηρίου το οποίο έχει συνήθως τη μορφή κάποιου ποσοτικού δείκτη και η αναζήτηση του προσανατολισμού που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί την τιμή του. Καθώς στις περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός κριτήρια ακολουθείται συνήθως η μέθοδος της ταξινόμησης των κριτηρίων ανάλογα με την σημασία που τους αποδίδει ο ερευνητής ή ο χειριστής και βελτιστοποιείται ο προσανατολισμός βάσει του σημαντικότερου. Τα δευτερεύοντα κριτήρια χρησιμοποιούνται κατά αυτή την μέθοδο μόνο πληροφοριακά ή για την επιλογή μεταξύ δύο ισόβαθμων, με βάση το πρωτεύον κριτήριο, λύσεων.

Την προαναφερθείσα μέθοδο ακολουθούν οι Allen & Dutta [64] οι οποίοι επιλέγουν ως κριτήρια την συνολική επιφάνεια επαφής στηριγμάτων και αντικειμένου για κάθε λύση και την σταθερότητα του αντικειμένου κατά την κατασκευή. Ως δείκτη σταθερότητας προτείνουν την απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους του αντικειμένου και της πλατφόρμας. Βέλτιστος θεωρείται ο προσανατολισμός εκείνος κατά τον οποίο ελαχιστοποιείται η συνολική στηριζόμενη επιφάνεια. Εάν δύο προσανατολισμοί απαιτούν τον ίδιο αριθμό στηριγμάτων τότε επιλέγεται αυτός όπου η απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους του αντικειμένου και πλατφόρμας είναι μικρότερη. Πιθανές λύσεις αποτελούν όλοι οι προσανατολισμοί που προκύπτουν εάν χρησιμοποιηθεί ως βάση για την κατασκευή όλες οι επιφάνειες του κυρτού περιβλήματος (convex hull) του πολυεδρικού μοντέλου του αντικειμένου, οι οποίες έχουν εμβαδό μεγαλύτερο μίας συγκεκριμένης τιμής (ορίου).

Αντίστοιχα οι Bablani & Bagchi [65] προσδιορίζουν και ποσοτικοποιούν κάποια από τα αναμενόμενα διαστασιολογικά σφάλματα που σχετίζονται με την Στερεολιθογραφία. Η επιλογή του βέλτιστου προσανατολισμού γίνεται με αξιολόγηση όλων των πιθανών λύσεων που προκύπτουν με την διακριτή περιστροφή (κατά συγκεκριμένη γωνία) του αντικειμένου κατά έναν ή περισσότερους άξονες που επιλέγει ο χειριστής. Τα δύο κριτήρια αξιολόγησης αποτελούν ο συνολικός αριθμός στρωμάτων που απαιτούνται για την κατασκευή ή το συνολικό διαστασιολογικό σφάλμα που προκύπτει από το φαινόμενο κλίμακας και τα εγγενή χαρακτηριστικά της μεθόδου σάρωσης. Κάθε κριτήριο αξιολογείται ανεξάρτητα και προτείνεται στο χειριστή η αντίστοιχη βέλτιστη λύση.

Την μέθοδο της διακριτής περιστροφής περί του ενός ή δύο αξόνων επιλέγουν και οι Masood-Rattawong [66] για τον ορισμό του συνόλου πιθανών προσανατολισμών. Διαφοροποιούνται στην επιλογή του κριτηρίου, όπου και προτείνουν την μέτρηση της ογκομετρικού σφάλματος, της διαφοράς δηλαδή μεταξύ του όγκου του τελικού αντικειμένου και του ονομαστικού όγκου του 3D μοντέλου. Ο υπολογισμός του όγκου του κατασκευασθέντος μοντέλου γίνεται αφού πρώτα προηγηθεί τεμαχισμός του 3D μοντέλου έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η ακρίβεια της εκτίμησης.

Οι Cheng et al. [52] χρησιμοποιούν την κατασκευαστική ακρίβεια και τον κατασκευαστικό χρόνο ως πρώτο και δεύτερο σε σπουδαιότητα κριτήριο για την επιλογή προσανατολισμού. Η κατασκευαστική ακρίβεια εκτιμάται με βάση τις επιφάνειες του μοντέλου, στις οποίες αποδίδονται διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας ανάλογα με το είδος, εμβαδό και την προβλεπόμενη υφή τους σύμφωνα με τον επιλεγθέντα προσανατολισμό (κλιμακωτή, στηριζόμενη κλπ.). Ο κατασκευαστικός χρόνος υπολογίζεται έμμεσα βάσει του ύψους του αντικειμένου κατά τη διεύθυνση κατασκευής. Οι πιθανοί προσανατολισμοί επιλέγονται με βάση τις επίπεδες επιφάνειες του αντικειμένου οι οποίες εξετάζονται διαδοχικά ως βάσεις κατασκευής του αντικειμένου. Οι σχετικοί αλγόριθμοι αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας τη δομή και τις γεωμετρικές λειτουργίες ενός ευρέως διαδεδομένου εμπορικά συστήματος CAD, εντός του οποίου γίνονται και οι αντίστοιχες υπολογιστικές εργασίες.

Στις προαναφερθείσες μελέτες η επιλογή προσανατολισμού έγινε με την αναλυτική αξιολόγηση μίας σειράς πιθανών προσανατολισμών. Η βελτιστοποίηση ωστόσο κάποιου κριτηρίου είναι δυνατόν να επιτευχθεί και με την χρησιμοποίηση γεωμετρικών αλγορίθμων. Την χρήση γεωμετρικών αλγορίθμων προτείνουν οι Mahji et al. [67] με στόχο την ελαχιστοποίηση ενός από τα εξής κριτήρια:

- ύψος «οδόντωσης» (cusp height)
- όγκος των στηριγμάτων
- συνολικό εμβαδό των στηριζόμενων επιφανειών

Ο αλγόριθμος ελαχιστοποίησης του ύψους «οδόντωσης» περιλαμβάνει δύο μεθόδους επίλυσης για ελαχιστοποίηση είτε της μέγιστης είτε της μέσης εκτιμώμενης τιμής του. Για τον υπολογισμό της μέσης τιμής αποδίδεται συγκεκριμένη βαρύτητα για κάθε επιφάνεια του μοντέλου και εκτιμάται

το αντίστοιχο ύψος «οδόντωσης». Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολυέδρα οποιασδήποτε μορφής, σε αντίθεση με τον αλγόριθμο ελαχιστοποίησης του όγκου των στηριγμάτων που εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση κυρτών (convex) πολυέδρων.

Το συνδυασμό της αλγοριθμικής και της αναλυτικής μεθόδου προτείνουν οι Lang et al. [68], οι οποίοι θεωρούν την ποιότητα των επιφανειών, το χρόνο κατασκευής και τον αριθμό των στηριγμάτων ως κριτήρια επιλογής προσανατολισμού. Οποιοδήποτε από τα τρία αυτά κριτήρια μπορεί να επιλεγεί από τον χειριστή του συστήματος και να βελτιστοποιηθεί. Οι υποψήφιες λύσεις προκύπτουν δοκιμάζοντας όλες τις επίπεδες επιφάνειες που ανήκουν στο κυρτό περίβλημα (convex hull) του πολυεδρικού μοντέλου ως βάσεις κατασκευής του αντικειμένου. Ειδικά για την περίπτωση του κατασκευαστικού χρόνου δεν εξετάζεται αυτό το πεδίο λύσεων, αλλά εφαρμόζεται η αλγοριθμική προσέγγιση για την εύρεση του προσανατολισμού που ελαχιστοποιεί το ύψος της κατασκευής και συνεπώς τον αριθμό των απαιτούμενων στρωμάτων.

Οι Thompson και Crawford [69] στην μελέτη τους για το πρόβλημα του προσανατολισμού για την τεχνική της επιλεκτικής συσσωμάτωσης με Laser (SLS) προσθέτουν στα ήδη προαναφερθέντα κριτήρια επιλογής προσανατολισμού αυτό της μηχανικής αντοχής του αντικειμένου. Η εκτίμηση της αντοχής σε δεδομένα φορτία γίνεται με βάση το μοντέλο Tsai-Wu, το οποίο εφαρμόζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση λόγω της αναμενόμενης ορθοτροπικής συμπεριφοράς των αντικειμένων (η οποία οφείλεται στη διαστρωματικής τους φύση). Εκτός του κριτηρίου της μηχανικής αντοχής εξετάζονται επίσης το ύψος του αντικειμένου κατά τη διεύθυνση κατασκευής, το συνολικό εμβαδό των κλιμακωτών επιφανειών και το συνολικό εμβαδό των στηριζόμενων επιφανειών. Για την επίλυση του προβλήματος προτείνονται αλγόριθμοι που βελτιστοποιούν ένα από τα κριτήρια, ενώ για τα υπόλοιπα προτείνεται η χρήση περιορισμών. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι ισχύουν για πολυεδρικά μοντέλα.

Αρκετοί ερευνητές προτείνουν επίσης την μέθοδο του προσαρμοστικού τεμαχισμού (adaptive slicing), την χρήση δηλαδή μεταβλητού πάχους στρώματος έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη ενιαίου επιπέδου ακριβείας και να αποφευχθούν τα λάθη τεμαχισμού. Την λύση του μεταβλητού πάχους στρώματος προτείνουν οι Kulkarni & Dutta [70], οι οποίοι αναπτύσσουν ένα αλγόριθμο τεμαχισμού όπου το πάχος των στρωμάτων μεταβάλλεται ώστε η ποιότητα επιφανείας να παραμένει εντός του επιλεχθέντος ορίου ακριβείας που ορίζεται από το ύψος «οδόντωσης» (cusp height). Τα κριτήρια επιλογής προσανατολισμού αποτελούν κατά πρώτο λόγο ο συνολικός αριθμός στρωμάτων και κατά δεύτερον ο λόγος του συνολικού εμβαδού των κλιμακωτών επιφανειών προς το άθροισμα των εμβαδών όλων των επιφανειών του αντικειμένου. Η γεωμετρία του αντικειμένου παρέχεται με τη μορφή ενός πολυεδρικού μοντέλου.

Οι Hur και Lee [71] εξετάζουν τους επιλεχθέντες προσανατολισμούς με βάση τέσσερα κριτήρια, το συνολικό εμβαδό κλιμακωτών επιφανειών, τον απαιτούμενο αριθμό στρωμάτων, τον όγκο του πλέγματος στήριξης και την ύπαρξη περιοχών «κλειστού όγκου» (closed volume). Κάθε κριτήριο

εξετάζεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, ενώ το πεδίο λύσεων καθορίζεται από τον χειριστή με επιλογή των υποψήφιων προσανατολισμών. Το προτεινόμενο σύστημα λειτουργεί περισσότερο υποστηρικτικά παρέχοντας πληροφορίες στο χειριστή για καθ' έναν από τους επιλεχθέντες παράγοντες, χωρίς να εφαρμόζεται κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης ως προς κάποιο κριτήριο ή να καθορίζεται αυτόματα ένα σύνολο πιθανών προσανατολισμών. Και στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται πολυεδρικά μοντέλα ενώ αναπτύσσεται αλγόριθμος τεμαχισμού μεταβλητού πάχους στρωμάτων.

Οι Xu et al. [72] προτείνουν τη λύση του μεταβλητού πάχους στρώματος έτσι ώστε να συμβιβαστούν οι απαιτήσεις ακρίβειας και κόστους. Για τον τεμαχισμό χρησιμοποιείται ένας γενετικός (genetic) αλγόριθμος προσαρμοστικού τεμαχισμού (adaptive slicing), που υπολογίζει το πάχος των διαδοχικών στρωμάτων έτσι ώστε το εκτιμώμενο ύψος οδόντωσης να μην υπερβαίνει την ανοχή τεμαχισμού (cusp height tolerance) που ορίζεται από τον χειριστή. Ο βέλτιστος προσανατολισμός επιλέγεται ελαχιστοποιώντας την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία προκύπτει από την εξέταση τριών κριτηρίων: του αριθμού των απαιτούμενων στρωμάτων, του συνολικού εμβαδού των κάτω επιφανειών και της σταθερότητας της κατασκευής. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους ερευνητές στην εργασία αυτή τα 3D γεωμετρικά μοντέλα δεν είναι πολυεδρικά αλλά επιφανειακά μοντέλα, τα οποία τεμαχίζονται απ' ευθείας, γεγονός που θεωρητικά αυξάνει και την ακρίβεια απόδοσης της αρχικής γεωμετρίας, αφού απαλείφεται το στάδιο της μετατροπής σε αρχείο STL. Αντίστοιχη προσέγγιση ακολουθούν οι ίδιοι ερευνητές και σε μεταγενέστερη μελέτη η οποία παρουσιάζει τις διαφορές των κριτηρίων και των μεθόδων επιλογής προσανατολισμού ανάλογα με την εξεταζόμενη τΤΚΠ [73].

Εκτός των ποσοτικών δεικτών κάποιοι ερευνητές, όπως οι Frank & Fadel [74] προτείνουν την χρήση ενός έμπειρου συστήματος βασισμένο σε κρίσιμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Ως γεωμετρικά ή μορφολογικά χαρακτηριστικά (features) λαμβάνονται οι πρωταρχικές γεωμετρικές οντότητες, οι οποίες μπορούν να οριστούν παραμετρικά και χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και σχεδίαση 3D στερεών μοντέλων. Ο χειριστής επιλέγει δύο γεωμετρικά χαρακτηριστικά-στοιχεία, π.χ. μία κρίσιμη επιφάνεια, οπή κλπ., τα οποία κατατάσσει από άποψη σπουδαιότητας όσον αφορά την διαστασιολογική τους ακρίβειας. Ο βέλτιστος προσανατολισμός επιλέγεται έτσι ώστε ο άξονας του σημαντικότερου στοιχείου να ταυτίζεται με τον κάθετο άξονα της μηχανής (τη διεύθυνση «χτισίματος» του αντικειμένου). Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η ύπαρξη «σκαλοπατιού» στην επιφάνεια του κρίσιμου στοιχείου και εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

Μία αντίστοιχη προσέγγιση για την επιλογή προτείνουν οι Yew et al. [56] οι οποίοι όμως περιορίζονται στην εξέταση εκείνων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπου είναι πιθανό να παγιδευτεί ρητίνη και να παρουσιασθεί πρόβλημα «δοχείου». Σε αντίθεση με τους Frank & Fadel η αναγνώριση των «προβληματικών» γεωμετρικών χαρακτηριστικών γίνεται αυτόματα, με την επεξεργασία όμως της αναπαράστασης και των γεωμετρικών εργαλείων ανάλυσης ενός εμπορικού

συστήματος CAD, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά το έργο της αναγνώρισης.

Την συνδυασμένη χρήση εμπειρικών κανόνων και ποσοτικών δεικτών για την επιλογή του προσανατολισμού προτείνουν οι Masood και Lim [75]. Η προτεινόμενη μέθοδος στηρίζεται στη συνεργασία τεσσάρων «ευφυών» (intelligent) υποσυστημάτων. Το πρώτο υποσύστημα αξιολογεί τον προτεινόμενο προσανατολισμό βάσει της ποιότητας επιφάνειας και των διαστασιολογικών ανοχών, το δεύτερο βάσει του κόστους λειτουργίας της μηχανής και του κόστους υλικού, ενώ το τρίτο εξετάζει τις πιθανές ατέλειες λόγω συρρίκνωσης και τον αριθμό των στηριγμάτων. Το τέταρτο, τέλος, υποσύστημα επεξεργάζεται τα αποτελέσματα των άλλων τριών και σε περίπτωση αντικρουόμενων λύσεων δίνει εντολή για εύρεση νέων λύσεων. Το εμπειρο σύστημα βασίζεται σε κανόνες και προτείνει πιθανούς προσανατολισμούς βάσει του ελάχιστου ύψους και του ελάχιστου αριθμού των επικλινών επιφανειών.

Στις προαναφερθείσες μελέτες δεν τίθεται θέμα επιλογής του πάχους στρώματος είτε γιατί θεωρείται σταθερό και ανεξάρτητο του προβλήματος επιλογής προσανατολισμού είτε διότι μεταβάλλεται βάσει ορισμένων ανοχών ακριβείας. Η μοναδική μελέτη στην οποία το πρόβλημα της επιλογής παραμέτρων τίθεται σε μία ευρύτερη μορφή με την συνδυασμένη ανάλυση του προβλήματος επιλογής προσανατολισμού είναι η μελέτη των McClurkin-Rosen [76]. Τα κριτήρια στην μελέτη αυτή αποτελούν η ακρίβεια στην απόδοση των διαστάσεων, η ποιότητα επιφάνειας και ο χρόνος, η εκτίμηση των οποίων γίνεται βάσει μαθηματικών μοντέλων που προκύπτουν από την στατιστική ανάλυση πειραματικών δεδομένων. Η αξιολόγηση και επιλογή των διαφόρων λύσεων πραγματοποιείται με την χρήση σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης.

Τέλος, οι Wodziak et al. [77] προσεγγίζουν το πρόβλημα από μία αρκετά διαφορετική γωνία καθώς στην μελέτη τους το κριτήριο επιλογής προσανατολισμού αποτελεί ο μέγιστος βαθμός εκμετάλλευσης του χώρου της μηχανής κατά την κατασκευή περισσότερων του ενός αντικειμένων. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιείται βάσει του ελάχιστου παραλληλεπιπέδου που οριοθετεί κάθε αντικείμενο (bounding box), το οποίο επιτρέπεται να περιστραφεί μόνο κατά διαστήματα 90° κατά τον Z άξονα και με την χρήση γενετικών αλγόριθμων. Προφανώς χαρακτηριστικά κάθε αντικειμένου όπως η ακρίβεια ή η τραχύτητα επιφανειών δεν τίθενται υπό εξέταση. Αντίστοιχη προσέγγιση αλλά με περισσότερες δυνατότητες σε ότι αφορά την περιστροφή των αντικειμένων στον χώρο προτείνεται από τους Beascoechea – Wozny [78].

3.2 Συνοπτική παρουσίαση βιβλιογραφίας

Όπως είναι φανερό και από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας υπάρχει μία πληθώρα μεθόδων και προσεγγίσεων στο πρόβλημα της επιλογής προσανατολισμού κατά κύριο λόγο και πάχους στρώματος κατά δεύτερον. Στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται οι κρίσιμοι παράγοντες/κριτήρια κατασκευής και οι αντίστοιχοι δείκτες που χρησιμοποιούνται σε προηγούμενες μελέτες. Ο χρόνος κατασκευής είναι το κριτήριο που συναντάται συχνότερα ως πρωτεύον ή δευτερεύον κριτήριο

επιλογής του προσανατολισμού. Η εκτίμησή του γίνεται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις προσεγγιστικά με τον υπολογισμό του αριθμού των απαιτούμενων στρωμάτων είτε με τεμαχισμό του αντικειμένου είτε με διαίρεση του ύψους προς το πάχος στρώματος. Σημαντικό θεωρείται από τους περισσότερους ερευνητές και το φαινόμενο κλίμακας, το οποίο συνδέεται τόσο με την ακρίβεια στην απόδοση της γεωμετρίας όσο και με την τραχύτητα των επιφανειών. Για την μέτρηση ή τον έλεγχο του χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες συνολικής ακρίβειας όπως η διαφορά όγκου μεταξύ αντικειμένου και 3D μοντέλου και το μέσο ύψος «οδόντωσης». Ειδικά για την περίπτωση της Στερεολιθογραφίας εξετάζονται από κάποιους ερευνητές τα θέματα του μεγέθους του πλέγματος στηριγμάτων, των περιοχών κλειστού όγκου και της σταθερότητας κατασκευής. Τέλος σε κάποιες μελέτες εμφανίζεται το κριτήριο της αντοχής και του βέλτιστου βαθμού εκμετάλλευσης του χώρου της μηχανής, οι μελέτες αυτές όμως εστιάζονται στην τεχνική SLS και όχι στην Στερεολιθογραφία.

Πίνακας 3.1. Κριτήρια και δείκτες προηγούμενων μελετών

Κριτήρια	Δείκτες
Χρόνος	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Αριθμός απαιτούμενων στρωμάτων ➤ Ύψος αντικειμένου
Ένταση φαινομένου κλίμακας	<ul style="list-style-type: none"> • Συνολικό εμβαδό επιφανειών με κλιμακωτή υφή • Ογκομετρικό σφάλμα • Ακρίβεια απόδοσης επιφανειών • Μέσο/μέγιστο ύψος «οδόντωσης»
Μέγεθος Πλέγματος Στήριξης	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Συνολικό εμβαδό στηριζόμενων επιφανειών ➤ Όγκος πλέγματος στήριξης
Πρόβλημα «κλειστού όγκου»	<ul style="list-style-type: none"> • Ύπαρξη περιοχών παγίδευσης ρητίνης
Σταθερότητα κατασκευής	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Απόσταση πλατφόρμας-κέντρου βάρους
Μηχανική αντοχή	<ul style="list-style-type: none"> • Μοντέλο αντοχής Tsai-Wu
Εκμετάλλευση χώρου μηχανής	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ποσοστό ελεύθερου χώρου ➤ Αριθμός αντικειμένων

Διαφορά προσεγγίσεων παρατηρείται επίσης στην μέθοδο αξιολόγησης των λύσεων και εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Η συνηθέστερη μέθοδος είναι η ταξινόμηση των κριτηρίων ανάλογα με τη σημασία τους και η αξιολόγηση ενός αριθμού δεδομένων λύσεων με βάση το σημαντικότερο. Τα δευτερεύοντα κριτήρια σε αυτή την περίπτωση χρησιμεύουν μόνο για την επίλυση περιπτώσεων ισοβαθμίας ως προς το πρωτεύον κριτήριο ή υποστηρικτικά στην διαδικασία λήψης της απόφασης. Η βελτιστοποίηση ως προς περισσότερα του ενός κριτήρια επιτυγχάνεται σε αρκετές μελέτες μέσω μίας σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης στην τιμή της οποίας κάθε κριτήριο συμβάλλει ανάλογα με τον συντελεστή βαρύτητας που του αποδίδεται. Εκτός των ποσοτικών δεικτών

χρησιμοποιείται από κάποιους μελετητές η μέθοδος του έμπειρου συστήματος το οποίο εμπεριέχει κανόνες βέλτιστου προσανατολισμού για διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Η μέθοδος αξιολόγησης είναι στενά συνδεδεμένη και με το θέμα του ορισμού του πεδίου λύσεων, ποιοι δηλαδή προσανατολισμοί θεωρούνται υποψήφιοι, καθώς οι δύο αυτές παράμετροι ορίζουν τον χρόνο που θα απαιτηθεί για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Στις προηγηθείσες μελέτες το σύνολο των υποψήφιων προσανατολισμών προκύπτει με τις εξής μεθόδους:

- περιστροφή του αντικειμένου κατά συγκεκριμένη γωνία ως προς ένα ή δύο άξονες.
- τοποθέτηση επίπεδων επιφανειών μεγάλου σχετικά εμβαδού ως βάσεων του αντικειμένου.
- καθορισμός του πεδίου λύσεων από τον χειριστή.
- βέλτιστη τοποθέτηση κρίσιμων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.
- βέλτιστη τοποθέτηση αντικειμένου μέσω γεωμετρικών αλγορίθμων που ελαχιστοποιούν το ύψος, το φαινόμενο κλίμακας ή το μέγεθος του πλέγματος στήριξης.

Σε ό,τι αφορά το πάχος στρώματος η επιλογή των τιμών συναρτάται άμεσα με την μέθοδο τεμαχισμού. Σε αρκετές μελέτες προτείνεται η λύση του μεταβλητού πάχους στρώματος το οποίο υπολογίζεται διαδοχικά σύμφωνα με την καθορισμένη ανοχή ακριβείας. Με αυτό τον τρόπο επιχειρείται να εξασφαλισθεί ένα ενιαίο επίπεδο ακριβείας και έντασης του φαινομένου κλίμακας για τις επικλινείς επιφάνειες και να αποφευχθούν τα λάθη τεμαχισμού. Πρακτικά ωστόσο ελάχιστα εμπορικά συστήματα ΤΚΠ διαθέτουν την δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων μεταβλητού πάχους στρώματος και έτσι η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει προς το παρόν μόνο θεωρητική χρησιμότητα. Βάση λοιπόν για την πλειοψηφία των μελετών αποτελεί η υπόθεση ότι η κατασκευή πραγματοποιείται με ενιαίο πάχος στρώματος.

Ένα τελευταίο ζήτημα που προκύπτει από την μελέτη της βιβλιογραφίας είναι η μορφή των γεωμετρικών δεδομένων που εξετάζονται. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η ανάλυση γίνεται με βάση τα πολυεδρικά (STL) μοντέλα των προς κατασκευή αντικειμένων, ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις ερευνητών που αναπτύσσουν αλγόριθμους/μεθοδολογίες που ισχύουν για τριδιάστατα στερεά μοντέλα (solid models) ή επιφανειακά μοντέλα (surface models).

3.3 Χαρακτηριστικά προτεινόμενου συστήματος επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων

Με βάση την προηγηθείσα μελέτη της βιβλιογραφίας και τους περιορισμούς/χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου συστήματος Στερεολιθογραφίας EOS - Stereos Desktop S μπορούμε να καθορίσουμε τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου **ΣΥ**στήματος **Ε**πιλογής των **ΚΑ**τασκευαστικών **Πα**ραμέτρων - **ΣΥΕΚΑΠ** ως προς τις παρακάτω διαστάσεις του.

Εξεταζόμενες μεταβλητές. Το προτεινόμενο σύστημα υποστήριξης εστιάζεται στην επιλογή των δύο σημαντικότερων κατασκευαστικών παραμέτρων, έτσι όπως προκύπτουν και από την ανάλυση

της παραγράφου 2.3, τον προσανατολισμό και το πάχος στρώματος. Οι υπόλοιπες κατασκευαστικές παράμετροι λαμβάνουν σταθερή τιμή (π.χ. το διάστημα σάρωσης) ή καθορίζονται έμμεσα από τις δύο βασικές (π.χ. το βάθος στερεοποίησης). Ως πιθανός προσανατολισμός θεωρείται κάθε προσανατολισμός του αντικείμενου που προκύπτει από την περιστροφή του αρχικού προσανατολισμού κατά ακέραιη γωνία γύρω από ένα ή περισσότερους άξονες του συστήματος συντεταγμένων. Συνεπώς το πλήθος των πιθανών προσανατολισμών ισούται με 360^3 . Η τιμή του πάχους στρώματος θεωρείται ενιαία για όλο το αντικείμενο καθώς η κατασκευή αντικειμένων με μεταβλητό πάχος στρώματος δεν είναι δυνατή από το εξεταζόμενο σύστημα Στερεολιθογραφίας EOS - Stereos Desktop S. Επισημαίνεται ότι και αν ακόμα η χρήση μεταβλητού πάχους ήταν δυνατή, θα ήταν προβληματική η εφαρμογή της διότι θα δυσχέραινε σημαντικά την ταυτόχρονη κατασκευή περισσότερων του ενός αντικειμένων. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης το πάχος στρώματος λαμβάνεται ίσο με 0.10, 0.15 ή 0.20 mm, τιμές για τις οποίες η εμπειρία έχει δείξει ότι εξασφαλίζουν ένα σχετικά καλό συνδυασμό ακρίβειας και κόστους. Συνεπώς ως πιθανή λύση λαμβάνεται από το ΣΥΕΚΑΠ κάθε πιθανό ζεύγος προσανατολισμού-πάχους στρώματος.

Μορφή των γεωμετρικών δεδομένων. Η γεωμετρία του 3D μοντέλου εισάγεται στο ΣΥΕΚΑΠ με τη μορφή ενός πολυεδρικού μοντέλου STL. Το πρότυπο STL διαθέτει κάποια μειονεκτήματα τόσο σε ότι αφορά την ακρίβεια απόδοσης της γεωμετρίας του αρχικού 3D μοντέλου όσο και από άποψη οργάνωσης και διαχείρισης της πληροφορίας [46]. Ωστόσο αποτελεί το βασικό πρότυπο μεταφοράς γεωμετρικών δεδομένων προς όλα τα συστήματα ΤΚΠ και συνεπώς πρέπει να αποτελεί το βασικό πρότυπο για ένα σύστημα υποστήριξης με πρακτική χρησιμότητα. Εκτός αυτού η χρησιμοποίηση προτύπων τομών (slicing formats) που διαθέτουν την δυνατότητα αναπαράστασης της τομής υπό την μορφή τόξων και παραμετρικών γραμμών (μεγαλύτερης τάξης) δεν έχει πρακτική εφαρμογή στο προτεινόμενο σύστημα, καθώς ο μηχανισμός σάρωσης εκτελεί μόνον ευθύγραμμες κινήσεις.

Κριτήρια επιλογής της λύσης. Η αξιολόγηση των λύσεων στο ΣΥΕΚΑΠ πραγματοποιείται βάσει της εκτίμησης δεικτών σχετικών με την ακρίβεια, την ποιότητα επιφάνειας και το χρόνο κατασκευής. Για την αξιολόγηση της ακρίβειας εξετάζονται οι δείκτες του συνολικού εμβαδού στηριζόμενων επιφανειών, του συνολικού εμβαδού κλιμακωτών επιφανειών και του ογκομετρικού σφάλματος, έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η ένταση του φαινομένου κλίμακας και το μέγεθος του πλέγματος στήριξης. Η εκτίμηση της ποιότητας επιφάνειας μέσω (του υπολογισμού) της μέσης τραχύτητας αφορά το πρωτογενές αντικείμενο όπως εξάγεται από την μηχανή και παρέχει μία ένδειξη των περιοχών που ίσως χρειάζονται επεξεργασία. Ο χρόνος κατασκευής αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κριτήριο το οποίο οφείλει να περιληφθεί στο σύστημα. Το σημαντικότερο τμήμα του αποτελεί ο χρόνος κατασκευής του αντικείμενου από την μηχανή, ο οποίος αξιολογείται για κάθε ζεύγος προσανατολισμού-πάχους στρώματος. Ο χρόνος αυτός σε συνδυασμό με την ποσότητα της ρητίνης που απαιτείται για την κατασκευή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του καθαρού κατασκευαστικού κόστους. Ο χρόνος και το κόστος τελικών εργασιών αφήνεται στην εκτίμηση του χειριστή βάσει των δεδομένων τραχύτητας, καθώς έχει έντονα υποκειμενικό χαρακτήρα.

Μέθοδος αξιολόγησης υποψηφίων λύσεων. Η μέθοδος αξιολόγησης των υποψηφίων προς

εξέταση λύσεων συναρτάται άμεσα με τον αριθμό και την φύση των κριτηρίων που εξετάζονται. Εάν υπάρχει μόνο ένα κριτήριο προς αξιολόγηση τότε η βέλτιστη λύση μπορεί να προκύψει αυτόματα με την χρήση κάποιου αλγορίθμου (π.χ. εύρεση του προσανατολισμού με το μικρότερο ύψος για την ελαχιστοποίηση του χρόνου κατασκευής όπου αναζητείται). Αντίστοιχοι γεωμετρικοί ή ευρετικοί αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί και για την ελαχιστοποίηση του πλέγματος στήριξης, των κλιμακωτών επιφανειών, του ογκομετρικού σφάλματος και του μέσου ύψους «οδόντωσης». Στην παρούσα μελέτη το πρόβλημα είναι όμως πολυκριτηριακής φύσεως οπότε η αξιολόγηση των λύσεων γίνεται με την μέθοδο της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης, στην οποία οι συντελεστές βαρύτητας ορίζονται από τον χειριστή ανάλογα με την σημασία που αποδίδει σε κάθε κριτήριο. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η προσαρμογή του μοντέλου στις ανά περίπτωση απαιτήσεις.

Ορισμός του πεδίου λύσεων. Ως πεδίο λύσεων ορίζεται το σύνολο που περιλαμβάνει κάθε ζεύγος πιθανού προσανατολισμού και πάχους στρώματος. Στην περίπτωση κατά την οποία ο χειριστής δεν καθορίζει ο ίδιος το πεδίο των λύσεων το ΣΥΕΚΑΠ προτείνει αυτόματα κάποιες πιθανές λύσεις. Καθώς η εκτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε δυνατή λύση έχει σημαντικό υπολογιστικό κόστος, επιβάλλεται περιορισμός του πεδίου πιθανών λύσεων. Για τον περιορισμό του συνόλου των πιθανών λύσεων η επιλογή των υποψηφίων προς εξέταση λύσεων βασίζεται στην βέλτιστη τοποθέτηση επιφανειών μεγάλου εμβαδού. Βέλτιστος προσανατολισμός επιφάνειας θεωρείται εκείνος που μεγιστοποιεί θεωρητικά την ακρίβεια και ελαχιστοποιεί το φαινόμενο κλίμακας. Έτσι για επίπεδες επιφάνειες ο βέλτιστος προσανατολισμός είναι εκείνος στον οποίο η επιφάνεια τίθεται κάθετα στον άξονα κατασκευής. Αντίστοιχα για επιφάνειες εκ περιστροφής βέλτιστος προσανατολισμός είναι αυτός στον οποίο ο άξονας του αντικειμένου τίθεται παράλληλα στον άξονα κατασκευής. Με βάση τους παραπάνω κανόνες προκύπτει ένα σύνολο «καλών» λύσεων, το οποίο δύναται να συμπληρωθεί από τον χειριστή με επιπλέον λύσεις που παρουσιάζουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, όπως λ.χ. η επιλογή ενός προσανατολισμού που ελαχιστοποιεί τα αναμενόμενα σφάλματα σε ένα ή περισσότερα κρίσιμα γεωμετρικά/μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χειριστή. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και κάθε κριτηρίου παρουσιάζεται στον χειριστή μέσω πινάκων, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος κάθε διάστασης της κατασκευής. Ειδικά για τον χρόνο κατασκευής παρέχεται και ανάλυση σε επιμέρους τμήματα (π.χ. χρόνος σάρωσης, χρόνος επίστρωσης) για την εκτίμηση της επιρροής των επιμέρους κατασκευαστικών παραμέτρων. Καθώς κάποιες ποιοτικού αλλά και ποσοτικού χαρακτήρα πληροφορίες που εξάγει το ΣΥΕΚΑΠ είναι δύσκολο να εκτιμηθούν ικανοποιητικά από τον χειριστή με την μορφή (ποσοτικών) δεικτών και μόνον, το σύστημα έχει την δυνατότητα οπτικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που πραγματοποιεί. Συγκεκριμένα δημιουργούνται τριδιάστατες αναπαραστάσεις του αντικειμένου όπου απεικονίζονται χαρακτηριστικά οι στηριζόμενες επιφάνειες καθώς και η τραχύτητα των επιφανειών μέσω χρωματικής διαβάθμισης. Η οπτική αναπαράσταση επιτρέπει επίσης τον εντοπισμό προβλημάτων «δοχείου» και περιοχών όπου

η αφαίρεση του πλέγματος στήριξης πιθανόν να είναι δύσκολη.

Η πρόβλεψη του χρόνου κατασκευής, της ποιότητας επιφανειών αλλά και της ακρίβειας απαιτεί την συσχέτιση των αντίστοιχων δεικτών με τις δύο βασικές μεταβλητές. Για την κατάστρωση αυτών των σχέσεων διενεργήθηκαν μία σειρά πειραμάτων και μετρήσεων, οι οποίες παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Ειδικά για το κριτήριο της ακρίβειας οι μετρήσεις έχουν περισσότερο χαρακτήρα εκτίμησης των δυνατοτήτων του συστήματος και της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του κεφαλαίου 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Χρόνος κατασκευής αντικειμένου

4.1 Εισαγωγή

Ο χρόνος κατασκευής είναι συνήθως ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή προσανατολισμού και πάχους στρώματος κυρίως γιατί συνδέεται άμεσα με το συνολικό κόστος παραγωγής ενός αντικειμένου με την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας. Η ανάλυση του κόστους παραγωγής δείχνει ότι με εξαίρεση πολύ μικρά αντικείμενα το κόστος κατασκευής του αντικειμένου από την μηχανή Στερεολιθογραφίας αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους. Εκτός της εκτίμησης του κόστους και άλλα πρακτικά θέματα συνδέονται με την πρόβλεψη του χρόνου κατασκευής, όπως ο προγραμματισμός εργασιών της μηχανής και η συγκριτική αξιολόγηση της τεχνικής σε σχέση με άλλες τΤΚΠ. Στην Στερεολιθογραφία αλλά και τις τΤΚΠ γενικότερα είναι επιθυμητό να υπάρχει ο μέγιστος βαθμός εκμετάλλευσης της μηχανής λόγω του υψηλού κόστους κτήσης, λειτουργίας και συντήρησής της. Ο σωστός χρονικός προγραμματισμός των εργασιών είναι επίσης σημαντικός για την εκμετάλλευση του χρόνου του ίδιου του χειριστή καθώς η κατασκευή από την μηχανή δεν απαιτεί επίβλεψη. Από την πλευρά της συγκριτικής αξιολόγησης η πρόβλεψη του χρόνου και του κόστους κατασκευής επιτρέπει να ελεγχθεί η καταλληλότητα της μεθόδου για δεδομένη εργασία σε σύγκριση με άλλες τΤΚΠ ή κατεργασίες κοπής.

Οι μέχρι σήμερα δημοσιευμένες μελέτες, σχετικά με το πρόβλημα της πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής, δείχνουν ότι η ακρίβεια του θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του συστήματος Στερεολιθογραφίας που εξετάζεται. Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια των εκτιμήσεων είναι η μορφή των γεωμετρικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του χρόνου κατασκευής. Συγκεκριμένα οι μέχρι τώρα μελέτες δείχνουν ότι εάν η εκτίμηση του χρόνου κατασκευής βασίζεται στα αρχεία τομών ενός αντικειμένου (τα αρχεία δηλαδή που περιέχουν την ακριβή γεωμετρία κάθε

τομή) είναι αρκετά ακριβέστερη από εκείνη που πραγματοποιείται βάσει του αντίστοιχου STL αρχείου. Για τον έλεγχο του θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής στην περίπτωση του συστήματος EOS – Stereos Desktop S, καθώς και της ακρίβειας των εκτιμήσεων με βάση την STL περιγραφή της γεωμετρίας ενός αντικειμένου, διενεργήθηκαν μία σειρά πειραμάτων τα οποία παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο και έχουν δημοσιευτεί επίσης στα [79, 80].

4.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Στην πλειοψηφία των δημοσιευμένων μελετών για την επιλογή κατασκευαστικών παραμέτρων ο χρόνος κατασκευής υπολογίζεται έμμεσα και προσεγγιστικά με την χρήση δεικτών όπως ο αριθμός των στρωμάτων ή το ύψος του αντικειμένου. Όπως είναι προφανές η χρήση παρόμοιων δεικτών έχει μία πρακτική χρησιμότητα κατά την σύγκριση μεταξύ πιθανών προσανατολισμών από άποψη υπολογιστικού χρόνου, δεν παρέχει όμως την απαιτούμενη ακρίβεια για τον έλεγχο πιθανών περιορισμών κόστους/χρόνου και για τον προγραμματισμό εργασιών. Η χρησιμότητα λοιπόν ενός εργαλείου ακριβούς πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής είναι προφανής.

Το πρόβλημα της πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής με την τεχνική της Στερεολιθογραφίας υπήρξε αντικείμενο και προηγούμενων μελετών. Οι Chen-Sullivan [81] μετά από εκτενή πειραματικό έλεγχο του συνολικού χρόνου σάρωσης (του χρόνου δηλαδή που απαιτείται για την σάρωση όλων των στρωμάτων) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο πραγματικός χρόνος σάρωσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος του θεωρητικά εκτιμώμενου λόγω διαφορών στην ταχύτητα σάρωσης. Μελετώντας τις παρατηρούμενες διαφορές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρησιμοποιούμενη πραγματική ταχύτητα σάρωσης ισούται περίπου με το 70% της ονομαστικής. Χρησιμοποιώντας το παραπάνω εύρημα οι McClurkin-Rosen [82] σε μία μεταγενέστερη έρευνα επέτυχαν πρόβλεψη του χρόνου κατασκευής ακρίβειας 3-5% του πραγματικού χρόνου.

Και στις δύο προαναφερθείσες μελέτες ο χρόνος κατασκευής υπολογίσθηκε βάσει του αρχείων τομών του αντικειμένου, το οποίο αποτελεί και την πηγή των δεδομένων που επεξεργάζεται η μηχανή κατά την κατασκευή. Η γνώση της ακριβούς γεωμετρίας κάθε στρώματος προφανώς είναι η απαραίτητη για την όσο το δυνατόν πιο ακριβή εκτίμηση του χρόνου κατασκευής. Καθώς όμως η φάση της επιλογής του προσανατολισμού και του πάχους στρώματος προηγείται του τεμαχισμού η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων λύσεων θα απαιτούσε τον τεμαχισμό για κάθε διαφορετικό ζευγάρι παραμέτρων. Κάτι τέτοιο βέβαια στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι εξαιρετικά χρονοβόρο και συνεπώς μη πρακτικό. Στην φάση λοιπόν της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων χρειάζεται ένα εργαλείο πρόβλεψης του χρόνου που θα επεξεργάζεται γεωμετρικά δεδομένα σε μορφή STL.

Η STL αναπαράσταση της γεωμετρίας του αντικειμένου αποτέλεσε την βάση για την εκτίμηση

του χρόνου κατασκευής στην μελέτη των Tata και Flynn [83], οι οποίοι αναφέρουν εκτιμήσεις με απόκλιση 1-2% του πραγματικού χρόνου. Σε αντίθεση με τους Chen και Sullivan υποστηρίζουν ότι ο χρόνος σάρωσης δεν εξαρτάται από το πλήθος των γραμμών σάρωσης που διαγράφει η ακτίνα Laser και συνεπώς από το διάστημα σάρωσης, αλλά αποκλειστικά από την ταχύτητα και το συνολικό μήκος σάρωσης. Οι παρατηρούμενες μικρές αποκλίσεις οφείλονται κατά τους μελετητές στις πολύ μικρές καθυστερήσεις που εμφανίζει το σύστημα σάρωσης λόγω των διαδοχικών γρήγορων αλλαγών κατεύθυνσης κατά την σάρωση διαδοχικών γραμμών μικρού μήκους. Αντίστοιχη συγκριτική μελέτη μεταξύ ενός συστήματος Στερεολιθογραφίας και ενός LOM πραγματοποιήθηκε από τους Kehagias et al. [84], όπου όμως η ακρίβεια της πρόβλεψης διαφοροποιείται σημαντικά για κάθε εξεταζόμενο αντικείμενο, πιθανότατα λόγω των σημαντικών διαφορών στην γεωμετρία και την μορφή κάθε αντικειμένου αλλά και λόγω λαθών στην εκτίμηση του χρόνου που απαιτείται κατά περίπτωση για την κατασκευή του πλέγματος στήριξης.

Η διαφοροποίηση των συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων καθώς και το γεγονός ότι όλες οι προαναφερθείσες μελέτες διεξήχθησαν με την χρήση συστημάτων Στερεολιθογραφίας σημειακής σάρωσης, σε αντίθεση με το εξεταζόμενο στην παρούσα μελέτη σύστημα το οποίο διαθέτει σύστημα γραμμικής συνεχούς σάρωσης, καθιστούν προβληματική την αποδοχή των μοντέλων και επιβάλλουν τον πειραματικό έλεγχο των προτεινόμενων θεωρητικών σχέσεων.

4.3 Θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης χρόνου κατασκευής

Ως χρόνο κατασκευής (build time) ορίζουμε τον χρόνο που απαιτείται από την μηχανή Στερεολιθογραφίας για την ολοκλήρωση της κατασκευής ή «χτισίματος» ενός αντικειμένου, ή αλλιώς ο χρόνος που απαιτείται για τον πολυμερισμό/στερεοποίηση όλων των στρωμάτων ενός αντικειμένου. Μαθηματικά ο ορισμός αυτός εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$Build\ Time = \sum_{i=1}^n TLayer(i) \quad (4.1)$$

όπου $TLayer(i)$ είναι ο χρόνος που απαιτείται για την πρόσθεση του στρώματος i και n ο συνολικός αριθμός των στρωμάτων. Καθώς η πρόσθεση ενός στρώματος επιτελείται σε δύο φάσεις, την επίστρωση (recoating) και την σάρωση (scanning) ο χρόνος πρόσθεσης του στρώματος i ισούται με το άθροισμα του απαιτούμενου για τις δύο φάσεις χρονικού διαστήματος:

$$TLayer(i) = TRecoat(i) + TScan(i) \quad (4.2)$$

όπου με $TRecoat(i)$ συμβολίζεται ο χρόνος επίστρωσης και $TScan(i)$ ο χρόνος σάρωσης για το στρώμα i . Τόσο ο χρόνος επίστρωσης όσο και ο χρόνος σάρωσης αναλύονται σε μικρότερες χρονικές περιόδους. Ο χρόνος επίστρωσης ισούται με το άθροισμα της καθυστέρησης μετά τη σάρωση του προηγούμενου στρώματος $TPre(i)$, του χρόνου κίνησης της λεπίδας επίστρωσης $TRecoater(i)$ και της καθυστέρησης εξομάλυνσης πριν τη σάρωση του επόμενου στρώματος $TPost(i)$.

$$TRecoat(i) = TPre(i) + TRecoater(i) + TPost(i) \quad (4.3)$$

Ο χρόνος κίνησης της λεπίδας μπορεί απλά να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξής σχέση:

$$TRecoater(i) = \frac{Rd(i)}{Rv(i)} \quad (4.4)$$

όπου $Rd(i)$ είναι η απόσταση που καλύπτει η λεπίδα κατά την κίνησή της και $Rv(i)$ η ταχύτητα με την οποία κινείται. Η επίστρωση στο σύστημα Stereos Desktop S επιτυγχάνεται σε δύο κινήσεις, από την θέση «μηδέν» της λεπίδας (αριστερά της πλατφόρμας) έως το δεξιά όριο του άξονα κίνησης και την επιστροφή της. Καθώς το διάστημα μετακίνησης της λεπίδας από το ένα άκρο στο άλλο ισούται με 305 mm, η σχέση (4.4) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$TRecoater(i) = \frac{n \cdot 610}{Rv(i)} \quad (4.5)$$

όπου n ο αριθμός των κύκλων επίστρωσης. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων $n = 1$ με εξαίρεση στρώματα μεγάλου εμβαδού όπου χρειάζονται δύο κύκλοι επίστρωσης και συνεπώς $n = 2$.

