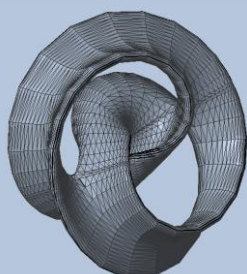


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ
ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ



ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Ι. ΚΑΝΕΛΛΙΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Β. ΔΕΔΟΥΣΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2010

Ευχαριστίες

Η όμορφη αλλά επίπονη, πολλές φορές, πορεία προς την ολοκλήρωση μιας διδακτορικής διατριβής δεν είναι δυνατή χωρίς την υποστήριξη και τη θετική ενέργεια των ανθρώπων που διασταυρώνονται μαζί της. Η μικρή αυτή αναφορά αποτελεί ένα ευχαριστώ σε όλους αυτούς τους ανθρώπους χωρίς τη συμβολή των οποίων η ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής θα ήταν αδύνατη.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βασίλη Δεδούση, Καθηγητή του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας και διευθυντή του εργαστηρίου Σύγχρονων Τεχνολογιών Παραγωγής & Ελέγχου, για την επίβλεψη, τη βοήθεια, την εποικοδομητική συνεργασία καθώς και την αμέριστη εμπιστοσύνη και υποστήριξη την οποία επέδειξε προς το πρόσωπο μου από την πρώτη κιόλας μέρα της συνεργασίας μας. Το ήθος του και ο επαγγελματισμός του αποτελούν για εμένα παράδειγμα προς μίμηση. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να απευθύνω προς την Καθηγήτρια Στυλιανή Σοφianoπούλου για τα εποικοδομητικά σχόλια και τις πολύτιμες κατευθύνσεις σε κάθε προβληματισμό μου, καθώς και προς τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δημήτριο Καραλέκα για την πολύτιμη βοήθεια που πρόσφερε και προσφέρει άοκνα σε όλες τις εκφάνσεις της συνεργασίας μας.

Ένα θερμό ευχαριστώ θα ήθελα επίσης να απευθύνω στον φίλο, συνεργάτη και συνοδοιπόρο όλα αυτά τα χρόνια, εντός και εκτός Πανεπιστημίου, Λέκτορα κ. Γιάννη Γιαννατοσή, χωρίς την ηθική και πρακτική υποστήριξη του οποίου τίποτα δεν θα είχε πραγματοποιηθεί, καθώς και στην Επίκουρο Καθηγήτρια Τατιάνα Ταμπουρατζή το ήθος της οποίας και η ανιδιοτελής προσφορά βοήθειας όποτε και για ότι και αν απαιτηθεί αποτελούν παράδειγμα προς μίμηση. Επιπλέον, ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω προς τον Πρόεδρο του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας Καθηγητή Λεωνίδα Καμαρινόπουλο ο οποίος με τίμησε με την επαγγελματική εμπιστοσύνη που επέδειξε προς το πρόσωπο μου τα τελευταία έτη.

Η εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής δεν θα είχε ποτέ ξεκινήσει χωρίς την αέναη υποστήριξη και αγάπη της οικογένειάς μου, η οποία στάθηκε πολύτιμος αρωγός σε όποια προσπάθεια, μεγάλη ή μικρή, και εάν επιχειρήσα. Τους ευχαριστώ λοιπόν από τα βάθη της καρδιάς μου. Ομοίως, η διατριβή δεν θα είχε ολοκληρωθεί ποτέ χωρίς την αγόγγυστη συμπαράσταση και την αμέριστη αγάπη με την οποία με περιβάλλει η συνοδοιπόρος στην ζωή μου Σοφία, η πίστη της οποίας σε εμένα αποτέλεσε και αποτελεί παράγοντα υποκίνησης. Σε ευχαριστώ για όλα.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες θέλω να απευθύνω στους φίλους και συνεργάτες Δρ. κ. Χαράλαμπο Σχίζα, κ. Παναγιώτη Σιότροπο, Δρ. κ. Νικόλαο Παυλή, Λέκτορα κ. Δημήτριο Ψυχογιό, η φίλια και η συνεργασία των οποίων εντός και εκτός εργαστηρίου αποτελεί πολύτιμο απόκτημα και πηγή δημιουργικότητας.

1.	Στόχοι και δομή της διατριβής	1
1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Στόχοι διατριβής.....	4
1.3	Δομή Διατριβής	4
2.	Τεχνολογίες Στρωματικής Κατασκευής και Εφαρμογές.....	6
2.1	Τεχνολογίες Στρωματικής Κατασκευής	6
2.1.1	Επιλεκτική (πυρο-) Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering-SLS)	9
2.1.2	Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)	10
2.1.3	Επιλεκτική (πυρο-)Συσσωμάτωση με λείζερ απευθείας σε μέταλλο (Direct Metal Laser Sintering - DMLS)	11
2.1.4	Μορφοποίηση κόκκων με λείζερ (Laser Powder Forming – LPF)	12
2.1.5	Συγκόλληση Επαλλήλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing-LOM)	13
2.1.6	Μοντελοποίηση με απόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM).....	15
2.1.7	Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SL).....	16
2.2	Εφαρμογές Τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής	17
2.2.1	Ταχεία Πρωτοτυποποίηση.....	17
2.2.2	Ταχεία κατασκευή εργαλείων παραγωγής	18
2.2.3	Ταχεία Παράγωγή.....	19
2.2.4	Ιατρικές Εφαρμογές.....	22
3.	Ανάλυση Μεθόδου Στερεολιθογραφίας.....	24
3.1	Στερεολιθογραφία.....	24
3.2	Κόστος Κατασκευής Αντικείμενου με Στερεολιθογραφία	29
3.3	Υπολογισμός Χρόνου Κατασκευής Αντικείμενου.....	33
3.4	Ποιότητα αντικειμένων κατασκευασμένων με Στερεολιθογραφία	38
3.4.1	Ψηφιοποίηση του 3D μοντέλου.....	39
3.4.2	Κλιμακωτή υφή επικλινών επιφανειών	40
3.4.3	Τεμαχισμός με σταθερό διάστημα τεμαχισμού.....	43
3.4.4	Υπερστερεοποίηση (overcure)	43
3.4.5	Συρρίκνωση (shrinkage)	44
3.5	Παγίδευση υγρής ρητίνης εντός του αντικείμενου κατά την κατασκευή	44
4.	Μετα-ευρετικές Τεχνικές Βελτιστοποίησης.....	46
4.1	Ορισμοί.....	46
4.2	Μεθοδολογίες Βελτιστοποίησης.....	48

4.2.1	Μετά-ευρετικές Τεχνικές Βελτιστοποίησης	49
4.2.2	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι.....	51
4.2.3	Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	53
4.2.3.1	Περιγραφή λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων.....	54
4.2.3.2	Δομικά Στοιχεία των Γενετικών Αλγορίθμων	55
4.2.3.2.1	Άτομα.....	55
4.2.3.2.2	Πληθυσμός	57
4.2.3.2.3	Επιλογή και Αντικατάσταση	58
4.2.3.2.4	Διαδικασίες Αντικατάστασης	65
4.2.3.2.5	Τελεστές Αναπαραγωγής	65
4.2.3.2.6	Κριτήρια τερματισμού της προσομοίωσης.....	68
4.2.4	Προσομοιωμένη Ανόπτηση.....	69
4.2.4.1	Περιγραφή Προσομοιωμένης Ανόπτησης.....	69
4.2.4.2	Γενική δομή Προσομοιωμένης Ανόπτησης.....	70
5.	Βελτιστοποίηση Προσανατολισμού Κατασκευής	76
5.1	Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	76
5.2	Ανάπτυξη Συστήματος Βελτιστοποίησης Προσανατολισμού Κατασκευής	79
5.2.1	Κατηγοριοποίηση μεθοδολογιών δημιουργίας μετώπου κατά Παρέτο	82
5.2.2	Μοντελοποίηση προβλήματος Προσανατολισμού.....	84
5.2.2.1	Ανάλυση Κατασκευαστικής Απόκλισης.....	85
5.2.2.2	Υπολογισμός Κόστους Κατασκευής.....	90
5.2.3	Μέθοδοι βελτιστοποίησης προβλήματος προσανατολισμού	94
5.2.3.1	Μέθοδος της Σταθμισμένης Αντικειμενικής Συνάρτησης (Weighted Sum)	94
5.2.3.2	Μέθοδος NSGA II.....	104
5.2.3.2.1	Βασική περιγραφή αλγορίθμου NSGA II.....	107
5.2.3.2.2	Τελεστές Υλοποίησης Αλγορίθμου NSGA II.....	108
5.3	Μελέτη Περιπτώσεων	111
5.3.1	Περίπτωση απλού γεωμετρικά αντικειμένου	112
6.	Βελτιστοποίηση Παρτίδας Παραγωγής.....	134
6.1	Το πρόβλημα αποτελεσματικής αξιοποίησης του χώρου κατασκευής.....	134
6.2	Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων Στοιβαγμού κατά Dyckhoff.....	136
6.3	Βελτιωμένη Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων Στοιβαγμού	137
6.3.1	Βασικοί τύποι προβλημάτων στοιβαγμού.	140