Η σάρωση κάθε στρώματος χωρίζεται σε δύο φάσεις, την σάρωση του περιγράμματος (contouring) και της σάρωση εσωτερικού (hatching). Κατά την σάρωση περιγράμματος η ακτίνα Laser διαγράφει τα πολύγωνα (εξωτερικά και εσωτερικά) που ορίζουν το περίγραμμα του στρώματος, ενώ κατά την εσωτερική σάρωση η ακτίνα εστίασης διαγράφει διαδοχικά διανύσματα παράλληλα στον X και Y άξονα της μηχανής σαρώνοντας το εσωτερικό της τομής και στερεοποιώντας την ρητίνη. Ο χρόνος σάρωσης $TScan(i)$ λοιπόν ισούται με:

$$TScan(i) = TContour(i) + THatch(i) \quad (4.6)$$

Όπου $T_{Contour}(i)$ είναι ο χρόνος σάρωσης του περιγράμματος και $THatch(i)$ ο χρόνος σάρωσης του εσωτερικού για το στρώμα i . Ο χρόνος σάρωσης του περιγράμματος αλλά και του εσωτερικού θεωρητικά ισούται με τον λόγο του συνολικού μήκους που διαγράφει η εστιασμένη ακτίνα Laser σε κάθε φάση της σάρωσης προς την αντίστοιχη ταχύτητα.

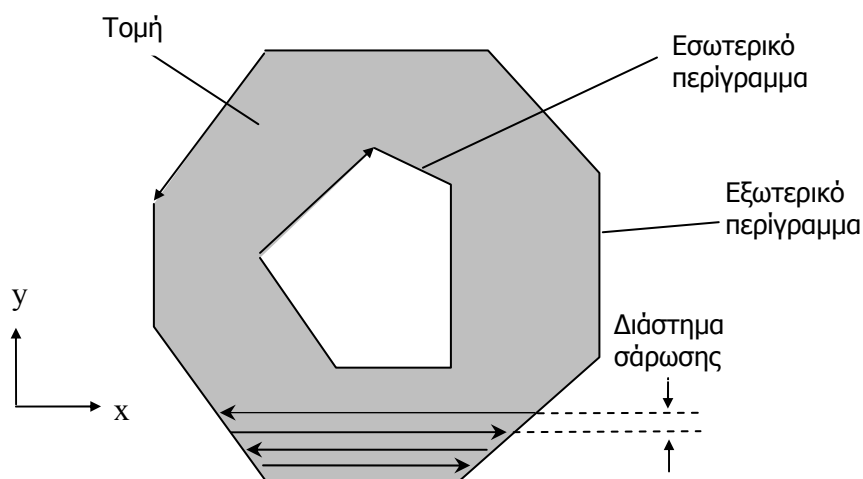
$$T_{Contour}(i) = \frac{Cl(i)}{Cv(i)} \quad (4.7)$$

και

$$THatch(i) = \frac{Hl(i)}{Hv(i)} \quad (4.8)$$

όπου Cl και Hl είναι το συνολικό μήκος όλων των διανυσμάτων που διαγράφει το Laser κατά την σάρωση του περιγράμματος και του εσωτερικού και Cv και Hv οι αντίστοιχες τιμές για την ταχύτητα σάρωσης. Το μήκος του περιγράμματος Cl μίας τομής ισούται με το άθροισμα των μηκών των διαδοχικών διανυσμάτων, που περιγράφουν τα πολύγωνα-όρια της τομής (Σχήμα 4.1). Αντίστοιχα, το συνολικό μήκος σάρωσης εσωτερικού Hl κατά μία κατεύθυνση ισούται με το εμβαδό της τομής E προς το αντίστοιχο διάστημα σάρωσης hs .

$$Hl = \frac{E}{hs} \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.1. Σχηματική αναπαράσταση τομής.

Για τις ταχύτητες σάρωσης περιγράμματος και εσωτερικού, βάσει των σχέσεων (2.1) και (2.2), ισχύει:

$$Cv(i) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 E_c e^{(CD(i)/Dp)}} \quad (4.10)$$

$$Hv(i) = \frac{m P_L}{hs E_c e^{(CD(i)/Dp)}} \quad (4.11)$$

Συνοψίζοντας τις σχέσεις (4.2)-(4.11) παρατηρούμε ότι ο χρόνος επίστρωσης ενός στρώματος είναι σχετικά απλό να προβλεφθεί εάν είναι γνωστές οι παράμετροι επίστρωσης (Rd , Rv , καθυστερήσεις επίστρωσης). Αντίθετα η πρόβλεψη του χρόνου σάρωσης είναι πιο πολύπλοκη καθώς πρέπει να εκτιμηθούν με ακρίβεια το συνολικό μήκος και η ταχύτητα σάρωσης. Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι η πραγματική ταχύτητα σάρωσης δεν ταυτίζεται με την ονομαστική και ότι πιθανόν ο χρόνος σάρωσης να επηρεάζεται και από επιπλέον παράγοντες όπως ο αριθμός των διανυσμάτων σάρωσης. Με στόχο την εξέταση των δύο αυτών υποθέσεων και την δημιουργία ενός μοντέλου ακριβούς πρόβλεψη του χρόνου σάρωσης μίας τομής εκτελέστηκαν μία σειρά μετρήσεων του χρόνου σάρωσης χαρακτηριστικών τομών.

4.4 Πειραματικός έλεγχος θεωρητικού μοντέλου

Οι θεωρητικές σχέσεις της προηγούμενης παραγράφου στηρίζονται σε βασικές αρχές της γεωμετρίας και της φυσικής και προφανώς ισχύουν για όλα τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα Στερεολιθογραφίας. Ο χρόνος ωστόσο σάρωσης δεν εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία της τομής αλλά και από τον μηχανισμό σάρωσης και τα χαρακτηριστικά του. Προηγούμενες μελέτες εστίασθηκαν σε συστήματα σημειακής σάρωσης της επιφάνειας της τομής, κατά την οποία η ακτίνα Laser εστιάζεται σε διαδοχικά σημεία κατά μήκος των διανυσμάτων σάρωσης. Αντίθετα στο σύστημα EOS-Stereos Desktop S η σάρωση εκτελείται με συνεχή έκθεση των γραμμών σάρωσης, συνεπώς πιθανολογείται ότι θα υπάρχουν σημαντικές διαφορές στο μοντέλο πρόβλεψης του χρόνου σάρωσης.

Με στόχο τον αρχικό έλεγχο της αξιοπιστίας των θεωρητικών σχέσεων που προέκυψαν κατά την ανάλυση του χρόνου κατασκευής σχεδιάσθηκε μία σειρά απλών πειραμάτων. Στα πειράματα αυτά μετρήθηκε ο απαιτούμενος χρόνος σάρωσης μίας τετράγωνης τομής διαστάσεων 50 mm, η οποία σαρώθηκε και κατά τις δύο διευθύνσεις σάρωσης με διαφορετικό διάστημα σάρωσης. Για κάθε τιμή του διαστήματος σάρωσης λήφθηκαν πέντε μετρήσεις βάσει των οποίων υπολογίσθηκε η μέση τιμή του χρόνου σάρωσης. Η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με την χρησιμοποίηση ενός ψηφιακού χρονομέτρου ακριβείας 1/100 sec. Κατά την σάρωση των τομών δεν διενεργήθηκε

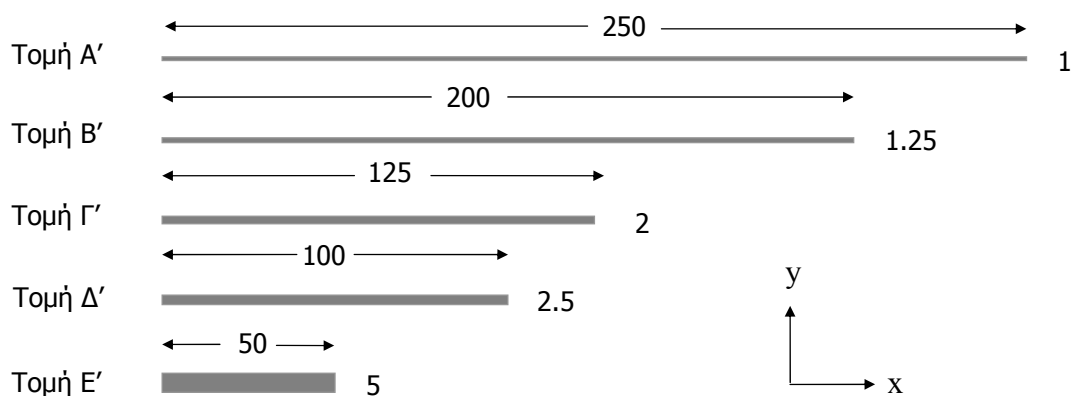
σάρωση περιγράμματος καθώς ο αντίστοιχος χρόνος είναι αμελητέος, ενώ η ισχύς θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 30 mW. Μετρήθηκε επίσης ο χρόνος επικάλυψης για διαφορετικές ταχύτητες επίστρωσης, έτσι ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια των σχέσεων (4.3) και (4.5).

Σε ό,τι αφορά τον χρόνο επίστρωσης παρατηρήθηκαν απειροελάχιστες διαφορές που δεν δικαιολόγησαν την περαιτέρω διερεύνηση. Αντίθετα κατά την μέτρηση του χρόνου σάρωσης παρατηρήθηκε μία σημαντική χρονική υστέρηση του θεωρητικού χρόνου σε σχέση με τον μετρούμενο. Το μέγεθος των θετικών αυτών αποκλίσεων σε σχέση με το διάστημα σάρωσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1. Η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των δύο χρόνων αυξάνεται όσο μειώνεται το διάστημα σάρωσης, όσο αυξάνεται δηλαδή το πλήθος των διανυσμάτων σάρωσης, το συνολικό μήκος σάρωσης καθώς και η ταχύτητα σάρωσης. Συνεπώς ο χρόνος εσωτερικής σάρωσης πιθανότατα συσχετίζεται με κάποια ή όλες από τις παραπάνω παραμέτρους.

Πίνακας 4.1. Προβλεπόμενος και μετρηθείς χρόνος σάρωσης για τετράγωνη τομή 50 mm.

<i>hs</i> (mm)	<i>Hv</i> (mm/s)	Αριθμός διανυσμάτων	<i>HI</i> (mm)	Μετρηθείς χρόνος (s)	Προβλεπόμενος χρόνος (s)	Διαφορά (s)	Ποσοστό (%)
0.25	600	400	20200	33.892	33.666	0.226	0.7
0.20	750	500	25250	33.893	33.666	0.227	0.7
0.15	1000	667	33667	34.005	33.666	0.339	1.0
0.10	1500	1000	50500	34.269	33.666	0.602	1.8
0.08	2000	1250	63125	32.241	31.562	0.679	2.1
0.05	3000	2000	101000	34.719	33.666	1.052	3.0
0.03	5000	3333	168333	35.378	33.666	1.712	4.8

Με βάση τα αποτελέσματα των πρώτων αυτών μετρήσεων μία νέα σειρά πειραμάτων σχεδιάστηκε, στην οποία θα ήταν δυνατή η εξέταση της επίδρασης του αριθμού των διανυσμάτων σάρωσης. Για να απομονωθεί ο παράγοντας του αριθμού των διανυσμάτων σάρωσης μετρήθηκε ο χρόνος εσωτερικής σάρωσης των τομών του Σχήματος 4.2, οι οποίες έχουν όλες το ίδιο εμβαδό (250 mm²) διαφορετικό όμως μήκος και πλάτος. Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται σταθερό συνολικό μήκος σάρωσης (για κάθε τιμή του διαστήματος σάρωσης) απαιτείται όμως διαφορετικός αριθμός διανυσμάτων.

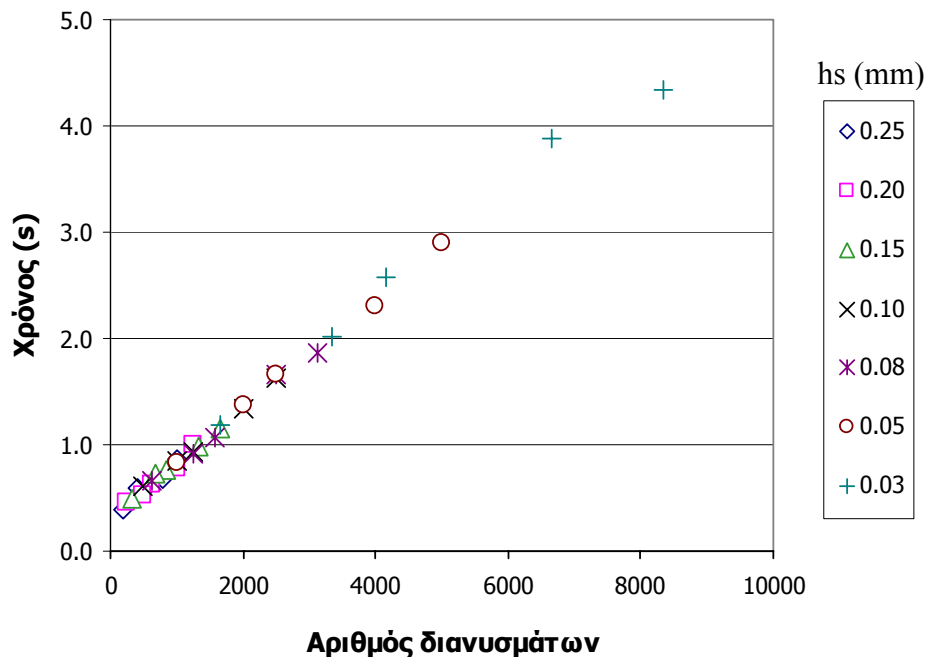


Σχήμα 4.2. Τομές Α'-Ε' (οι διαστάσεις σε mm)

Οι τομές Α'-Ε' σαρώθηκαν για επτά διαφορετικές τιμές του διαστήματος σάρωσης και σταθερό βάθος στερεοποίησης (και μεταβλητή συνεπώς ταχύτητα σάρωσης), μόνο κατά την Y διεύθυνση. Για κάθε τιμή του διαστήματος και γεωμετρία τομής λήφθηκαν πέντε μετρήσεις, από τις οποίες εξήχθη η μέση τιμή του χρόνου σάρωσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι ο μετρούμενος χρόνος σάρωσης είναι μεγαλύτερος του θεωρητικού, υπάρχει δηλαδή μία «καθυστέρηση» κατά τις μετρήσεις. Η γραφική αποτύπωση των αποκλίσεων, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3, δείχνει ότι υπάρχει μία απλή γραμμική σχέση μεταξύ της παρατηρούμενης χρονικής καθυστέρησης και του αριθμού των διανυσμάτων της μορφής:

$$D = a_v NoV(i) + b \quad (4.12)$$

όπου D η χρονική καθυστέρηση, a_v είναι η κλίση της ευθείας, $NoV(i)$ ο αριθμός των διανυσμάτων σάρωσης του στρώματος i και b η σταθερά της γραμμικής σχέσης. Οι τιμές για τους συντελεστές a_v και b υπολογίστηκαν με την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε τιμή του διαστήματος σάρωσης και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.



Σχήμα 4.3. Χρονικές αποκλίσεις τομών Α-Ε.

Τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης δείχνουν ότι η κλίση όλων των ευθειών είναι πρακτικά σταθερή (γεγονός εμφανές και στο Σχήμα 4.3) και ισούται περίπου με 0.0005, το οποίο σημαίνει ότι ο αριθμός των διανυσμάτων σάρωσης συσχετίζεται με μία σταθερή γραμμική σχέση με

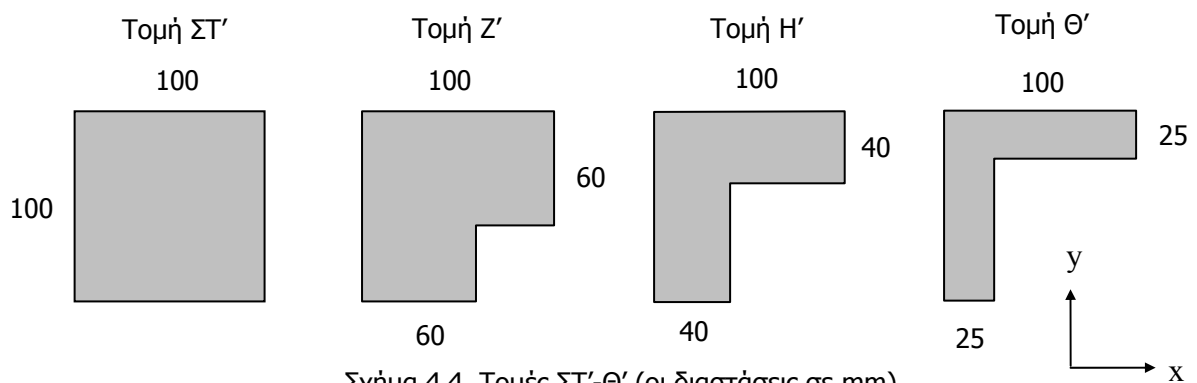
τον χρόνο σάρωσης, ανεξάρτητα της ταχύτητας σάρωσης. Έτσι λοιπόν η «καθυστερήση» η ανάλογη του αριθμού διανυσμάτων D_V δίνεται από την σχέση:

$$D_V = 0.0005 NoV(i) \quad (4.13)$$

Πίνακας 4.2. Στοιχεία γραμμικής παλινδρόμησης καθυστερήσεων.

hs	a_V	b	Τυπική Απόκλιση (s)	R^2
0.25	0.00048675	0.44545900	0.0538	0.9635
0.20	0.00050528	0.34647500	0.0514	0.9789
0.15	0.00051263	0.30610560	0.0579	0.9730
0.10	0.00050886	0.33454900	0.0251	0.9986
0.08	0.00039811	0.41414950	0.0555	0.9956
0.05	0.00053553	0.28994118	0.0454	0.9988
0.03	0.00052554	0.31338725	0.1675	0.9937

Η καθυστέρηση διανυσμάτων σάρωσης εξηγεί ένα μέρος της συνολικής καθυστέρησης καθώς παραμένει ένα μικρό μέρος της συνολικής καθυστέρησης, το οποίο αποτυπώνεται στην σταθερά b της σχέσης (4.12), το οποίο θεωρείται ότι εξαρτάται από τις υπόλοιπες παραμέτρους σάρωσης, το μήκος και την ταχύτητα σάρωσης. Για την διερεύνηση της πιθανής σχέσης μεταξύ μήκους / ταχύτητας σάρωσης και των καθυστερήσεων σχεδιάστηκε μία τρίτη σειρά πειραμάτων, κατά την οποία μετρήθηκε ο χρόνος σάρωσης των τομών ΣΤ'-Θ', οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4. Οι τομές ΣΤ'-Θ' είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να απαιτείται το ίδιο πλήθος διανυσμάτων σάρωσης για κάθε τομή και τιμή του διαστήματος σάρωσης για την κάλυψη διαφορετικού όμως μήκους σάρωσης, τόσο κατά την X όσο και κατά την Y διεύθυνση.

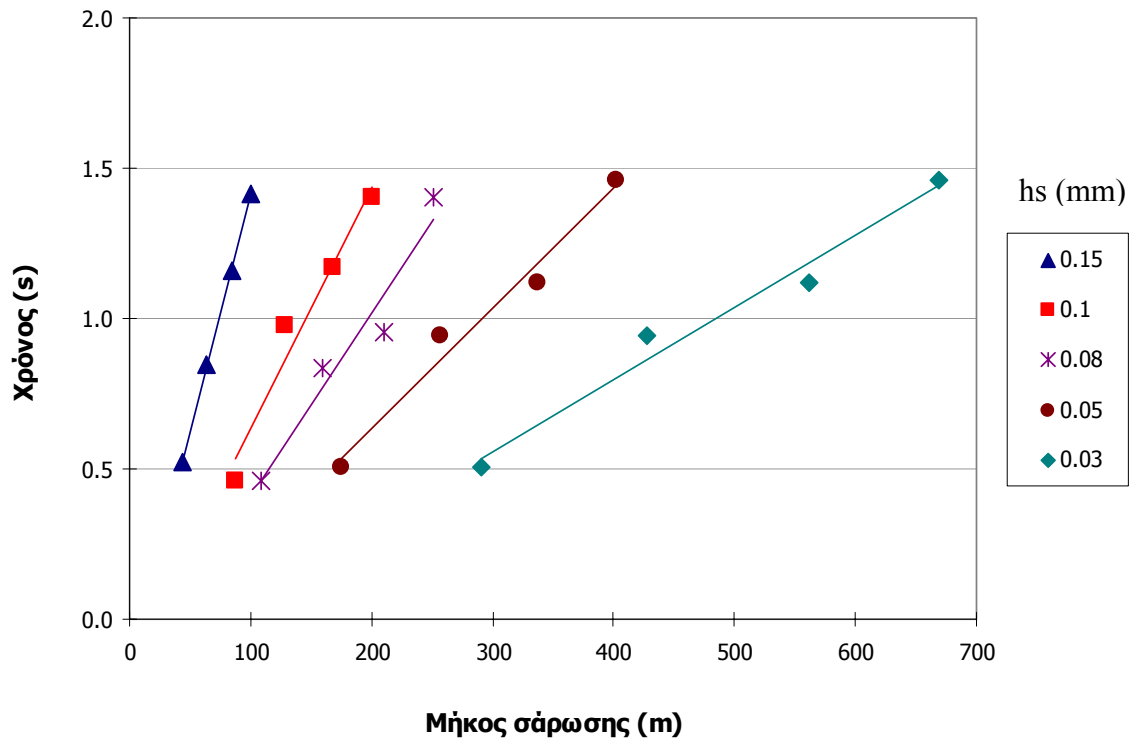


Σχήμα 4.4. Τομές ΣΤ'-Θ' (οι διαστάσεις σε mm)

Οι τιμές των παραμέτρων παρέμειναν ως είχαν από το προηγούμενο πείραμα, με μόνη διαφορά την κατεύθυνση σάρωσης. Στην παρούσα φάση των πειραμάτων οι τομές σαρώθηκαν και κατά τις δύο διευθύνσεις έτσι ώστε να καλυφθεί ένα σημαντικό μήκος σάρωσης και να υπάρξουν μετρήσιμες αποκλίσεις. Και σε αυτή την περίπτωση ο προβλεπόμενος χρόνος υστερεί του μετρούμενου παρότι

συνυπολογίσθηκε η καθυστέρηση των διανυσμάτων σάρωσης σύμφωνα με τη σχέση (4.13). Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις παρουσιάζονται γραφικά σε σχέση με το συνολικό μήκος σάρωσης στο Σχήμα 4.5. Παρατηρείται ότι υπάρχει μία σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ μήκους σάρωσης και αποκλίσεων, σχέση η οποία σε αυτή την περίπτωση όμως μεταβάλλεται για κάθε τιμή του διαστήματος σάρωσης. Η νέα αυτή σχέση θα είναι της μορφής:

$$D_l = a_l Hl(i) + c \quad (4.14)$$



Σχήμα 4.5. Χρονικές αποκλίσεις τομών ΣΤ'-Θ'.

Τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής a_l δεν είναι σταθερός αλλά μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα σάρωσης. Η συσχέτιση της μεταβλητής a_l και της ταχύτητας σάρωσης $Hv(i)$ δείχνει ότι ισχύει η σχέση (με βαθμό εμπιστοσύνης $r = 0.999$):

$$a_l = \frac{1}{54 Hv(i) + 6114} \quad (4.15)$$

Πίνακας 4.3. Συντελεστές και δεδομένα γραμμικής συσχέτισης αποκλίσεων και μήκους σάρωσης.

<i>hs</i>	<i>Hv</i>	<i>a_l</i>	Τυπική απόκλιση (<i>s</i>)	<i>R</i> ²
0.03	7255	0.0000010	0.1000	0.9891
0.05	4355	0.0000018	0.0819	0.9911
0.08	2900	0.0000025	0.1170	0.9823
0.10	2175	0.0000036	0.1087	0.9846
0.15	1450	0.0000051	0.0049	0.9999
0.20	1750	0.0000054	0.0813	0.9782
0.25	1500	0.0000064	0.0177	0.9986

Σύμφωνα με την σχέση (4.15) και εξισώνοντας την σταθερά *c* με τη μέση υπολογιζόμενη τιμή της, η σχέση (4.14) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$D_l = \frac{Hl(i)}{54 Hv(i) + 6114} - 0.206 \quad (4.16)$$

Η σχέση (4.16) εκφράζει μαθηματικά την σταθερά *b* της σχέσης (4.12) συναρτήσει του μήκους και της ταχύτητας σάρωσης.

Συνοψίζοντας λοιπόν τα αποτελέσματα της διερεύνησης του συστήματος σάρωσης, παρατηρούνται δύο ειδών χρονικές υστερήσεις, η καθυστέρηση διανυσμάτων σάρωσης (*D_v*) που είναι ευθέως ανάλογη του αριθμού των διανυσμάτων σάρωσης και η καθυστέρηση μήκους σάρωσης (*D_l*), της οποίας το μέγεθος είναι συνάρτηση του μήκους και της ταχύτητας σάρωσης. Αθροίζοντας τις δύο καθυστερήσεις προκύπτει η αναλυτική σχέση υπολογισμού της συνολικής χρονικής υστερήσης *D_t*, η οποία έχει ως εξής:

$$D_t = 0.0005 NoVectors + \frac{Hl(i)}{54 Hv(i) + 6114} - 0.206 \quad (4.17)$$

Προφανώς για να είναι ακριβής η πρόβλεψη του χρόνου σάρωσης μίας οποιασδήποτε τομής πρέπει να συνυπολογισθούν οι παρατηρούμενες χρονικές υστερήσεις, συνεπώς η σχέση (4.8) υπολογισμού του χρόνου εσωτερικής σάρωσης παίρνει την εξής μορφή:

$$THatch = \frac{Hl(i)}{Hv(i)} + 0.0005 NoVectors + \frac{Hl(i)}{54 Hv(i) + 6114} - 0.206 \quad (4.18)$$

Επισημαίνεται ότι η νέα αυτή σχέση υπολογισμού του εσωτερικού χρόνου σάρωσης ελέγχθηκε και για τομές διαφορετικής γεωμετρίας και μεγέθους δίνοντας προβλέψεις με απόκλιση μικρότερη του 0.5% του πραγματικού χρόνου.

4.5 Εκτίμηση συνολικού μήκους σάρωσης περιγράμματος-εσωτερικού βάσει STL αρχείων

Σύμφωνα με την προηγηθείσα ανάλυση για την ακριβή πρόβλεψη του χρόνου σάρωσης ενός στρώματος απαιτείται ακριβής υπολογισμός του αντίστοιχου μήκους σάρωσης περιγράμματος και εσωτερικού. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να υπολογισθούν με απόλυτη ακρίβεια εάν είναι γνωστή η ακριβής γεωμετρία κάθε τομής, εάν δηλαδή είναι διαθέσιμο το αρχείο τομών του αντικειμένου. Στην φάση ωστόσο της επιλογής παραμέτρων τα μόνα διαθέσιμα γεωμετρικά δεδομένα είναι σε μορφή STL. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι δυνατόν να υπολογισθεί το ακριβές μήκος σάρωσης περιγράμματος και εσωτερικού κάθε τομής, υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα υπολογισμού του συνολικού μήκους σάρωσης εσωτερικού (THI) και περιγράμματος (TCl) για όλα τα στρώματα βάσει των εξής σχέσεων:

$$THI = \frac{V}{Lth \cdot hs} \quad (4.19)$$

$$TCl = \frac{VA}{Lth} \quad (4.20)$$

όπου με V συμβολίζεται ο όγκος του αντικειμένου, όπως προκύπτει από το STL μοντέλό του, Lth το πάχος στρώματος, hs το διάστημα σάρωσης και VA (Vertical Area) το άθροισμα των εμβαδών των κάθετων προβολών όλων των τριγώνων του STL μοντέλου σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο της πλατφόρμας. Η σχέση (4.20) έχει προταθεί από τους Tata-Flynn [83] και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό του μήκους σάρωσης του πλέγματος στήριξης, υπό την προϋπόθεση φυσικά ότι υπάρχει η STL αναπαράστασή τους. Η σχέση (4.19) προφανώς ισχύει μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σταθερό πάχος στρώματος.

Όπως προαναφέρθηκε η ακρίβεια της εκτίμησης του συνολικού μήκους σάρωσης περιγράμματος και εσωτερικού βάσει του αρχείου τομών πρέπει να θεωρείται δεδομένη, καθώς σε αυτό το αρχείο περιέχεται η ακριβής περιγραφή της γεωμετρίας κάθε τομής που θα σαρωθεί από την μηχανή της Στερεολιθογραφίας. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί όμως να υποτεθεί με ασφάλεια και για την περίπτωση που η εκτίμηση των μεγεθών αυτών γίνεται βάσει δεδομένων STL και των σχέσεων (4.19) και (4.20). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται με τις δύο μεθόδους (με την χρήση STL αρχείου από τη μία, και χρήση αρχείου τομών από την άλλη) επιτρέπει να διαπιστωθεί εάν η

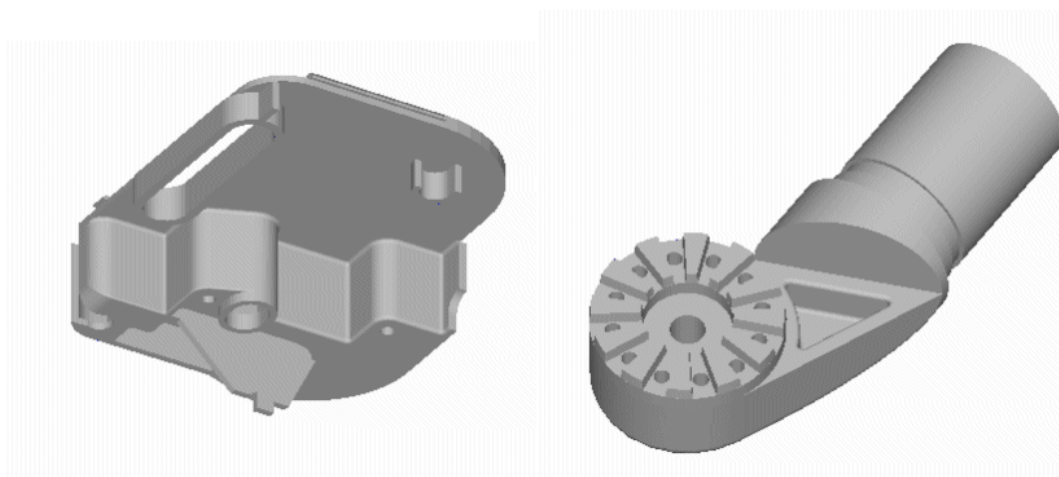
εκτίμηση των μήκων σάρωσης βάσει STL αρχείων είναι ακριβής.

Για να ελεγχθεί η ακρίβεια της εκτίμησης του συνολικού μήκους σάρωσης εσωτερικού και περιγράμματος βάσει δεδομένων STL αναπτύχθηκαν δύο υπολογιστικά εργαλεία εκτίμησης των μεγεθών αυτών, ένα για την επεξεργασία STL αρχείων και ένα για την επεξεργασία αρχείου τομών σε μορφή CLI (Common Layer Interface). Σύντομη περιγραφή του προτύπου CLI παρατίθεται στο παράρτημα Π4.1. Τα δύο εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του μήκους σάρωσης εσωτερικού (*THI*) και περιγράμματος (*TCI*) μοντέλων διαφορετικής μορφής και γεωμετρικής πολυπλοκότητας (Πίνακας 4.4). Στο πίνακα 4.4 παρουσιάζεται επίσης ο αριθμός των τριγώνων του STL αρχείου ως ένδειξη της γεωμετρικής του πολυπλοκότητας. Οι παρατηρούμενες ποσοστιαίες διαφορές είναι πρακτικά αρκετά μικρές, γεγονός που δείχνει ότι η μέθοδος εκτίμησης του συνολικού μήκους σάρωσης εσωτερικού και περιγράμματος με βάση το STL μοντέλο θα έχει ικανοποιητικό βαθμό αξιοπιστίας.

Πίνακας 4.4. Μήκος σάρωσης εσωτερικού και περιγράμματος βάσει STL και CLI αρχείων.

Όνομα Αντικ/νου	Αριθμός τριγώνων	<i>THI</i> (m)			<i>TCI</i> (m)		
		STL	CLI	Διαφορά (%)	STL	CLI	Διαφορά (%)
<i>Coverr</i>	530	169.46	167.34	1.27%	6.19	6.14	0.83%
<i>Coverl</i>	424	216.40	213.52	1.35%	7.33	7.30	0.42%
<i>Disk1</i>	2460	14394.40	14463.96	-0.48%	150.27	149.88	0.26%
<i>Disk2</i>	4342	5526.94	5424.04	1.90%	81.63	81.72	-0.11%
<i>Disk3</i>	534	2617.74	2591.42	1.02%	12.89	12.76	1.00%
<i>Disk4</i>	2524	8818.80	8779.42	0.45%	135.90	135.59	0.23%
<i>Pcover</i>	2495	14479.20	14468.32	0.08%	173.73	172.19	0.89%
<i>Paperc</i>	778	379.60	379.64	-0.01%	7.19	7.18	0.17%
<i>Handle2</i>	25862	13682.80	13682.36	0.00%	429.31	429.32	0.00%
<i>Runner2</i>	3424	393.50	390.02	0.89%	10.73	10.65	0.77%
<i>Plate2</i>	6428	1909.00	1903.38	0.30%	11.84	11.61	2.01%
<i>Franc_on</i>	69244	9271.70	9221.96	0.54%	176.28	175.89	0.22%
<i>Franc_tw</i>	54194	12183.60	12122.22	0.51%	194.78	194.37	0.21%
<i>190l</i>	198522	4970.40	4872.46	2.01%	826.10	825.60	0.06%
<i>Arthil</i>	7996	3294.60	3288.40	0.19%	97.09	96.87	0.22%
<i>Dthil</i>	7708	3815.40	3808.90	0.17%	123.36	124.53	-0.95%
<i>Icpem15</i>	4166	9774.80	9630.40	1.50%	194.58	193.50	0.56%
<i>Icpose1</i>	4730	8840.40	8703.34	1.57%	141.51	140.50	0.72%
<i>Scover</i>	4376	12398.94	12292.90	0.86%	349.55	349.83	-0.08%
<i>Idcover</i>	416	1032.54	1033.30	-0.07%	6.59	6.37	3.52%
<i>hu-up2</i>	9700	3766.66	3753.20	0.36%	166.69	166.54	0.09%
<i>base01</i>	3838	20358.26	20362.48	-0.02%	323.42	323.86	-0.14%
<i>arm</i>	22192	15184.30	15140.28	0.29%	176.11	176.04	0.04%
<i>nt-bbb</i>	8993	16063.80	16068.84	-0.03%	274.57	275.27	-0.25%
<i>cc-z</i>	5203	19081.40	18907.38	0.92%	480.13	482.61	-0.51%
<i>handle</i>	22248	14189.20	14178.20	0.08%	376.46	376.27	0.05%
<i>runner</i>	3410	785.60	785.18	0.05%	22.65	22.61	0.18%
<i>plate</i>	5788	1990.60	1986.28	0.22%	17.91	17.71	1.15%

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.4 αφορούν «πραγματικά» αντικείμενα, αντικείμενα δηλαδή που έχουν παραχθεί και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα προϊόντων όπως πλαστικά εξαρτήματα συσκευών, προϊόντα συσκευασίας, μοντέλα χυτοπρεσσαριστών μεταλλικών προϊόντων, τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό κ.ο.κ. Αντιπροσωπευτικά αντικείμενα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6. Ενδεικτικά μοντέλα πρωτοτύπων/προϊόντων.

Οι τιμές που περιέχονται στον πίνακα 4.4 αφορούν τα μήκη σάρωσης των μοντέλων καθ' αυτών, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το πλέγμα στήριξης. Σε αρκετές περιπτώσεις ο χρόνος που καταναλίσκεται για την κατασκευή του πλέγματος στήριξης αποτελεί σημαντικό μέρος του συνολικού χρόνου κατασκευής. Η γεωμετρική πληροφορία σχετικά με την θέση και την μορφή του πλέγματος στήριξης περιέχεται στο αντίστοιχο αρχείο τομών CLI, συνεπώς είναι σχετικά εύκολο να υπολογισθεί το αντίστοιχο μήκος σάρωσης. Εάν ωστόσο το τεμαχισμένο αρχείο του πλέγματος στήριξης δεν είναι διαθέσιμο, χρειάζεται η STL αναπαράσταση του πλέγματος στήριξης. Η STL αναπαράσταση του πλέγματος στήριξης δεν είναι η περιγραφή ενός στερεού κλειστού αντικειμένου αλλά μία συλλογή κάθετων τοιχωμάτων «μηδενικού πάχους». Χρήζει λοιπόν διερεύνησης η ακρίβεια υπολογισμού του μήκους σάρωσης με βάση το STL αρχείο του πλέγματος στήριξης.

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι τιμές του μήκους σάρωσης για τα αντίστοιχα πλέγματα στήριξης των μοντέλων του Πίνακα 4.4 όπως υπολογίστηκαν από τα δύο υπολογιστικά εργαλεία. Σε αντίθεση με τα αρχεία των μοντέλων η ακρίβεια της εκτίμησης του STL εκτιμητή για το πλέγμα στήριξης δεν είναι ιδιαίτερα καλή. Πιθανή αιτία αποτελεί η αλλαγή της γεωμετρίας του πλέγματος στήριξης κατά τον τεμαχισμό, όπως η διαμόρφωση «οδόντωσης» στα σημεία επαφής με το μοντέλο και κενών κατά την έννοια του ύψους των τοιχωμάτων, ώστε να είναι ευκολότερη η αφαίρεσή τους και να διευκολύνεται η ροή της ρητίνης που παγιδεύεται εντός του πλέγματος στήριξης. Παρόλα αυτά η STL εκτίμηση του μήκους σάρωσης για τα στηρίγματα δίνει μία «σχετικά καλή» ένδειξη του συνολικού μήκους των διανυσμάτων που εμπεριέχονται στο CLI αρχείο.

Πίνακας 4.5. Συνολικό μήκος σάρωσης στηριγμάτων βάσει STL και CLI αρχείων.

Αρχείο Στηριγμάτων	Αριθμός Τριγώνων	Συνολικό μήκος σάρωσης (mm)		
		STL	CLI	Διαφορά (%)
s-coverr	24	2273	2028	12,10
s-coverl	24	2253	2051	9,87
s-disk1	966	582927	332317	75,41
s-disk2	246	289853	170849	69,65
s-disk3	58	18840	12907	45,97
s-disk4	828	203787	132908	53,33
s-pcover	7100	230502	1396363	65,07
s-paperc	1537	26473	17606	50,37
s-handle2	7431	452210	413898	9,26
s-runner2	1340	8760	8294	5,62
s-plate2	10422	48225	37987	26,95
s-franc_on	8948	116010	98215	18,12
s-franc_tw	8221	925450	720120	28,51
s-190l	26688	164896	1657299	-0,50
s-arthil	2822	693575	464930	49,18
s-dthil	5801	651410	444713	46,48
s-icpem15	2957	252920	158648	59,42
s-idcover	1000	150607	97536	54,41
s-hu-up2	5975	19900	14775	34,69
s-base01	11683	327488	3188452	2,71
s-arm	8073	66715	731827	-90,88
s-nt-bbb	18653	357330	371517	-3,82
s-cc-z	10081	247780	45299	446,99
s-handle	18940	35870	357711	-89,97
s-runner	1715	22690	22781	-0,40
s-plate	13272	52680	54270	-2,93

4.6 Δοκιμές πρόβλεψης χρόνου κατασκευής

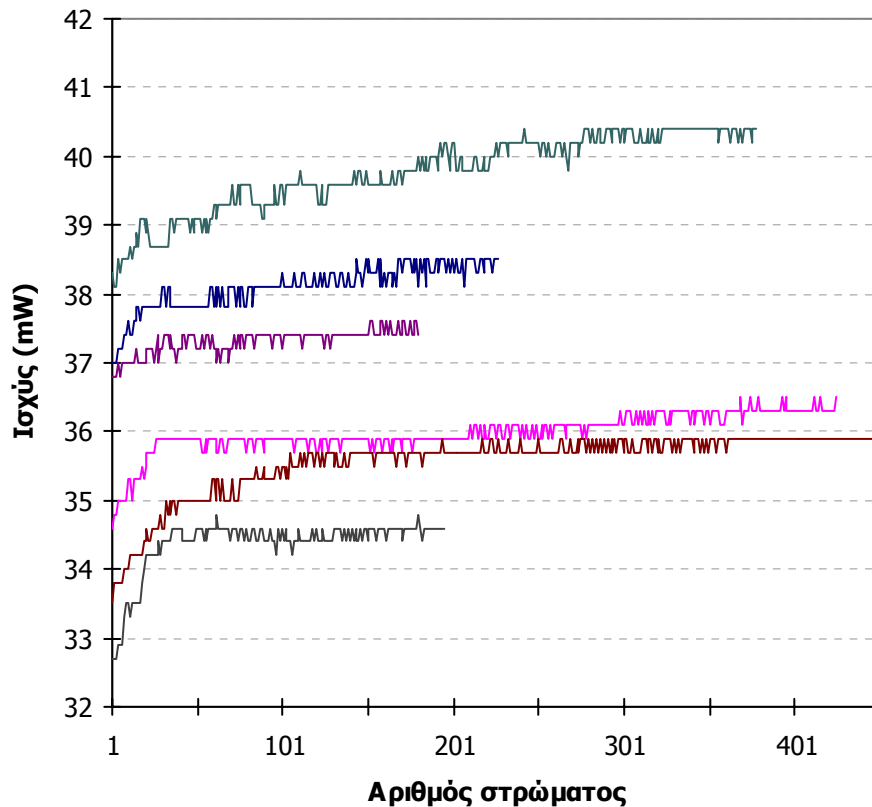
Σύμφωνα με την προηγηθείσα ανάλυση ο χρόνος κατασκευής ενός αντικειμένου είναι το άθροισμα των διαδοχικών χρόνων που απαιτούνται για την επίστρωση και στερεοποίηση κάθε στρώματος. Πειράματα έδειξαν ότι ο χρόνος επίστρωσης ενός στρώματος υπολογίζεται με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.3) και (4.5). Καθώς οι παράμετροι επίστρωσης είναι συνήθως σταθερές για όλο το αντικείμενο αρκεί ο υπολογισμός του χρόνου για ένα στρώμα και ο πολλαπλασιασμός του με τον αριθμό των στρωμάτων για την εύρεση του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την επίστρωση. Στην περίπτωση κατά την οποία είναι διαθέσιμο το αρχείο τομών του αντικειμένου ο αριθμός των στρωμάτων υπολογίζεται άμεσα. Αντίστοιχα εάν η γεωμετρία είναι σε μορφή STL, όπως στην φάση της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων, ο αριθμός των στρωμάτων προκύπτει έμμεσα με την διαίρεση του ύψους του αντικειμένου προς το πάχος

στρώματος. Και στις δύο λοιπόν περιπτώσεις η πρόβλεψη του συνολικού χρόνου επίστρωσης για ένα αντικείμενο είναι απλή και ακριβής.

Σύμφωνα με τις σχέσεις (4.7) και (4.18) ο χρόνος σάρωσης μίας τομής εξαρτάται από το μήκος σάρωσης εσωτερικού και περιγράμματος τις αντίστοιχες ταχύτητες σάρωσης και τον αριθμό των διανυσμάτων σάρωσης. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης της προηγούμενης παραγράφου δείχνουν ότι το συνολικό μήκος σάρωσης περιγράμματος και εσωτερικού ενός αντικειμένου μπορούν να υπολογισθούν με ικανοποιητική ακρίβεια χρησιμοποιώντας STL αρχεία. Στην περίπτωση όμως αυτή δεν είναι δυνατόν να υπολογισθεί ο αριθμός των διανυσμάτων σάρωσης, γεγονός που προσθέτει ένα παράγοντα σφάλματος στην πρόβλεψη του χρόνου κατασκευής.

Επιπλέον ζήτημα προς εξέταση αποτελεί η εκτίμηση της ταχύτητας σάρωσης του εσωτερικού και του περιγράμματος των τομών. Σύμφωνα με τις σχέσεις (4,10) και (4.11) οι δύο ταχύτητες σάρωσης υπολογίζεται βάσει διαφόρων μεγεθών, τα οποία με εξαίρεση την ισχύ του Laser διατηρούν σταθερές τιμές κατά την διάρκεια της κατασκευής. Οι συσκευές Laser αερίων όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στην πλειονότητα των συστημάτων Στερεολιθογραφίας παρουσιάζουν μεταβολές στην ισχύ κατά την λειτουργία τους. Η επίτευξη λοιπόν σταθερού βάθους στερεοποίησης για όλα τα στρώματα απαιτεί προσαρμογή της ταχύτητας σάρωσης στις αυξομειώσεις της ισχύος (βλέπε Σχ. 2.2). Η προσαρμογή αυτή εκτελείται αυτόματα από το σύστημα μέσω ενός μηχανισμού μέτρησης της ισχύος ανά τακτά χρονικά διαστήματα και επαναπροσδιορισμού της ταχύτητας σάρωσης.

Ο μηχανισμός αυτόματης ρύθμισης της ταχύτητας σάρωσης απενεργοποιήθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων μέτρησης του χρόνου σάρωσης, ώστε να εξασφαλισθεί σταθερή ταχύτητα σάρωσης. Ωστόσο σε πραγματικές συνθήκες ο μηχανισμός αυτόματης ρύθμισης πρέπει να λειτουργεί έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η μεγαλύτερη δυνατή ομοιογένεια της κατασκευής και να αποφευχθούν κατασκευαστικά σφάλματα. Με στόχο να διερευνηθεί το εύρος των αυξομειώσεων της ισχύος του laser εξετάστηκαν μερικά από τα αρχεία αναφορών που καταγράφουν αυτόματα μεταξύ άλλων και την ισχύ κατά την διάρκεια μιας κατασκευαστικής εργασίας. Ενδεικτικές καμπύλες της καταγεγραμμένης ισχύος κατά την κατασκευή αντικειμένων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7. Καταγεγραμμένη ισχύς laser ανά στρώμα για αντιπροσωπευτικές εργασίες.

Σύμφωνα και με άλλους ερευνητές (Tata and Flynn [83]) η ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς του laser κατά την διάρκεια της λειτουργίας του είναι αρκετά δύσκολη. Ωστόσο είναι φανερό από το Σχήμα 4.7 ότι η ισχύς του laser πρακτικά σταθεροποιείται μετά από ένα αρχικό διάστημα λειτουργίας παρουσιάζοντας αυξομειώσεις αρκετά μικρές (της τάξης του $\pm 2\%$). Παρότι λοιπόν η ακριβής πρόβλεψη είναι πρακτικά αδύνατη υπάρχει η δυνατότητα περιορισμού των αποκλίσεων εάν για την πρόβλεψη του χρόνου σάρωσης θεωρηθεί ως ενεργός ισχύς η μέση τιμή της καταγεγραμμένης ισχύος, μίας σχετικά πρόσφατης εργασίας.

Ο τελικός έλεγχος ακριβείας του θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής πραγματοποιήθηκε με την σύγκριση των θεωρητικών προβλέψεων με τον αντίστοιχο απαιτούμενο χρόνο ολοκλήρωσης πραγματικών εργασιών. Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων χρόνων κατασκευής για αντιπροσωπευτικές εργασίες, που αφορούσαν την ταυτόχρονη κατασκευή περισσότερων του ενός μοντέλων μέτριας και υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Για την πρόβλεψη του χρόνου κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν τόσο τα STL όσο και τα CLI μοντέλα των αντικειμένων έτσι ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια και των δύο μεθόδων. Η ισχύς του laser που χρησιμοποιήθηκε κατά την πρόβλεψη ήταν ίση με την μέση τιμή των καταγραφών της ισχύος κατά το αμέσως προηγούμενο χρονικό διάστημα. Επισημαίνεται επίσης ότι το προβλεπόμενο, και με τις δύο μεθόδους, συνολικό μήκος σάρωσης εσωτερικού και

περιγράμματος αυξήθηκε κατά 0.8%, ποσοστό ίσο με την αντιστάθμιση συρρίκνωσης που εφαρμόστηκε στις εξεταζόμενες εργασίες.

Πίνακας 4.6. Πραγματικός και προβλεπόμενος χρόνος κατασκευής για διάφορες εργασίες.

Εργασία	Χρόνος (hr)	CLI Εκτίμηση (hr)	CLI Απόκλ. (%)	STL Εκτίμηση (hr)	STL Απόκλ. (%)	Προβλεπ. P _L (mW)	Καταγεγρ. P _L (mW)	P _L Απόκλ. (%)
intr-2	4.136	4.055	-1.96	3.686	-10.88	35.5	34.6	-2.60
intr3	8.045	8.187	1.77	7.365	-8.45	34.5	35.1	1.71
vior-hand	7.015	6.865	-2.14	6.249	-10.92	34.4	34.1	-0.88
mavilek2	5.700	5.615	-1.49	5.677	-0.40	34.0	33.9	-0.29
francel	11.753	12.104	2.99	11.946	1.64	34.0	34.0	0.00
intr11	9.726	9.713	-0.13	9.315	-4.23	36.5	35.8	-1.96
intr-12	6.181	6.320	2.25	6.321	2.27	35.5	35.8	0.84
intr-10b	5.846	5.824	-0.38	5.499	-5.94	36.5	36.8	0.82
intr9	3.773	3.697	-2.01	3.569	-2.04	37.0	36.5	-1.37
intr-8	11.282	11.332	0.44	10.481	-8.01	37.5	37.0	-1.35
intr-7	7.909	7.479	-5.44	8.071	2.05	37.3	37.6	0.80
vhandle2	16.423	16.11	-1.91	15.890	-3.25	34.1	34.0	-0.29

Παρατηρείται ότι η πρόβλεψη χρησιμοποιώντας τα δεδομένα CLI εμφανίζει ακρίβεια 1.91% κατά μέσο όρο, ακρίβεια η οποία είναι ελαφρώς καλύτερη αυτής που αναφέρεται στις αντίστοιχες μελέτες των Chen-Sullivan [81] και McClurkin-Rosen [82]. Μέρος των παρατηρούμενων λαθών πρόβλεψης οφείλεται προφανώς στην αυξομείωση της ισχύος του Laser. Εκ των υστέρων σύγκριση της προβλεπόμενης και της αντίστοιχης μέσης καταγεγραμμένης ισχύος, οι οποίες περιέχονται επίσης στον Πίνακα 4.6, εμφανίζει μία απόκλιση της τάξης του 1%.

Οι προβλέψεις του STL εργαλείου εκτίμησης του χρόνου κατασκευής, το οποίο εντάσσεται στο ΣΥΕΠΑΚ έχει μικρότερη ακρίβεια λόγω των επιπρόσθετων μειονεκτημάτων της μη δυνατότητας υπολογισμού του αριθμού των διανυσμάτων σάρωσης (και της αντίστοιχης χρονικής υστέρησης) αλλά και της σχετικής ανακρίβειας στον υπολογισμό του χρόνου σάρωσης για το πλέγμα στήριξης. Ωστόσο η μέση ακρίβεια των STL εκτιμήσεων είναι της τάξεως του 5%, ενώ η μέγιστη απόκλιση ξεπερνά ελάχιστα το 10% ποσοστό το οποίο θεωρείται ότι πληροί τις απαιτήσεις ακρίβειας στην φάση της επιλογής προσανατολισμού και πάχους στρώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ποιότητα επιφανειών αντικειμένου

5.1 Εισαγωγή

Η στρωματική φύση της κατασκευής των τΤΚΠ είναι η αιτία της κατασκευαστικής ταχύτητας αποτελεί όμως και την αιτία εμφάνισης σχετικά μεγάλης τραχύτητας επιφανειών λόγω του φαινομένου κλίμακας. Επιπλέον στην περίπτωση της Στερεολιθογραφίας η ανάγκη στήριξης ορισμένων επιφανειών επιδρά επίσης αρνητικά στην ποιότητά τους. Η ποιότητα (τραχύτητα) των επιφανειών αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά αξιολόγησης της κατασκευαστικής ποιότητας ενός αντικειμένου, καθώς έχει σημασία τόσο από άποψη αισθητικής όσο και λειτουργικότητας. Ιδιαίτερως σημαντική θεωρείται στην περίπτωση κατασκευής εξαρτημάτων ή τμημάτων ενός συστήματος τα οποία κατά την λειτουργία τους έρχονται σε επαφή με άλλα εξαρτήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση καλουπιών, μητρών και εργαλείων χύτευσης γενικά όπως προτύπων (μοδέλων), όπου η υψηλή τραχύτητα επιφανειών μειώνει τον ωφέλιμο χρόνο ζωής τους ή προκαλεί λειτουργικά προβλήματα όπως δυσκολία αφαίρεσης του χυτού από το καλούπι μετά την χύτευση. Καθώς η πλήρης εξαφάνιση του φαινομένου κλίμακας και των στηριγμάτων είναι πρακτικά αδύνατη η μείωση της τραχύτητας επιτυγχάνεται συνήθως μέσω δευτερευόντων κατεργασιών λείανσης ή κάλυψης (coating).

Η λείανση των αντικειμένων πραγματοποιείται κυρίως χειρωνακτικά από ειδικευμένο τεχνίτη με την βοήθεια μικροεργαλείων, ενώ σπάνια χρησιμοποιούνται μηχανικές μέθοδοι και κατεργασίες όπως αμμοβολή, ψεκασμός ειδικών βαφών / βερνικιών καθώς και λείανση σε κλειστούς θαλάμους μέσω ανάδευσης (barrel tumbling) και δόνησης (vibratory finishing) [85]. Λύση στο πρόβλημα της τραχύτητας μπορεί να δοθεί και με την πρόσθεση υλικού - κάλυψη (coating) σε επιφάνειες όπου παρουσιάζεται αρνητικό σφάλμα κλίμακας [86]. Οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα ή και σε συνδυασμό, σε κάθε περίπτωση όμως απαιτείται και πάλι η παρέμβαση τεχνίτη που θα πραγματοποιήσει το τελικό φινιρίσμα και θα τελειοποιήσει το αποτέλεσμα. Αυτό βεβαίως

συνεπάγεται πολλές ώρες χειρωνακτικής εργασίας, οι οποίες σύμφωνα με εκτιμήσεις άγγιξαν το 1994 τις 48000 εργατοώρες [87], αριθμός που θεωρείται ότι είναι σήμερα αρκετά υψηλότερος με την περαιτέρω διάδοση των τΤΚΠ.

Η εμπειρία του τεχνίτη παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο καθώς οι μηχανικές ιδιότητες της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης επιβάλουν προσεκτικό χειρισμό των αντικειμένων και πλήρη εξοικείωση με τη φύση και τις ιδιαιτερότητες του υλικού έτσι ώστε να αποφευχθούν τα λάθη και το μεγάλο ποσοστό απορριφθέντων αντικειμένων. Επιπλέον η φάση της τελειοποίησης (φινιρίσματος) του μοντέλου καθορίζει όχι μόνο το τελικό αισθητικό αποτέλεσμα αλλά και την διαστασιολογική ακρίβεια των αντικειμένων, καθώς η αφαίρεση (λείανση) ή πρόσθεση (ψεκασμός, επίστρωση) υλικού στις κλιμακωτές επιφάνειες μπορεί να επηρεάσει τις αντίστοιχες διαστάσεις.

Το είδος των εργασιών τελειοποίησης καθώς και το βαθμό στον οποίο αυτές απαιτούνται καθορίζονται από την τραχύτητα των επιφανειών του ακατέργαστου μοντέλου. Ως ακατέργαστο λαμβάνεται το μοντέλο που εξάγεται από την μηχανή της Στερεολιθογραφίας και το οποίο δεν έχει υποστεί καμία περαιτέρω κατεργασία πέραν του καθαρισμού σε διαλύτη για την αφαίρεση των υπολειμμάτων υγρής ρητίνης και του πλέγματος στήριξης. Τόσο ο προσανατολισμός κατασκευής όσο και το πάχος στρώματος επηρεάζουν καθοριστικά την τραχύτητα των επιφανειών του ακατέργαστου μοντέλου, καθώς από τις δύο αυτές παραμέτρους καθορίζεται η έκταση/ένταση του φαινομένου κλίμακας. Ανάλογα με τον προσανατολισμό κατασκευής καθορίζονται επίσης οι στηριζόμενες επιφάνειες, οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένη τραχύτητα λόγω της παρουσίας υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης. Με στόχο να προσδιοριστεί η τραχύτητα των επιφανειών του ακατέργαστου μοντέλου συναρτήσεως του προσανατολισμού κατασκευής και του πάχους στρώματος διενεργήθηκε μία σειρά πειραματικών μετρήσεων της τραχύτητας των επιφανειών ειδικά σχεδιασμένων δοκιμίων.

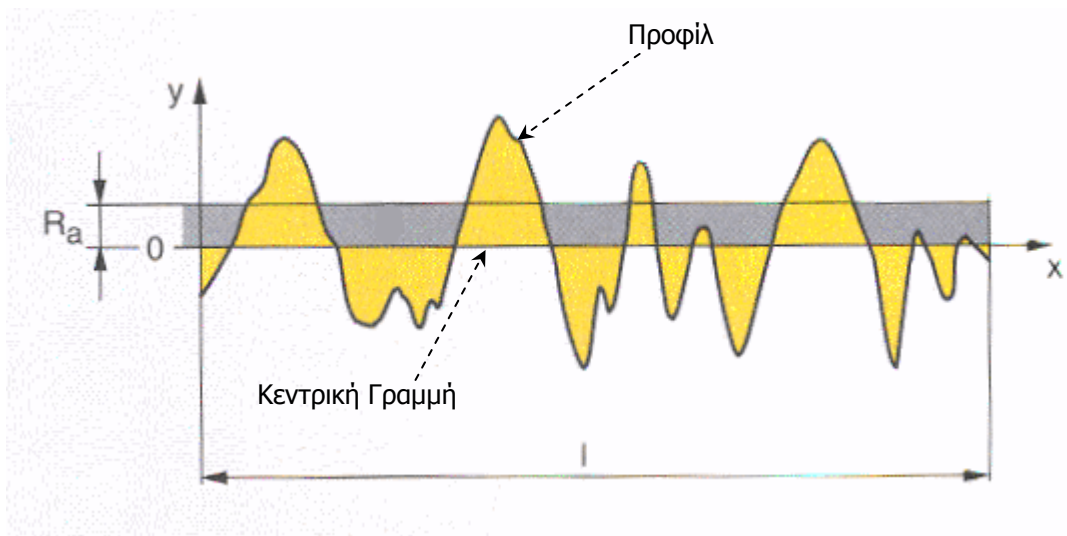
5.2 Θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης τραχύτητας

Η ένταση του φαινομένου κλίμακας που είναι βασική αιτία της παρατηρούμενης τραχύτητας συναρτάται άμεσα με το πάχος στρώματος και την κλίση της επιφάνειας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (επίπεδο XY), τον προσανατολισμό δηλαδή της επιφάνειας στον χώρο. Είναι συνεπώς χρήσιμο κατά την προπαρασκευαστική φάση όπου καθορίζονται οι δύο αυτές παράμετροι να υπάρχει μία ένδειξη ή εκτίμηση της τραχύτητας των επιφανειών του αντικειμένου για διαφορετικά πάχη στρώματος και προσανατολισμούς.

Θεωρητικά γνωρίζοντας την τιμή του πάχους στρώματος μίας επιφάνειας και την γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο μπορούμε να έχουμε μία ένδειξη της ποιότητάς της με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων. Μία ένδειξη αυτού του είδους αποτελεί η εκτίμηση ύψους της «οδόντωσης»

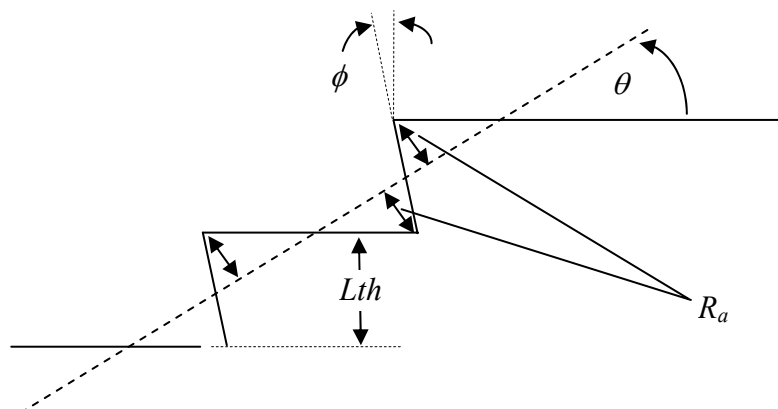
ή της μέσης τραχύτητας. Ως μέση τραχύτητα (Roughness average) R_a ορίζεται η μέση τιμή των απόλυτων αποκλίσεων $|y(x)|$ του μετρούμενου «προφίλ» (ίχνους) της επιφάνειας από την ιδεατή κεντρική γραμμή για μήκος l . Προφίλ μίας επιφάνειας ονομάζουμε την θεωρητική γραμμή που προκύπτει από την τομή της μετρούμενης επιφάνειας με το κάθετο εκείνο επίπεδο κατά μήκος του οποίου γίνεται η μέτρηση (Σχήμα 5.1).

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (5.1)$$



Σχήμα 5.1. Σχηματική αναπαράσταση της μέσης τραχύτητας επιφάνειας.

Θεωρητικά μία κλιμακωτή επιφάνεια θα παρουσιάζει υπό μεγέθυνση την μορφή του Σχήματος 5.2. όπου Lth είναι το πάχος στρώματος, θ η κλίση της επιφάνειας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο και ϕ η γωνία που σχηματίζεται κατά την σάρωση των στρωμάτων λόγω της παραβολοειδούς μορφής της περιοχής πολυμερισμού.



Σχήμα 5.2. Σχηματική αναπαράσταση της θεωρητικής τραχύτητας σε άνω επικλινή επιφάνεια.

Σύμφωνα με τους Reeves & Cobb [88] και με βάση το γεωμετρικό μοντέλο του Σχήματος 5.2 η

μέση τραχύτητα R_a μιας ακατέργαστης επίπεδης επιφάνειας ισούται με:

$$R_a(up) = \frac{Lth(\tan \phi \sin \theta + \cos \theta)}{4} \quad (5.1)$$

$$R_a(down) = \frac{Lth(\tan \phi_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1)}{4} \quad (5.2)$$

όπου $R_a(up)$ είναι η μέση τραχύτητα των άνω επιφανειών ($0 < \theta \leq 90 + \phi$) και $R_a(down)$ η μέση τραχύτητα των κάτω επιφανειών ($90 + \phi < \theta < 180$). Στην Σχέση (5.2) υπολογισμού της τραχύτητας κάτω επιφανειών χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές θ_1 και ϕ_1 οι οποίες προκύπτουν ως εξής:

$$\theta_1 = 180^\circ - \theta \quad \text{και} \quad \phi_1 = -\phi \quad (5.3)$$

Οι άνω και κάτω οριζόντιες επιφάνειες ($\theta = 0^\circ$ και $\theta = 180^\circ$ αντίστοιχα) θεωρείται ότι είναι εντελώς λείες, συνεπώς ισχύει:

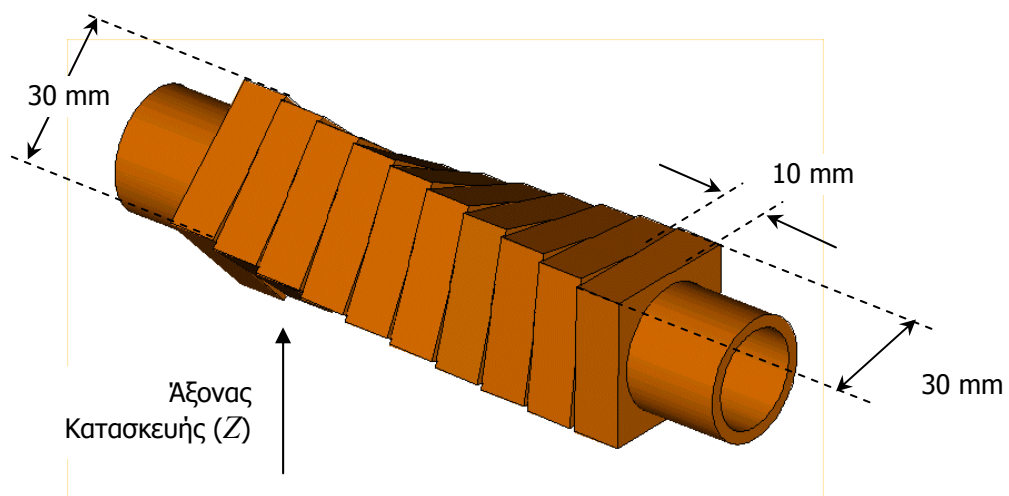
$$R_a(0^\circ) = R_a(180^\circ) = 0 \quad (5.4)$$

Από πρακτικής απόψεως το θεωρητικό μοντέλο της τραχύτητας μπορεί να φανεί χρήσιμο για την συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών προσανατολισμών και τιμών για το πάχος στρώματος προηγούμενες μελέτες ωστόσο απέδειξαν ότι δεν ανταποκρίνεται με μεγάλη ακρίβεια στις μετρούμενες πειραματικά τιμές για όλες σχεδόν τις τΤΚΠ [88,89,90]. Πιθανή αιτία για αυτό αποτελούν οι διαφορές στην «μικρο-τοπογραφία» των διαφόρων μεθόδων [90], δευτερεύοντα δηλαδή γεωμετρικά γνωρίσματα σε επίπεδο στρώματος που λειτουργούν αυξητικά ή μειωτικά της τραχύτητας. Αιτία ανακρίβειας επίσης πιθανόν να αποτελεί το γεγονός ότι στο προαναφερθέν θεωρητικό μοντέλο δεν συνυπολογίζεται η επίδραση των υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης στην τραχύτητα των στηριζόμενων επιφανειών. Ως στηριζόμενες επιφάνειες λαμβάνονται όσες έχουν κλίση 150° - 180° .

Για να εξετασθεί η ακρίβεια του θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης της τραχύτητας μιας επιφάνειας και να μετρηθεί η επίδραση πιθανών παραγόντων άμβλυνσης ή όξυνσης, όπως των υπολειμμάτων στήριξης που δεν συνυπολογίζονται στο θεωρητικό μοντέλο, μετρήθηκε η τραχύτητα ειδικά σχεδιασμένων δοκιμίων. Παρά την ύπαρξη προηγούμενων αντίστοιχων μελετών για την τεχνική της Στερεολιθογραφίας [88,90] θεωρείται επιβεβλημένη η πειραματική της διερεύνηση και στα πλαίσια της παρούσας μελέτης λόγω τόσο του μικρού πλήθους των σχετικών μελετών όσο και των διαφορών που εμφανίζει το εξεταζόμενο σύστημα Στερεολιθογραφίας και ο χρησιμοποιούμενος τύπος ρητίνης.

5.3 Πειραματικός έλεγχος θεωρητικού μοντέλου

Για τον έλεγχο του θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης της τραχύτητας κατασκευάστηκαν και εξετάστηκαν μία σειρά δοκιμών αντίστοιχων με αυτά που χρησιμοποιούνται από τους Reeves-Cobb [88]. Τα δοκίμια είναι σχεδιασμένα κατά τρόπο (βλέπε σχήμα 5.3) έτσι ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της τραχύτητας επίπεδων επιφανειών με κλίση $0^\circ - 180^\circ$ σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Κατασκευάστηκαν τρία δοκίμια, ένα για κάθε τιμή του πάχους στρώματος (δοκίμια «0.10», «0.15» και «0.20») σύμφωνα με τις συνήθειες χρησιμοποιούμενες παραμέτρους σάρωσης. Κατά τη φάση του καθαρισμού απομακρύνθηκαν «προσεκτικά» τα στηρίγματα με πλύσιμο του αντικειμένου σε διάλυμα ακετόνης ενώ δεν έγινε καμία επιπλέον εργασία τελειοποίησης (λείανση ή κάλυψη).



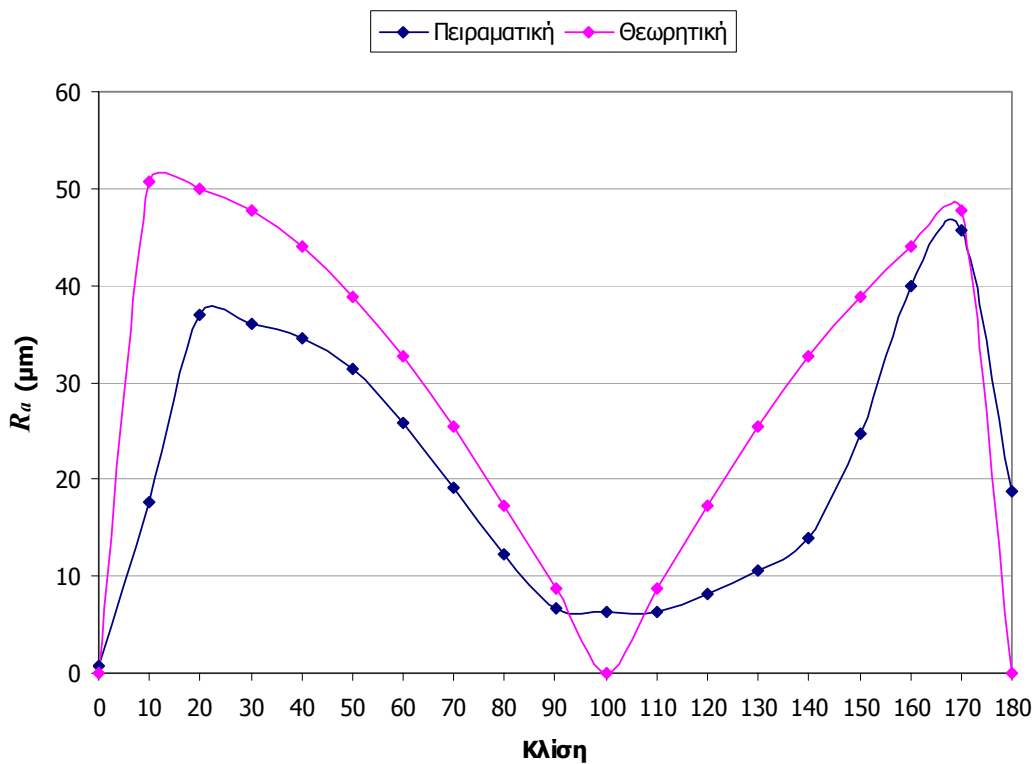
Σχήμα 5.3. Δοκίμιο μέτρησης τραχύτητας επιφανειών

Τα τρία δοκίμια μετρήθηκαν στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Μηχανολογικών Κατασκευών & Σχεδιασμού του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για τη μέτρηση της τραχύτητας τα δοκίμια προσαρμόστηκαν σε μία ιδιοσυσκευή συγκράτησης κατά τον οριζόντιο άξονα και χρησιμοποιήθηκε το απτικό τραχύμετρο χειρός *Taylor-Hobson Surtronic 3+*. Σε κάθε δοκίμιο πάρθηκαν μετρήσεις μέσης τραχύτητας των επίπεδων επιφανειών ανά 10° . Για κάθε μία από αυτές τις επιφάνειες ελήφθησαν τρεις μετρήσεις κατά μήκος και ανά 3 mm περίπου. Με βάση τις τρεις μετρήσεις υπολογίστηκε η μέση τραχύτητα για κάθε συνδυασμό πάχους στρώματος και γωνίας μίας επίπεδης επιφάνειας με το οριζόντιο επίπεδο.

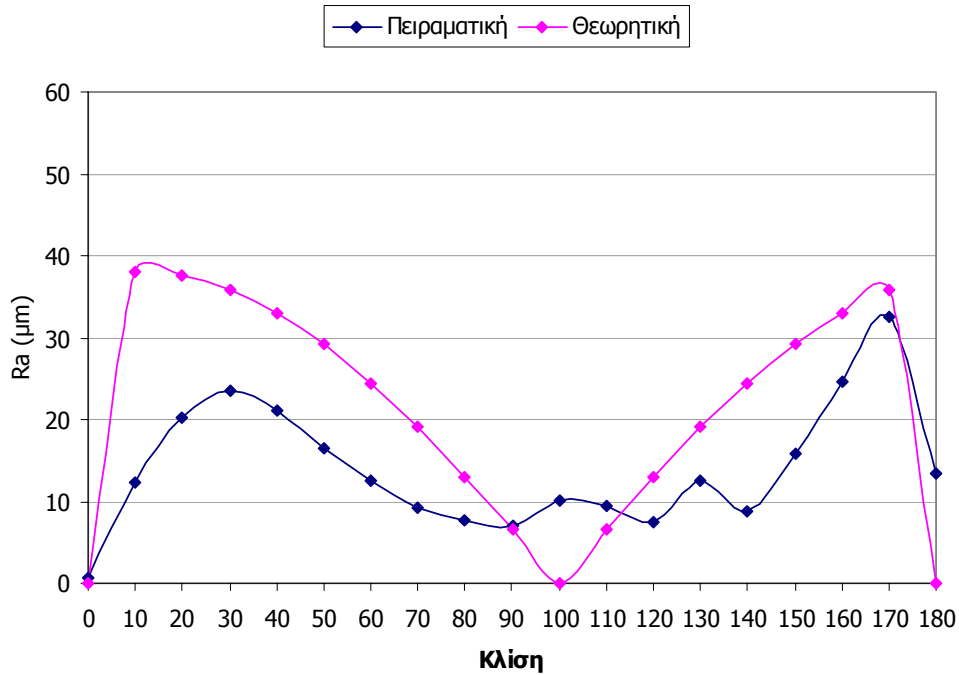
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων τραχύτητας για τα τρία δοκίμια παρουσιάζονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.4, 5.5 και 5.6 όπου και συγκρίνονται με τις θεωρητικά εκτιμώμενες τιμές για το αντίστοιχο πάχος στρώματος και γωνία. Επισημαίνεται ότι για τον υπολογισμό της θεωρητικής τραχύτητας έγινε η υπόθεση ότι $\phi = 10^\circ$, τιμή αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε από τους Reeves-Cobb. Από την σύγκριση των δύο καμπυλών και για τις τρεις τιμές του πάχους στρώματος προκύπτει ότι και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η παρατηρούμενη τραχύτητα είναι σημαντικά μικρότερη της θεωρητικής. Εξαιρέση αποτελούν οι άνω οριζόντιες επιφάνειες

($\theta=0^\circ$), οι οποίες και στα τρία δοκίμια παρουσιάζουν τραχύτητα που προσεγγίζει το μηδέν, όπως είχε αρχικά υποθεθεί, καθώς και οι επιφάνειες με κλίση 160° - 170° όπου η πειραματική τραχύτητα προσεγγίζει την θεωρητική. Διαφορές παρουσιάζονται επίσης στην μορφή των καμπυλών της τραχύτητας οι οποίες μπορούν να συνοψιστούν στα εξής σημεία κάποιες διαφορές :

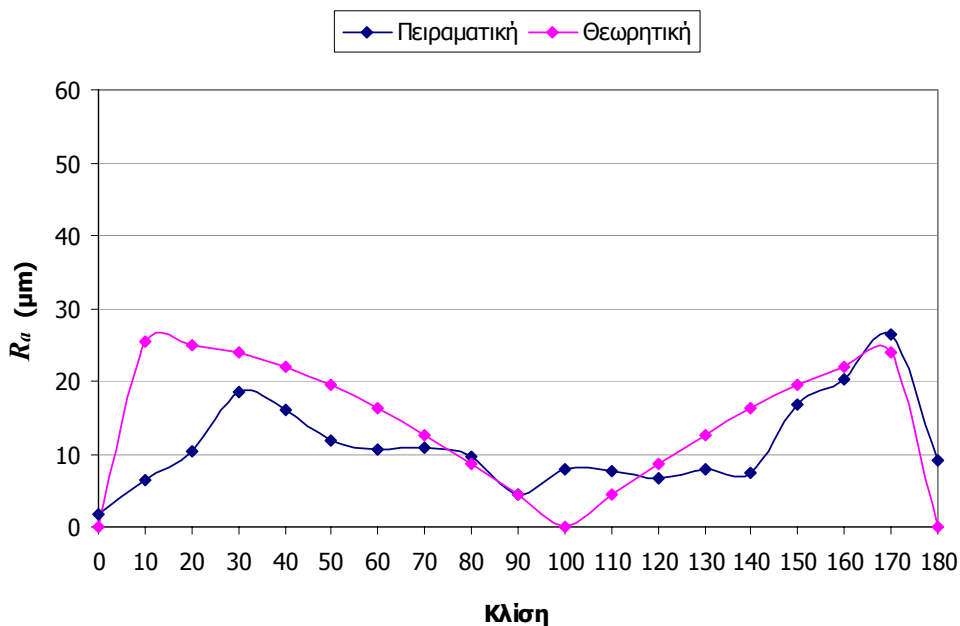
- Όσο αυξάνεται η κλίση των επιφανειών και μέχρι κλίση 30° παρατηρείται ομαλότερη αύξηση της τραχύτητας από ότι θεωρητικά αναμενόταν.
- Καθώς αυξάνεται η κλίση των επιφανειών παρατηρείται μείωση της τραχύτητας, η οποία πρακτικά σταθεροποιείται για το διάστημα 90° - 110° , χωρίς να μηδενίζεται για κλίση 100° όπως αναμενόταν.
- Σημαντικά μειωμένη τραχύτητα σε σύγκριση με την θεωρητική παρατηρείται για επιφάνειες με κλίση 110° - 150° .
- Στις στηριζόμενες επιφάνειες ($150^\circ < \theta \leq 180^\circ$) η μετρηθείσα προσεγγίζει και σε πολλές περιπτώσεις ξεπερνά την θεωρητική
- Η τραχύτητα των κάτω οριζόντιων επιφανειών δεν είναι μηδενική όπως θεωρητικά προβλεπόταν.



Σχήμα 5.4. Θεωρητική και πειραματικά μετρηθείσα τραχύτητα επιφανειών δοκιμίου «0.20».



Σχήμα 5.5. Θεωρητική και πειραματικά μετρηθείσα τραχύτητα επιφανειών δοκιμίου «0.15».

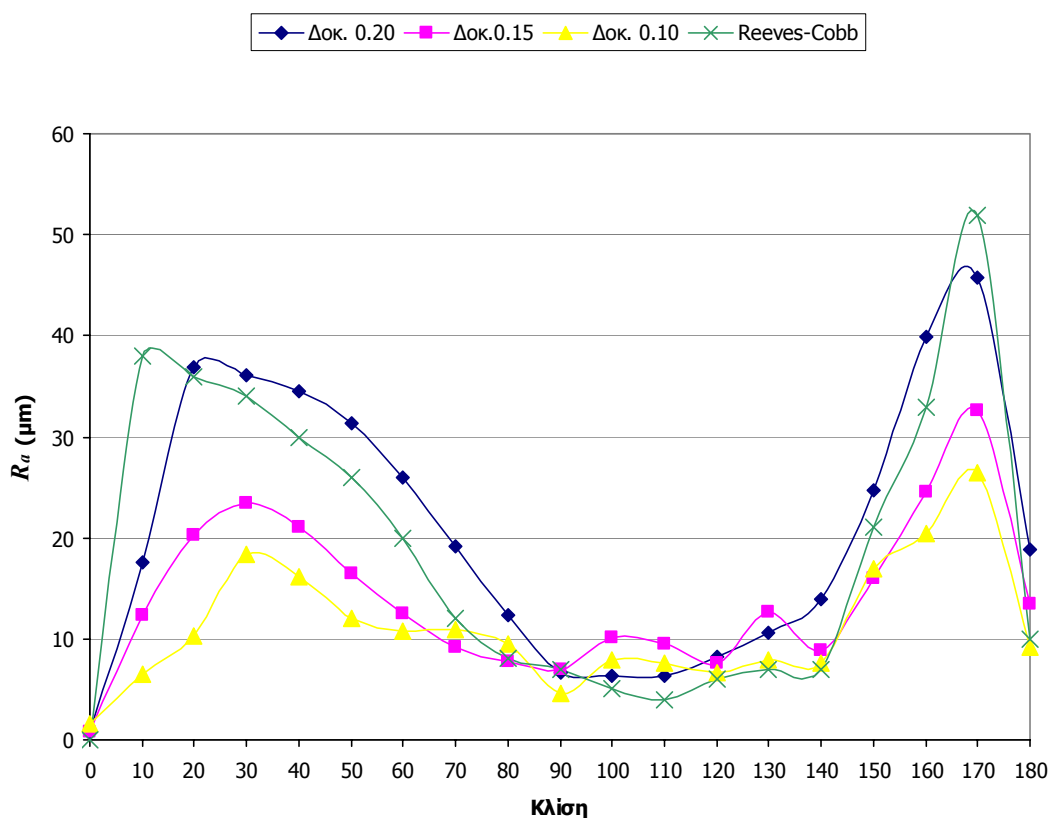


Σχήμα 5.6. Θεωρητική και πειραματικά μετρηθείσα τραχύτητα επιφανειών δοκιμίου «0.10».

Η συγκριτικά μειωμένη τραχύτητα που παρατηρείται για γωνίες μεταξύ 110° και 150° οφείλεται πιθανότατα στον έμμεσο πολυμερισμό μικρής ποσότητα ρητίνης (φαινόμενο print-through), φαινόμενο το οποίο έχει εντοπιστεί από τον Jacobs [91]. Το φαινόμενο της εξομάλυνσης λόγω έμμεσου πολυμερισμού παρατηρείται στις κάτω επιφάνειες, καθώς επιπλέον ποσότητα ρητίνης στερεοποιείται στην περιοχή σύνδεσης δύο διαδοχικών στρωμάτων, λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία προερχόμενη από την σάρωση ανώτερων στρωμάτων. Κατά αυτό τον τρόπο σχηματίζεται μία

μικρή στερεοποιημένη ζώνη η οποία εξομαλύνει το φαινόμενο κλίμακας μειώνοντας έτσι και την μέση τραχύτητα.

Αντίστοιχα αποτελέσματα με αυτά που καταγράφονται από τον πειραματικό έλεγχο παρουσιάζονται και στην αντίστοιχη μελέτη των Reeves-Cobb [88], η οποία πραγματοποιήθηκε σε σύστημα Στερεολιθογραφίας σημειακής σάρωσης (3D Systems SLA 250) με πάχος στρώματος 0.15 mm. Τα αποτελέσματα μέτρησης της μέσης τραχύτητας των τριών δοκιμίων καθώς και τα αντίστοιχα από την μελέτη των Reeves-Cobb παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.7, όπου είναι εμφανής η αντιστοιχία στην μορφή των καμπυλών τραχύτητας. Όπως είναι εμφανές ότι η μέση τραχύτητα μειώνεται σημαντικά όσο μειώνεται το πάχος στρώματος, όπως άλλωστε αναμενόταν.



Σχήμα 5.7. Σύγκριση τραχύτητας δοκιμίων και αποτελεσμάτων μελέτης Reeves-Cobb.

Ωστόσο παρατηρούνται κάποιες διαφορές στις επιμέρους τιμές της μέσης τραχύτητας ειδικά σε σύγκριση με το δοκίμιο «0.15» όπου οι μετρήσεις είναι άμεσα συγκρίσιμες. Οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να αποδοθούν τόσο στην χρήση διαφορετικών συστημάτων με διαφορετικούς μηχανισμούς/παραμέτρους σάρωσης και διαφορετική ρητίνη, αλλά και στην χρήση διαφορετικών μεθόδων μέτρησης, αφού στην μελέτη των Reeves-Cobb η τραχύτητα μετράται με εξοπλισμό οπτικής μέτρησης

Αντίστοιχη εξομάλυνση της τραχύτητας σε σύγκριση με την θεωρητικά αναμενόμενη

παρατηρείται και στα επίπεδα με κλίση 10° - 30° και στα τρία δοκίμια. Η εξομάλυνση αυτή πιθανότατα οφείλεται στην συσσώρευση ατελούς πολυμερισμένης ρητίνης στα όρια μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων, στην οποία συνεχίζεται η διαδικασία πολυμερισμού ακόμη και μετά το τέλος της σάρωσης, φαινόμενο αντίστοιχο του έμμεσου πολυμερισμού των κάτω επιφανειών (print-through).

Η επίδραση του πλέγματος στήριξης είναι εμφανής στην μετρούμενη μέση τραχύτητα των επιφανειών με κλίση 150° - 180° . Η μέση τραχύτητα λαμβάνει την μέγιστη τιμή της στις επιφάνειες με κλίση 170° λόγω πιθανότατα του συνδυαζόμενου αποτελέσματος του κλιμακωτού φαινομένου και της παρουσίας υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης. Η επαφή με το πλέγμα στήριξης είναι πιθανότατα και η βασική αιτία εμφάνισης τραχύτητας μεγαλύτερη της αναμενόμενης στις κάτω οριζόντιες επιφάνειες των δοκιμίων.

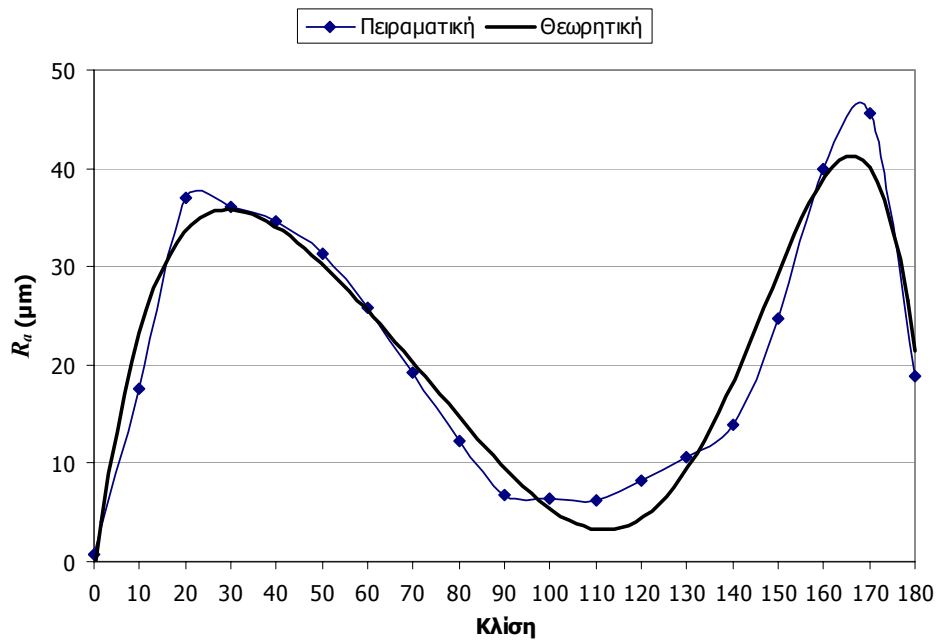
Όπως είναι εμφανές από τα αποτελέσματα του πειραματικού ελέγχου απαιτείται διόρθωση του θεωρητικού μοντέλου εκτίμησης της τραχύτητας έτσι ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση τόσο των παραγόντων εξομάλυνσης, όπως το φαινόμενο έμμεσου πολυμερισμού, όσο και αύξησης της τραχύτητας, όπως η παρουσία υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων και χρησιμοποιώντας την μέθοδο της regression analysis προσδιορίστηκαν τρεις νέες σχέσεις πρόβλεψης της τραχύτητας, μία για κάθε τιμή του πάχους στρώματος. Οι σχέσεις πρόβλεψης της τραχύτητας ενός επιπέδου με κλίση s για πάχος στρώματος ίσο με 0.20 mm – $R_{\alpha}(0.20,s)$, 0.15 mm – $R_{\alpha}(0.15,s)$ και 0.10 mm – $R_{\alpha}(0.10,s)$ είναι οι εξής:

$$R_{\alpha}(0.20,s) = -2E-10 s^6 + 1E-07 s^5 - 2E-05 s^4 + 0,0021 s^3 - 0,1226 s^2 + 3,5109 s - 1,359 \quad (5.5)$$

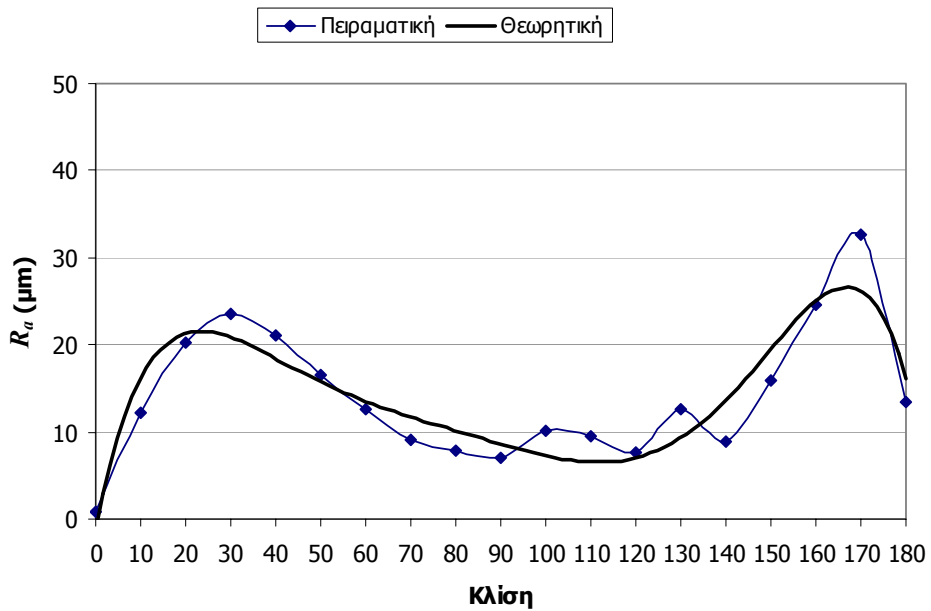
$$R_{\alpha}(0.15,s) = -2E-10 s^6 + 9E-08 s^5 - 2E-05 s^4 + 0,002 s^3 - 0,1072 s^2 + 2,6154 s - 1,1609 \quad (5.6)$$

$$R_{\alpha}(0.10,s) = -1E-10 s^6 + 6E-08 s^5 - 1E-05 s^4 + 0,001 s^3 - 0,0501 s^2 + 1,3187 s + 0,1169 \quad (5.7)$$

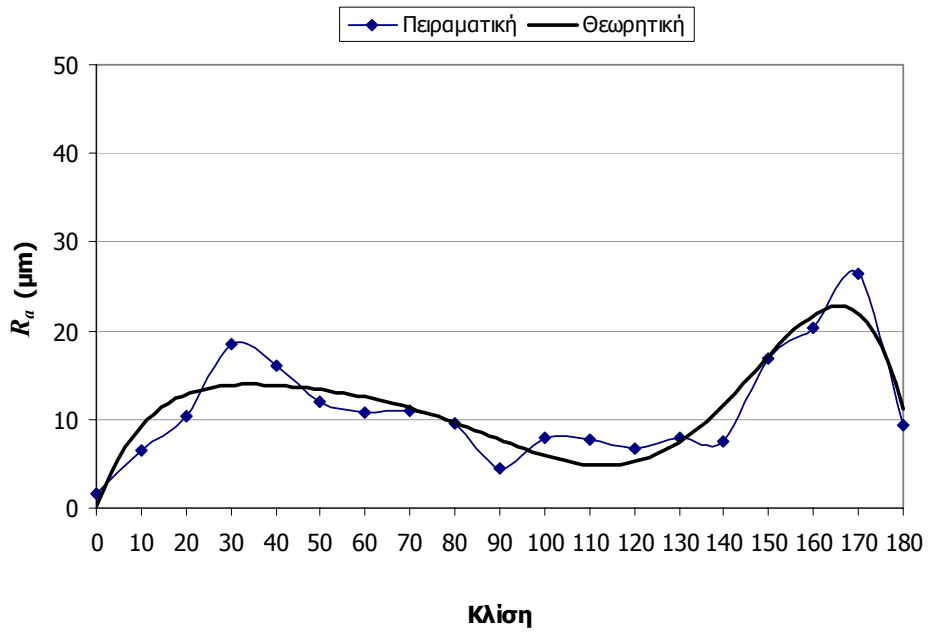
Οι σχέσεις (5.5)-(5.7) καθώς και οι πειραματικά μετρηθείσες τραχύτητες ανά δοκίμιο - πάχος στρώματος παρουσιάζονται γραφικά στα Σχήματα 5.8-5.10.