Περιεχόμενα	Σελ.
6.3.1.1 Προβλήματα μεγιστοποίησης της εκροής	140
6.3.1.2 Προβλήματα ελαχιστοποίησης της εισροής	141
6.4 Αντιμετώπιση του προβλήματος αποτελεσματικής αξιοποίησης του χώρου κατασκευής ως πρόβλημα στοιβαγμού.	142
6.5 Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	143
6.5.1 Προσεγγίσεις Έμμεσης Αντιμετώπισης	144
6.5.2 Προσεγγίσεις Άμεσης Αντιμετώπισης	148
6.6 Δομή αναπτυχθέντος λογισμικού για τον στοιβαγμό αντικειμένων	151
6.6.1 Περιγραφή υποσυστήματος ανάγνωσης και τροποποίησης των γεωμετρικών δεδομένων.....	152
6.6.2 Περιγραφή υποσυστημάτων μεταερευνητικής έρευνας και κανόνων τοποθέτησης ..	159
6.6.2.1 Περιγραφή Κανόνων Τοποθέτησης.....	160
6.6.2.1.1 Κανόνες τοποθέτησης LBDB.....	164
6.6.2.1.2 Κανόνας τοποθέτησης NFP	185
6.6.3 Περιγραφή υποσυστήματος μετα-ερευνητικών αλγορίθμων έρευνας.....	187
6.7 Μελέτη Περιπτώσεων	192
7. Σύνοψη και Μελλοντική Έρευνα.....	209
7.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα διατριβής	209
7.2 Μελλοντική Έρευνα.....	214
Βιβλιογραφία	216
Παράρτημα Π1	228

Σχήμα 1-1 Παραδείγματα προϊόντων κατασκευασμένων με διαδικασίες ΣΚ	2
Σχήμα 2-1 Ταξινόμηση των τεχνολογιών ΣΚ σύμφωνα με την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη.	8
Σχήμα 2-2 Επιλεκτική (Πυρο-)Συσσωμάτωση με Λέιζερ (SLS).	9
Σχήμα 2-3 Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D-Printing).	10
Σχήμα 2-4 Επιλεκτική (πυρο-)Συσσωμάτωση με Λέιζερ απευθείας σε μέταλλο (DMLS).	11
Σχήμα 2-5 Μορφοποίηση κόκκων με λέιζερ.	13
Σχήμα 2-6 Συγκόλληση Επαλλήλων Φύλλων (LOM).	14
Σχήμα 2-7 Μοντελοποίηση με Απόθεση Υλικού (FDM).....	16
Σχήμα 2-8 Ακουστικό Βαρηκοΐας (Siemens).	20
Σχήμα 2-9 Παραγωγή λαβής πόρτας αυτοκινήτου με χρήση SLS.....	21
Σχήμα 3-1 Σχηματική Αναπαράσταση Μηχανής Στερεολιθογραφίας.	25
Σχήμα 3-2 Πολυεδρική Απεικόνιση STL Μοντέλου Δράκου	26
Σχήμα 3-3 Σχηματική Αναπαράσταση Πλέγματος Στήριξης.....	27
Σχήμα 3-4 Πηγές κόστους που χρησιμοποιούνται για την κοστολόγηση της παράγωγης.	30
Σχήμα 3-5 Σχηματική αναπαράσταση ορθογωνικού προτύπου και παραμέτρων σάρωσης [29].	36
Σχήμα 3-6 Σχηματική αναπαράσταση γραμμικής συρρίκνωσης [29].	37
Σχήμα 3-7 Σχηματική απεικόνιση της STL απεικόνισης ενός 3Dμοντέλου.	39
Σχήμα 3-8 Σχηματική αναπαράσταση στρωματικής κατασκευής πυραμίδας.	40
Σχήμα 3-9 Σχηματική απεικόνιση φαινομένου κλίμακας.	40
Σχήμα 3-10 Σχηματική αναπαράσταση της μέσης τραχύτητας επιφάνειας [3.8].....	42
Σχήμα 3-11 Σχηματική αναπαράσταση φαινομένου υπερστερεοποίησης [39]	44
Σχήμα 3-12 Σχηματική αναπαράσταση του προβλήματος δοχείου [39].	44
Σχήμα 4-1 Σχηματική κατηγοριοποίηση μεθοδολογιών βελτιστοποίησης.....	49
Σχήμα 4-2 Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός ΓΑ [4.1].	55
Σχήμα 4-3 Σχηματική αναπαράσταση γενέτυπου και γονίδιων.	56
Σχήμα 4-4 Διασταύρωση ατόμων υψηλής καταλληλότητας.	67
Σχήμα 4-5 Σχηματική αναπαράσταση φυσικής ανόπτησης [57].	69
Σχήμα 4-6 Διάγραμμα ροής Προσομοιωμένης Ανόπτησης.	71
Σχήμα 5-1 Σχηματική αναπαράσταση μη κυριαρχούμενων λύσεων κατά Παρέτο [5.26].	81
Σχήμα 5-2 Σχηματική αναπαράσταση κυρτού & μη κυρτού μετώπου κατά Παρέτο [5.29].	82
Σχήμα 5-3 Φαινόμενο κλίμακας και δομή υποστήριξης.....	85
Σχήμα 5-4 Σχηματική απεικόνιση γωνίας επιφάνειας.	87
Σχήμα 5-5 Σύγκριση πραγματικής μέσης τραχύτητας και μοντέλου Reeves & Cobb [5.1].	88
Σχήμα 5-6 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου πρόβλεψης Ra.....	89
Σχήμα 5-7 Πειραματικά δοκίμια υπολογισμού της τραχύτητας της επιφάνειας κομματιού και χρωματική απεικόνιση μέσης τραχύτητας.	90
Σχήμα 5-8 Σχηματική αναπαράσταση αλγόριθμου NSGA II [5.51].	108
Σχήμα 5-9 STL απεικόνιση απλού γεωμετρικά αντικείμενου.	112
Σχήμα 5-10 Βέλτιστοι και χειρίστοι προσανατολισμοί του απλού αντικείμενου.	113
Σχήμα 5-11 Βέλτιστος προσανατολισμός απλού αντικείμενου (0.5 κρτ. Χρόνου/ 0.5 κρτ.Ra).....	115
Σχήμα 5-12 Ιστόγραμμα κατανομής μέσης τραχύτητας απλού αντικείμενου (0,5 κρτ. Χρόνου/ 0,5 κρτ.Ra).	116
Σχήμα 5-13 Μέτωπο κατά Παρέτο απλού αντικείμενου.	117