Σχήμα 5.8. Σύγκριση μετρήσεων τραχύτητας δοκιμίων και προσαρμοσμένου θεωρητικού μοντέλου για πάχος στρώματος 0.20 mm.



Σχήμα 5.9. Σύγκριση μετρήσεων τραχύτητας δοκιμίων και προσαρμοσμένου θεωρητικού μοντέλου για πάχος στρώματος 0.15 mm.



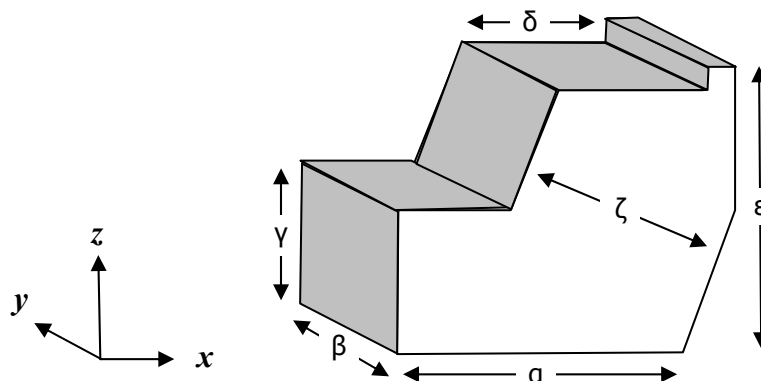
Σχήμα 5.10. Σύγκριση μετρήσεων τραχύτητας δοκιμίων και προσαρμοσμένου θεωρητικού μοντέλου για πάχος στρώματος 0.20 mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Ακρίβεια κατασκευής αντικειμένου

6.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο 2.1 παρουσιάστηκαν οι πιθανές αιτίες εμφάνισης διαστασιολογικών σφαλμάτων στην κατασκευή ενός αντικειμένου με την τεχνική της Στερεολιθογραφίας. Ως διαστασιολογικό σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ της «πραγματικής» (μετρούμενης) και της ονομαστικής (θεωρητικής) τιμής μίας διάστασης. Εάν υποθεθεί ότι δεν υφίσταται πρόβλημα κλειστού όγκου και ότι το λάθος ψηφιοποίησης είναι αμελητέο προκύπτει ότι η ακρίβεια απόδοσης μίας οποιασδήποτε διάστασης του αντικειμένου επηρεάζεται από όλους ή κάποιους από τους εξής τέσσερις παράγοντες: την συρρίκνωση, το φαινόμενο κλίμακας, την υπερστερεοποίηση και την ύπαρξη λαθών τεμαχισμού. Ποιοι από τους παραπάνω παράγοντες και σε ποιο βαθμό επηρεάζουν την ακρίβεια της διάστασης εξαρτάται από τον διεύθυνση της στο χώρο. Για παράδειγμα στο αντικείμενο του Σχήματος 6.1 η ακρίβεια των οριζόντιων διαστάσεων «α», «β» και «δ» εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια απόδοσης της γεωμετρίας κάθε επιμέρους στρώματος και συνεπώς με τον παράγοντα της γραμμικής συρρίκνωσης. Η ακρίβεια των κάθετων διαστάσεων από την άλλη, όπως οι διαστάσεις «γ» και «ε», επηρεάζεται από την γραμμική συρρίκνωση η οποία συνεπάγεται την εμφάνιση κυρτών παραμορφώσεων, την υπερστερεοποίηση και ίσως κάποιο λάθος τεμαχισμού. Οι παραπάνω παράγοντες με την προσθήκη του παράγοντα του φαινομένου κλίμακας καθορίζουν τέλος την ακρίβεια της διαγώνιας διάστασης «ζ», διάστασης μεταξύ δύο εδρών που δεν ούτε κάθετες αλλά ούτε και παράλληλες με το επίπεδο της πλατφόρμας (XY). Στις μη οριζόντιες διαστάσεις δεν πρέπει κανείς να ξεχνά και την πιθανότητα μεγέθυνσης λόγω υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης.



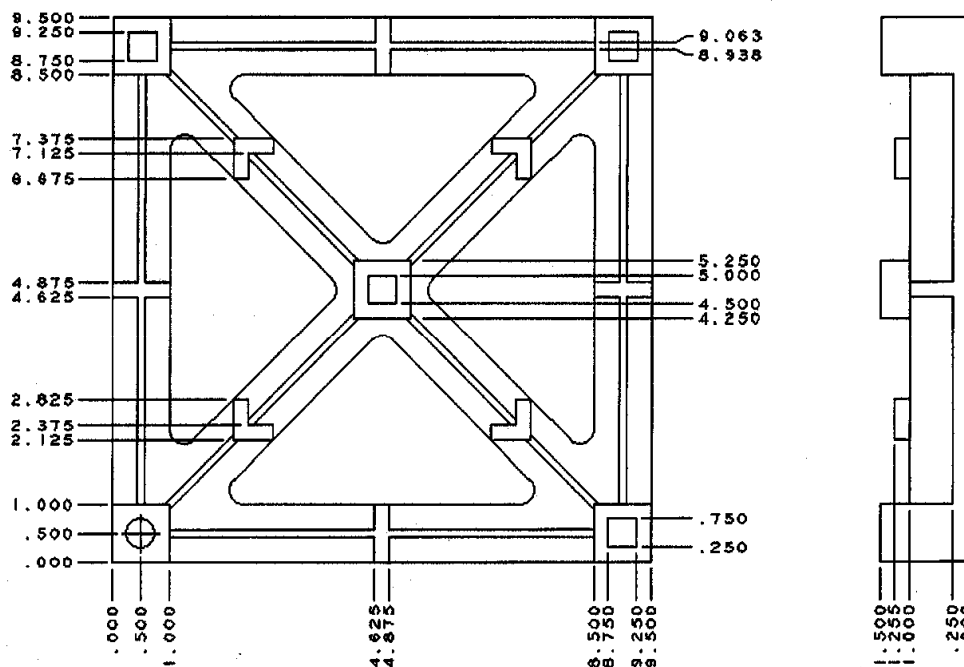
Σχήμα 6.1 Ταξινόμηση των διαστάσεων ενός αντικειμένου ανάλογα με τον διεύθυνσή τους.

Θεωρητικά η ακρίβεια κατασκευής πρέπει να είναι μέγιστη κατά τις οριζόντιες διαστάσεις καθώς η ακρίβεια των διαστάσεων επηρεάζεται μόνο από την συρρίκνωση, για την οποία προβλέπεται και η αντίστοιχη αντιστάθμιση (compensation). Αντίθετα στις μη οριζόντιες διαστάσεις είναι πρακτικά δύσκολη η χρησιμοποίηση τεχνικών αντιστάθμισης με αποτέλεσμα η ακρίβεια να είναι αρκετά χαμηλότερη [92]. Στις παραπάνω διαπιστώσεις και υποθέσεις στηρίζονται οι βασικοί εμπειρικοί κανόνες κατασκευής για βέλτιστη ποιότητας όπως:

- Η επιλογή προσανατολισμού κατά τον οποίο κρίσιμες διαστάσεις τοποθετούνται στο οριζόντιο επίπεδο
- Η ελαχιστοποίηση των επικλινών επιφανειών και του συνεπαγόμενου φαινομένου κλίμακας.
- Η χρήση μικρού πάχους στρώματος έτσι ώστε να μειωθεί η ένταση του φαινομένου κλίμακας, η πιθανότητα εμφάνισης λαθών τεμαχισμού καθώς και η τιμή της υπερστερεοποίησης.
- Η ελαχιστοποίηση των στηριζόμενων επιφανειών.

Η επίτευξη της βέλτιστης ακρίβειας στο οριζόντιο επίπεδο επιβεβαιώθηκε πειραματικά και σε προηγούμενες μελέτες ακρίβειας της Στερεολιθογραφίας αν και υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στις καταγεγραμμένες ανοχές ακριβείας και τα συμπεράσματα. Στην πρώτη χρονολογικά μελέτη του Jacobs [92] προτείνεται για την αξιολόγηση της ακρίβειας η κατασκευή του δοκιμίου "User Part" το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2. Στη μελέτη αυτή αναφέρεται ακρίβεια της τάξεως του 0.10 mm για το 90% των διαστάσεων, οι οποίες όμως αφορούν μόνο ορθογωνικές διαστάσεις (παράλληλες σε ένα από τους τρεις άξονες), με έμφαση στις οριζόντιες (91% των μετρούμενων διαστάσεων). Επισημαίνεται ότι τα παραπάνω αποτελέσματα είναι τα βέλτιστα που επιτυγχάνονται μετά από διαδοχικούς κύκλους μέτρησης και ρύθμισης των αντισταθμίσεων συρρίκνωσης και εστίασης. Αντίστοιχα αποτελέσματα για την Στερεολιθογραφία αναφέρονται και από τους Reeves – Cobb σε μία συγκριτική μελέτη ακριβείας των τΤΚΠ [93] ενώ ελαφρώς καλύτερη ακρίβεια αναφέρεται από τους Bedal-Nguyen [94], οι οποίοι ακολουθούν την ίδια μεθοδολογία με τον Jacobs. Αντίθετα στην μελέτη των Carosi et al. [95] όπου γίνεται χρήση του ίδιου δοκιμίου αλλά με

διαφοροποιημένη στρατηγική κατασκευής (build style) οι παρατηρούμενες αποκλίσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες και η τεχνική της Στερεολιθογραφίας κατατάσσεται μεταξύ των διεθνών προτύπων ανοχών IT12 και IT14, όπως και στην μελέτη των Iuliano et al. [96] στην οποία εξετάζεται δοκίμιο διαφορετικής γεωμετρίας.



Σχήμα 6.2 Δοκίμιο ακρίβειας "User Part".

Η διαφοροποίηση μεταξύ των δημοσιευμένων αποτελεσμάτων αλλά και η μελέτη της επίδρασης παραγόντων όπως το φαινόμενο κλίμακας και η υπερστερεοποίηση στην ακρίβεια της Στερεολιθογραφίας επιβάλλει την πειραματική διερεύνηση της τεχνικής και στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Στην αναγκαιότητα της διενέργειας μετρήσεων συμβάλλει και η απουσία εκτενών μελετών ειδικά για την ακρίβεια συστημάτων Στερεολιθογραφίας EOS - Stereos Desktop S. Στις ελάχιστες σχετικές δημοσιεύσεις οι αναφερόμενες αποκλίσεις στηρίζονται είτε σε εκτιμήσεις χρηστών [97] είτε αφορούν ελάχιστες ελεγχόμενες διαστάσεις [98] και συνεπώς δεν μπορούν να θεωρηθούν αρκετά αντιπροσωπευτικές.

Για την πληρέστερη διερεύνηση της ακρίβειας της τεχνικής της Στερεολιθογραφίας γενικότερα αλλά και του εξεταζόμενου συστήματος ειδικότερα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ειδικά σχεδιασμένων δοκιμίων. Η μέτρηση του πρώτου δοκιμίου εστιάζεται στην μελέτη της ακρίβειας κατασκευής των στρωμάτων την απόδοση δηλαδή των οριζόντιων διαστάσεων, ενώ του δεύτερου στην μελέτη της ακρίβειας των μη οριζόντιων διαστάσεων. Στόχο της παρούσας μελέτης ακρίβειας δεν αποτέλεσε τόσο η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου πρόβλεψης της ακρίβειας όσο ο έλεγχος της υπόθεσης ότι η ακρίβεια κατασκευής είναι μεγαλύτερη στις οριζόντιες διαστάσεις. Η επιβεβαίωση της παραπάνω υπόθεσης θα δικαιολογήσει και την χρήση των σχετικών κανόνων προεπιλογής προσανατολισμού στο υπό ανάπτυξη σύστημα. Ως δεύτερο στόχο η μελέτη ακρίβειας

έχει την εξαγωγή κάποιων ανοχών ακριβείας ανάλογα με την διεύθυνσή μίας διάστασης και το πάχος στρώματος έτσι ώστε να διευκολυνθεί ο χειριστής στην επιλογή προσανατολισμού και πάχους στρώματος που θα ικανοποιούν τις κατασκευαστικές απαιτήσεις. Η μελέτη ακριβείας και τα αποτελέσματά της παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

6.2 Ακρίβεια οριζόντιων διαστάσεων

Η αξιολόγηση της ακρίβειας μίας οποιαδήποτε κατασκευαστικής μεθόδου προϋποθέτει την κατασκευή και μέτρηση ενός αντιπροσωπευτικού δοκιμίου. Το ιδεώδες δοκίμιο μέτρησης της διαστασιολογικής ακρίβειας για την τεχνική της Στερεολιθογραφίας πρέπει να διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά [92]:

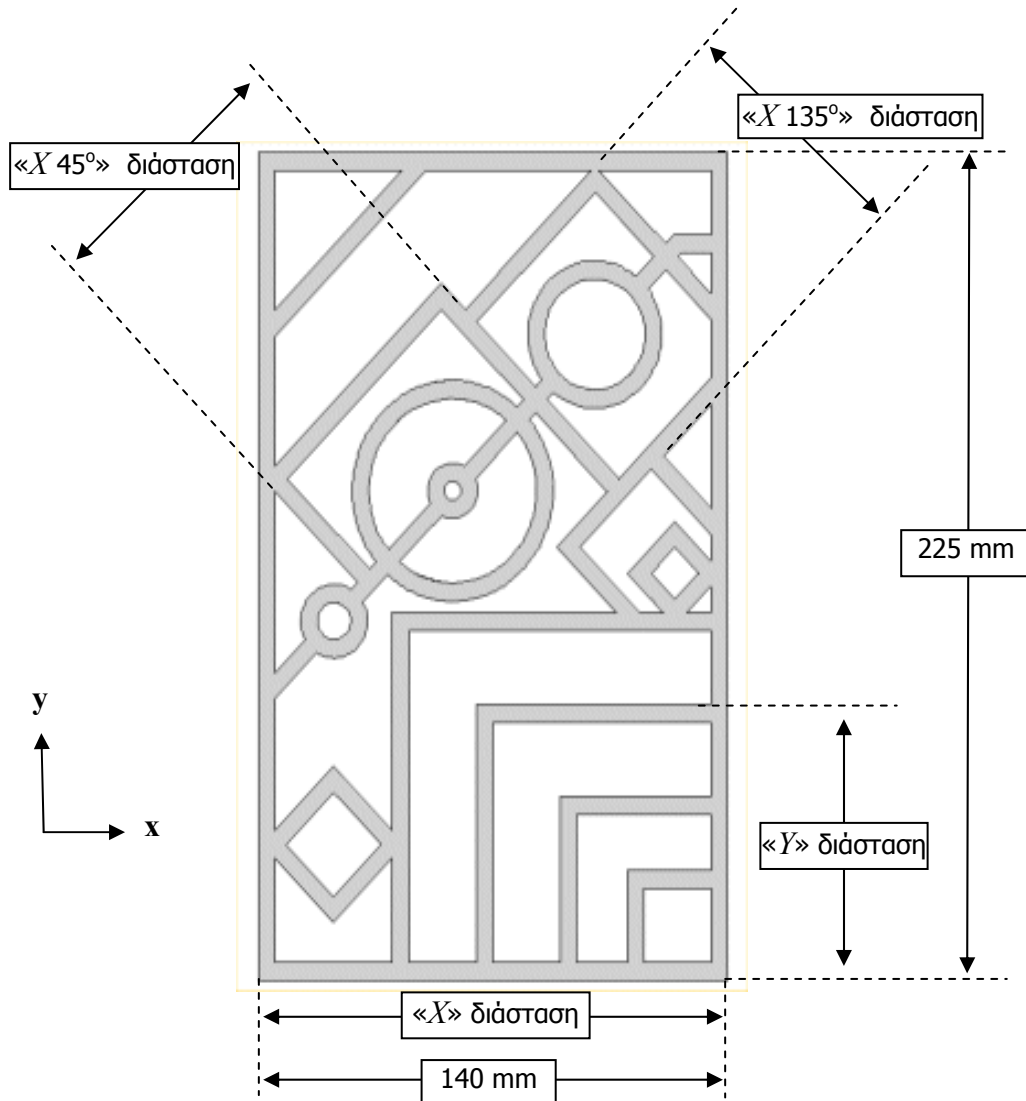
- να είναι αρκετά μεγάλο τόσο μήκος (διεύθυνση X) όσο και κατά πλάτος (διεύθυνση Y), να προσεγγίζει δηλαδή κατά το δυνατόν τα όρια της πλατφόρμας έτσι ώστε να μετρηθεί η ακρίβεια στην κατασκευή μεγάλων αντικειμένων
- να έχει ένα σημαντικό δείγμα / αριθμό από μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους διαστάσεις
- να διαθέτει τόσο «εσωτερικές» όσο και «εξωτερικές» διαστάσεις, έτσι ώστε να διαπιστωθεί εάν η τιμή της αντιστάθμισης ακτίνας εστίασης είναι σωστή
- να μην είναι πολύ ογκώδες έτσι ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί χωρίς μεγάλη δαπάνη κόστους και χρόνου
- να προσαρμόζεται εύκολα για μέτρηση σε αυτόματη μετρητική μηχανή καθορισμού συντεταγμένων (CMM-Coordinate Measuring Machine)
- να διαθέτει διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά «πραγματικών» προϊόντων

Με βάση τα παραπάνω προτείνεται στην μελέτη του Jacobs το δοκίμιο ακριβείας *User Part* του Σχήματος 6.2. Το δοκίμιο αυτό περιέχει ένα σημαντικό αριθμό ελεγχόμενων διαστάσεων (170 διαστάσεις) κανονικής γεωμετρίας, των κάθετων δηλαδή αποστάσεων μεταξύ παράλληλων εδρών. Το δοκίμιο αυτό παρότι είναι γενικώς αποδεκτό και πληροί τα περισσότερα κριτήρια της προηγούμενης παραγράφου δεν διαθέτει καμία κυκλική ακμή έτσι ώστε να εξετασθεί η δυνατότητα κατασκευής κυλινδρικών επιφανειών ενώ όλες οι εξεταζόμενες διαστάσεις είναι παράλληλες στους άξονες X και Y .

Στα πλαίσια μία συγκριτικής μελέτης της ακρίβειας των τεχνικών Στερεολιθογραφίας και LOM σχεδιάστηκε από τους Polydoros & Sfantsikoroulos [99] ένα νέο δοκίμιο μέτρησης το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3 Το νέο αυτό δοκίμιο διαθέτει 62 συνολικά διαστάσεις, 8 διαμετρικές και 54 ευθύγραμμες. Οι ευθύγραμμες διαστάσεις χωρίζονται σε 4 ομάδες:

- Τις παράλληλες με τον X άξονα

- Τις παράλληλες με τον Y άξονα
- Τις διαγώνιες με κλίση 45° κατά τον X άξονα (σύμφωνα με την φορά των δεικτών ενός ρολογιού)
- Τις διαγώνιες με κλίση 135° κατά τον X άξονα



Σχήμα 6.3 Δοκίμιο ακρίβειας οριζόντιων διαστάσεων.

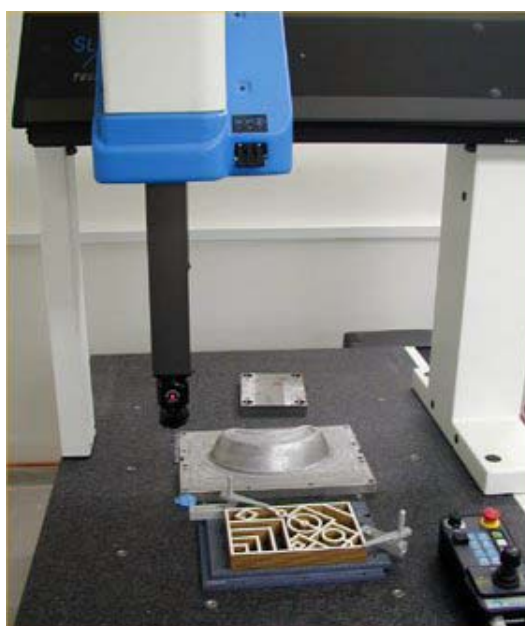
Οι εξεταζόμενες διαστάσεις είναι εξωτερικές και εσωτερικές και καλύπτουν ένα εύρος μετρήσεων μεταξύ 5 και 225 mm και οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στα Παραρτήματα Π2.1-Π2.4. Στον Πίνακα 6.1 περιέχεται ο αριθμός και το εύρος των εξεταζόμενων εσωτερικών και εξωτερικών διαστάσεων ανά κατηγορία. Η κατασκευή του δοκιμίου έγινε με το μέσο πάχος στρώματος (0.15 mm) και τις αντίστοιχες παραμέτρους σάρωσης και επικάλυψης (βλέπε Παράρτημα Π1.3). Επισημαίνεται ότι ο προσδιορισμός των αντισταθμίσεων συρρίκνωσης και εστίασης έγινε πειραματικά βάσει της μεθόδου που περιγράφεται στο [58].

Η μέτρηση του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της αυτόματης μετρητικής μηχανής καθορισμού συντεταγμένων (CMM) *DEA/Brown&Sharpe – Mistral 070705* του εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. (Σχήμα 6.4).

Πίνακας 6.1. Κατηγορίες διαστάσεων του δοκιμίου οριζόντιας ακρίβειας.

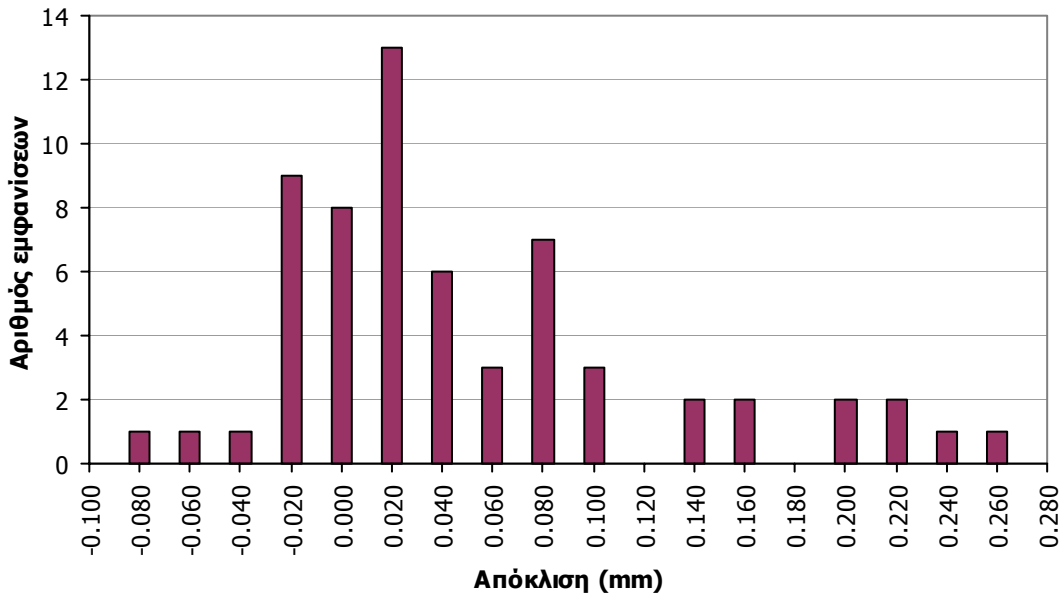
Τύπος	Αριθμός		Εύρος διαστάσεων (mm)	
	Εσωτερικές	Εξωτερικές	Εσωτερικές	Εξωτερικές
Διαμετρικές	4	4	5-50	15-60
Παράλληλες Χ	5	6	20-130	5-140
Παράλληλες Υ	6	7	20-215	5-225
Διαγώνιες 45°	8	7	10-135	5-145
Διαγώνιες 135°	7	8	10-190.437	5-200.437

Οι μηχανές CMM διαθέτουν ένα μηχανισμό υψηλής ακριβείας τριών συνήθως αλλά και παραπάνω αξόνων, στον οποίο είναι προσαρμοσμένη μία ακίδα η οποία προσεγγίζοντας απτικά, «ακουμπώντας» δηλαδή το αντικείμενο σε διάφορα σημεία, προσδιορίζει τις συντεταγμένες του σε σχέση με ένα ορισμένο επίπεδο ή σημείο αναφοράς. Στην περίπτωση π.χ. μέτρησης ενός κύβου ορίζεται αρχικά μία έδρα του ως επίπεδο αναφοράς και μία κορυφή του ως το σημείο αναφοράς (αρχή συστήματος συντεταγμένων) και ακολουθεί η μέτρηση των συντεταγμένων διαφόρων σημείων κατά μήκος των ακμών του κύβου, καθώς και χαρακτηριστικών σημείων όπως των κορυφών, καθορίζοντας έτσι τις διαστάσεις του κύβου. Προφανώς όσο περισσότερες διαστάσεις του αντικειμένου μετρηθούν τόσο καλύτερη εικόνα της συνολικής ακρίβειας έχουμε με αντίστοιχη όμως δαπάνη σε κόστος και χρόνο, καθώς αυξάνονται ανάλογα ο χρόνος ρύθμισης της μηχανής και μέτρησης του δοκιμίου.



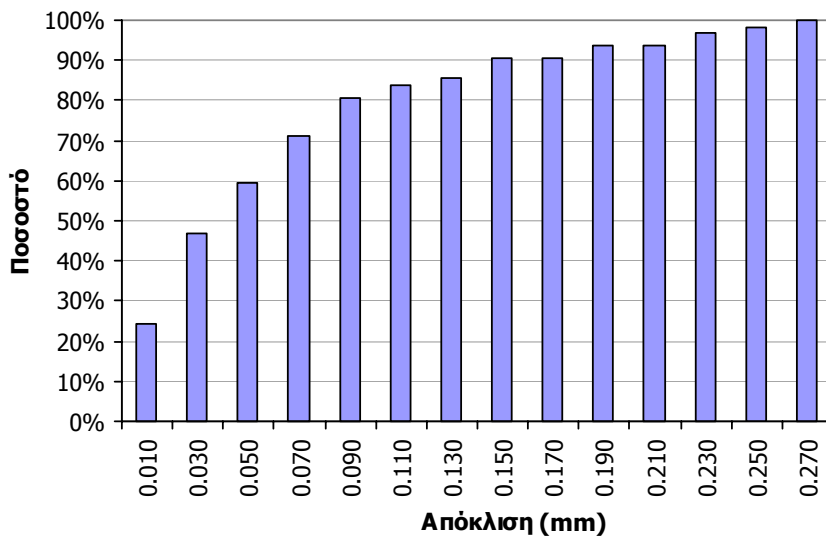
Σχήμα 6.4 Φωτογραφία της χρησιμοποιηθείσας μηχανής CMM

Για κάθε διάσταση του δοκιμίου ελήφθησαν τρεις μετρήσεις σε βάθος 2, 4 και 6 mm από την ανώτατη επιφάνεια/«οροφή» του δοκιμίου, έτσι ώστε να εξετασθεί το ενδεχόμενο εμφάνισης παραμορφώσεων στις κάθετες επιφάνειες του αντικειμένου. Με βάση τις τρεις αυτές τιμές υπολογίστηκε η μέση τιμή της διάστασης και οι αποκλίσεις σε σχέση με την ονομαστική της τιμή. Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν ανά ύψος καθώς και η μέση απόκλιση παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα Π2.5. Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η κατανομή των μέσων αποκλίσεων για τις 62 εξεταζόμενες διαστάσεις. Όπως είναι εμφανές περίπου το 84% των καταγεγραμμένων αποκλίσεων είναι της τάξεως των ± 0.100 mm.



Σχήμα 6.5. Κατανομή αποκλίσεων μεταξύ πραγματικών και ονομαστικών οριζόντιων διαστάσεων.

Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η αθροιστική κατανομή των μέσων αποκλίσεων σε απόλυτες αυτή την φορά τιμές, όπου παρατηρείται ότι το 90% των αποκλίσεων είναι μικρότερο των 0.15 mm. Στον Πίνακα 6.2 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της κατανομής των αποκλίσεων σε απόλυτη τιμή.

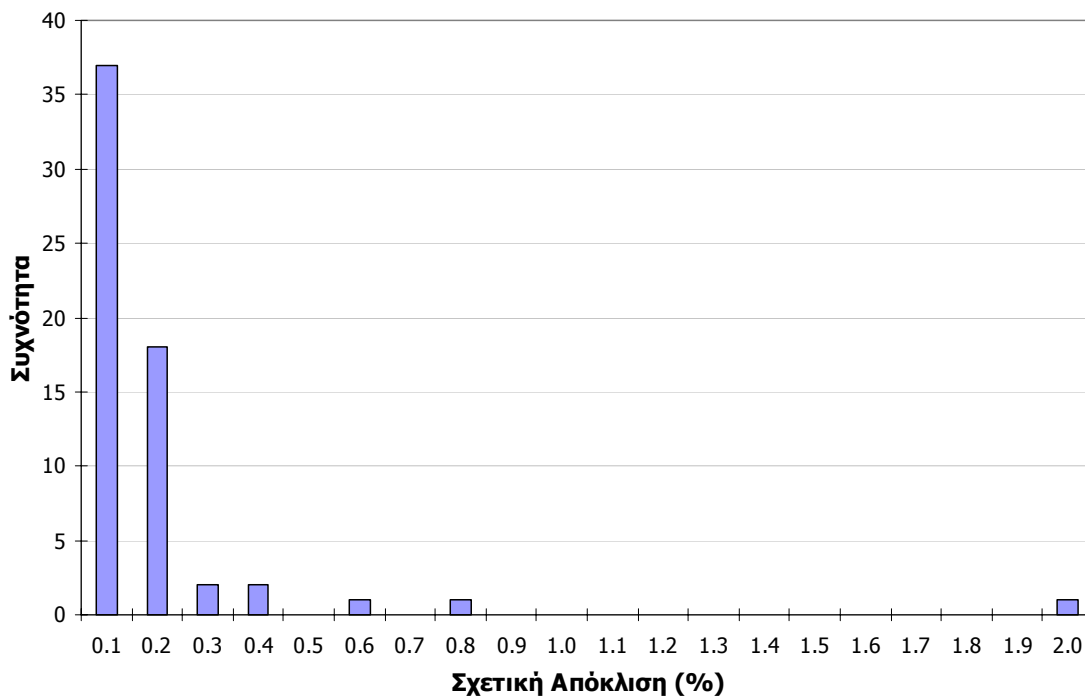


Σχήμα 6.6. Αθροιστική κατανομή απόλυτων αποκλίσεων οριζόντιων διαστάσεων.

Πίνακας 6.2. Χαρακτηριστικά αθροιστικής κατανομής αποκλίσεων (mm).

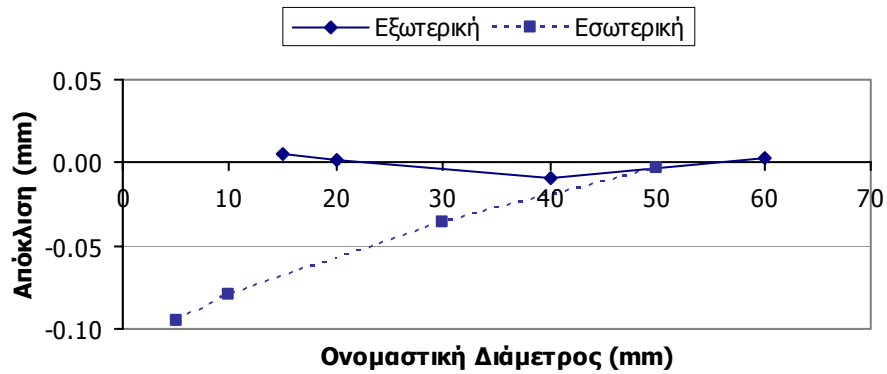
Μέσος	0.05776
Τυπικό σφάλμα	0.00812
Διάμεσος	0.03500
Επικρατούσα τιμή	0.00933
Μέση απόκλιση τετραγώνου	0.06397
Διακύμανση	0.00409
Κύρτωση	1.83001
Ασυμμετρία	1.57374
Εύρος	0.25400
Ελάχιστο	0.00067
Μέγιστο	0.25467
Άθροισμα	3.58133
Πλήθος	62
Βαθμ. Εμπ/νης (90,0%)	0.01357

Εξετάζοντας τις σχετικές (απόλυτες) αποκλίσεις, τον λόγο δηλαδή της απόλυτης απόκλισης προς την ονομαστική τιμή της διάστασης, παρατηρείται ότι η σχετική απόκλιση είναι μικρότερη του 0.27% για τις 57 από τις 62 εξεταζόμενες διαστάσεις (Σχήμα 6.7). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις με τις μεγαλύτερες σχετικές αποκλίσεις (>0.2%) είναι εκείνες με την μικρότερη ονομαστική τιμή (5-10 mm).



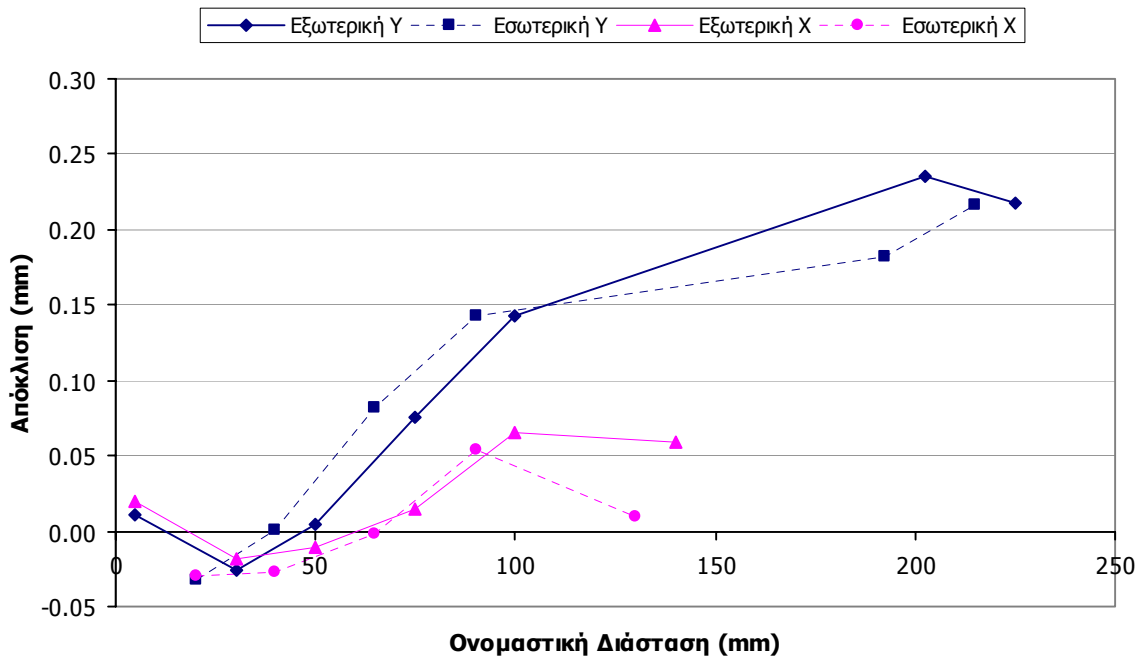
Σχήμα 6.7. Κατανομή σχετικών απόλυτων αποκλίσεων οριζοντίων διαστάσεων.

Στα Σχήματα 6.8-6.10 παρουσιάζεται η ανάλυση των αποκλίσεων ανά κατηγορία (διαμετρικές, παράλληλες στους X και Y άξονες και διαγώνιες διαστάσεις). Ξεκινώντας με τις διαμετρικές διαστάσεις (Σχ. 6.8) παρατηρείται ότι η ακρίβεια στην απόδοση της διαμέτρου είναι της τάξεως του $\pm 10 \mu\text{m}$. Αντίθετα στις διαμέτρους εσωτερικών κύκλων η ακρίβεια είναι αρκετά μικρότερη ειδικά στις μικρές διαστάσεις (5 και 10 mm).



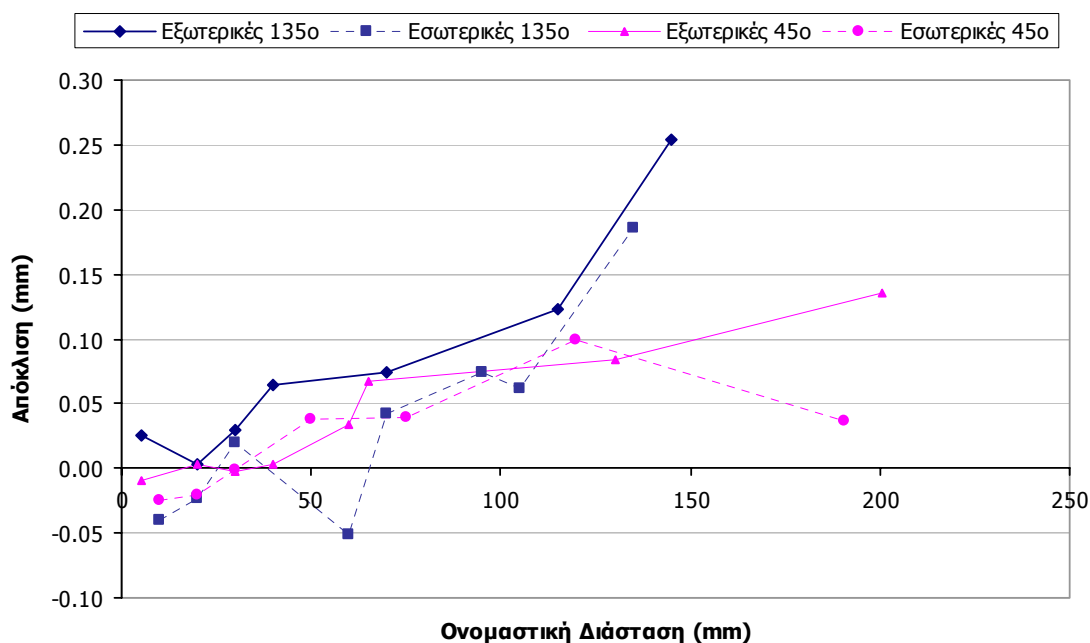
Σχήμα 6.8. Αποκλίσεις διαμετρικών διαστάσεων.

Οι αποκλίσεις των ευθύγραμμων διαστάσεων οι οποίες είναι παράλληλες στους X και Y άξονες παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.9. Αρχικά σε ό,τι αφορά τις διαστάσεις οι οποίες είναι παράλληλες στον X άξονα παρατηρείται αρκετά καλή ακρίβεια, μεταξύ -0.030 και 0.066 mm, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά. Αντίθετα στις διαστάσεις « Y » παρατηρούνται σημαντικά μεγαλύτερες αποκλίσεις οι οποίες ακολουθούν μία μάλλον γραμμική τάση.



Σχήμα 6.9. Αποκλίσεις διαστάσεων παράλληλων στους X και Y άξονες.

Οι αποκλίσεις μεταξύ ονομαστικής και πραγματικής τιμής για τις διαγώνιες διαστάσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.10. Παρατηρείται ότι οι μετρούμενες αποκλίσεις ακολουθούν μία ενιαία τάση για διαστάσεις μέχρι 130 mm, ωστόσο σε μεγαλύτερες διαστάσεις υπάρχει μία διαφοροποίηση τάσης για τις διαστάσεις που σχηματίζουν γωνία 45° με τον άξονα X και τις διαστάσεις με κλίση 135°. Στις διαστάσεις « X 135°» παρατηρείται η τάση μεγαλύτερων αποκλίσεων και μάλιστα εκεί καταγράφεται η μεγαλύτερη απόκλιση (0.255 mm) των μετρήσεων συνολικά.



Σχήμα 6.10. Αποκλίσεις οριζόντιων διαγώνιων διαστάσεων.

Σύμφωνα με τις πραγματοποιηθείσες μετρήσεις και σε σύγκριση και με τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών η συνολική ακρίβεια του συστήματος στο οριζόντιο επίπεδο μπορεί να χαρακτηριστεί ικανοποιητική. Σε σύγκριση με την μελέτη των Jacobs και Bedal-Nguyen παρατηρείται μία σχετικά μεγαλύτερη τιμή στο ε(90%) των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων, το οποίο στη παρούσα μελέτη ισούται με 0.01357 mm. Ωστόσο η τιμή αυτή είναι αρκετά καλύτερη από αυτή που αναφέρεται από τους Carosi et al. και Iuliano et al. για αντίστοιχα συστήματα Στερεολιθογραφίας.

Η ανάλυση των αποκλίσεων ανά κατηγορία διαστάσεων δείχνει ότι οι μεγαλύτερες τιμές αποκλίσεων παρατηρούνται σε ευθύγραμμες διαστάσεις παράλληλες με τον Y άξονα της μηχανής και διαγώνιες διαστάσεις με κλίση 135° με τον X άξονα. Σε ό,τι αφορά τις « Y » διαστάσεις η απόκλιση φαίνεται να ακολουθεί γραμμική τάση γεγονός που υποδηλώνει ότι πιθανότατα χρειάζεται μείωση της αντίστοιχης αντιστάθμισης συρρίκνωσης. Επισημαίνεται ότι κατά την κατασκευή εφαρμόστηκαν τα ίδια ποσοστά συρρίκνωσης και για τους δύο άξονες. Η εμφανιζόμενη διαφορά στην ακρίβεια των διαστάσεων « X » και « Y » οφείλεται μάλλον στην σχετική πυκνότητα των γραμμών σάρωσης λόγω του μικρού σχετικού διαστήματος. Έτσι κατά την πρώτη σάρωση, η οποία

εκτελείται παράλληλα στον X άξονα, πολυμερίζεται το μεγαλύτερο ποσοστό του στρώματος το οποίο συρρικνώνεται ως ένα βαθμό. Συνεπώς όταν ακολουθεί η σάρωση κατά Y η εφαρμογή του ίδιου συντελεστή συρρίκνωσης έχει ως αποτέλεσμα την μεγέθυνση των διαστάσεων κατά την Y κατεύθυνση καθώς το ήδη στερεοποιημένο στρώμα υφίσταται πλέον μικρότερου βαθμού συρρίκνωση.

Σε ό,τι αφορά τις διαγώνιες διαστάσεις παρατηρούμε ότι εμφανίζονται αποκλίσεις οι οποίες προσεγγίζουν την μέση τιμή μεταξύ των αναμενόμενων αποκλίσεων για τις « X » και « Y » ευθύγραμμες διαστάσεις, όπως είναι λογικό. Ωστόσο για μήκη μεγαλύτερα των 130 mm οι αποκλίσεις των διαστάσεων με γωνία 135° αυξάνονται σημαντικά ακολουθώντας μία τάση αντίστοιχη των « Y » διαστάσεων. Αντίστοιχα οι « X 45° » εμφανίζουν αποκλίσεις μικρότερες των 0.15 mm ακολουθώντας μία τάση αντίστοιχη των « X » διαστάσεων, μπορεί λοιπόν να υποθεθεί ελαφρά συσχέτιση μεταξύ της ακρίβειας των κατηγοριών ανά δύο (« X »-« X 45° » και « Y »-« X 135° »).

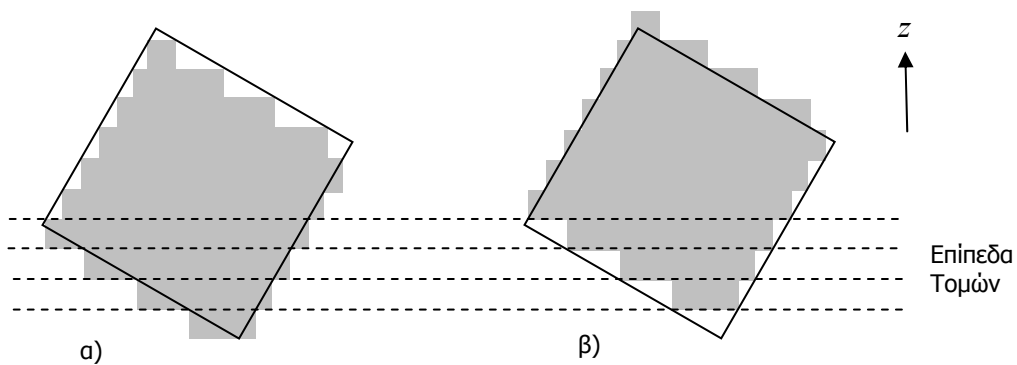
Τέλος παρατηρείται ότι οι μετρούμενες αποκλίσεις δεν είναι πάντα θετικές, αντίθετα σε σχετικά μικρές διαστάσεις παίρνουν και αρνητικές τιμές. Αν και οι αποκλίσεις αυτές στην πλειοψηφία τους είναι πολύ μικρές και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες σε κάποιες περιπτώσεις λαμβάνουν αρκετά μεγάλες τιμές όπως για τις μετρήσεις εσωτερικής διαμέτρου 5 και 10 mm. Το γεγονός αυτό υπονοεί ότι ίσως υπάρχει ένα μικρό σφάλμα και χρειάζεται επανεκτίμηση η τιμή της αντιστάθμισης εστίασης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης ακρίβειας των οριζόντιων διαστάσεων η Στερεολιθογραφία κατατάσσεται μεταξύ των στάνταρ $IT7$ και $IT8$ για μικρές και μεσαίες διαστάσεις και $IT8 - IT9$ για μεγάλες, σε σχέση πάντα με τον ωφέλιμο χώρο της μηχανής (250x250x250 mm). Εκτιμάται ότι η σωστότερη ρύθμιση των αντισταθμίσεων συρρίκνωσης και εστίασης θα βελτίωνε σημαντικά την παρατηρούμενη ακρίβεια ειδικά στις μεγαλύτερες διαστάσεις καθιστώντας την τεχνική ανταγωνιστική κάποιων τεχνικών κοπής για διάφορες εφαρμογές. Επισημαίνεται ωστόσο τα αποτελέσματα των μετρήσεων αφορούν την ακρίβεια στο επίπεδο XY και δεν μπορούν να θεωρηθούν πλήρως αντιπροσωπευτικά της συνολικής ακρίβειας κατασκευής. Για να υπάρξει μία εικόνα της συνολικής ακρίβειας της μηχανής επιβάλλεται και η μέτρηση της ακρίβειας των μη οριζόντιων διαστάσεων.

6.3 Ακρίβεια μη οριζόντιων διαστάσεων

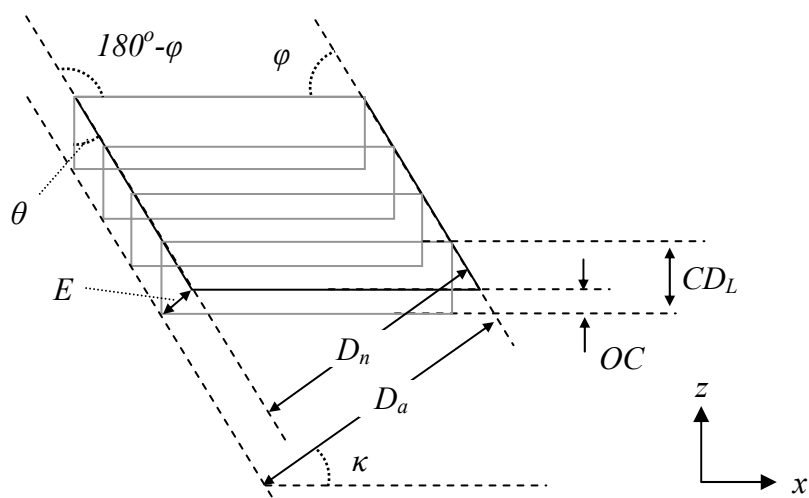
Όπως προαναφέρθηκε οι μη οριζόντιες διαστάσεις επηρεάζονται σημαντικά από τους παράγοντες του φαινομένου κλίμακας και της υπερστερεοποίησης. Ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν αυτοί οι

δύο παράγοντες, αυξητικά ή μειωτικά, είναι αποτέλεσμα της στρατηγικής τεμαχισμού (slicing strategy) που ακολουθείται. Υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές τεμαχισμού ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία σχηματίζεται το στρώμα σε σχέση με το επίπεδο της τομής [100]. Η συνηθέστερη μέθοδος είναι ο σχηματισμός του στρώματος κάτω του επιπέδου της τομής σύμφωνα πάντα με την κατεύθυνση κατασκευής (Σχ. 6.11α), υπάρχουν όμως και συστήματα τΤΚΠ όπου συμβαίνει το αντίθετο (Σχ. 6.11β). Στην πρώτη περίπτωση έχουμε αρνητικό σφάλμα κλίμακας στις άνω επιφάνειες, απώλεια όγκου δηλαδή λόγω της στρωματικής προσέγγισης του 3D μοντέλου, και θετικό σφάλμα κλίμακας στις κάτω. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση το σφάλμα κλίμακας στις άνω και κάτω επιφάνειες είναι αντίστροφο.



Σχήμα 6.11. Μέθοδοι σχηματισμού του στρώματος κάτω (α) και άνω της τομής (β).

Στο σύστημα Stereos Desktop S ακολουθείται η στρατηγική του «προς τα κάτω» σχηματισμού του στρώματος, και συνεπώς αναμένεται πρόσθεση υλικού στις κάτω επιφάνειες του αντικειμένου. Στο Σχήμα 6.12 απεικονίζεται η αναμενόμενη διαφορά E μεταξύ της ονομαστικής τιμής D_n και D_a της απόστασης μεταξύ δύο παράλληλων επικλινών εδρών με κλίση φ και $180^\circ - \varphi$.



Σχήμα 6.12. Αναμενόμενο σφάλμα διαγώνιας στο XZ επίπεδο διάστασης.

Θεωρητικά η αναμενόμενη διαφορά E ισούται με το ύψος της κάτω «οδόντωσης», ισχύει δηλαδή ότι

$$E = D_n - D_a = CD_L \cos(\theta) \quad (6.1)$$

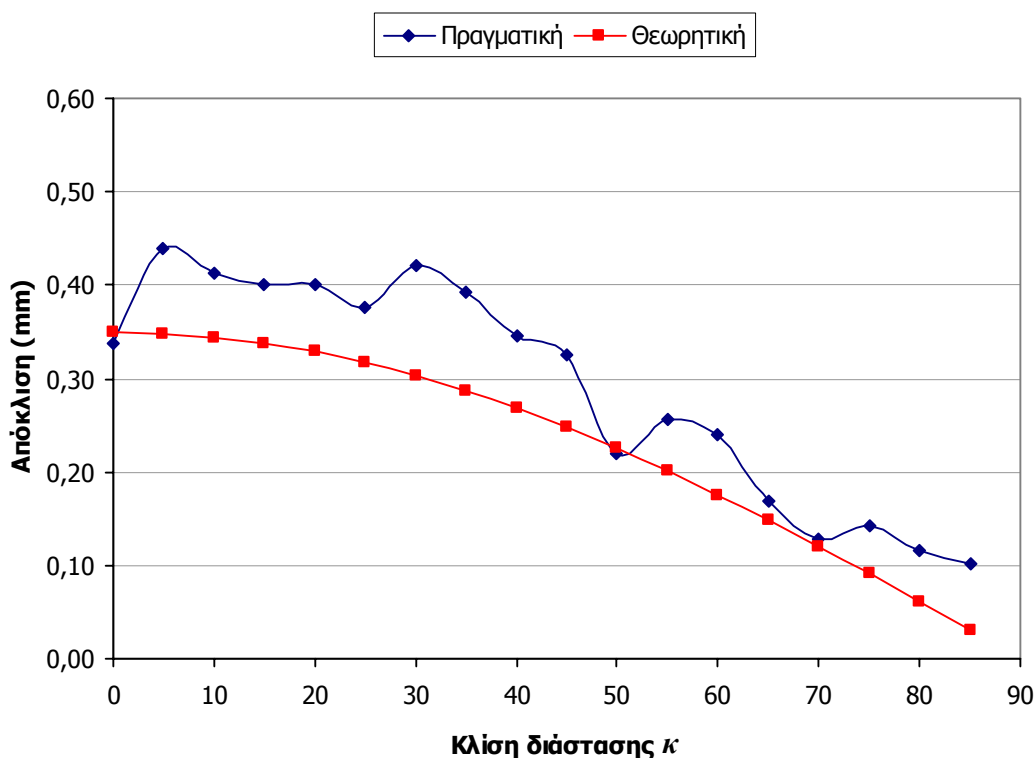
όπου CD_L το βάθος στερεοποίησης των στρωμάτων και $\theta = 90^\circ - \varphi$ για $0 < \varphi < 90^\circ$ ή $\theta = \varphi - 90^\circ$ όταν $90^\circ < \varphi < 180^\circ$. Με κ συμβολίζεται η κλίση της ίδιας της διάστασης μεταξύ των επιπέδων φ και $180^\circ - \varphi$, την γωνία δηλαδή που σχηματίζει η διάσταση με το οριζόντιο επίπεδο. Για τις κάθετες διαστάσεις η αναμενόμενη διαφορά θεωρητικά ισούται με την τιμή της υπερστερεοποίησης OC την διαφορά δηλαδή μεταξύ βάθους στερεοποίησης CD_L και ονομαστικού πάχους στρώματος Lth .

$$OC = CD_L - Lth \quad (6.2)$$

Το δοκίμιο "User Part" του Σχήματος 6.2, το οποίο είναι το γενικά αποδεκτό δοκίμιο ελέγχου ακριβείας της Στερεολιθογραφίας, διαθέτει ελάχιστες κάθετες διαστάσεις οι οποίες επίσης αφορούν την απόσταση μεταξύ οριζόντιων άνω εδρών του αντικειμένου με αποτέλεσμα να μην ελέγχεται το φαινόμενο της υπερστερεοποίησης. Επιπλέον δεν διαθέτει καμία επικλινή έδρα και συνεπώς καμία διαγώνια διάσταση και έτσι δεν ελέγχεται η επίδραση του φαινομένου κλίμακας. Για την εξέταση αυτών των δύο παραγόντων χρειάζεται συνεπώς η κατασκευή και μέτρηση ενός διαφορετικού δοκιμίου με διαγώνιες και κάθετες διαστάσεις. Τις παραπάνω απαιτήσεις ικανοποιεί το δοκίμιο ελέγχου της τραχύτητας (βλέπε Κεφ. 5) το οποίο διαθέτει ζεύγη παράλληλων επιφανειών διαφορετικής κλίσης με το οριζόντιο επίπεδο. Η μέτρηση των πιθανών διαφορών θα μπορούσε να δώσει μία ένδειξη των αποκλίσεων που αναμένονται σε μη οριζόντιες διαστάσεις ανάλογα με την κλίση των επιφανειών για δεδομένο προσανατολισμό κατασκευής και βάθος στερεοποίησης, το οποίο καθορίζεται από το επιλεχθέν πάχος στρώματος. Το μέγεθος της διάστασης υποθέτουμε πως στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν επηρεάζει το μέγεθος της πιθανής απόκλισης καθώς οι καμπύλες παραμορφώσεις με τον χρησιμοποιούμενο τύπο ρητίνης μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

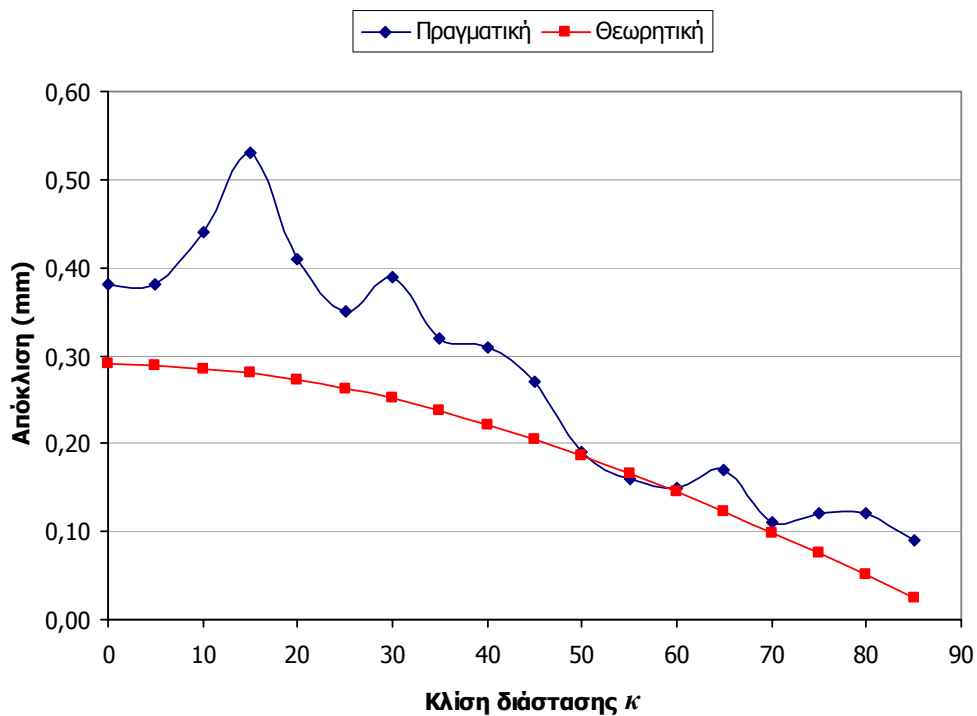
Το δοκίμιο αυτό διαθέτει 20 ζεύγη παράλληλων εδρών (βλέπε Σχ. 5.3), με κλίση 0° - 180° σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η ονομαστική τιμή όλων των διαστάσεων είναι 30 mm, διαφέρει όμως η κλίση κ της κάθε διάστασης. Η απόκλιση για τις 18 διαστάσεις που εξετάζονται (εξαιρείται η διάσταση με κλίση 0° , η οριζόντια δηλαδή διάσταση και η μία από τις δύο διαστάσεις με κλίση 45°), μεταξύ ονομαστικής και πραγματικής τιμής για τα τρία δοκίμια παρουσιάζεται διαγραμματικά στα Σχήματα 6.13, 6.14 και 6.15. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό παχύμετρο ακρίβειας 0.01 mm. Η εκτίμηση της θεωρητικής απόκλισης έγινε βάσει των σχέσεων (6.1) και (6.2), για βάθος στερεοποίησης αντίστοιχο του πάχους στρώματος (βλέπε Παρ. Π1.3).

Σε ό,τι αφορά το δοκίμιο «0.20» παρατηρείται ότι οι μετρούμενες αποκλίσεις απέχουν σημαντικά από τις θεωρητικά εκτιμώμενες στις διαστάσεις με κλίση 0° - 30° . Η διαφορά αυτή είναι μάλλον αναμενόμενη καθώς σε αυτές τις κλίσεις έχουμε και την παρουσία στηριγμάτων, υπολείμματα των οποίων είναι λογικό να αυξάνουν τη μετρούμενη απόκλιση. Όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφ. 5 οι επιφάνειες των δοκιμίων δεν λειάνθηκαν αλλά καθαρίστηκαν μόνο ελαφρά έτσι ώστε να αφαιρεθεί ο κύριος όγκος του πλέγματος στήριξης έτσι ώστε να επηρεαστεί το φαινόμενο κλίμακας.



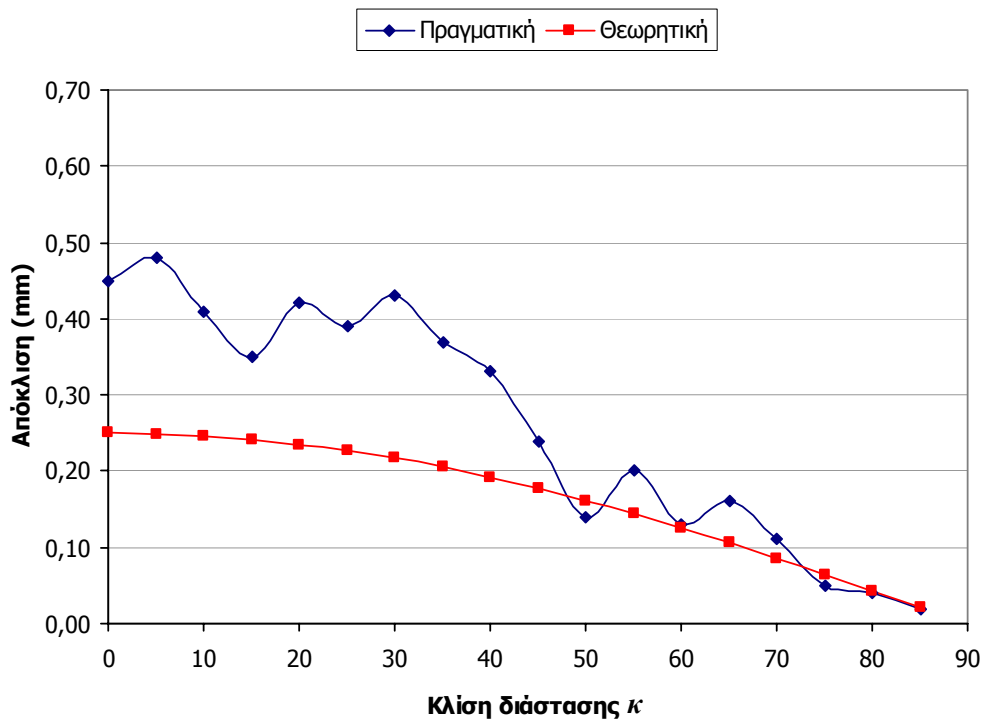
Σχήμα 6.13. Απόκλιση μη οριζόντιων διαστάσεων δοκιμίου τραχύτητας «0.20».

Παρόμοιες αλλά ελαφρώς μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής και πραγματικής απόκλισης παρατηρούνται και για το δοκίμιο «0.15» (που είναι και το πάχος στρώματος το οποίο χρησιμοποιείται πρακτικά συχνότερα). Η αύξηση αυτή στις παρατηρούμενες διαφορές παρατηρείται κυρίως στο διάστημα 0° - 30° , διάστημα στο οποίο συμπεριλαμβάνονται οι στηριζόμενες επιφάνειες, και οφείλεται πιθανότατα σε σχετικά μεγαλύτερου μεγέθους υπολείμματα του πλέγματος στήριξης.



Σχήμα 6.14. Απόκλιση μη οριζόντιων διαστάσεων δοκιμίου τραχύτητας «0.15».

Η προηγούμενη παρατήρηση επιβεβαιώνεται ως ένα βαθμό και από την εξέταση των αποκλίσεων για το δοκίμιο «0.10», στο οποίο οι παρατηρούμενες αποκλίσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου δοκιμίου, μέρος των παρατηρούμενων αποκλίσεων πιθανόν να οφείλεται στην υπερέκθεση των κάτω στρωμάτων (φαινόμενο print through) λόγω του μεγάλου (σε σχέση με το πάχος στρώματος) βάθους στερεοποίησης (0.18 mm).



Σχήμα 6.15. Απόκλιση μη οριζόντιων διαστάσεων δοκιμίου τραχύτητας «0.10».

Συνοψίζοντας τις παρατηρήσεις από την μέτρηση των μη οριζόντιων διαστάσεων του δοκιμίου τραχύτητας διαπιστώνεται ότι και στα τρία δοκίμια παρατηρούνται αποκλίσεις οι οποίες ακολουθούν την ίδια τάση με το θεωρητικό μοντέλο των σχέσεων (6.1) και (6.2) με εξαίρεση τις διαστάσεις με κλίση 0° - 40° όπου η πραγματική απόκλιση είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Η διαφορά για αυτές τις τιμές της κλίσης είναι αναμενόμενη λόγω της παρουσίας υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης. Ειδικά για το δοκίμιο «0.10» είναι πιθανόν οι σχετικά μεγάλες παρατηρούμενες αποκλίσεις να οφείλονται και στο φαινόμενο της υπερέκθεσης (print-through), λόγω του σχετικά μεγάλου βάθους στερεοποίησης. Συνεπώς η χρήση των παραπάνω σχέσεων σε συνδυασμό με μία εμπειρικά καθοριζόμενη ανοχή για το πλέγμα στήριξης και το φαινόμενο υπερέκθεσης μπορεί να παρέχει μία ένδειξη της αναμενόμενης απόκλισης μίας μη οριζόντιας διάστασης του ακατέργαστου αντικειμένου.

Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις για διαστάσεις με κλίση 0° - 60° είναι αρκετά μεγαλύτερες των 0.15 mm, γεγονός που επιβεβαιώνει την υπόθεση πως η ακρίβεια του ακατέργαστου προϊόντος Στερεολιθογραφίας στις μη οριζόντιες διαστάσεις είναι αρκετά μικρότερη από την ακρίβεια των οριζόντιων διαστάσεων. Ωστόσο, στο διάστημα 65° - 85° η ακρίβεια προσεγγίζει εκείνη των οριζόντιων διαστάσεων, ειδικά στην περίπτωση του δοκιμίου «0.10».

Επισημαίνεται τέλος ότι τα όργανα και η μέθοδος μέτρησης των αποκλίσεων στις μη οριζόντιες διαστάσεις έχουν σαφώς μικρότερη ακρίβεια από την μηχανή CMM που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη των οριζόντιων διαστάσεων, συνεπώς δεν αποκλείεται μέρος των διαφορών στο μέγεθος των αποκλίσεων να οφείλεται και σε αυτό τον λόγο. Ωστόσο τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δοκιμίου τραχύτητας δίνουν μία καλή ένδειξη του μεγέθους των αποκλίσεων που πρέπει να αναμένονται στις μη οριζόντιες διαστάσεις. Επιπλέον κατεργασίες λείανσης ακριβείας των κάτω κλιμακωτών επιφανειών και κάλυψης των άνω κλιμακωτών εκτιμάται ότι μπορούν να μειώσουν σημαντικά αυτές τις αποκλίσεις, απαιτούν όμως ιδιαίτερη εμπειρία και «τέχνη».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ανάπτυξη Συστήματος

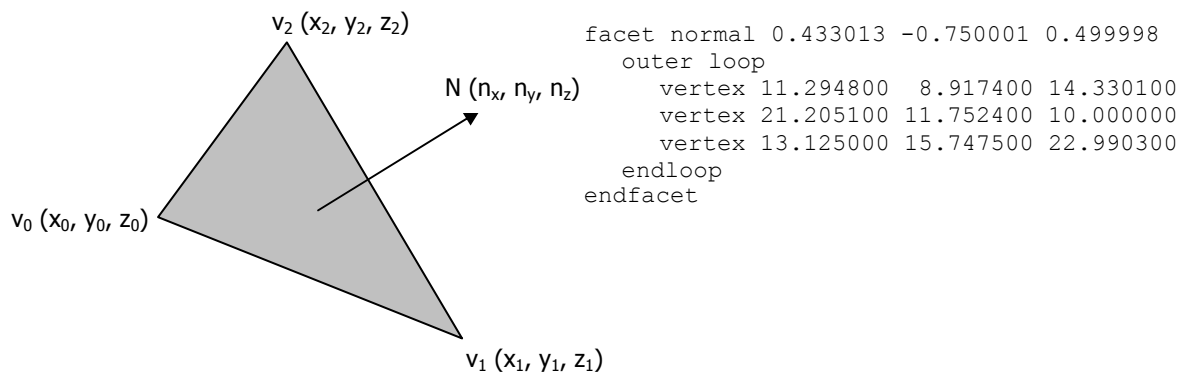
7.1 Εισαγωγή

Με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης ανάλυσης αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας την γλώσσα προγραμματισμού "C" το **ΣΥ**στημα **Ε**πιλογής **ΚΑ**τασκευαστικών **Πα**ραμέτρων (ΣΥΕΚΑΠ) για την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας το οποίο επιτρέπει στον χειριστή να εκτιμήσει την επίδραση που έχουν συγκεκριμένες επιλογές προσανατολισμού και πάχους στρώματος στον χρόνο κατασκευής, το κόστος και την ακρίβεια κατασκευής. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται διάφορα πρακτικά ζητήματα που αφορούν τον τύπο των σχεδιαστικών και γεωμετρικών δεδομένων που εισάγονται στο σύστημα, την μορφή και την μέθοδο εξαγωγής των χρήσιμων πληροφοριών καθώς και το σύστημα αυτόματης επιλογής προσανατολισμού και πάχους στρώματος ανάλογα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις.

7.2 Το πρότυπο γεωμετρικής αναπαράστασης STL

Η γεωμετρία του αντικειμένου και ο προσανατολισμός του εισάγονται στο ΣΥΕΚΑΠ με τη μορφή μοντέλου STL (StereoLithography), το οποίο αναπτύχθηκε από την 3D Systems, την πρώτη εταιρία που κατασκεύασε εμπορική μονάδα Στερεολιθογραφίας. Πρόκειται ουσιαστικά για πολυεδρικό πρότυπο (facet format) στο οποίο οι επιφάνειες του τριδιάστατου μοντέλου προσεγγίζονται μέσω τριγώνων, κατά την απλούστερη δηλαδή πολυεδρική προσέγγιση (ψηφιδωτή αναπαράσταση - tessellated modeling). Για την περιγραφή ενός τριγώνου παρατίθενται οι τρεις κορυφές του και το κάθετο στο επίπεδο του μοναδιαίο διάνυσμα. Κάθε κορυφή ορίζεται ως το διάνυσμα των τριών συντεταγμένων του σημείου ενώ το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα ορίζεται με βάση τα συνημίτονα

κατεύθυνσής του. Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία και η περιγραφή ενός τριγώνου με βάση το πρότυπο STL.



Σχήμα 7.1 Αναπαράσταση και περιγραφή τριγώνου σύμφωνα με το πρότυπο STL.

Τα τρίγωνα παρατίθενται στο αρχείο σύμφωνα με την μέθοδο εξαγωγής τους από το λογισμικό σχεδίασης χωρίς συνήθως κάποια συγκεκριμένη σειρά ή ταξινόμηση. Στη δημιουργία των τριγώνων οφείλουν να ακολουθούνται τέσσερις κανόνες [45]:

- ◆ το κάθετο διάνυσμα κάθε τριγώνου πρέπει να δείχνει προς το «εξωτερικό» του μοντέλου/σώματος,
- ◆ η σειρά αναφοράς των συντεταγμένων πρέπει να ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού και να συμφωνεί με την φορά του καθέτου διανύσματος,
- ◆ τα τρίγωνα μπορούν να τέμνονται μόνο σε κοινές πλευρές και κορυφές, και
- ◆ κάθε τρίγωνο πρέπει να έχει τρία ακριβώς γειτονικά, ένα για κάθε πλευρά.

Το πρότυπο STL εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα που αφορούν κυρίως το πλεόνασμα και την μη αποδοτική οργάνωση των δεδομένων. Πλεονασματική πληροφορία αποτελεί η παράθεση της καθέτου υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι ακολουθείται ο κανόνας του δεξιού χεριού κατά την καταγραφή των τριγώνων. Αντίστοιχα κάθε κορυφή εμφανίζεται στο αρχείο τόσες φορές όσες και τα τρίγωνα για τα οποία είναι κοινή. Και σε αυτή την περίπτωση η κορυφή μπορούσε να αποθηκευθεί μία φορά και να υπάρξουν οι αντίστοιχοι δείκτες στα τρίγωνα, λύση που θα μείωνε σημαντικά το μέγεθος του αρχείου, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι ακολουθούνται ο τρίτος και ο τέταρτος από τους παραπάνω κανόνες κατά τη εξαγωγή των τριγώνων.

Ειδικά για την φάση των προπαρασκευαστικών εργασιών επιπλέον μειονέκτημα αποτελεί η απουσία οποιασδήποτε άμεσης πληροφόρησης για την τοπολογία των τριγώνων, πληροφορία η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την πιθανή ανασύνθεση των επιφανειών του 3D μοντέλου. Η ταξινόμηση των τριγώνων σε επιφάνειες διευκολύνει σημαντικά τόσο κατά τον τεμαχισμό όσο και τον έλεγχο των STL μοντέλων [101]. Τέλος μειονέκτημα αποτελεί η απουσία κατασκευαστικών δεδομένων όπως ανοχών ακρίβειας και τραχύτητας η οποία θα διευκόλυνε σημαντικά την αυτόματη επιλογή κατασκευαστικών παραμέτρων.

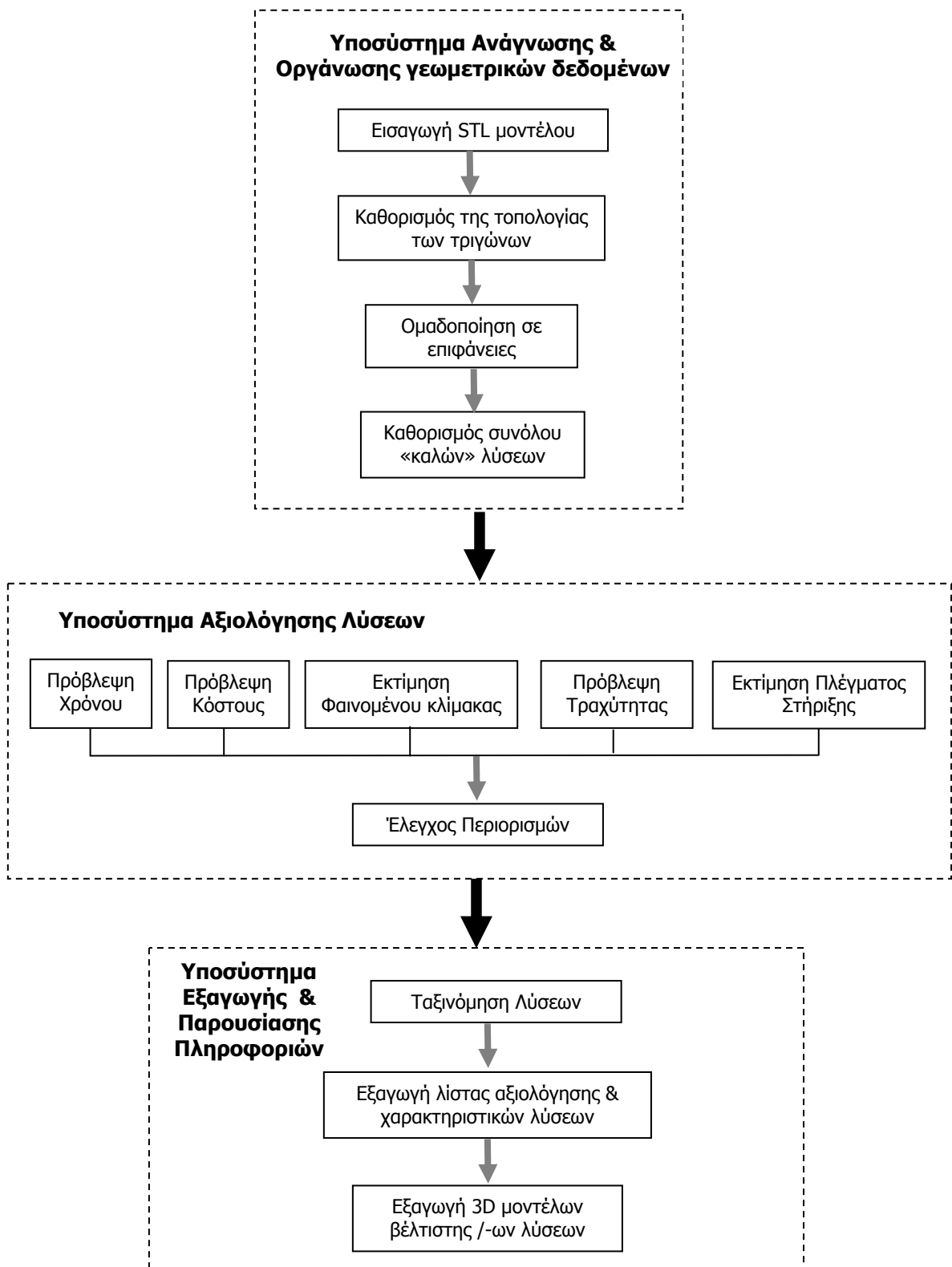
Παρά τα εγγενή μειονεκτήματά του το πρότυπο STL διαθέτει το σημαντικό πλεονέκτημα της απλότητας. Η τριγωνική είναι η απλούστερη δυνατή πολυεδρική προσέγγιση και έτσι η ευκολότερη για τα συστήματα σχεδίασης. Στα περισσότερα μάλιστα συστήματα σχεδίασης είναι ενσωματωμένοι αλγόριθμοι ψηφιοποίησης με τρίγωνα για την φωτοσκίαση των μοντέλων και έτσι η εξαγωγή ενός STL αρχείου δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες, ενώ εξασφαλίζεται και η «ουδετερότητα» του προτύπου (neutral format) αφού δεν εξαρτάται από το λογισμικό σχεδίασης. Επιπλέον η απλότητα αλλά και το πλεόνασμα πληροφοριών βοήθησε τουλάχιστον, κατά τα πρώτα χρόνια εφαρμογής των ΤΤΚΠ, τον έλεγχο και την επιδιόρθωση σφαλμάτων παραβίασης των προαναφερθέντων κανόνων στην εξαγωγή των STL μοντέλων. Τα τελευταία χρόνια βέβαια η ανάγκη ελέγχου και διόρθωσης των STL αρχείων έχει μειωθεί σημαντικά καθώς η επέκταση των ΤΤΚΠ ώθησε τις εταιρείες λογισμικού CAD στην βελτίωση των αλγόριθμων εξαγωγής των. Το μέγεθος επίσης των αρχείων δεν αποτελεί πλέον ιδιαίτερο πρόβλημα λόγω της ταχύτατης ανάπτυξης των Η/Υ και της τεχνολογίας αποθήκευσης δεδομένων [102].

7.3 Δομή του ΣΥΕΚΑΠ

Τη βάση για το ΣΥΕΚΑΠ αποτέλεσε το λογισμικό διόρθωσης και ελέγχου STL αρχείων *ADMESH 0.95* που διαθέτει όλες τις βασικές λειτουργίες εισαγωγής, εξαγωγής και επεξεργασίας STL δεδομένων. Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε από τον A. Martin [103] και είναι διαθέσιμο μέσω του διαδικτύου (<http://www.engr.csulb.edu/~amartin/>) προς χρήση και τροποποίηση, σύμφωνα πάντα με τους κανόνες της δημόσιας άδειας λογισμικού GNU. Το ΣΥΕΚΑΠ αποτελείται από τρία βασικά μέρη ή υποσυστήματα (modules):

- το υποσύστημα ανάγνωσης και οργάνωσης των γεωμετρικών δεδομένων,
- το υποσύστημα αξιολόγησης των προτεινόμενων λύσεων και
- το υποσύστημα εξαγωγής/παρουσίασης των πληροφοριών.

Σχηματικά η δομή του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2, όπου φαίνονται και οι βασικές εργασίες που επιτελεί το κάθε υποσύστημα.



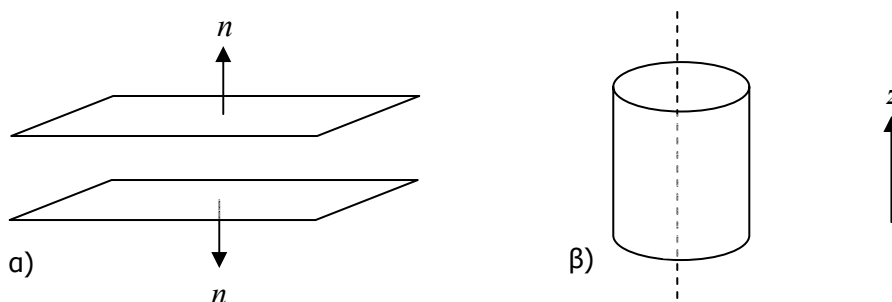
Σχήμα 7.2 Δομή και βασικές λειτουργίες του ΣΥΕΚΑΠ

7.3.1 Προσδιορισμός βασικών λύσεων

Πρώτο υποσύστημα αποτελεί αυτό της εισαγωγής και οργάνωσης των STL δεδομένων. Στο υποσύστημα αυτό εκτελούνται οι παρακάτω βασικές λειτουργίες.

- ◆ Ανάγνωση του STL αρχείου και αποθήκευση των δεδομένων στην μνήμη.
- ◆ Καθορισμός της τοπολογίας με την εξεύρεση των τριών γειτονικών τριγώνων για κάθε τρίγωνο του STL αρχείου.
- ◆ Ομαδοποίηση των τριγώνων σε επιφάνειες
- ◆ Επιλογή των πιθανών προσανατολισμών.

Βασικό προϊόν του υποσυστήματος αποτελεί το σύνολο «καλών» προσανατολισμών, το οποίο καθορίζεται με βάση τις επιφάνειες του αντικειμένου. Καθώς βασικός μας στόχος είναι η επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής ακρίβειας ως πιθανοί επιλέγονται οι προσανατολισμοί που ελαχιστοποιούν το βασικό παράγοντα σφάλματος που είναι το φαινόμενο κλίμακας. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται με την επιλογή προσανατολισμών στους οποίους επιφάνειες μεγάλου σχετικά εμβαδού δεν εμφανίζουν κλιμακωτή υφή. Στην παρούσα έκδοση του συστήματος μόνο δύο τύποι επιφανειών εξετάζονται οι επίπεδες και οι κυλινδρικές, οι οποίες προκύπτουν από την προεκβολή (extrude) μίας ευθείας γραμμής/τμήματος στον χώρο. Άλλες επιφάνειες όπως οι σφαιρικές, οι εκ περιστροφής (revolved), οι επιφάνειες εκ σάρωσης (sweep) και οι ελεύθερης μορφής θα διαθέτουν με οποιοδήποτε προσανατολισμό κλιμακωτή υφή. Βέλτιστος προσανατολισμός για τις επίπεδες επιφάνειες θεωρείται εκείνος κατά τον οποίο το κάθετο διάνυσμα είναι παράλληλο στον άξονα κατασκευής Z ανεξαρτήτως φοράς (Σχ. 7.3α). Αντίστοιχα για τις κυλινδρικές η απουσία του φαινομένου κλίμακας εξασφαλίζεται με την τοποθέτηση του άξονα περιστροφής παράλληλα στον άξονα κατασκευής (Σχ. 7.3β). Για λόγους οικονομίας υπολογιστικού χρόνου οι επιλεχθέντες προσανατολισμοί δεν μπορούν να ξεπερνούν τους δέκα σε αριθμό. Εάν κατά την αναγνώριση προκύψουν περισσότεροι τότε επιλέγονται οι δέκα πρώτοι με κριτήριο επιλογής το εμβαδό των αντίστοιχων επιφανειών.



Σχήμα 7.3. Βέλτιστος προσανατολισμός για επίπεδη (α) και κυλινδρική (β) επιφάνεια.

Κατά την ανασύσταση των επιφανειών πρώτες αναγνωρίζονται οι επίπεδες επιφάνειες. Ο

έλεγχος γίνεται με την διαδοχική μετάβαση από ένα τρίγωνο σε γειτονικό του και την σύγκριση των κάθετων διανυσμάτων. Εάν αυτά είναι ίσα τα δύο τρίγωνα ανήκουν στην ίδια επίπεδη επιφάνεια με το αντίστοιχο κάθετο διάνυσμα. Στην συνέχεια ελέγχονται τα τρίγωνα που δεν έχουν ενταχθεί σε κάποια επίπεδη επιφάνεια έτσι ώστε να αναγνωρισθούν πιθανές κυλινδρικές επιφάνειες. Ο έλεγχος εδώ απαιτεί την εξέταση τριών διαδοχικών τριγώνων και τον υπολογισμό των εξωτερικών γινομένων των κάθετων διανυσμάτων τους. Εάν το διάνυσμα που προκύπτει από τα τρία αυτά εξωτερικά γινόμενα είναι το ίδιο τότε αποτελεί τον άξονα της αντίστοιχης κυλινδρικής επιφάνειας. Αφού προσδιοριστούν οι επιφάνειες ομαδοποιούνται με βάση τον βέλτιστο προσανατολισμό τους έτσι ώστε να αποφευχθεί η πολλαπλή παρουσία του ίδιου προσανατολισμού.

7.3.2 Αξιολόγηση των λύσεων

Το σύνολο των βασικών προσανατολισμών τροφοδοτείται στο υποσύστημα αξιολόγησης των λύσεων, τις οποίες αποτελούν οι συνδυασμοί προσανατολισμού και πάχους στρώματος. Για κάθε λύση υπολογίζονται ο χρόνος και το κόστος κατασκευής, η μέση και μέγιστη τραχύτητα των επιφανειών και διάφοροι δείκτες που σχετίζονται με τις πηγές διαστασιολογικών σφαλμάτων, όπως το μέγιστο και μέσο ύψος «οδόντωσης» για το φαινόμενο κλίμακας καθώς και το συνολικό εμβαδό των στηριζόμενων επιφανειών. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ελέγχεται ποιές από τις λύσεις ικανοποιούν τους περιορισμούς και έτσι προκύπτει το σύνολο των εφικτών λύσεων. Περιορισμοί μπορούν να τεθούν ως προς τα εξής μεγέθη:

- ◆ Μέγιστος χρόνος κατασκευής
- ◆ Μέγιστο κόστος κατασκευής
- ◆ Μέγιστη τραχύτητα
- ◆ Μέγιστο ύψος «οδόντωσης»

Η μέση τραχύτητα (*Roughness*) ο δείκτης ογκομετρικού σφάλματος (*VolumetricError*) κάθε λύσης υπολογίζονται βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$$Roughness = \sum_i^n \frac{A_i}{A} R_a(i) \quad (7.1)$$

$$VolumetricError = \sum_i^n \frac{A_i}{V} CH_i \quad (7.2)$$

όπου n ο αριθμός των τριγώνων του STL μοντέλου, A_i το εμβαδό του i τριγώνου, $R_a(i)$ η εκτιμώμενη τραχύτητα, CH_i το εκτιμώμενο ύψος «οδόντωσης» του τριγώνου, A το συνολικό

εμβαδό όλων των τριγώνων του STL μοντέλου και V ο όγκος του. Η εκτιμώμενη τραχύτητα στην επιφάνεια ενός τριγώνου $R_a(i)$ υπολογίζεται συναρτήσει της κλίσης του και του πάχους στρώματος

Το κόστος κατασκευής δεν συνυπολογίζεται στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς συνδέεται άμεσα με τον χρόνο κατασκευής. Για τον υπολογισμό του κόστους κατασκευής από το σύστημα Στερεολιθογραφίας ($BCost$) χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$BCost = BTime * C_m + V d_r C_r \quad (7.3)$$

όπου με $BTime$ συμβολίζεται ο χρόνος κατασκευής, C_m το ωριαίο κόστος λειτουργίας του συστήματος Στερεολιθογραφίας, d_r η πυκνότητα της φωτοπολυμεριζόμενης ρητίνης και C_r το κόστος της ρητίνης (€/kg). Στην αντικειμενική συνάρτηση δεν συνυπολογίζεται επίσης το συνολικό εμβαδό των στηριζόμενων επιφανειών καθώς δεν αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής της βέλτιστης λύσης. Το συνολικό εμβαδό των στηριζόμενων επιφανειών ισούται με το άθροισμα των εμβαδών όλων των τριγώνων που σχηματίζουν με κλίση (σε σχέση με οριζόντιο επίπεδο) μεγαλύτερη των 150° .

Για κάθε προτεινόμενη λύση υπολογίζεται η τιμή της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης z η οποία είναι της μορφής:

$$z = w_1 BTime_E + w_3 VolumetricError_E + w_2 Roughness_E \quad (7.4)$$

$$w_1, w_2, w_3 \leq 0$$

όπου $BTime_E$ η επίδοση της λύσης σύμφωνα με το κριτήριο του χρόνου κατασκευής, $VolumetricError_E$ η επίδοση για τον δείκτη ογκομετρικού σφάλματος, $Roughness_E$ η επίδοση για την μέση τραχύτητα των επιφανειών, και $\{w_1, w_2, w_3\}$ οι συντελεστές βαρύτητας κάθε κριτηρίου. Οι συντελεστές βαρύτητας κάθε κριτηρίου ορίζονται από τον χειριστή ανάλογα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και τη μετέπειτα λειτουργία του προϊόντος. Βέλτιστη θεωρείται η λύση που ελαχιστοποιεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Λόγω των διαφορετικών μονάδων και τάξεων μεγεθών κάθε κριτηρίου στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης δεν εισάγεται αυτούσια η τιμή κάθε μεγέθους αλλά η επίδοσή της με βάση την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή που παρατηρείται. Η επίδοση E μίας λύσης j για το κριτήριο k υπολογίζεται βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$E_k(j) = \frac{T_k(j) - \min\{T_k\}}{\max\{T_k\} - \min\{T_k\}} \quad (7.5)$$

όπου $T_k(j)$ είναι η τιμή του κριτηρίου k για την λύση j , $\max\{T_k\}$ η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε για το κριτήριο και $\min\{T_k\}$ η ελάχιστη. Με την «κανονικοποίηση» αυτή των μεγεθών εξασφαλίζεται ότι κάθε κριτήριο θα συμβάλλει στην αντικειμενική συνάρτηση σύμφωνα με το συντελεστή βαρύτητας που του αποδίδεται.

Το κόστος κατασκευής δεν συνυπολογίζεται στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς συνδέεται άμεσα με τον χρόνο κατασκευής. Επισημαίνεται ότι αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης και η διαδικασία τεμαχισμού του STL μοντέλου, ο χειριστής έχει την δυνατότητα εκτίμησης του χρόνου και του κόστους κατασκευής με βάση το αρχείο τομών του αντικειμένου χρησιμοποιώντας το CLI εργαλείο εκτίμησης χρόνου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της μελέτης του χρόνου κατασκευής (κεφ. 4).