Σχήμα 5-14 Ιστόγραμμα κατανομής μέσης τραχύτητας απλού αντικείμενου από μέτωπο Παρέτο.	118
Σχήμα 5-15 Πολυεδρική απεικόνιση αντικειμένων υπό μελέτη.	119
Σχήμα 5-16 Βέλτιστοι και χειρίστοι προσανατολισμοί καμπύλου αγωγού.	121
Σχήμα 5-17 Βέλτιστοι και χειρίστοι προσανατολισμοί μοντέλου πλοίου.	122
Σχήμα 5-18 Βέλτιστος προσανατολισμός καμπύλου αγωγού (0,5 κρτ. Χρόνου/ 0,5 κρτ.Ra).	123
Σχήμα 5-19 Βέλτιστοι προσανατολισμοί μοντέλου πλοίου.	124
Σχήμα 5-20 Ιστογράμματα κατανομής μέσης τραχύτητας για το μοντέλο πλοίου.	125
Σχήμα 5-21 Μέτωπο κατά Παρέτο καμπύλου αγωγού.	127
Σχήμα 5-22 Μέτωπο κατά Παρέτο μοντέλου πλοίου.	127
Σχήμα 5-23 Βέλτιστοι και χειρίστοι προσανατολισμοί μοντέλου αεροσκάφους.	128
Σχήμα 5-24 Βέλτιστοι προσανατολισμοί και ιστογράμματα μέσης τραχύτητας για το μοντέλο αεροσκάφους.	130
Σχήμα 5-25 Μέτωπο κατά Παρέτο μοντέλου αεροσκάφους.	131
Σχήμα 5-26 Προσανατολισμοί σύμφωνα με το μέτωπο κατά Παρέτο.	132
Σχήμα 5-27 Χρωματική απεικόνιση τραχύτητας/γωνιών επιφάνειας και ιστόγραμμα κατανομής τραχύτητας.	133
Σχήμα 6-1 Σχηματική δομή προβλημάτων στοιβαγμού.	135
Σχήμα 6-2 Σχηματική απεικόνιση πλέγματος πολυγώνου.	146
Σχήμα 6-3 Δομή λογισμικού στοιβαγμού αντικειμένων.	151
Σχήμα 6-4 Πολυεδρική απεικόνιση STL αντικείμενου τοποθετημένο πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής της μηχανής Στερεολιθογραφίας.	152
Σχήμα 6-5 Σχηματική απεικόνιση αρχείου CLI.	153
Σχήμα 6-6 Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας εύρεσης προβολής αντικείμενου.	153
Σχήμα 6-7 Σχηματική απεικόνιση ένωσης δυο διατομών.	154
Σχήμα 6-8 Σχηματική απεικόνιση αρχικής και αντισταθμισμένης διατομής.	155
Σχήμα 6-9 Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας αντιστάθμισης δύο ευθυγραμμών τμημάτων.	156
Σχήμα 6-10 Σχηματική απεικόνιση αρχικής, αντισταθμισμένης και απλοποιημένης διατομής.	157
Σχήμα 6-11 Σχηματική απεικόνιση απλοποίησης καμπύλης.	157
Σχήμα 6-13 Δομή αρχείου GSI.	158
Σχήμα 6-12 Σχηματική απεικόνιση απλοποιημένης διατομής με εναλλακτικό επίπεδο λεπτομέρειας.	158
Σχήμα 6-14 Κυρτό περίβλημα και MBR μη κυρτού αντικείμενου.	162
Σχήμα 6-15 Ορθογωνικός στοιβαγμός.	163
Σχήμα 6-16 Εναλλακτικοί προσανατολισμοί στοιβαγμού.	163
Σχήμα 6-17 Σχηματική απεικόνιση εναλλακτικών σημείων εισαγωγής.	166
Σχήμα 6-18 Αντικείμενα προς στοιβαγμό.	166
Σχήμα 6-19 Σχηματική απεικόνιση θέσεων εισαγωγής MBR _B	167
Σχήμα 6-20 Σχηματική απεικόνιση πρώτου σημείου εισαγωγής MBR _A	168
Σχήμα 6-21 Σχηματική απεικόνιση δεύτερου σημείου εισαγωγής MBR _A	169
Σχήμα 6-22 Σχηματική απεικόνιση τρίτου σημείου εισαγωγής MBR _A	169
Σχήμα 6-23 Σχηματική απεικόνιση τέταρτου σημείου εισαγωγής MBR _A	170
Σχήμα 6-24 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού με χρήση MBR.	171
Σχήμα 6-25 Σχηματική απεικόνιση τεχνικής βολής ακτινών (Ray Casting).	172
Σχήμα 6-26 Σχηματική απεικόνιση περιττών ακτινών.	173
Σχήμα 6-27 Σχηματική απεικόνιση κυρτών αντικειμένων.	174