7.3.3 Παρουσίαση των πληροφοριών

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης όλων των λύσεων τροφοδοτούνται στο τελευταίο υποσύστημα, αυτό της εξαγωγής και παρουσίασης των πληροφοριών προς τον χειριστή. Εκεί κατατάσσονται ως προς κάθε ένα από τα κριτήρια αλλά και ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και εξάγονται σε ένα απλό αρχείο κειμένου. Το αρχείο αυτό εκτός από την κατάταξη περιέχει και τα βασικά χαρακτηριστικά και επιδόσεις κάθε λύσης έτσι ώστε να δοθεί στον χειριστή μία συνολικότερη εικόνα των διαφόρων μεγεθών. Για να διευκολυνθεί ο χειριστής στην επεξεργασία των δεδομένων το αρχείο είναι της μορφής CSV (Comma Separated Values) το οποίο μπορεί να εισαχθεί αυτούσιο στο λογισμικό *MsExcel*.

Η παρουσίαση των πληροφοριών σε μορφή πινάκων επιτρέπει στον χειριστή να έχει μία συνολική εικόνα της επίδοσης μίας λύσης. Κάποια ωστόσο δεδομένα και πληροφορίες όπως η τραχύτητα συγκεκριμένων επιφανειών και τα σημεία που χρειάζονται στήριξη είναι πολύ δύσκολο να αξιολογηθούν αποκλειστικά με την χρήση αριθμητικών δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να παρέχεται στον χειριστή η δυνατότητα οπτικής αξιολόγησης έτσι ώστε να είναι άμεσα εμφανή τα χαρακτηριστικά δεδομένων επιφανειών. Συγκεκριμένα η οπτική παρουσίαση πληροφοριών σχετικά με την τραχύτητα, το φαινόμενο κλίμακας και το πλέγμα στήριξης διευκολύνει σημαντικά τον χειριστή να εντοπίσει ποιες επιφάνειες πιθανόν να χρειάζονται χειρωνακτική κατεργασία και ποιου τύπου κατεργασία πρέπει να εφαρμοστεί (λείανση-κάλυψη). Επιπλέον ο χειριστής μπορεί να εντοπίσει σημεία που χρειάζονται πλέγμα στήριξης, το οποίο όμως θα είναι δύσκολο να αφαιρεθεί καθώς και την πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων κλειστού όγκου. Για όλους τους παραπάνω λόγους αλλά και για να έχει μία σαφέστερη εικόνα ο χειριστής του κάθε προσανατολισμού κατασκευής το σύστημα παρουσίασης των πληροφοριών εξάγει τρία έγχρωμα 3D μοντέλα της

βέλτιστης λύσης, ένα για την αποτύπωση της τραχύτητας των επιφανειών, ένα για τον εντοπισμό των κλιμακωτών επιφανειών και του τύπου τους (θετικό-αρνητικό σφάλμα κλίμακας) και ένα για τις περιοχές στήριξης. Τα τριδιάστατα αυτά μοντέλα είναι της μορφής VRML (Virtual Reality Modeling Language) και η πληροφορία σχετικά με κάθε επιφάνεια του μοντέλου παρέχεται χρωματικά κωδικοποιημένη. Περιγραφή για το πρότυπο VRML παρουσιάζεται στο Παράρτημα Π4.2.

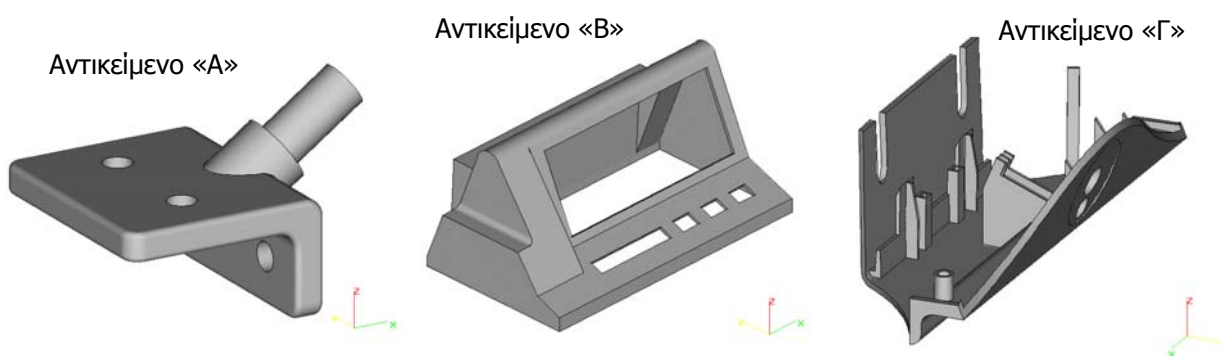
Κατά την επιλογή των βασικών προσανατολισμών έγινε η παραδοχή ότι ως λύσεις το σύστημα εξετάζει μόνο εκείνους που βελτιστοποιούν την απόδοση επιφανειών σχετικά μεγάλου εμβαδού. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η εύρεση μίας σχετικά καλής λύσης για κάποιο από τα κριτήρια ή την συνολική αντικειμενική συνάρτηση σε λογικό χρονικό διάστημα. Ωστόσο οι λύσεις αυτές δεν είναι απαραίτητα και οι συνολικά βέλτιστες. Επίσης υπάρχει πάντα η πιθανότητα να παραλειφθούν ή να υποβαθμισθούν προσανατολισμοί που μεγιστοποιούν την ακρίβεια κρίσιμων γεωμετρικών χαρακτηριστικών λόγω του μικρού τους μεγέθους ή εμβαδού των αντίστοιχων επιφανειών. Για να δοθεί η δυνατότητα στον χειριστή ελέγχου και άλλων λύσεων πέρα από αυτές που προτείνει αρχικά το σύστημα επιτρέπεται στον χειριστή να ελέγξει επιπλέον επιθυμητούς προσανατολισμούς, ανεξάρτητα. Αυτό δεν ακυρώνει την χρησιμότητα του συστήματος καθώς σε συνδυασμό με την χρήση γεωμετρικών αλγορίθμων μπορούν να προσδιοριστούν το σχετικό κόστος, ο χρόνος ή η ποιότητα της κατασκευής για προσανατολισμούς οι οποίοι βελτιστοποιούν κάποιο κριτήριο και να επιλεγεί το βέλτιστο πάχος στρώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Παρουσίαση Συστήματος

8.1 Εισαγωγή

Για την πληρέστερη παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών και λειτουργιών του τελικού συστήματος παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο τρεις περιπτώσεις χρήσης του ΣΥΕΚΑΠ, οι οποίες αφορούν τρία αντικείμενα με διαφορετικές κατασκευαστικές απαιτήσεις, περιορισμούς και γεωμετρική μορφή (Σχήμα 8.1). Πρώτη εξετάζεται η περίπτωση ενός μεταλλικού εξαρτήματος απλής γεωμετρικής μορφής, του αντικειμένου «Α», ώστε να εξηγηθούν σαφέστερα οι μέθοδοι ανάλυσης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης των λύσεων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το αντικείμενο «Β», ενός χυτού προϊόντος με λεπτά τοιχώματα και μεγαλύτερο αριθμό γεωμετρικών-μορφολογικών χαρακτηριστικών. Η παρουσίαση του συστήματος ολοκληρώνεται με την εξέταση ενός «πραγματικού» αντικειμένου, ενός πλαστικού εξαρτήματος υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας, πρωτότυπο/μοντέλο του οποίου κατασκευάστηκε στα πλαίσια συνεργασίας με ελληνική βιομηχανία χύτευσης πλαστικών εξαρτημάτων.

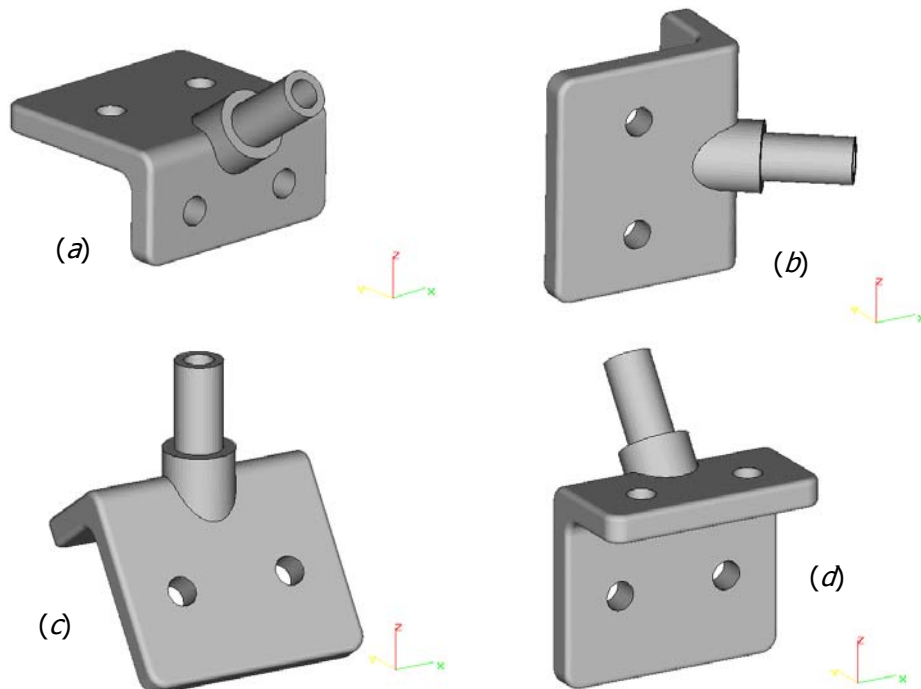


Σχήμα 8.1. Ισομετρικές (προοπτικές) όψεις των τριών υπό εξέταση αντικειμένων

8.2 Αντικείμενο «Α»

Το αντικείμενο «Α» είναι ένα μηχανολογικό εξάρτημα απλής γεωμετρικής μορφής, που περιγράφεται από ένα μικρό αριθμό επιπέδων και κυλινδρικών επιφανειών. Η κατασκευή ενός μοντέλου αυτής της γεωμετρίας δεν αποτελεί πρακτικά χαρακτηριστική περίπτωση εφαρμογής της Στερεολιθογραφίας καθώς το κόστος κατασκευής του με άλλες μεθόδους ή τεχνικές είναι σαφώς χαμηλότερο. Η γεωμετρική ωστόσο απλότητα του μοντέλου καθιστά σαφέστερη την παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του συστήματος και της λειτουργίας του ΣΥΕΚΑΠ.

Η γεωμετρία του αντικείμενου «Α» προκύπτει ουσιαστικά από την σύνθεση δύο βασικών μορφολογικών χαρακτηριστικών, ενός «γάμμα» στήριξης και ενός κυλινδρικού γεωμετρικού χαρακτηριστικού. Με βάση τα δύο αυτά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους κανόνες βέλτιστης τοποθέτησής τους προκύπτουν οι τέσσερις πιθανοί προσανατολισμοί του Σχήματος 8.2. Οι προσανατολισμοί a , b και d είναι εκείνοι που εξασφαλίζουν ότι οι μεγαλύτερες σε εμβαδό επίπεδες επιφάνειες του αντικειμένου δεν θα παρουσιάζουν «σκαλοπάτι» λόγω φαινομένου κλίμακας, ενώ στην περίπτωση του προσανατολισμού c δεν θα εμφανιστεί «σκαλοπάτι» στις κυλινδρικές επιφάνειες. Στο σύνολο των πιθανών προσανατολισμών συμπεριλαμβάνονται κανονικά και οι τέσσερις κατοπτρικοί ως προς το οριζόντιο επίπεδο προσανατολισμοί, οι οποίοι όμως εμφανίζουν πρακτικά αμελητέες κατασκευαστικές διαφορές με τους επιλεγμένους προσανατολισμούς και συνεπώς μπορούν να θεωρηθούν κατά αντιστοιχία ισοδύναμοι.



Σχήμα 8.2 Προτεινόμενοι προσανατολισμοί κατασκευής για το αντικείμενο «Α».

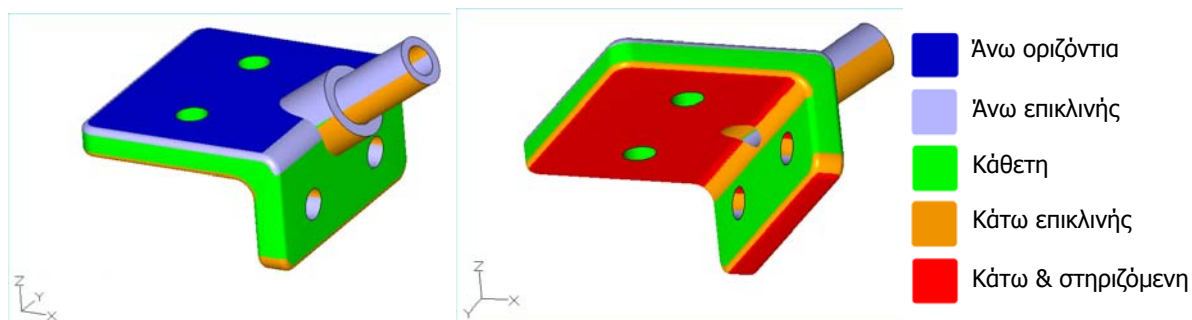
Η ανάλυση του προβλήματος επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων ξεκινά με την ανάλυση των προτεινόμενων προσανατολισμών. Για κάθε πιθανό προσανατολισμό υπολογίζονται

χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη που εξαρτώνται από τον προσανατολισμό και τα οποία είναι:

- Το συνολικό εμβαδό επικλινών επιφανειών
- Το συνολικό εμβαδό στηριζόμενων επιφανειών
- Το ύψος του αντικειμένου

Τα δύο πρώτα μεγέθη σχετίζονται άμεσα και αντιστρόφως ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής καθώς στις μεν επικλινείς επιφάνειες θα εμφανιστεί «σκαλοπάτι» λόγω του φαινομένου κλίμακας, ενώ στις στηριζόμενες θα παραμείνουν υπολείμματα του πλέγματος στήριξης. Αντίστοιχα το ύψος συναρτάται άμεσα με το χρόνο/κόστος κατασκευής καθώς καθορίζει τον αριθμό των απαιτούμενων στρωμάτων και συνεπώς τον συνολικό χρόνο επικάλυψης. Καθώς τα τρία αυτά μεγέθη παρέχουν μία πρώτη εικόνα των επιδόσεων κάθε προσανατολισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως δείκτες αξιολόγησης των προσανατολισμών. Κάτι τέτοιο πιθανόν να απαιτείται για πρακτικούς λόγους, εάν ο αριθμός των προτεινόμενων προσανατολισμών είναι αρκετά μεγάλος (περισσότεροι των δέκα) με αποτέλεσμα να αναμένεται και αντίστοιχα υψηλός χρόνος επεξεργασίας του προβλήματος. Σε αυτή την περίπτωση με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης των προσανατολισμών μπορούν να επιλεγθούν οι καλύτεροι, με «πρώτη» εκτίμηση, προσανατολισμοί, έτσι ώστε να μειωθεί ο συνολικός αριθμός και ο χρόνος επεξεργασίας τους.

Πέρα των ποσοτικών δεδομένων χρήσιμο είναι να γνωρίζει ο χειριστής σε ποιες επιφάνειες θα εμφανιστεί «σκαλοπάτι» (επικλινείς επιφάνειες) καθώς και ποιες θα είναι σε επαφή με το πλέγμα στήριξης (στηριζόμενες επιφάνειες), γιατί σε αυτές τις επιφάνειες θα επικεντρωθούν οι μεταπαρασκευαστικές εργασίες τελειοποίησης (φινιρίσμα). Ο τύπος της κατεργασίας που θα εφαρμοστεί εξαρτάται από τον προσανατολισμό της επιφάνειας. Στις άνω επικλινείς επιφάνειες το φαινόμενο κλίμακας οδηγεί σε απώλεια όγκου (αρνητικό ογκομετρικό σφάλμα) σε σύγκριση με το αρχικό 3D μοντέλο, και έτσι απαιτείται κάλυψη του «σκαλοπατιού» με προσθήκη υλικού. Αντίθετα στις κάτω επικλινείς το φαινόμενο κλίμακας προσθέτει όγκο (θετικό ογκομετρικό σφάλμα) που πρέπει να αφαιρεθεί με λείανση του αντικειμένου. Λείανση απαιτείται επίσης στις στηριζόμενες επιφάνειες για την αφαίρεση υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης. Οι πληροφορίες αυτές παρέχονται στο χειριστή μέσω του VRML μοντέλου φαινομένου κλίμακας, στο οποίο αποτυπώνονται χρωματικά οι κλιμακωτές περιοχές και ο τύπος του ογκομετρικού σφάλματος (Σχήμα 8.3).



Σχήμα 8.3. Μοντέλο VRML φαινομένου κλίμακας αντικ. «Α» για προσανατολισμό κατασκευής α.

Η χρησιμότητα του VRML μοντέλου φαινομένου κλίμακας μπορεί να είναι μικρή στην περίπτωση απλών γεωμετρικά αντικειμένων, όπως το «Α», η πλειοψηφία ωστόσο των μοντέλων που κατασκευάζονται με την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας είναι γεωμετρικά πολυπλοκότερα, με αποτέλεσμα να μην είναι πάντα προφανείς οι «προβληματικές» ειδικά για έναν χειριστή με μικρή εμπειρία. Εάν μάλιστα οι πιθανοί προσανατολισμοί είναι αρκετοί η χρήση των VRML μοντέλων μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τον χειριστή.

Αφού οριστεί πλήρως το σύνολο των πιθανών προσανατολισμών σχηματίζεται το σύνολο των πιθανών λύσεων το οποίο προκύπτει σε συνδυασμό με τις τρεις επιτρεπτές τιμές του πάχους στρώματος (0.10, 0.15 και 0.20 mm). Στην υπό εξέταση περίπτωση έχουμε 12 πιθανές λύσεις, τρεις για κάθε έναν προσανατολισμό από αυτούς που παρουσιάζονται στο σχήμα 8.2. Η αξιολόγηση των προτεινόμενων λύσεων απαιτεί τον υπολογισμό επιπλέον μεγεθών-δεικτών, που είναι τα εξής:

- Ο χρόνος και το κόστος κατασκευής
- Το Ογκομετρικό λάθος ως ποσοστό του όγκου του μοντέλου (θετικό και αρνητικό)
- Η τραχύτητα των επιφανειών (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή)
- Το ύψος οδόντωσης (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή)
- Ο αριθμός των απαιτούμενων στρωμάτων

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξάγονται υπό μορφή αρχείου CSV (Comma Separated Values), έτσι ώστε να είναι δυνατή η απευθείας εισαγωγή στο λογισμικό MS Excel. Στον Πίνακα 8.1 Βλέπουμε τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του προσανατολισμού *a* και των τριών αντίστοιχων λύσεων έτσι όπως εμφανίζονται προς επεξεργασία στο λογισμικό MS Excel.

Πίνακας 8.1. Αποτελέσματα ανάλυσης κατασκευής αντικειμένου «Α» με προσανατολισμό *a*.

Results evaluating case1a.stl						
Dimensions						
Axis	Min (mm)	Max (mm)	Dim (mm)			
X	5.00	57.29	52.29			(length)
Y	5.00	45.00	40.00			(width)
Z	3.00	36.27	33.27			(height)
Orientation						
Volume (mm ³)	Area (mm ²)	Supported Area (mm ²)	Horizontal Up Area (mm ²)	Horiz. Down Area (mm ²)	Incl. Up Area (mm ²)	Incl. Down Area (mm ²)
10.373.694	5.753.047	1.227.086	1.082.369	1.040.378	1.011.882	1.077.877
Build						
Lth	BTime (sec)	Volumetric Error (mm ³)	Posit.Volum. Error (mm ³)	Negat.Volum. Error (mm ³)	NoLayers	Bcost (Euros)
0.10	11.106.700	4,50%	2,89%	1,61%	332	80.49
0.15	7.538.072	6,26%	3,85%	2,41%	221	55.51
0.20	5.820.401	8,03%	4,82%	3,21%	166	43.48
Max-Min						
Lth	MAX Ra	MIN Ra	MEAN Ra	MAX Ch	MIN Ch	MEAN Ch
0.10	26.367	1.650	7.457	0.180	0.000	0.081
0.15	32.401	0.750	9.659	0.240	0.000	0.113
0.20	45.574	0.790	13.069	0.300	0.000	0.145

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης γίνεται ένας πρώτος έλεγχος των λύσεων σε σχέση με

τους κατασκευαστικούς περιορισμούς, που έχουν τεθεί από τον χειριστή. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές για τα εξής μεγέθη:

- κόστος κατασκευής
- χρόνος κατασκευής
- μέση τραχύτητα
- μέσο ύψος οδόντωσης
- ογκομετρικό λάθος.

Αφού αποκλεισθούν οι λύσεις που δεν ικανοποιούν τους κατασκευαστικούς περιορισμούς υπολογίζονται για κάθε μία από τις εναπομείναντες λύσεις οι επιδόσεις της ως προς τα τρία βασικά κριτήρια και η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης βάσει των σχέσεων 7.4 και 7.5. Οι συντελεστές βαρύτητας κάθε κριτηρίου καθορίζονται από τον χειριστή σύμφωνα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και την αναμενόμενη χρήση του τελικού φυσικού μοντέλου. Έτσι στην περίπτωση ενός απλού αισθητικού μοντέλου θα αποδοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στην ταχεία κατασκευή και το μικρό κόστος, συνεπώς ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου του χρόνου θα έχει μεγαλύτερη τιμή από τους άλλους δύο. Αντίθετα στην περίπτωση ενός πρότυπου-μοδέλου χύτευσης εν κενώ απαιτείται συνήθως πολύ καλή ακρίβεια και μικρή τραχύτητα επιφανειών, οπότε ο χειριστής οφείλει να δώσει μεγαλύτερο βάρος στα κριτήρια του ογκομετρικού σφάλματος και της τραχύτητας. Βέλτιστη θεωρείται η λύση που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

Στον πίνακα 8.2 παρουσιάζεται η κατάταξη των προτεινόμενων κατασκευαστικών λύσεων για το αντικείμενο «Α» με βάση επτά κατασκευαστικά σενάρια. Σε κάθε κατασκευαστικό σενάριο διαφοροποιούνται οι τιμές των τριών συντελεστών βαρύτητας, οι τιμές των οποίων ανά σενάριο παρουσιάζονται στην πρώτη γραμμή του πίνακα με την εξής σειρά: συντελεστής βαρύτητας χρόνου κατασκευής - ογκομετρικού λάθους - μέσης τραχύτητας. Αντίστοιχα οι πιθανές λύσεις παρουσιάζονται ως το ζεύγος προσανατολισμού-πάχους στρώματος που τις προσδιορίζει. Αναλυτικά οι τιμές όλων των υπολογιζόμενων μεγεθών για κάθε λύση παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π3.1.

Πίνακας 8.2 Κατάταξη των λύσεων κατασκευής αντικειμένου «Α» για διαφορετικά σενάρια.

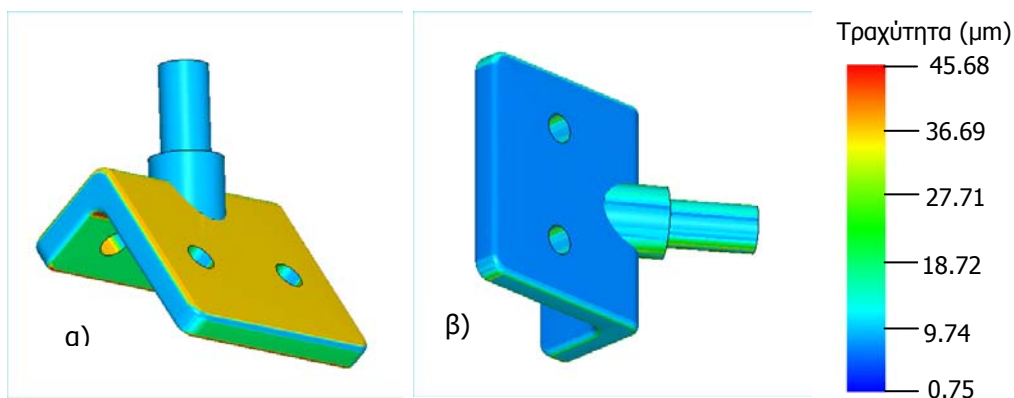
1-0-0		0.8-0.1-0.1		0.6-0.2-0.2		0.4-0.3-0.3		0.2-0.4-0.4		0-1-0		0-0-1	
<i>a-0.20</i>	0.000	<i>b-0.20</i>	0.137	<i>b-0.20</i>	0.179	<i>b-0.15</i>	0.207	<i>b-0.10</i>	0.131	<i>b-0.10</i>	0.000	<i>b-0.10</i>	0.000
<i>b-0.20</i>	0.094	<i>a-0.20</i>	0.153	<i>b-0.15</i>	0.231	<i>b-0.20</i>	0.221	<i>b-0.15</i>	0.183	<i>b-0.15</i>	0.116	<i>d-0.10</i>	0.009
<i>a-0.15</i>	0.151	<i>a-0.15</i>	0.216	<i>a-0.15</i>	0.281	<i>b-0.10</i>	0.262	<i>d-0.10</i>	0.261	<i>d-0.10</i>	0.142	<i>a-0.10</i>	0.052
<i>c-0.20</i>	0.223	<i>b-0.15</i>	0.255	<i>a-0.20</i>	0.306	<i>a-0.10</i>	0.330	<i>b-0.20</i>	0.264	<i>b-0.20</i>	0.233	<i>b-0.15</i>	0.201
<i>d-0.20</i>	0.268	<i>d-0.20</i>	0.305	<i>d-0.20</i>	0.342	<i>a-0.15</i>	0.347	<i>a-0.10</i>	0.286	<i>d-0.15</i>	0.314	<i>d-0.15</i>	0.218
<i>b-0.15</i>	0.279	<i>c-0.20</i>	0.359	<i>a-0.10</i>	0.375	<i>d-0.15</i>	0.363	<i>d-0.15</i>	0.315	<i>c-0.10</i>	0.321	<i>a-0.15</i>	0.240
<i>c-0.15</i>	0.450	<i>a-0.10</i>	0.420	<i>b-0.10</i>	0.393	<i>d-0.20</i>	0.379	<i>a-0.15</i>	0.412	<i>a-0.10</i>	0.430	<i>c-0.10</i>	0.282
<i>a-0.10</i>	0.465	<i>d-0.15</i>	0.461	<i>d-0.15</i>	0.412	<i>d-0.10</i>	0.445	<i>d-0.20</i>	0.416	<i>d-0.20</i>	0.486	<i>b-0.20</i>	0.380
<i>d-0.15</i>	0.509	<i>c-0.15</i>	0.469	<i>c-0.15</i>	0.489	<i>a-0.20</i>	0.459	<i>c-0.10</i>	0.424	<i>c-0.15</i>	0.564	<i>d-0.20</i>	0.420
<i>b-0.10</i>	0.654	<i>b-0.10</i>	0.524	<i>c-0.20</i>	0.495	<i>c-0.15</i>	0.508	<i>c-0.15</i>	0.527	<i>a-0.15</i>	0.715	<i>c-0.15</i>	0.530
<i>c-0.10</i>	0.913	<i>c-0.10</i>	0.790	<i>d-0.10</i>	0.630	<i>c-0.10</i>	0.546	<i>a-0.20</i>	0.612	<i>c-0.20</i>	0.806	<i>a-0.20</i>	0.530
<i>d-0.10</i>	1.000	<i>d-0.10</i>	0.815	<i>c-0.10</i>	0.668	<i>c-0.20</i>	0.631	<i>c-0.20</i>	0.767	<i>a-0.20</i>	1.000	<i>c-0.20</i>	1.000

Όπως είναι εμφανές από τον Πίνακα 8.2 λύσεις που σχετίζονται με την επιλογή του προσανατολισμού b υπερέχουν σε όλες τις περιπτώσεις εκτός εκείνης που αποδίδεται απόλυτο βάρος στο κριτήριο του χρόνου. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σύμφωνα με την αναμενόμενη συμπεριφορά του συστήματος καθώς στο προσανατολισμό b επιτυγχάνεται πολύ καλή απόδοση των επίπεδων επιφανειών του αντικειμένου ενώ ταυτόχρονα ο άξονας του κυλινδρικού τμήματος είναι στο οριζόντιο επίπεδο με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρή σχετικά τραχύτητα λόγω του φαινομένου κλίμακας στις κυλινδρικές επιφάνειες. Στον προσανατολισμό b βέβαια θα παρουσιάζουν «σκαλοπάτι» οι τέσσερις οπές, αυτό όμως επιβαρύνει ελάχιστα τις επιδόσεις των λύσεων καθώς οι αντίστοιχες επιφάνειες έχουν μικρό σχετικά εμβαδό.

Εάν αποδοθεί απόλυτη βαρύτητα στον χρόνο κατασκευής (πρώτο σενάριο) βέλτιστη λύση αποτελεί η επιλογή του προσανατολισμού a με πάχος στρώματος 0.20, αποτέλεσμα μάλλον αναμενόμενο καθώς είναι ο προσανατολισμός με το μικρότερο ύψος γεγονός που σε συνδυασμό με την χρησιμοποίηση του μέγιστου δυνατού πάχους στρώματος ελαχιστοποιεί τον αριθμό των στρωμάτων. Ακόμα όμως και σε εκείνη την περίπτωση η λύση $b-0.20$ είναι η δεύτερη καλύτερη και με μικρή από πλευράς επίδοσης διαφορά από την βέλτιστη.

Από την άλλη πλευρά οι λύσεις που στηρίζονται στην επιλογή του προσανατολισμού c βρίσκονται στην πλειονότητα των εξεταζόμενων σεναρίων στις τελευταίες θέσεις της αξιολόγησης ειδικά στα πιο «ισορροπημένα» κατασκευαστικά σενάρια. Η παρατήρηση αυτή ήταν επίσης αναμενόμενη καθώς ο προσανατολισμός c εξασφαλίζει μεν την ακριβή απόδοση των κυλινδρικών επιφανειών του μοντέλου, συνεπάγεται όμως την εμφάνιση σκαλοπατιού στις επίπεδες επιφάνειες που έχουν μεγαλύτερο συνολικό εμβαδό. Μόνη εξαίρεση η περίπτωση κατά την οποία ο χρόνος κατασκευής είναι το μόνο κριτήριο και το πάχος στρώματος το μέγιστο δυνατό. Πάλι όμως η προτεινόμενη λύση ($c-0.20$) είναι στην τέταρτη θέση από πλευράς αξιολόγησης. Παρά τα παραπάνω η λύση $c-0.20$ δεν πρέπει να αποκλειστεί καθώς θα μπορούσε να επιλεγεί από τον χειριστή της μηχανής εάν η ακριβής απόδοση των κυλινδρικών επιφανειών είναι κατασκευαστικά κρίσιμη, δεδομένου μάλιστα ότι η κατεργασία των επίπεδων επιφανειών είναι συνήθως απλούστερη από αυτή των κυλινδρικών (ειδικά των εσωτερικών).

Όπως με το φαινόμενο κλίμακας έτσι και στην περίπτωση της τραχύτητας, είναι χρήσιμο για τον χειριστή να γνωρίζει την αναμενόμενη τραχύτητα κάθε επιφάνειας του μοντέλου, ανάλογα με τον επιλεχθέντα προσανατολισμό και πάχος στρώματος. Έτσι ο χειριστής μπορεί να κρίνει εάν μία κρίσιμη επιφάνεια έχει ανεκτή τραχύτητα και συνεπώς δεν θα χρειαστεί επεξεργασία, πληροφορία ιδιαίτερα χρήσιμη για επιφάνειες που η επεξεργασία τους είναι πρακτικά δύσκολη και χρονοβόρα (π.χ εσωτερικές επιφάνειες ή μικρού μεγέθους γεωμετρικά χαρακτηριστικά). Εικόνα της τραχύτητας του ακατέργαστου μοντέλου Στερεολιθογραφίας δίνεται μέσω του VRML μοντέλου τραχύτητας στο οποίο αποτυπώνεται χρωματικά η εκτιμώμενη τραχύτητα κάθε επιφάνειας. Η τραχύτητα της κάθε επιφάνειας υπολογίζεται βάσει των σχέσεων (5.8)-(5.10), αναλόγως του προσανατολισμού της και του πάχους στρώματος. Δύο παραδείγματα μοντέλων τραχύτητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.4, της βέλτιστης ($b-0.10$) και της χειρίστης ($c-0.20$) από άποψη τραχύτητας λύσης.

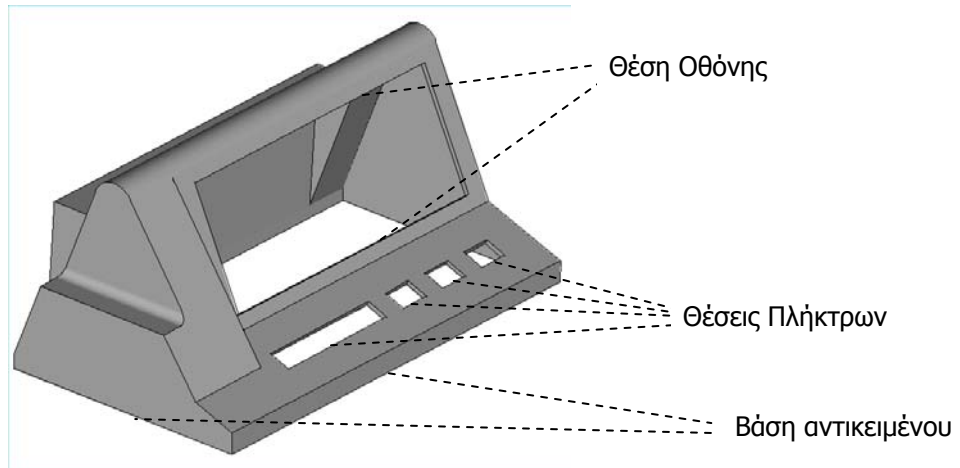


Σχήμα 8.4. VRML μοντέλα τραχύτητας αντικειμένου «A» για λύσεις α) $c-0.20$ και β) $b-0.10$.

8.3 Αντικείμενο «B»

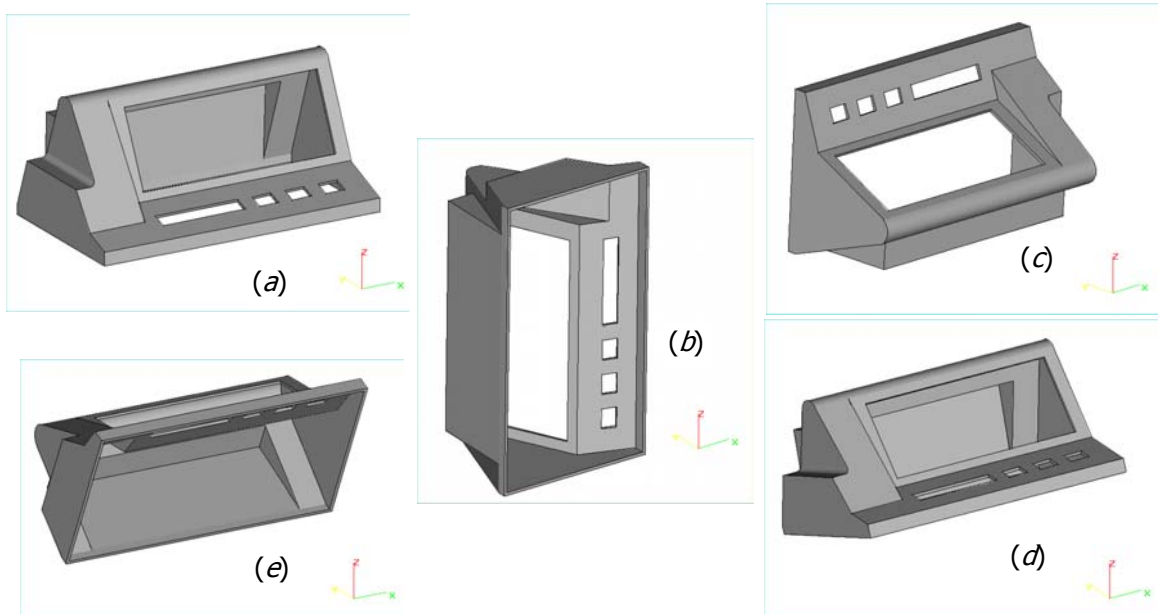
Το μεταλλικό κάλυμμα ενός ψηφιακού επιτραπέζιου ρολογιού αποτελεί την δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε (Σχήμα 8.5). Το αντικείμενο «B» παρότι δεν διαθέτει επιφάνειες «ελεύθερης» γεωμετρίας (freeform surfaces) και μεγάλο αριθμό μορφολογικών-γεωμετρικών χαρακτηριστικών, έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που καθιστούν ενδιαφέρουσα την εξέταση του όπως τα λεπτά τοιχώματα και η διασπορά κρίσιμων γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε διάφορες επιφάνειες, κοινό γνώρισμα της πλειοψηφίας των μοντέλων για τα οποία η Στερεολιθογραφία θεωρείται η καταλληλότερη μέθοδος κατασκευής.

Λόγω του μικρού πάχους των τοιχωμάτων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος ο περιορισμός του φαινομένου κλίμακας και των μεταπαρασκευαστικών εργασιών που μπορεί να οδηγήσουν σε αλλοίωση των διαστάσεων ή ακόμα και καταστροφή του μοντέλου. Η διασπορά από την άλλη των οπών σε διάφορες -μη παράλληλες μεταξύ τους- επιφάνειες δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη επίτευξη υψηλής ακρίβειας σε όλα τα χαρακτηριστικά. Η ακρίβεια στην κατασκευή των οπών έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς σε αυτά τα σημεία θα προσαρμοσθούν τα πλήκτρα και η οθόνη της συσκευής. Αντίστοιχης σημασίας είναι φυσικά η επίτευξη ακρίβειας στην βάση του αντικειμένου, όπου και θα προσαρμοσθεί η βάση της συσκευής.



Σχήμα 8.5. Μορφή και κρίσιμα μορφολογικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου «B».

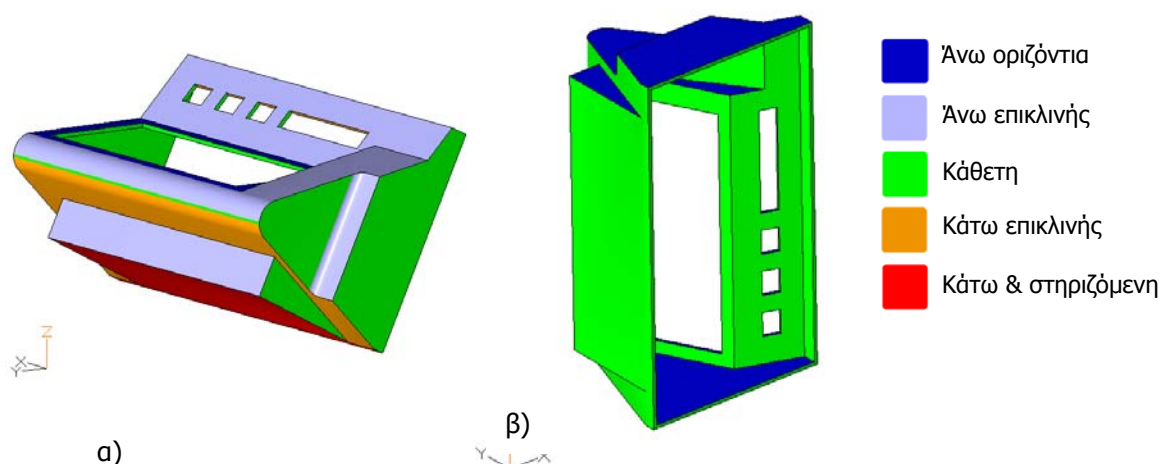
Η επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας σε κάποιο από τα κρίσιμα χαρακτηριστικά επιτυγχάνεται με την επιλογή προσανατολισμού στον οποίο η αντίστοιχη επιφάνεια είναι παράλληλη στο οριζόντιο επίπεδο. Με βάση λοιπόν τις θέσεις των οπών και της απαίτησης για ελαχιστοποίηση του φαινομένου κλίμακας προκύπτουν οι προτεινόμενοι προσανατολισμοί κατασκευής του αντικειμένου «B» που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.6. Προτεινόμενοι προσανατολισμοί κατασκευής αντικειμένου «B».

Οι προσανατολισμοί *a*, *d* και *e* επιλέχθηκαν διότι εξασφαλίζουν την μέγιστη δυνατή κατασκευαστική ακρίβεια στα σημεία επαφής με την βάση, τις οπές των πλήκτρων και την οπή της οθόνης αντίστοιχα, με το μειονέκτημα όμως της εμφάνισης του φαινομένου κλίμακας σε μεγάλο ποσοστό των επιφανειών του αντικειμένου (Σχήμα 8.7α). Ο προσανατολισμός *b* από την άλλη πλευρά ελαχιστοποιεί την τραχύτητα των επιφανειών και το ογκομετρικό λάθος καθώς η εμφάνιση του φαινομένου κλίμακας είναι πρακτικά αμελητέα (Σχήμα 8.7β). Τέλος ο προσανατολισμός *c* αποτελεί την βέλτιστη τοποθέτηση για την πίσω επιφάνεια του καλύμματος που είναι και η

μεγαλύτερη σε εμβαδό επιφάνεια του αντικειμένου.



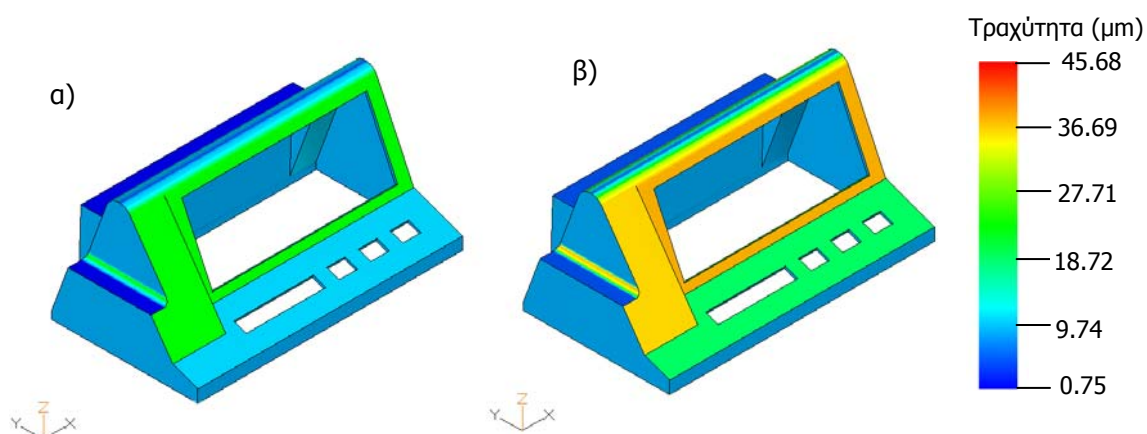
Σχήμα 8.7. VRML μοντέλα φαινομένου κλίμακας αντικ. «B» για προσανατολισμό α) *e* και β) *b*.

Στον Πίνακα 8.3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των πιθανών λύσεων και η κατάταξη τους σύμφωνα με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης των κατασκευαστικών σεναρίων που εξετάστηκαν και στην μελέτη του αντικειμένου «A». Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις όλων των λύσεων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π3.2. Από τον πίνακα 8.3 είναι εμφανές ότι στις περιπτώσεις που βασικό ζητούμενο είναι η ποιότητα κατασκευής υπερέχουν οι λύσεις που βασίζονται στον προσανατολισμό *b* και ειδικότερα η λύση με το μικρότερο δυνατό πάχος στρώματος (*b-0.10*). Μειονέκτημα της συγκεκριμένης λύσης είναι ότι απαιτεί τον μέγιστο χρόνο κατασκευής λόγω αριθμού στρωμάτων και η παρουσία ογκώδους πλέγματος στήριξης εντός του αντικειμένου, το οποίο όμως στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι δύσκολο να αφαιρεθεί. Ωστόσο αυξάνοντας το πάχος στρώματος και διατηρώντας τον προσανατολισμό *b* προκύπτουν καλές λύσεις και στα πιο «ισορροπημένα» κατασκευαστικά σενάρια.

Πίνακας 8.3. Κατάταξη λύσεων κατασκευής αντικειμένου «B» για διαφορετικά σενάρια.

1-0-0		0.8-0.1-0.1		0.6-0.2-0.2		0.4-0.3-0.3		0.2-0.4-0.4		0-1-0		0-0-1	
<i>a-0.20</i>	0.000	<i>a-0.20</i>	0.126	<i>a-0.15</i>	0.213	<i>a-0.10</i>	0.233	<i>b-0.10</i>	0.200	<i>b-0.10</i>	0.000	<i>b-0.10</i>	0.000
<i>d-0.20</i>	0.025	<i>a-0.15</i>	0.152	<i>a-0.10</i>	0.248	<i>b-0.20</i>	0.271	<i>a-0.10</i>	0.217	<i>b-0.15</i>	0.115	<i>b-0.15</i>	0.156
<i>e-0.20</i>	0.050	<i>d-0.20</i>	0.164	<i>a-0.20</i>	0.251	<i>a-0.15</i>	0.273	<i>b-0.15</i>	0.223	<i>a-0.10</i>	0.172	<i>b-0.20</i>	0.192
<i>c-0.20</i>	0.070	<i>d-0.15</i>	0.190	<i>d-0.15</i>	0.256	<i>d-0.10</i>	0.289	<i>b-0.20</i>	0.241	<i>b-0.20</i>	0.231	<i>a-0.10</i>	0.230
<i>a-0.15</i>	0.091	<i>c-0.20</i>	0.219	<i>b-0.20</i>	0.300	<i>b-0.15</i>	0.310	<i>d-0.10</i>	0.275	<i>d-0.10</i>	0.246	<i>c-0.10</i>	0.271
<i>d-0.15</i>	0.124	<i>e-0.20</i>	0.240	<i>d-0.10</i>	0.303	<i>d-0.15</i>	0.322	<i>a-0.15</i>	0.334	<i>a-0.15</i>	0.355	<i>d-0.10</i>	0.277
<i>e-0.15</i>	0.158	<i>e-0.15</i>	0.253	<i>d-0.20</i>	0.303	<i>c-0.10</i>	0.362	<i>c-0.10</i>	0.342	<i>c-0.10</i>	0.374	<i>c-0.15</i>	0.413
<i>c-0.15</i>	0.186	<i>c-0.15</i>	0.254	<i>c-0.15</i>	0.322	<i>a-0.20</i>	0.377	<i>d-0.15</i>	0.388	<i>e-0.10</i>	0.431	<i>e-0.10</i>	0.431
<i>a-0.10</i>	0.280	<i>a-0.10</i>	0.264	<i>e-0.15</i>	0.349	<i>c-0.15</i>	0.390	<i>e-0.10</i>	0.421	<i>d-0.15</i>	0.458	<i>a-0.15</i>	0.434
<i>d-0.10</i>	0.331	<i>d-0.10</i>	0.317	<i>c-0.20</i>	0.368	<i>b-0.10</i>	0.400	<i>c-0.15</i>	0.457	<i>a-0.20</i>	0.538	<i>d-0.15</i>	0.450
<i>b-0.20</i>	0.360	<i>b-0.20</i>	0.330	<i>c-0.10</i>	0.382	<i>e-0.10</i>	0.411	<i>a-0.20</i>	0.503	<i>c-0.15</i>	0.637	<i>e-0.15</i>	0.554
<i>e-0.10</i>	0.381	<i>e-0.10</i>	0.391	<i>b-0.15</i>	0.397	<i>d-0.20</i>	0.443	<i>e-0.15</i>	0.539	<i>d-0.20</i>	0.670	<i>a-0.20</i>	0.718
<i>c-0.10</i>	0.422	<i>c-0.10</i>	0.402	<i>e-0.10</i>	0.401	<i>e-0.15</i>	0.444	<i>d-0.20</i>	0.582	<i>e-0.15</i>	0.715	<i>c-0.20</i>	0.731
<i>b-0.15</i>	0.572	<i>b-0.15</i>	0.485	<i>e-0.20</i>	0.430	<i>c-0.20</i>	0.517	<i>c-0.20</i>	0.666	<i>c-0.20</i>	0.899	<i>d-0.20</i>	0.771
<i>b-0.10</i>	1.000	<i>b-0.10</i>	0.800	<i>b-0.10</i>	0.600	<i>e-0.20</i>	0.620	<i>e-0.20</i>	0.810	<i>e-0.20</i>	1.000	<i>e-0.20</i>	1.000

Αντίθετα στην περίπτωση που αποδίδεται υψηλότερη βαρύτητα στον χρόνο κατασκευής προτεινόμενος προσανατολισμός είναι ο a και το πάχος στρώματος λαμβάνει την μεγαλύτερη επιτρεπόμενη τιμή του (0.20 mm). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη λύση οδηγεί στον μικρότερο δυνατό αριθμό στρωμάτων, παράμετρος που στην περίπτωση του αντικειμένου «B» καθορίζει άμεσα το χρόνο/κόστος κατασκευής λόγω του μικρού σχετικά λόγου όγκου προς συνολική επιφάνεια. Ο προσανατολισμός a με το μέσο ή μικρό πάχος στρώματος υπερέχει και στα σενάρια που αποδίδεται ίση περίπου βαρύτητα και στα τρία κριτήρια, επιθυμείται δηλαδή ένας συμβιβασμός ποιότητας και κόστους, γεγονός που υπονοεί ότι το αναμενόμενο ογκομετρικό σφάλμα και η τραχύτητα για αυτές τις λύσεις λαμβάνουν σχετικά χαμηλές τιμές (Σχήμα 8.8).

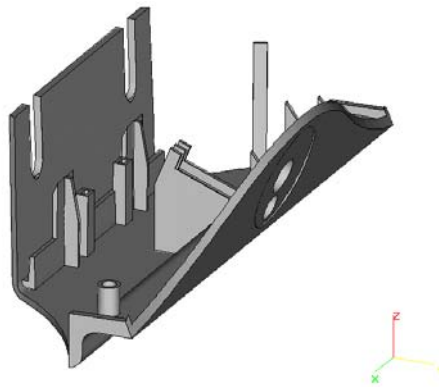


Σχήμα 8.8. VRML μοντέλα τραχύτητας αντικειμένου «B», για λύσεις α) $a-0.15$ και β) $a-0.20$.

Σχετικά καλή επίδοση στα δύο «ισορροπημένα» σενάρια έχουν και δύο λύσεις που στηρίζονται στον προσανατολισμό d , οι $d-0.10$ και $d-0.15$. Οι λύσεις αυτές, παρότι δεν είναι οι βέλτιστες, θα μπορούσαν να επιλεγθούν, καθώς εξασφαλίζουν υψηλή ακρίβεια κατασκευής για τις οπές των πλήκτρων, χωρίς ιδιαίτερα μεγάλο κόστος. Αντίθετα οι προσανατολισμοί c και e είναι αρκετά χαμηλά στην κατάταξη καθώς έχουν σχετικά υψηλό κόστος σε συνδυασμό με χαμηλή ακρίβεια.

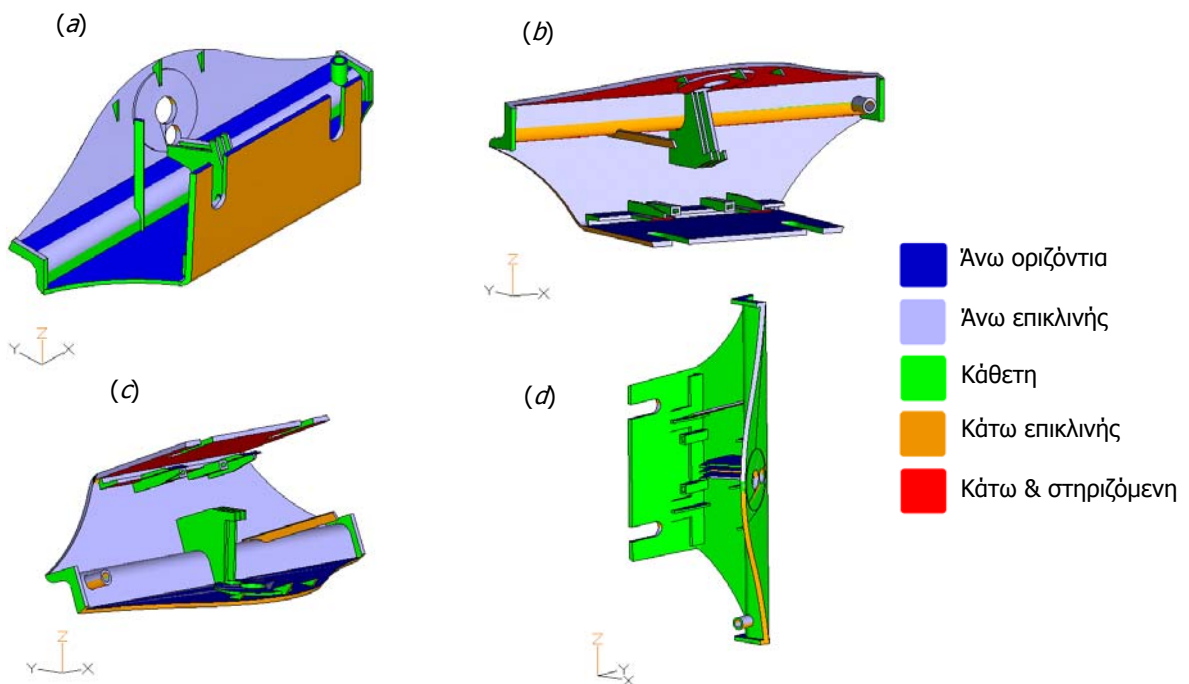
8.4 Αντικείμενο «Γ»

Το αντικείμενο «Γ» (Σχήμα 8.9) είναι ένα πλαστικό εξάρτημα ηλεκτρικής συσκευής που κατασκευάστηκε στα πλαίσια συνεργασίας με ελληνική βιομηχανία χύτευσης πλαστικών ως μοντέλο σχεδιασμού. Το αντικείμενο «Γ» τόσο από πλευράς μορφολογίας όσο και γεωμετρίας, αποτελεί χαρακτηριστικό προϊόν της Στερεολιθογραφίας, και συνεπώς αποτελεί κατάλληλο μοντέλο ελέγχου της σταθερότητας και της λειτουργικότητας του συστήματος.



Σχήμα 8.9. Ισομετρική όψη του αντικειμένου «Γ».

Οι προτεινόμενοι προσανατολισμοί κατασκευής που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.10, προκύπτουν τοποθετώντας με τη σειρά τις μεγαλύτερες επίπεδες επιφάνειες του αντικειμένου ως βάση (προσανατολισμοί a, b και c) και τις μεγαλύτερες κυλινδρικές επιφάνειες κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο, με τον άξονά τους δηλαδή παράλληλα στον άξονα κατασκευής (προσανατολισμός d). Οι τρεις πρώτοι προσανατολισμοί θεωρητικά δεν θα έχουν σημαντικές διαφορές ακρίβειας και κόστους, διαφοροποιείται ωστόσο σημαντικά η ακρίβεια απόδοσης των επιμέρους επιφανειών και μορφολογικών χαρακτηριστικών (Σχήμα 8.10). Αντίθετα ο προσανατολισμός d αναμένεται να έχει σημαντικά υψηλότερο κόστος καθώς αυξάνεται ο αριθμός των στρωμάτων, αλλά και σημαντικά χαμηλότερη μέση τραχύτητα και ποσοστό ογκομετρικού λάθους σε σχέση με τους άλλους προσανατολισμούς, λόγω της μικρότερης έκτασης του φαινομένου κλίμακας.



Σχήμα 8.10. VRML μοντέλα φαινομένου κλίμακας προσανατολισμών κατασκευής αντικ. «Γ».

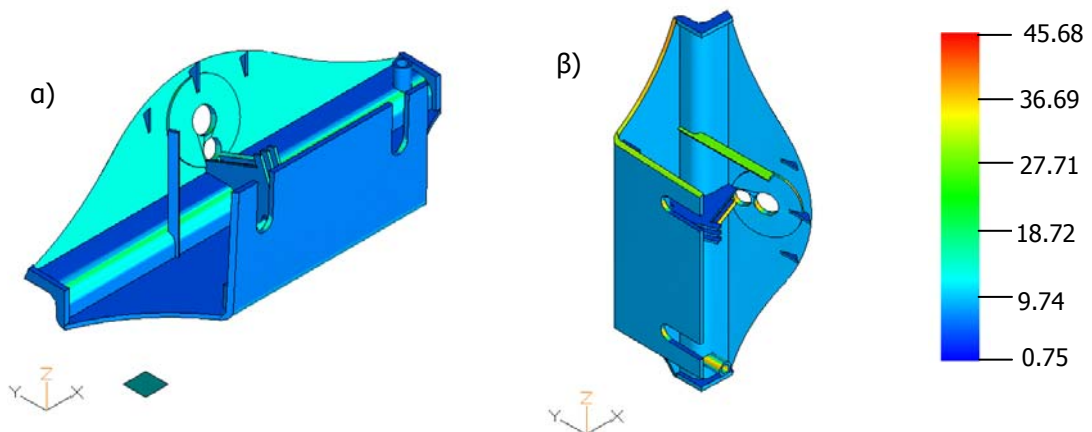
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δώδεκα πιθανών λύσεων και η κατάταξή τους σύμφωνα με

τα πιθανά κατασκευαστικά σενάρια παρουσιάζεται στον πίνακα 8.4. Παρατηρούμε ότι εάν βασικό ζητούμενο είναι η ταχεία και φθηνή κατασκευή του μοντέλου οι διαφορές μεταξύ των πρώτων τεσσάρων καλύτερων λύσεων είναι πρακτικά μικρές, με τον προσανατολισμό a να υπερέχει ελαφρώς. Αυτό οφείλεται στο ότι οι προσανατολισμοί a , b και c έχουν περίπου το ίδιο ύψος, άρα και τον ίδιο αριθμό στρωμάτων για δεδομένο πάχος στρώματος. Όσο όμως αρχίζει να αυξάνεται η βαρύτητα των μεγεθών που σχετίζονται με την ακρίβεια οι επιλογές περιορίζονται μεταξύ των προσανατολισμών a και d .

Πίνακας 8.4. Κατάταξη λύσεων κατασκευής αντικειμένου «Γ» για διαφορετικά σενάρια.

1-0-0		0.8-0.1-0.1		0.6-0.2-0.2		0.4-0.3-0.3		0.2-0.4-0.4		0-1-0		0-0-1	
$a-0.20$	0.000	$a-0.20$	0.111	$a-0.15$	0.185	$a-0.10$	0.198	$d-0.20$	0.195	$d-0.10$	0.000	$d-0.10$	0.000
$c-0.20$	0.049	$a-0.15$	0.120	$a-0.10$	0.190	$d-0.20$	0.249	$d-0.10$	0.200	$d-0.15$	0.051	$a-0.10$	0.130
$b-0.20$	0.055	$a-0.10$	0.182	$a-0.20$	0.223	$a-0.15$	0.250	$d-0.15$	0.201	$d-0.20$	0.103	$d-0.15$	0.147
$a-0.15$	0.055	$b-0.20$	0.187	$b-0.15$	0.268	$b-0.10$	0.300	$a-0.10$	0.207	$a-0.10$	0.300	$d-0.20$	0.177
$c-0.15$	0.121	$b-0.15$	0.199	$b-0.10$	0.295	$d-0.15$	0.302	$b-0.10$	0.305	$b-0.10$	0.410	$b-0.10$	0.211
$b-0.15$	0.129	$c-0.15$	0.225	$d-0.20$	0.304	$a-0.20$	0.334	$a-0.15$	0.315	$a-0.15$	0.470	$a-0.15$	0.290
$a-0.10$	0.174	$c-0.20$	0.239	$b-0.20$	0.319	$b-0.15$	0.338	$c-0.10$	0.400	$c-0.10$	0.502	$b-0.15$	0.333
$c-0.10$	0.272	$b-0.10$	0.290	$c-0.15$	0.330	$c-0.10$	0.368	$b-0.15$	0.408	$b-0.15$	0.622	$c-0.10$	0.360
$b-0.10$	0.285	$c-0.10$	0.304	$c-0.10$	0.336	$d-0.10$	0.400	$a-0.20$	0.446	$a-0.20$	0.640	$a-0.20$	0.475
$d-0.20$	0.414	$d-0.20$	0.359	$d-0.15$	0.404	$c-0.15$	0.434	$c-0.15$	0.538	$c-0.15$	0.751	$c-0.15$	0.534
$d-0.15$	0.607	$d-0.15$	0.505	$c-0.20$	0.429	$b-0.20$	0.451	$b-0.20$	0.584	$b-0.20$	0.835	$b-0.20$	0.597
$d-0.10$	1.000	$d-0.10$	0.800	$d-0.10$	0.600	$c-0.20$	0.620	$c-0.20$	0.810	$c-0.20$	1.000	$c-0.20$	1.000

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός ότι εάν αποκλειστική προτεραιότητα δοθεί στην ελαχιστοποίηση της τραχύτητας την δεύτερη καλύτερη λύση αποτελεί η $a-0.10$ και όχι κάποια λύση με βάση τον προσανατολισμό d όπως ίσως διαισθητικά αναμενόταν. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και οπτικά εάν εξετασθούν τα μοντέλα τραχύτητας των δύο λύσεων τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 8.11. Συνεπώς ο προσανατολισμός a είναι αυτός που οδηγεί σε έναν καλό συμβιβασμό ποιότητας και κόστους, ενώ η επιλογή του πάχους στρώματος μπορεί να διαφοροποιηθεί ανάλογα με την σχετική βαρύτητα κάθε κριτηρίου.



Σχήμα 8.11. VRML μοντέλα τραχύτητας αντικειμένου «Γ», για λύσεις α) $a-0.10$ και β) $d-0.10$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Σύνοψη και Μελλοντική Έρευνα

9.1 Σύνοψη εργασίας

Η Στερεολιθογραφία αποτελεί το πρώτο και πλέον γνωστό μέλος της ομάδας των τεχνικών Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων (τΤΚΠ), οι οποίες αποτελούν μία σχετικά νέα ομάδα μεθόδων κατασκευής προϊόντων από διαδοχικά στρώματα υλικού. Ως πρώτη ύλη στην περίπτωση της Στερεολιθογραφίας χρησιμοποιείται υγρή ρητίνη η οποία πολυμερίζεται μέσω ελεγχόμενης έκθεσης σε ακτινοβολία laser. Η κατασκευή ενός αντικειμένου εκτελείται αυτόματα από το σύστημα Στερεολιθογραφίας με βάση το αντίστοιχο τριδιάστατο μοντέλο και κατασκευαστικές παραμέτρους που ορίζονται από τον χειριστή του συστήματος. Βασικό στόχο του χειριστή κατά την επιλογή των παραμέτρων αποτελεί η καλύτερη δυνατή ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας και κόστους, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με την αναμενόμενη χρήση του τελικού προϊόντος (π.χ. πρωτότυπο σχεδιασμού, πρότυπο χύτευσης, εργαλείο παραγωγής μικρών παρτίδων κλπ.). Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων συγκεκριμένων επιλογών στο κόστος και την ποιότητα κατασκευής στηρίζεται συνήθως στην εμπειρία του χειριστή και σε ελάχιστες περιπτώσεις σε ποσοτικά δεδομένα ή κάποια άλλη μέθοδο ανάλυσης.

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός συστήματος υποβοήθησης του χειριστή μηχανής Στερεολιθογραφίας κατά την φάση της επιλογής των κατασκευαστικών παραμέτρων. Σκοπός του συστήματος αυτού είναι η αξιολόγηση των διαφορών εναλλακτικών επιλογών βάσει αντικειμενικών/ποσοτικών δεδομένων που αφορούν την αναμενόμενη κατασκευαστική ποιότητα και κόστος του τελικού προϊόντος. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η επιλογή των αντικειμενικά βέλτιστων παραμέτρων για ένα δεδομένο προϊόν ακόμα και από χειριστές με ελάχιστη εμπειρία.

Το κύριο μέρος της διατριβής συνιστά ο προσδιορισμός των σχέσεων που συνδέουν τις βασικές

κατασκευαστικές παραμέτρους με τα κριτήρια λήψης της απόφασης, την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο κατασκευής. Η μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας οδήγησε στην αναγνώριση δύο βασικών κατασκευαστικών παραμέτρων, α) του προσανατολισμού του αντικειμένου στον χώρο της μηχανής και β) του πάχους στρώματος. Ως βασικά κριτήρια επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων για την επιλέχθηκαν ο χρόνος κατασκευής, η τραχύτητα των επιφανειών και η ακρίβεια κατασκευής. Οι σχέσεις μεταξύ των κατασκευαστικών παραμέτρων και των κριτηρίων λήψης της απόφασης εξήχθησαν βάσει πειραματικών δεδομένων και θεωρητικής ανάλυσης.

Αρχικά εξετάστηκε το πρόβλημα της πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής ενός αντικειμένου για δεδομένο προσανατολισμό κατασκευής και πάχος στρώματος. Ο προσδιορισμός αυτών των σχέσεων είναι ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πρόβλημα καθώς η ακριβής εκτίμηση του χρόνου κατασκευής απαιτείται και για τον σωστό προγραμματισμό εργασιών της μηχανής Στερεολιθογραφίας και την μείωση των άεργων χρόνων. Επισημαίνεται επίσης ότι το κόστος κατασκευής εξαρτάται κυρίως από τον χρόνο κατασκευής και ειδικότερα από τον απαιτούμενο χρόνο λειτουργίας της μηχανής και συνεπώς τα δύο αυτά κριτήρια συνδέονται στενά.

Ο χρόνος λειτουργίας της μηχανής είναι ουσιαστικά το άθροισμα των χρόνων που απαιτούνται για την δημιουργία κάθε επιμέρους στρώματος. Ο χρόνος κατασκευής ενός στρώματος μπορεί με τη σειρά του να αναλυθεί στον χρόνο σάρωσης και τον χρόνο επικάλυψης, ο οποίος είναι σταθερός για κάθε στρώμα και προσδιορίζεται εύκολα. Αντίθετα ο χρόνος σάρωσης εξαρτάται από την γεωμετρία της αντίστοιχης τομής και την ταχύτητα σάρωσης η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την επιλεγθείσα τιμή του πάχους στρώματος. Για τον προσδιορισμό των σχέσεων πρόβλεψης του χρόνου σάρωσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του χρόνου σάρωσης τομών διαφορετικής γεωμετρίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι ο χρόνος σάρωσης ενός στρώματος/τομής εξαρτάται από το συνολικό μήκος σάρωσης (την απόσταση που διατρέχει η ακτίνα κατά την σάρωση), την ταχύτητα σάρωσης και τον αριθμό των διανυσμάτων σάρωσης. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναπτύχθηκε ένα εργαλείο πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής, το οποίο επεξεργάζεται το αρχείο τομών ενός αντικειμένου σε μορφή CLI. Η ακρίβεια του εργαλείου CLI ελέγχθηκε στην κατασκευή πραγματικών αντικειμένων με πολύ καλά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι ακριβής πρόβλεψη του χρόνου κατασκευής ενός αντικειμένου από την μηχανή Στερεολιθογραφίας είναι δυνατή εάν είναι διαθέσιμη η περιγραφή της γεωμετρίας κάθε τομής. Καθώς στην φάση της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων τα δεδομένα αυτά δεν είναι διαθέσιμα εξετάστηκε εάν είναι δυνατή η εκτίμηση του χρόνου κατασκευής με βάση την STL γεωμετρική περιγραφή του αντικειμένου. Ο έλεγχος αυτός έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της εκτίμησης του χρόνου κατασκευής του εργαλείου CLI με τα αντίστοιχα ενός εργαλείου STL και έδειξε ότι η ακρίβεια του δεύτερου αν και μικρότερη από του πρώτου είναι ικανοποιητική για την φάση της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων.

Η ποιότητα κατασκευής ενός μοντέλου Στερεολιθογραφίας έχει διάφορες διαστάσεις όπως η διαστασιολογική ακρίβεια, η τραχύτητα των επιφανειών και οι μηχανικές/θερμικές/χημικές ιδιότητες του μοντέλου. Η έρευνα της διεθνούς βιβλιογραφίας έδειξε ότι οι μηχανικές/θερμικές/χημικές εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης ρητίνης και είναι συνεπώς ανεξάρτητες των κατασκευαστικών παραμέτρων. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης εξετάστηκαν οι δύο πρώτες διαστάσεις που σχετίζονται με την ακρίβεια απόδοσης της γεωμετρίας του 3D μοντέλο-πρότυπου.

Η τραχύτητα των επιφανειών του «ακατέργαστου» μοντέλου Στερεολιθογραφίας, όπως δηλαδή εξάγεται από την μηχανή και χωρίς να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, εξαρτάται από την ένταση και τον βαθμό εμφάνισης του φαινομένου κλίμακας και τον βαθμό επαφής με το πλέγμα στήριξης. Η εμφάνιση/ένταση του φαινομένου κλίμακας σε μία δεδομένη επιφάνεια είναι συνάρτηση του πάχους στρώματος και του προσανατολισμού της, ανάλογα με τον οποίο καθορίζονται και οι στηριζόμενες επιφάνειες. Με βάση την υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία καθορίστηκε ένα αρχικό θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης της τραχύτητας μίας επιφάνειας ανάλογα με τον προσανατολισμό/κλίση της και το πάχος στρώματος, το οποίο εστιάζεται στον παράγοντα του φαινομένου κλίμακας. Με στόχο τον έλεγχο και την πιθανή προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου κατασκευάστηκαν και μετρήθηκαν τρία δοκίμια, ένα για κάθε τιμή του πάχους στρώματος.

Η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων και του θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης της τραχύτητας κατέδειξε ότι η μετρούμενη τραχύτητα ήταν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μικρότερη της θεωρητικής, με εξαίρεση τις επιφάνειες με κλίση 100° και εκείνες με κλίση 160° - 180° (στηριζόμενες επιφάνειες). Η παρατηρούμενη εξομάλυνση της τραχύτητας είναι εντονότερη στο διάστημα 100° - 150° πιθανότατα λόγω του φαινομένου έμμεσου πολυμερισμού (print-through). Αντίθετα η αυξημένη σχετικά τραχύτητα των επιφανειών με κλίση 160° - 180° θεωρείται ότι συνδέεται άμεσα με την παρουσία των υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα προσδιορίστηκαν τρεις νέες σχέσεις πρόβλεψης της τραχύτητας μίας επίπεδης επιφάνειας συναρτήσει της κλίσης της και του πάχους στρώματος.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία η ακρίβεια στην απόδοση μίας διάστασης του μοντέλου Στερεολιθογραφίας εξαρτάται από τον προσανατολισμό της στον χώρο της μηχανής. Η μέγιστη ακρίβεια παρατηρείται όταν η διάσταση ανήκει σε οριζόντιο επίπεδο, σε επίπεδο δηλαδή παράλληλο με αυτά των διαφόρων στρωμάτων. Αντίθετα εάν η διάσταση είναι παράλληλη με τον άξονα κατασκευής η παρατηρούμενη ακρίβεια είναι αρκετά χαμηλότερη και έτσι συνιστάται συνήθως στους χειριστές της μηχανής να επιλέγουν προσανατολισμό κατασκευής στον οποίο κρίσιμες διαστάσεις είναι σε οριζόντιο επίπεδο. Με στόχο να επιβεβαιωθεί η παραπάνω υπόθεση αλλά και να προσδιορισθεί η αναμενόμενη ακρίβεια ανάλογα με τον προσανατολισμό μίας διάστασης, μετρήθηκαν οι διαστάσεις ενός επιπλέον δοκιμίου, του δοκιμίου ακριβείας για την μελέτη των οριζόντιων διαστάσεων, και των ήδη κατασκευασμένων δοκιμίων τραχύτητας για την μελέτη μη οριζόντιων διαστάσεων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δοκιμίου ακριβείας έδειξαν ότι η ακρίβεια στην απόδοση οριζόντιων διαστάσεων είναι σε επίπεδα ανάλογα με αυτά που αναφέρονται σε αντίστοιχες μελέτες. Υψηλότερες σε σύγκριση με τις αναμενόμενες αποκλίσεις εμφανίστηκαν σε σχετικά μεγάλες διαστάσεις παράλληλες στον Y άξονα της μηχανής και σε διαστάσεις με κλίση 135° από τον άξονα X της μηχανής. Καθώς οι αποκλίσεις αυτές δείχνουν να είναι ανάλογες του μήκους της μετρούμενης διάστασης πιθανολογείται ότι σχετίζονται με την γραμμική συρρίκνωση και την επιλεχθείσα τιμή για την αντίστοιχη αντιστάθμιση. Συνεπώς χρήση μικρότερης τιμής για την αντιστάθμιση συρρίκνωσης σε σάρωση κατά Y , πιθανότατα θα περιορίσει σημαντικά τις αντίστοιχες αποκλίσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δοκιμών τραχύτητας έδειξαν ότι οι αποκλίσεις μεταξύ της ονομαστικής και της μετρούμενης διάστασης μειώνονται όσο ο προσανατολισμός της προσεγγίζει το οριζόντιο επίπεδο, παρατήρηση που επιβεβαιώνει την αρχική υπόθεση.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και την θεωρητική ανάλυση αναπτύχθηκε το ΣΥΕΚΑΠ (Σύστημα Υποβοήθησης Επιλογής Κατασκευαστικών Παραμέτρων) το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χειριστή της μηχανής Στερεολιθογραφίας να εκτιμήσει το κόστος, τον χρόνο και την ποιότητας κατασκευής ενός μοντέλου Στερεολιθογραφίας ανάλογα με τον επιλεχθέντα προσανατολισμό και πάχος στρώματος. Για την αξιολόγηση δεδομένων επιλογών και τον έλεγχο πιθανών κατασκευαστικών περιορισμών και απαιτήσεων εκτιμώνται τα εξής βασικά μεγέθη:

- Χρόνος κατασκευής
- Μέση τραχύτητα επιφανειών
- Ογκομετρικό λάθος
- Κόστος κατασκευής
- Εμβαδά στηριζόμενων επιφανειών

Το ΣΥΕΚΑΠ παρέχει την δυνατότητα στον χειριστή να αξιολογήσει τις πιθανές λύσεις, τα ζευγάρια προσανατολισμού και πάχους στρώματος, τόσο ως προς κάθε κριτήριο ξεχωριστά όσο και συνολικότερα με την μέθοδο της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης. Το μοντέλο της αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται λαμβάνει υπόψη την επίδοση κάθε λύσης με κριτήρια τον χρόνο κατασκευής, την μέση τραχύτητα επιφανειών και το ογκομετρικό λάθος. Σε κάθε κριτήριο αποδίδεται από τον χειριστή ένας συντελεστής βαρύτητας ανάλογα με την σχετική του σημασία. Με την μέθοδο αυτή είναι δυνατή η επιλογή της λύσης που ικανοποιεί περισσότερα του ενός κριτήρια, όπως και απαιτείται συνήθως στην πράξη.

Πέρα από τα κατασκευαστικά ποσοτικά δεδομένα που αφορούν μία λύση το ΣΥΕΚΑΠ δίνει στον χειριστή την δυνατότητα να εξετάσει τα αποτελέσματα των επιλογών του στις επιφάνειες του μοντέλου μέσω δύο τριδιάστατων ψηφιακών μοντέλων VRML, του μοντέλου απεικόνισης του φαινομένου κλίμακας και του μοντέλου τραχύτητας. Στα μοντέλα αυτά αποδίδονται χρωματικά τα χαρακτηριστικά και η τραχύτητα κάθε επιφάνειας ανάλογα με το βαθμό εμφάνισης του φαινομένου κλίμακας και την αναμενόμενη παρουσία υπολειμμάτων στήριξης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να

γίνει ο εκ των προτέρων έλεγχος της τραχύτητας κρίσιμων επιφανειών του μοντέλου και η εκτίμηση της έκτασης και του βαθμού δυσκολίας των μεταπαρασκευαστικών εργασιών, ειδικά για πολύπλοκα γεωμετρικά μοντέλα.

9.2 Μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην μελέτη του προβλήματος της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων, ειδικότερα προσανατολισμού και πάχους στρώματος, για την κατασκευή ενός αντικειμένου με την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας. Η επιλογή κατασκευαστικών παραμέτρων είναι μία από τις προπαρασκευαστικές εργασίες, τις εργασίες δηλαδή που προηγούνται της κατασκευής του προϊόντος από την μηχανή της Στερεολιθογραφίας. Τόσο σε ό,τι αφορά το πρόβλημα της επιλογής παραμέτρων όσο και των προπαρασκευαστικών εργασιών γενικά υπάρχουν ζητήματα με ιδιαίτερο πρακτικό αλλά και ερευνητικό ενδιαφέρον.

Πιο συγκεκριμένα σε ό,τι αφορά το πρόβλημα της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη αλγορίθμων για την αναγνώριση μορφολογικών χαρακτηριστικών από την STL γεωμετρική περιγραφή ενός μοντέλου. Στην παρούσα εργασία προτάθηκε μία ομαδοποίηση των τριγώνων σε επιφάνειες με βάση την κάθετο τους έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του φαινομένου κλίμακας για κρίσιμες επιφάνειες. Περαιτέρω ομαδοποίηση και αναγνώριση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών εκτιμάται ότι θα βελτιώσει σημαντικά την διαδικασία αυτόματης εξεύρεσης των «καλών» πιθανών προσανατολισμών που βελτιστοποιούν την ακρίβεια κρίσιμων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Μία άλλη προσέγγιση στο πρόβλημα της αναγνώρισης γεωμετρικών χαρακτηριστικών αποτελεί η απ' ευθείας χρήση μοντέλων CAD αντί των αντίστοιχων STL. Στα σύγχρονα συστήματα CAD η σχεδίαση της γεωμετρίας ενός αντικειμένου γίνεται συχνά με την βοήθεια έτοιμων μορφολογικών ή γεωμετρικών χαρακτηριστικών και αποθηκεύεται η σχετική πληροφορία στο αντίστοιχο μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή ανακύπτει βέβαια το ζήτημα της ανάπτυξης αλγορίθμων τεμαχισμού των CAD αρχείων για την μεταφορά των γεωμετρικών δεδομένων προς τη μηχανή Στερεολιθογραφίας. Με αυτό τον τρόπο παραλείπεται και το στάδιο της μετάφρασης σε STL μειώνοντας πιθανότατα και τον χρόνο της συνολικής διαδικασίας.

Ιδιαίτερο πρακτικό και ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων για περισσότερα του ενός αντικείμενα. Στην περίπτωση αυτή υπεισέρχεται και το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης πολλών αντικειμένων στον χώρο της μηχανής. Η σωστή εκμετάλλευση του χώρου της μηχανής μειώνει σημαντικά τόσο το κόστος ανά κατασκευαζόμενο μοντέλο όσο και το συνολικό κόστος λειτουργίας. Σύμφωνα με την συνήθη πρακτική ο χειριστής αφού επιλέξει τον κατάλληλο προσανατολισμό και πάχος στρώματος για κάθε

αντικείμενο ομαδοποιεί τα αντικείμενα σύμφωνα με το πάχος στρώματος και τα τοποθετεί στον χώρο της μηχανής προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσει τα κενά διαστήματα μεταξύ των μοντέλων. Ενδιαφέρον λοιπόν θα παρουσίαζε τόσο η ανάπτυξη αλγόριθμων για την συνδυασμένη επίλυση των δύο προβλημάτων, της βέλτιστης τοποθέτησης και της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων, έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος των προπαρασκευαστικών εργασιών και να είναι δυνατή η περαιτέρω αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Στην παρούσα εργασία έχει γίνει η υπόθεση ότι ο τύπος της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιείται είναι σταθερός. Η υπόθεση αυτή στηρίζεται σε πρακτικούς λόγους καθώς η διαδικασία αλλαγής του τύπου της ρητίνης στα υπάρχοντα συστήματα είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, ενώ και μεταξύ των διάφορων τύπων ρητίνης δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές. Τόσο όμως τα συστήματα όσο και οι ρητίνες Στερεολιθογραφίας εξελίσσονται με αποτέλεσμα να απλοποιείται συνεχώς η διαδικασία αλλαγής αλλά και η ποικιλία των χρησιμοποιούμενων ρητινών. Ενδιαφέρον συνεπώς θα παρουσίαζε η μελέτη του προβλήματος της επιλογής υλικού ανάλογα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις καθώς διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο της ρητίνης, τόσο ο χρόνος και η ακρίβεια κατασκευής όσο και οι μηχανικές ιδιότητες του μοντέλου. Ειδικά στο θέμα της ακρίβειας ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη του φαινομένου στρέβλωσης λόγω συρρίκνωσης, που αν και έχει περιοριστεί σημαντικά με την εμφάνιση των εποξειδικών ρητινών, εξακολουθεί να εμφανίζεται, ειδικά σε ογκώδη αντικείμενα.

Βιβλιογραφία

1. M. Burns, *Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing*, Prentice Hall, 1993.
2. D. Kochan, *Solid Freeform Manufacturing: Advanced Rapid Prototyping*, Elsevier, Amsterdam, 1993.
3. P. Jacobs, *Stereolithography and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan, 1996.
4. C. Fain, K. Chua, C. Kai and L. Kah, *Rapid Prototyping: Principles & Applications in Manufacturing*, Chua, John Wiley & Sons Pub, 1997.
5. Ε. Καλαθάς, Ι. Γιαννατσής, Β. Δεδούσης, Μ. Γιαννακούρου και Ν. Μπλέσιος, Υπάρχουσες τεχνολογίες Ταχείας Ανάπτυξης Πρωτοτύπων (ΤΑΠ) και συστήματα CAD, Τεχνική Έκθεση 1.2, ΕΠΕΤ ΙΙ – ΝΕΚΤΑΡ 672, Πειραιάς, Ιούνιος 1996.
6. X. Yan and P. Gu, A review of Rapid Prototyping Technologies and Systems, *Computer-Aided Design*, 28 (4), pp. 307-318, 1996.
7. M. Shellabear, *Model Manufacturing Processes – State of the art in Rapid Prototyping*, Raptec Report, Task 4.2-Report 1, Brite-Euram Project BE-2051, February 1998.
8. C.-K. Chua, S.-M. Chou and T.-S. Wong, A Study of the state-of-the-art Rapid Prototyping Technologies, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, pp. 146-152, Springer Verlag, 1998.
9. Ν. Τσουλάκος και Ι. Γιαννατσής, *Τεχνολογίες Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων, Μετάδοση Ισχύος*, Αθήνα, Μάιος 2000.
10. Μ. Γιαννακούρου, Β. Δεδούσης, Ε. Καλαθάς, Ι. Γιαννατσής και Ν. Μπλέσιος, Οργανωτικές απαιτήσεις της εφαρμογής Τεχνολογιών Ταχείας Ανάπτυξης Πρωτοτύπων στις Ελληνικές επιχειρήσεις – Προδιαγραφές προϊόντων, Τεχνική Έκθεση 1.1, ΕΠΕΤ ΙΙ – ΝΕΚΤΑΡ 672, σελ.7-8, Πειραιάς, Ιούνιος 1996.
11. I. Halliday, Getting the business benefits from Rapid Prototyping, *Proceedings of the International Conference on Rapid Product Development*, Stuttgart, Germany, July 1995.
12. T. Wohlers, *Wohlers Report 2001: Rapid Prototyping State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Assoc. Inc., Oak Ridge - Colorado, 2001.
13. K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product Design and Development (International Edition)*, McGraw-Hill, pp. 275, 2000.
14. V. Dedoussis, D. Karalekas, J. Giannatsis and C. Valsamidis, Redesign and Optimization of product variants with Stereolithography – The case of a small dishwasher water injection system, *Proceedings of the U-Rapid 2001 Conference*, Amsterdam, 2001.
15. V. Dedoussis, D. Karalekas, J. Giannatsis, N. Mantzouratos and K. Sinogiannis, Investigation of the mechanical behaviour of cylindrical “bottle-like” shapes under crushing loading using

- Stereolithography Models, Proceedings of the 9th European Rapid Prototyping Conference, Athens, July 2000.
16. H. W. Wai, RP in art and conceptual design, *Rapid Prototyping Journal*, 7 (4), pp. 217-219, 2001.
 17. Ε. Καλαθάς, Ι. Γιαννατσής, Β. Δεδούσης και Λ. Λάιος, Η εφαρμογή της Στερεολιθογραφίας στην Ανάπτυξη Προϊόντων, Α' Συνέδριο Βιομηχανικού Σχεδιασμού, ΤΕΙ Κοζάνης, σελ. 115-120, 1997.
 18. S. M. Lopez and P. K. Wright, The role of Rapid Prototyping in the product development process: A case study on the ergonomics factors of handheld video games, *Rapid Prototyping Journal*, 8 (2), pp. 116-125, 2002.
 19. S. N. Polydoros, M. Sfantsikopoulos, J. Giannatsis and V. Dedoussis, Rapid Prototyping: Industrial case studies in Greece, Proceedings of the 1st ICMEN (International Conference on Manufacturing Engineering), Cassandra, Greece, October 2002.
 20. L. Bucciarelli, Between Thought and Object in Engineering Design, *Design Studies*, 23, pp. 219-231, 2002.
 21. S. G. Preston and D. G. Reinertsen, *Developing products in half the Time: new Rules, new tools*, John Wiley and Sons, New York – USA, 1998.
 22. H.-J. Bullinger, J. Warschat and D. Fischer, Rapid Product Development – An Overview, *Computers in Industry*, 42, pp. 99-108, 2000.
 23. P. N. Suh, *The principles of Design*, Oxford University Press, pp. 41, 1990.
 24. P. G. Smith, The business of Rapid Prototyping, *Rapid Prototyping Journal*, 5 (4), MCB Univ. Press, pp. 179-185, 1999.
 25. Ι. Γιαννατσής, Οργανωτικά θέματα εισαγωγής τεχνολογιών Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων - Επιπτώσεις στη διαδικασία Σχεδιασμού νέων προϊόντων, Τεχνική Έκθεση 3.3, ΕΠΕΤ ΙΙ - ΝΕΚΤΑΡ 672, Φεβρουάριος 1999.
 26. E. Radstok, Rapid Tooling, *Rapid Prototyping Journal*, 5 (4), pp. 164-168, 1999.
 27. H. Durr, R. Pilz and N. S. Eleser, Rapid Tooling of EDM electrodes by means of selective laser sintering, *Computers in Industry*, 39, pp. 35-45, 1999.
 28. S. N. Polydoros, M. Sfantsikopoulos and G. Papacharalambous, Applying LOM and silicone rubber tooling for recycled paper pulp molded packaging products, Proceedings of the 9th European Rapid Prototyping Conference, Athens, July 2000.
 29. A. Rosochowski and A. Matuszak, Rapid Tooling: the state of the art, *Journal of Materials Processing Technology*, 106, Elsevier, pp. 191-198, 2000.
 30. T. J. Weaver, J. A. Thomas, S. A. Atre and R. M. German, Time-Compression rapid steel tooling for an ever-changing world, *Materials and Design*, 21, pp. 409-415, 2000.
 31. N. Hopkinson and P. Dickens, Rapid Prototyping for direct manufacture, *Rapid Prototyping Journal*, 7 (4), pp. 197-202, 2001.
 32. O. S. Onuh, Rapid Prototyping integrated systems, *Rapid Prototyping Journal*, 7 (4), pp. 220-223, 2001.

33. <http://www.invisalign.com>
34. P. Peters, F. Langlotz and L.-P. Nolte, Computer assisted screw insertion into real 3D rapid prototyping pelvis models, *Clinical Biomechanics*, 17, pp. 376-382, 2002.
35. B. Wiedemann and H.-A. Jantzen, Strategies and applications for rapid product and process development in Daimler-Benz AG, *Computers in Industry*, 39, pp. 11-25, 1999.
36. Bertsch, P. Bernard, C. Vogt and P. Renaud, Rapid Prototyping of small size objects, *Rapid Prototyping Journal*, 6 (4), pp. 259-266, 2000.
37. J. Giannatsis, D. Karalekas, V. Dedoussis and L. Laios, Rapid Prototyping implementation in the architectural design of large civil structures - the case study of an athletics stadium, *Proceedings of the 9th European Rapid Prototyping Conference*, Athens, July 2000.
38. J. Giannatsis, V. Dedoussis and D. Karalekas, Architectural Scale modeling using Stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, 8 (3), pp. 200-207, 2002.
39. G. Ryder, B. Ion, G. Green, D. Harrison and B. Wood, Rapid Design and Manufacture tools in architecture, *Automation in Construction*, 11, pp. 279-290, 2002.
40. H. M. Klein, W. Schneider, G. Alzen and E. D. Voy, Pediatric craniofacial surgery: comparison of milling and stereolithography for 3D model manufacturing, *Pediatric Radiology*, 22 (6), pp. 458-60, 1992.
41. S. P. D'Urso, R. G. Thompson and W. J. Earwaker, Stereolithographic (SL) biomodelling in paleontology: a technical note, *Rapid Prototyping Journal*, 6 (3), pp. 212-215, 2000.
42. M. Rees, Rapid prototyping and art, *Rapid Prototyping Journal*, 5 (4), pp. 154-160, 1999.
43. M. J. Bailey, Tele-Manufacturing: Rapid Prototyping on the Internet, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15 (6), pp. 20-26, 1995.
44. E. Καλαθάς, Ι. Γιαννατσής και Β. Δεδούσης, Εμπειρίες από τη Χρήση Εξελιγμένων Συστημάτων CAD για την Ανάπτυξη (Σχεδίαση) Προϊόντων, Πρακτικά Συνεδρίου «Τεχνολογία και Αυτοματισμός», ΤΕΙ Πειραιά, 1996.
45. A. Dolenc, Software tools for Rapid Prototyping technologies in manufacturing, PhD Thesis, Institute of Industrial Automation, Helsinki Univ. of Technology, Finland, 1993.
46. A. Dolenc and I. Mäkelä, Rapid Prototyping from a Computer Scientist's Point of View, *Rapid Prototyping Journal*, 2 (2), pp. 18-25, 1995.
47. R. Peiffer, Stereolithography Accuracy: Influence of photosensitive materials, *Proceedings of the 1st European Conference on Rapid Prototyping*, Nottingham-UK, July 1992.
48. J. Colton and B. Blair, Experimental study of post-build cure of Stereolithography polymers for injection molds, *Rapid Prototyping Journal*, 5 (2), pp. 72-81, 1999.
49. Γιαννατσής Ι., Ε. Καλαθάς, Β. Δεδούσης και Λ. Λάιος, Στερεολιθογραφία: Δυνατότητες και Τεχνικά Χαρακτηριστικά, Πρακτικά Α' Συνεδρίου Βιομηχανικού Σχεδιασμού, ΤΕΙ Κοζάνης, σελ. 127-129, 1997.
50. S. H. Masood, Intelligent Rapid Prototyping with Fused Deposition Modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 2 (1), pp. 24-33, 1996.
51. D. Karalekas and D. Rapti, Investigation of the processing dependence of SL solidification

- residual stresses, *Rapid Prototyping Journal*, 8 (4), pp. 243-247, 2002.
52. W. Cheng, J. Y. H. Fuh, A. Y. C. Nee, Y. S. Wong, H. T. Loh and T. Miyazawa, Multi-objective optimization of part building orientation in Stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, 1 (4), pp. 12-23, 1995.
 53. R. Jamieson and H. Hacker, Direct slicing of CAD Models for Rapid Prototyping, *Rapid Prototyping Journal*, 1 (2), pp. 4-12, 1995.
 54. D. L. Winmill, D. M. Hoopes and S. S. Jayanthi, Dimensional Issues in Stereolithography, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium 1994*, H. L. Marcus et al. (eds.), University of Texas, Austin-USA, pp. 303-310, August 1994.
 55. B. Yew, C. C. Kai and D. Zhaohui, Study of trapped material in rapid prototyping parts, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, pp. 120-130, 2000.
 56. B. Yew, C. C. Kai and D. Zhaohui, Development of an advisory system for trapped material in Rapid Prototyping parts, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, pp. 733-738, 2000.
 57. D. A. Schaub, K.-R. Chou and D. C. Montgomery, Optimizing Stereolithography Throughput, *Journal of Manufacturing Systems*, 16 (4), pp. 290-303, 1997.
 58. H. Nguyen, J. Richter and P. F. Jacobs, On Windowpane and Christmas tree: Diagnostic techniques for improved part accuracy, *Proceedings of the 1st European Conf. on Rapid Prototyping*, Nottingham–UK, July 1992.
 59. P. F. Jacobs, Fundamentals of Stereolithography, *Proceedings of the 1st European Conf. on Rapid Prototyping*, Nottingham–UK, July 1992.
 60. S. O. Onuh and K. K. B. Hon, Optimising build parameters and hatch style for part accuracy in Stereolithography, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium-1991*, H. L. Marcus et al. (eds.), University of Texas, Austin-USA, pp. 653-660, August 1991.
 61. J. G. Zhou, D. Hersovici and C. C. Chen, Parametric process optimization to improve the accuracy of Rapid Prototyped Stereolithography parts, *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, pp. 363-379, 2000.
 62. M. C. Chea, C. Y. A. Nee, H. Y. J. Fuh, L. Lu, S. Y. Choo and T. Miyazawa, Characteristics of photopolymeric material used in Rapid Prototypes - Part I: Mechanical properties in the green state, *Journal of Materials Processing Technology*, 67, pp. 41-45, 2000.
 63. P. Jacobs, *Stereolithography and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan, pp. 47, 1996.
 64. S. Allen and D. Dutta, Determination and evaluation of support structures in layered manufacturing, *Journal of Design and Manufacturing*, 5, pp. 153-162, 1995.
 65. M. Bablani, and A. Bagchi, Quantification of errors in Rapid Prototyping processes and determination of preferred orientation of parts, *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution*, XXIII, SME, Houghton-USA, pp. 319-324, May 1995.
 66. S. H. Masood and W. Rattawong, A generic part orientation system based on volumetric error in Rapid Prototyping, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, pp.209-216,

2002.

67. J. Majhi, R. Janardan, M. Smid and P. Gupta, On some geometric optimization problems in Layered Manufacturing, *Computational Geometry*, 12, pp. 219-239, 1999.
68. P.-T. Lang, S.-H. Chao, L.-L. Chen and D. Gemmil, Determining fabrication orientations for Rapid Prototyping with Stereolithography apparatus, *Computer-Aided Design*, 29 (1), pp. 53-62, 1997.
69. D. C. Thompson, and R. H. Crawford, Optimizing part quality with orientation, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium-1995*, H. L. Marcus et al. (eds.), University of Texas, Austin-USA, August 1995.
70. P. Kulkarni, and D. Dutta, An accurate slicing procedure of Layered Manufacturing, *Computer-Aided Design*, 28 (9), pp. 683-697, 1996.
71. J. Hur and K. Lee, Determination of optimal part orientation for stereolithographic Rapid Prototyping, Technical Report, Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul National University, Korea, 1995.
72. F. Xu, S. Y. Wong, T. H. Loh, H. Y. J. Fuh and T. Miyazawa, Optimal orientation with variable slicing in Stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, 3 (3), pp. 76-88, 1997.
73. F. Xu, T. H. Loh and Y. S. Wong, Considerations and selection of optimal orientation for different Rapid Prototyping systems, *Rapid Prototyping Journal*, 5 (2), pp. 54-60, 1999.
74. D. Frank, and G. Fadel, Expert system-based selection of the preferred direction of build for Rapid Prototyping processes, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 6 (5), pp. 339-345, 1995.
75. S. H. Masood and B. S. Lim, Concurrent intelligent Rapid Prototyping environment, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 6 (5), pp. 291-310, 1995.
76. J. E. McClurkin and D. W. Rosen, Computer-aided build style decision support for Stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, 4 (1), pp. 4-13, 1998.
77. J. R. Wodziak, G. M. Fadel, and C. Kirschman, A genetic algorithm for optimizing multiple part placement to reduce build time, *Proceedings of the 5th International Conference on Rapid Prototyping*, R. P. Chartoff et al. (eds.), University of Dayton, Dayton-USA, pp. 201-210, June 1994.
78. Beascoechea, and M. J. Wozny, On three dimensional heuristic packing for Solid Freeform Fabrication, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium - 1995*, H. L. Marcus et al. (eds.), University of Texas, Austin-USA, pp. 326-333, August 1995.
79. J. Giannatsis, V. Dedoussis and L. Laios, Build-Time Estimation Tools for Rapid Prototyping Stereolithography Systems, *Advances in Manufacturing*, S. G. Tzafestas (ed.), Springer, pp. 373-384, 1999.
80. J. Giannatsis, V. Dedoussis and L. Laios, A study of the Build-Time Estimation Problem for Rapid Prototyping Stereolithography Systems, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 17, pp 295-304, 2001.
81. C. Chen and P. A. Sullivan, Predicting total build-time and the resultant cure depth of the 3D Stereolithography process, *Rapid Prototyping Journal*, 2(4), pp. 27-40, 1996.

82. E. J. McClurkin, D. W. Rosen, Build time estimation for Stereolithography, <http://rpm.marc.gatech.edu/BTE.html>, Georgia Institute of Technology, U.S.A., 1996.
83. K. Tata, D. Flynn, A procedure to estimate build time for Stereolithography Machine, Technical Report, Prototype Express, U.S.A., 1996.
84. J. Kehagias, V. Anagnostopoulos, S. Zervos and G. Chryssolouris, Estimation of build times in Rapid Prototyping processes, Proceedings of the 6th European Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing, Nottingham, U.K., pp. 137-148, 1997.
85. R. C. Cobb, D. J. Spencer and P. M. Dickens, Better surface finishing techniques for RPT is a must, Proc. Of the 2nd Scandinavian Rapid Prototyping Conference, Danish Technological Institute, Aarhus, Denmark, October 1993.
86. P. E. Reeves and R. C. Cobb, The finishing of Stereolithography models using resin based coatings, Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas, Austin, pp. 96-107, August 1995.
87. P. M. Dickens, Rapid finishing and tooling, internal report, Rapid Prototyping Research Group – University of Nottingham, January 1994.
88. P. E. Reeves and R. C. Cobb, Reducing the Surface Deviation of Stereolithography using In-process Techniques, Rapid Prototyping Journal, 3 (1), pp. 20-31, 1997.
89. G. Chryssolouris, J. D. Kechagias, J. L. Kotselis, D. A. Mourtzis and S. G. Zannis, Surface Roughness modeling of the Helisys laminated object manufacturing (LOM) process, Proc. Of the 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, University of Nottingham, UK, pp. 141-152, 1999.
90. I. R. Campbell, M. Martorelli and H. S. Lee, Surface Roughness Visualisation for Rapid Prototyping Models, Computer-Aided Design, 34, pp. 717-725, 2002.
91. P. Jacobs, Stereolithography and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan, pp 180, 1996.
92. Jacobs P., Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography, McGraw Hill Inc, pp. 306, 1992.
93. P. E. Reeves and R. C. Cobb, Surface Deviation modeling of LMT Processes- A comparative analysis, Proc. of 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Helsinki, June 1996.
94. B. Bedal and H. Nguyen, Chapter 5: Advances in part accuracy, in Stereolithography and other RP & M Technologies, ed. P. F. Jacobs, SME, pp. 149-181, 1996.
95. A. Carosi, D. Poggi, L. Iuliano and L. Settineri, Investigation on Stereolithography accuracy on both solid & quickcast parts, Proc. of 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Helsinki, June 1996.
96. L. Iuliano, R. Ippolito and A. De Filippi, A new user part for performances evaluation of Rapid Prototyping systems, Proc. of 3rd European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Nottingham, July 1994.
97. F. R. Aubin, A world wide assessment of Rapid Prototyping Technologies, UTRC Report No.

- 94-13 initiated by the intelligent Manufacturing IMS Test Case on Rapid Product Development, January 1994.
98. M. Shellabear, Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models, Raptec Report, Task 4.2, Report 2, Brite–Euram Project BE-2051, June 1999.
 99. S. N. Polydoras and M. M. Sfantsikopoulos, On the accuracy performance of the Laminated Object Manufacturing Technology, Proc. of Euro RP 2001 / 10th European Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing, Paris, June 2001.
 100. Y. S. Liao and Y. Y. Chiu, A new slicing procedure for Rapid Prototyping systems, Int. Journal of Advanced Manufacturing, 18, pp. 579-585, 2001.
 101. K. Tata, G. Fadel, A. Bagchi and N. Aziz, Efficient Slicing for Layered Manufacturing, Rapid Pototyping Journal, 4 (4), pp. 151-167, 1998.
 102. V. Kumar and D. Dutta, An assessment of data formats for Layered Manufacturing, Advances in Engineering Software, 28, pp. 151-164, 1997.
 103. A. D. Martin, Analysis and repair of STL files, MSc Thesis, California State University, May 1998.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Π1

Σύστημα Στερεολιθογραφίας EOS - Stereos Desktop S

Π1.1 Χαρακτηριστικά συστήματος EOS - Stereos Desktop S

Laser

- | | |
|--------------------|-------------------------------------|
| • Τύπος | Helium-Cadmium, UV Laser, αερόψυκτο |
| • Ονομαστική Ισχύς | 40 mW |
| • Μήκος κύματος | 325 nm |

Σύστημα Σάρωσης

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| • Μέθοδος σάρωσης | Μέσω περιστρεφόμενων κάτοπτρων |
| • Ταχύτητα | μέγιστη 2 m/s |
| • Ανάλυση | 0.01 mm |
| • Επαναλαμβανόμενη ακρίβεια | ± 0.05 mm |
| • Διάμετρος εστιασμένης ακτίνας | 0.15 - 0.18 mm |

Θάλαμος Κατασκευής

- | | |
|----------------------|---------------------------------|
| • Λειτουργικός Χώρος | 250 x 250 x 250 mm ³ |
|----------------------|---------------------------------|

Μονάδα Επικάλυψης

- | | |
|----------------------------|--------------|
| • Πεδίο κίνησης (X άξονας) | 0-305 mm |
| • Ταχύτητα | 10 - 40 mm/s |
| • Ελάχιστο Πάχος στρώματος | 0.05 mm |

Z άξονας

- | | |
|-----------------------------|---------------|
| • Πεδίο κίνησης | 0-250 mm |
| • Ταχύτητα | max. 10mm/s |
| • Ανάλυση | 0.01 mm |
| • Επαναλαμβανόμενη Ακρίβεια | ± 0.05 mm |
-



Π1.2 Φωτοπολυμεριζόμενη Ρητίνη DSM - Somos 7110

Χαρακτηριστικά Ρητίνης DSM - Somos 7110.

Τύπος	Εποξειδική Φωτοπολυμεριζόμενη
Εμφάνιση	Ημιδιαφανής
Ιξώδες	~700 cps στους 30°C
Πυκνότητα (d_p)	~1.13 g/cm ³ στους 25°C
E_c	8.2 mJ/cm ²
D_p	0.140 mm
E_5	20 mJ/cm ²
(απαιτούμενη έκθεση για στρώμα πάχους 0.127 mm)	
E_{10}	51 mJ/cm ²
(απαιτούμενη έκθεση για στρώμα πάχους 0.254 mm)	

Μηχανικές Ιδιότητες DSM - Somos 7110.

Διαδ/σία ελέγχου	Περιγραφή	Ανώριμο	UV Ωρίμανση	UV και Θερμική Ωρίμανση
D638M	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa) <i>Tensile Strength</i>	44	56	69
	Μέτρο ελαστικότητας (MPa) <i>Young's Modulus</i>	1,758	2,117	2,413
	Παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%) <i>Elongation at Break</i>	4.7-7.4	5.4-7.1	4.2-4.9
D790M	Αντοχή σε κάμψη (MPa) <i>Flexural Strength</i>	59	85	110
	Μέτρο κάμψης (MPa) <i>Flexural Modulus</i>	1,710	2,434	2,668
D2240	Σκληρότητα <i>Hardness (Shore D)</i>	81	82	85
D256A	Αντοχή σε κρουστικά φορτία (J/m) <i>Izod Impact (notched)</i>	26.2	27.8	34.2
D648	Θερμοκρασία Heat Deflection Temperature (°C)	45-54	59-72	77-89

Π1.3 Παράμετροι σάρωσης δοκιμίων

Σταθερές παράμετροι σάρωσης.

Διάστημα Σάρωσης (hs)	0.05 mm
Ισχύς Laser (P_L)	30 mW
Αντιστάθμιση εστίασης (περίγραμμα)	0.08 mm
Αντιστάθμιση εστίασης (εσωτερικό)	0.10 mm
Αντιστάθμιση συρρίκνωσης (X διεύθυνση)	0.8 %
Αντιστάθμιση συρρίκνωσης (Y διεύθυνση)	0.8 %

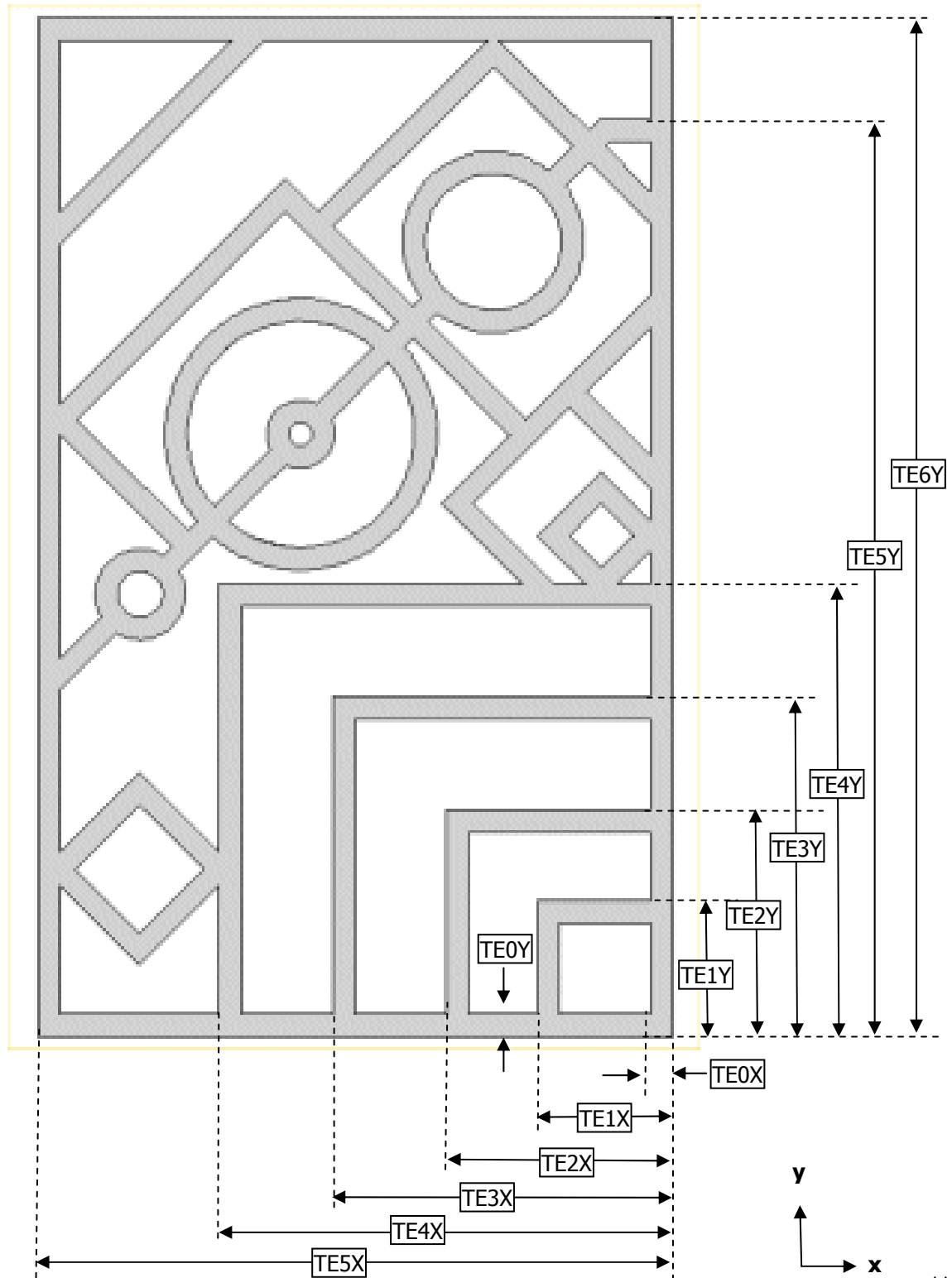
Μεταβλητές παράμετροι σάρωσης ανά πάχος στρώματος.

Πάχος Στρώματος (Lth)	Βάθος Στερεοποίησης (CD)	Ταχύτητα Σάρωσης εσωτερικού (Hv)	Ταχύτητα Σάρωσης περιγράμματος (Cv)
0.10 mm	0.18 mm	4800 mm/sec	1700 mm/sec
0.15 mm	0.25 mm	3300 mm/sec	1200 mm/sec
0.20 mm	0.30 mm	2400 mm/sec	1000 mm/sec

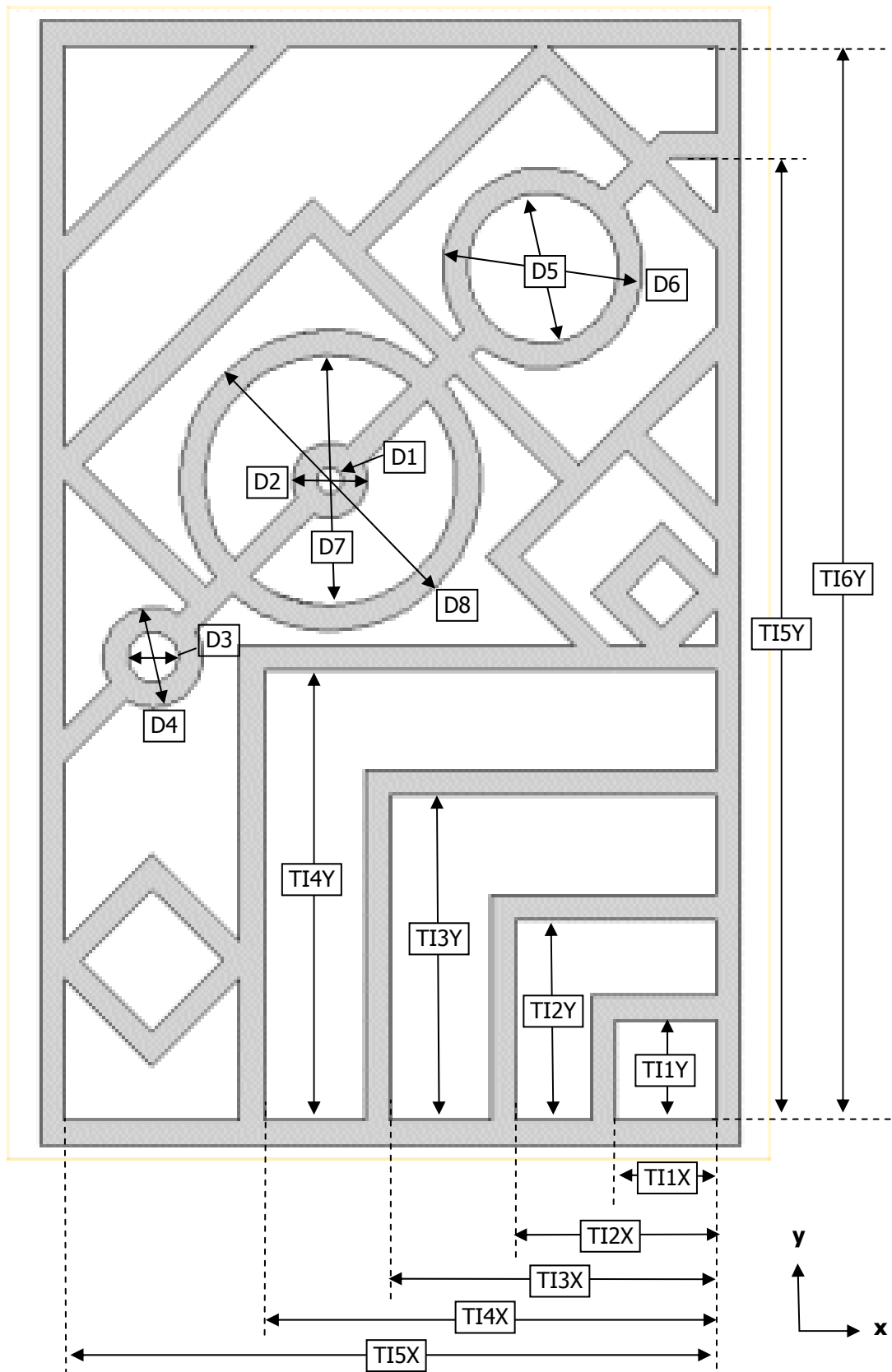
Παράρτημα Π2

Δοκίμιο & Μετρήσεις Ακριβείας

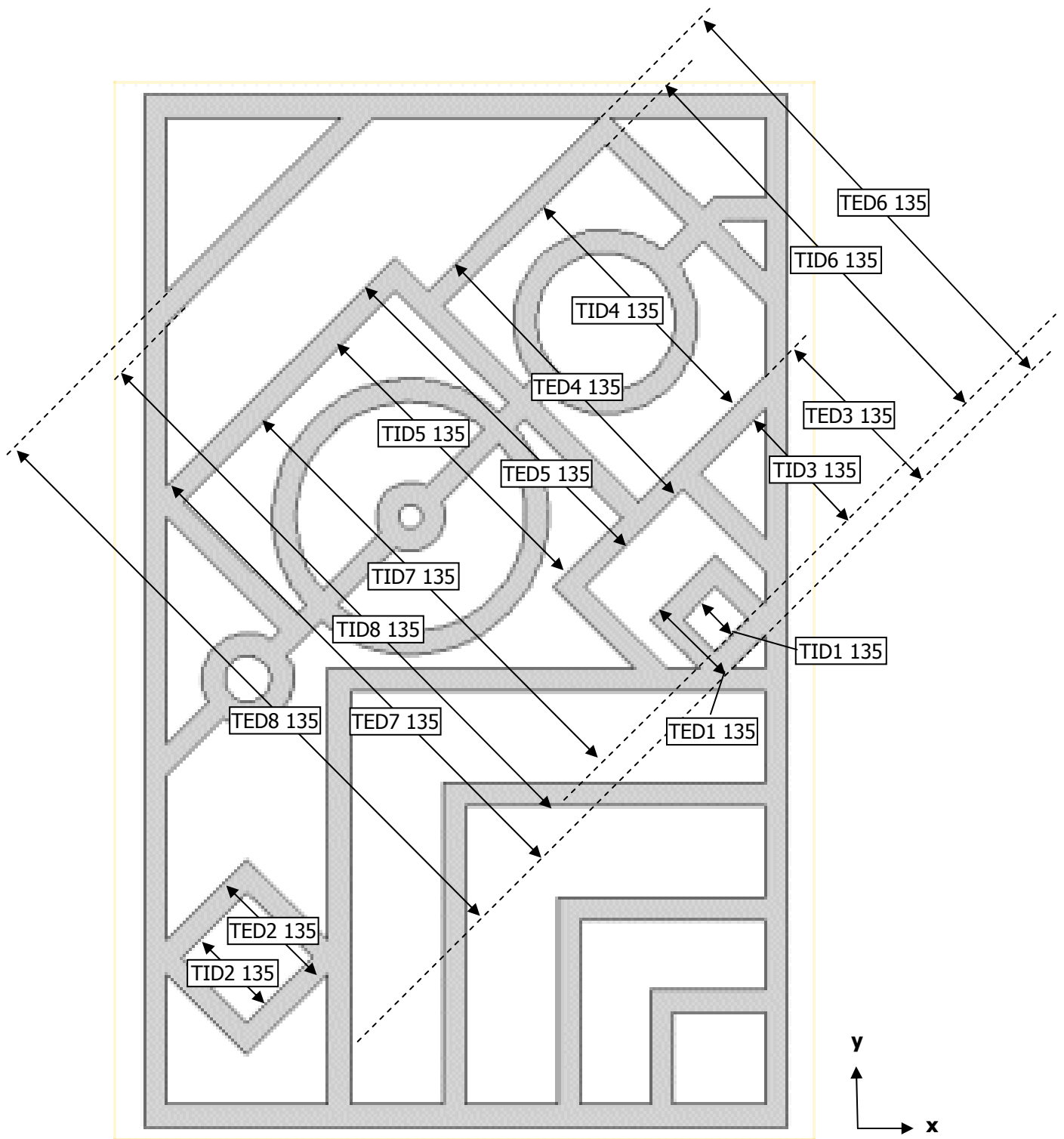
Π2.1 Εξωτερικές διαστάσεις παράλληλες X & Y



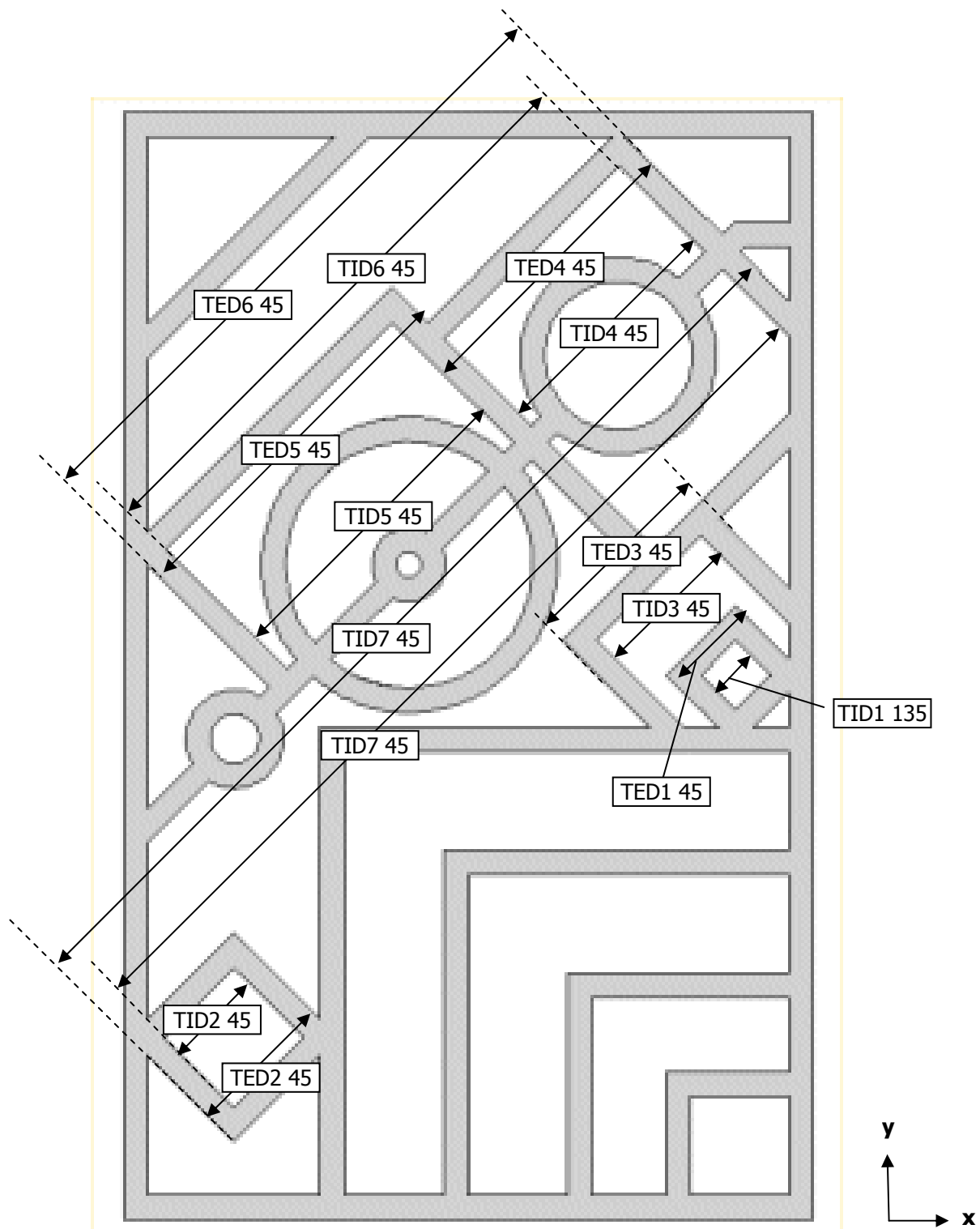
Π2.2 Εσωτερικές X & Y και διαμετρικές διαστάσεις



Π2.3 Εσωτερικές και εξωτερικές διαστάσεις $X 135^{\circ}$



Π2.4 Εσωτερικές και εξωτερικές διαστάσεις $X 45^\circ$



Π2.5 Μετρούμενες αποκλίσεις διαστάσεων δοκιμίου ακριβείας ανά επίπεδο μέτρησης

Διάσταση	Ονομαστική Τιμή	Απόκλιση (2mm)	Απόκλιση (4mm)	Απόκλιση (6mm)	Μέση Απόκλιση	Εύρος	%
<i>Διαμετρικές εσωτ.</i>							
D1	5.000	-0.102	-0.081	-0.103	-0.095	0.022	-1.91
D3	10.000	-0.081	-0.068	-0.090	-0.080	0.022	-0.80
D5	30.000	-0.029	-0.038	-0.042	-0.036	0.013	-0.12
D7	50.000	0.005	0.000	-0.015	-0.003	0.020	-0.01
<i>Διαμετρικές εξωτ.</i>							
D2	15.000	0.009	0.007	-0.002	0.005	0.011	0.03
D4	20.000	0.000	0.003	0.003	0.002	0.003	0.01
D6	40.000	0.010	-0.014	-0.024	-0.009	0.034	-0.02
D8	60.000	0.011	0.003	-0.005	0.003	0.016	0.01
<i>Χ Εξωτερικές</i>							
TE0X	5.000	0.018	0.007	0.006	0.010	0.012	0.21
TE1X	30.000	-0.016	-0.030	-0.030	-0.025	0.014	-0.08
TE2X	50.000	0.016	-0.002	-0.002	0.004	0.018	0.01
TE3X	75.000	0.083	0.078	0.065	0.075	0.018	0.10
TE4X	100.000	0.149	0.139	0.139	0.142	0.010	0.14
TE5X	202.575	0.245	0.233	0.228	0.235	0.017	0.12
TE6X	225.000	0.235	0.210	0.208	0.218	0.027	0.10
<i>Χ εσωτερικές</i>							
TI1X	20.000	-0.036	-0.031	-0.030	-0.032	0.006	-0.16
TI2X	40.000	0.016	0.003	-0.016	0.001	0.032	0.00
TI3X	65.000	0.116	0.074	0.056	0.082	0.060	0.13
TI4X	90.000	0.186	0.135	0.106	0.142	0.080	0.16
TI5X	192.575	0.175	0.188	0.182	0.182	0.013	0.09
TI6X	215.000	0.264	0.209	0.176	0.216	0.088	0.10
<i>Υ Εξωτερικές</i>							
TE0Y (P7)	5.000	0.014	0.016	0.029	0.020	0.015	0.39
TE1Y	30.000	-0.012	-0.021	-0.020	-0.018	0.009	-0.06
TE2Y	50.000	-0.007	-0.012	-0.012	-0.010	0.005	-0.02
TE3Y	75.000	0.017	0.015	0.013	0.015	0.004	0.02
TE4Y	100.000	0.068	0.060	0.069	0.066	0.009	0.07
TE5Y	140.000	0.062	0.057	0.059	0.059	0.005	0.04
<i>Υ εσωτερικές</i>							
TI1Y	20.000	-0.022	-0.031	-0.037	-0.030	0.015	-0.15
TI2Y	40.000	-0.022	-0.025	-0.034	-0.027	0.012	-0.07
TI3Y	65.000	0.001	0.000	-0.005	-0.001	0.006	0.00
TI4Y	90.000	0.057	0.055	0.051	0.054	0.006	0.06
TI5Y	130.000	0.017	0.007	0.004	0.009	0.013	0.01
P15	5.000	0.028	0.023	0.024	0.025	0.005	0.50
<i>Εξωτερικές 135°</i>							
TED1 (135)	20.000	0.004	-0.001	0.007	0.003	0.008	0.02

Διάσταση	Ονομαστική Τιμή	Απόκλιση (2mm)	Απόκλιση (4mm)	Απόκλιση (6mm)	Μέση Απόκλιση	Εύρος	%
TED2 (135)	30.000	0.047	0.012	0.031	0.030	0.035	0.10
TED3 (135)	40.000	0.070	0.053	0.071	0.065	0.018	0.16
TED4 (135)	70.000	0.072	0.077	0.073	0.074	0.005	0.11
TED5 (135)	115.000	0.148	0.110	0.113	0.124	0.038	0.11
TED6 (135)	145.000	0.253	0.251	0.260	0.255	0.009	0.18
<i>Εσωτερικές 135°</i>							
TID1 (135)	10.000	-0.031	-0.039	-0.049	-0.040	0.018	-0.40
TID2(135)	20.000	-0.017	-0.019	-0.033	-0.023	0.016	-0.12
TID3(135)	30.000	0.021	0.020	0.019	0.020	0.002	0.07
TID4(135)	60.000	-0.046	-0.027	-0.081	-0.051	0.054	-0.09
TID5(135)	70.000	0.037	0.049	0.042	0.043	0.012	0.06%
TID6(135)	95.000	0.073	0.074	0.076	0.074	0.003	0.08%
TID7(135)	105.000	0.061	0.063	0.063	0.062	0.002	0.06%
TID8(135)	135.000	0.187	0.185	0.187	0.186	0.002	0.14%
<i>Εξωτερικές 45°</i>							
TED0(45)	5.000	-0.006	-0.005	-0.017	-0.009	0.012	-
TED1(45)	20.000	0.007	0.000	0.003	0.003	0.007	0.02%
TED2(45)	30.000	0.014	-0.004	-0.017	-0.002	0.031	-
TED3(45)	40.000	0.016	-0.006	-0.002	0.003	0.022	0.01%
TED4(45)	60.000	0.043	0.030	0.029	0.034	0.014	0.06%
TED5(45)	65.000	0.059	0.069	0.072	0.067	0.013	0.10%
TED6(45)	130.000	0.087	0.083	0.084	0.085	0.004	0.07%
TED7(45)	200.437	0.169	0.135	0.102	0.135	0.067	0.07%
<i>Εσωτερικές 45°</i>							
TID1(45)	10.000	-0.037	-0.016	-0.023	-0.025	0.021	-
TID2(45)	20.000	-0.016	-0.020	-0.026	-0.021	0.010	-
TID3(45)	30.000	-0.003	0.007	-0.006	-0.001	0.013	0.00%
TID4(45)	50.000	0.040	0.032	0.040	0.037	0.008	0.07%
TID5(45)	75.000	0.036	0.045	0.037	0.039	0.009	0.05%
TID6(45)	120.000	0.096	0.100	0.102	0.099	0.006	0.08%
TID7(45)	190.437	0.062	0.017	0.029	0.036	0.045	0.02%

Παράρτημα Π3

Χαρακτηριστικά κατασκευαστικών λύσεων

Π3.1. Χαρακτηριστικά κατασκευαστικών λύσεων αντικειμένου «Α».

Λύση	Χρόνος (sec)	Μέση Τραχύτητα (μm)	Ογκομετρικό Σφάλμα (%)	Αριθμός Στρωμάτων	Κόστος (€)	Στηριζόμενη επιφάνεια (mm ²)
a-0.10	11106,70	7,46	4,50%	332	80,49	1227,09
a-0.15	7538,07	9,66	6,26%	221	55,51	1227,09
a-0.20	5820,40	13,07	8,03%	166	43,48	1227,09
b-0.10	13266,00	6,85	1,83%	399	95,60	416,75
b-0.15	8992,59	9,21	2,55%	266	65,69	416,75
b-0.20	6891,89	11,30	3,28%	199	50,98	416,75
c-0.10	16202,90	10,15	3,82%	491	116,16	202,78
c-0.15	10937,86	13,07	5,33%	327	79,30	202,78
c-0.20	8356,71	18,58	6,83%	245	61,24	202,78
d-0.10	17197,49	6,96	2,71%	522	123,12	655,42
d-0.15	11612,31	9,41	3,78%	348	84,02	655,42
d-0.20	8871,33	11,78	4,85%	261	64,84	655,42

Π3.2. Χαρακτηριστικά κατασκευαστικών λύσεων αντικειμένου «Β».

Λύση	Χρόνος (sec)	Μέση Τραχύτητα (μm)	Ογκομετρικό Σφάλμα (%)	Αριθμός Στρωμάτων	Κόστος (€)	Στηριζόμενη επιφάνεια (mm ²)
a-0.10	14683,16	8,08	10,68%	438	105,92	3145,97
a-0.15	9986,26	10,96	14,88%	292	73,04	3145,97
a-0.20	7706,04	14,97	19,08%	219	57,08	3145,97
b-0.10	32647,49	4,84	6,74%	999	231,67	2814,16
b-0.15	21965,96	7,05	9,38%	666	156,90	2814,16
b-0.20	16678,53	7,54	12,03%	499	119,88	2814,16
c-0.10	18232,18	8,66	15,31%	550	130,76	5330,10
c-0.15	12353,07	10,67	21,33%	367	89,60	5330,10
c-0.20	9462,61	15,15	27,35%	275	69,37	5330,10
d-0.10	15954,18	8,74	12,37%	478	114,81	3059,64
d-0.15	10809,74	11,18	17,24%	318	78,80	3059,64
d-0.20	8336,94	15,72	22,10%	239	61,49	3059,64
e-0.10	17208,21	10,91	16,61%	518	123,59	4569,73
e-0.15	11649,09	12,65	23,14%	345	84,68	4569,73
e-0.20	8950,64	18,95	29,66%	259	65,79	4569,73

Π3.3. Χαρακτηριστικά κατασκευαστικών λύσεων αντικειμένου «Γ».

Λύση	Χρόνος (sec)	Μέση Τραχύτητα (μm)	Ογκομετρικό Σφάλμα (%)	Αριθμός Στρωμάτων	Κόστος (€)	Στηριζόμενη επιφάνεια (mm ²)
<i>a-0.10</i>	17605,79	7,08	6,97%	498	132,02	6265,14
<i>a-0.15</i>	12234,21	9,54	9,71%	332	94,42	6265,14
<i>a-0.20</i>	9721,73	12,38	12,45%	249	76,83	6265,14
<i>b-0.10</i>	22651,00	8,33	8,75%	657	167,32	9446,15
<i>b-0.15</i>	15585,56	10,20	12,19%	438	117,86	9446,15
<i>b-0.20</i>	12206,27	14,26	15,62%	328	94,20	9446,15
<i>c-0.10</i>	22097,18	10,63	10,25%	640	163,44	9726,75
<i>c-0.15</i>	15224,25	13,29	14,27%	427	115,33	9726,75
<i>c-0.20</i>	11940,32	20,45	18,30%	320	92,34	9726,75
<i>d-0.10</i>	55152,13	5,09	2,12%	1669	394,82	2235,96
<i>d-0.15</i>	37296,70	7,34	2,95%	1113	269,84	2235,96
<i>d-0.20</i>	28516,91	7,80	3,79%	834	208,38	2235,96

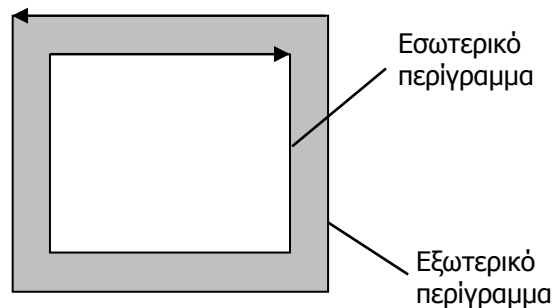
Παράρτημα Π4

Πρότυπα περιγραφής γεωμετρικών δεδομένων

Π4.1 Πρότυπο CLI

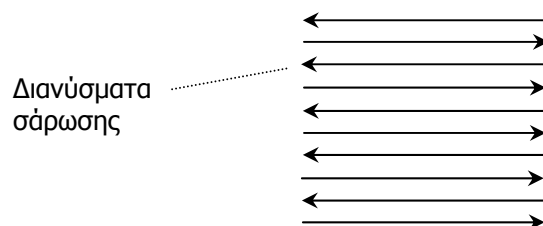
Το πρότυπο CLI (Common Layer Interface) είναι ένα πρότυπο περιγραφής της γεωμετρίας διαδοχικών παράλληλων τομών ενός αντικειμένου, η οποία απαιτείται για την κατασκευή ενός αντικειμένου με οποιαδήποτε τΤΚΠ. Αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος "BRITE/EURAM - Rapid Prototyping Techniques" ως μέσο μεταφοράς των δεδομένων μαγνητικής ή αξονικής τομογραφίας προς τα συστήματα τΤΚΠ για την κατασκευή ιατρικών μοντέλων.

Οι τομές είναι ταξινομημένες από κάτω προς τα πάνω (κατά την κατεύθυνση κατασκευής) και για κάθε τομή καταγράφεται το ύψος της και τα απαραίτητα κλειστά πολύγωνα που την περικλείουν. Η γεωμετρία κάθε πολυγώνου περιγράφεται με την διαδοχική παράθεση των κορυφών του πολυγώνου με φορά αντίθετη στη φορά των δεικτών του ρολογιού εάν πρόκειται για εξωτερικό περίγραμμα και σύμφωνα με τη φορά των δεικτών για εσωτερικό περίγραμμα. Ο καθορισμός της φοράς είναι απαραίτητος τόσο για τον μετέπειτα υπολογισμό των διανυσμάτων σάρωσης αλλά και για την σωστή εφαρμογή της αντιστάθμισης εστίασης.



Σχήμα Π4.1 Αναπαράσταση τομής κατά το πρότυπο CLI.

Εκτός των πολυγώνων το πρότυπο παρέχει την δυνατότητα περιγραφής των διανυσμάτων σάρωσης που απαιτούνται για την σάρωση μίας τομής. Η μορφή αυτή περιγραφής της γεωμετρίας μίας τομής χρησιμοποιείται κυρίως για την περιγραφή των στρωμάτων του πλέγματος στήριξης.



Σχήμα Π4.2 Αναπαράσταση διανυσμάτων σάρωσης κατά το πρότυπο CLI.

Ως μειονέκτημα του προτύπου μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα περιγραφής μόνο ευθύγραμμων τμημάτων και όχι τόξων ή γραμμών μεγαλύτερης τάξης, που θα επέτρεπε καλύτερη προσέγγιση της αρχικής γεωμετρίας του τριδιάστατου μοντέλου. Το μειονέκτημα αυτό ωστόσο έχει μικρή πρακτική σημασία αφού ελάχιστες μηχανές ΤΚΠ έχουν την δυνατότητα εκτέλεσης μη γραμμικών κινήσεων στο μηχανισμό κατασκευής των στρωμάτων. Πληροφορίες και εκτενή περιγραφή της σύνταξης του προτύπου CLI είναι διαθέσιμες μέσω του διαδικτύου στην διεύθυνση http://www.cranfield.ac.uk/coa/rapid/cli/cli_v20.html.

Π4.2 Πρότυπο VRML

Το πρότυπο VRML (Virtual Reality Modeling Language) σχεδιάστηκε για την αναπαράσταση 3D μοντέλων στο διαδίκτυο και διαθέτει μία πληθώρα αντικειμένων (objects) και μεθόδων για την περιγραφή της γεωμετρίας, του χρώματος αλλά και της υφής του μοντέλου. Το πρότυπο δίνει την δυνατότητα περιγραφής τόσο απλών γεωμετρικών στερεών όπως το παραλληλεπίπεδο, η σφαίρα ή ο κύλινδρος όσο και πιο σύνθετων με την μορφή πολυέδρων. Στην πολυεδρική αναπαράσταση VRML οι έδρες έχουν τριγωνική μορφή όπως και στο πρότυπο STL, απαιτείται όμως λιγότερος αποθηκευτικός χώρος καθώς τα δεδομένα - οι συντεταγμένες των κορυφών, τα μοναδιαία κάθετα διανύσματα και οι τριγωνικές έδρες - είναι ταξινομημένα στις αντίστοιχες λίστες οι οποίες συνδέονται με δείκτες. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η επανάληψη στην παράθεση των πληροφοριών για έδρες που έχουν κοινές κορυφές ή το ίδιο μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα παράλειψης του μοναδιαίου κάθετου διανύσματος εάν η φορά παράθεσης των κορυφών κάθε έδρας ακολουθεί τον κανόνα του «δεξιού χεριού», έτσι ώστε να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη οικονομία μνήμης. Σε κάθε έδρα του μοντέλου μπορεί επίσης να αποδοθεί κάποιο χρώμα υπό μορφή RGB (Red Green Blue). Και σε αυτή την περίπτωση προηγείται μία λίστα των διαθέσιμων χρωμάτων την οποία ακολουθεί μία λίστα με δείκτες που αποδίδουν σε κάθε έδρα το αντίστοιχο χρώμα.