Σχήμα 6-28 Σχηματική απεικόνιση πολυγώνου No-Fit.	175
Σχήμα 6-29 Σχηματική απεικόνιση σχετικής θέσης πολυγώνου B σε σχέση με το πολύγωνο No-Fit.	175
Σχήμα 6-30 Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας No-Fit πολύγωνα για κυρτά αντικείμενα.	176
Σχήμα 6-31 Σχηματική απεικόνιση εύρεσης της βέλτιστης σχετικής θέσης δύο μη κυρτών αντικειμένων.	177
Σχήμα 6-32 Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας υπολογισμού $NFP_{AB_ESTIMATOR}$	179
Σχήμα 6-33 Σχηματική απεικόνιση μετακίνησης πολυγώνου B στο ίδιο τελικό σημείο.	180
Σχήμα 6-34 Σχηματική απεικόνιση αντικατάστασης εικονικής ακμής.	181
Σχήμα 6-35 Σχηματική απεικόνιση αύξησης της ακριβείας σχηματισμού του NFP.	182
Σχήμα 6-36 Σχηματική απεικόνιση υπολογισμού διανύσματος οριζόντιας κίνησης.	184
Σχήμα 6-37 Σχηματική απεικόνιση No-Fit πολυγώνων (NFP_{AB} , NFP_{BA}).	185
Σχήμα 6-38 Σχηματική απεικόνιση κυρτών (A, Γ) και μη κυρτών (B) αντικειμένων προς στοιβαγμό.	186
Σχήμα 6-39 Σχηματική απεικόνιση στοιβαγμού δυο αντικειμένων.	187
Σχήμα 6-40 Σχηματική απεικόνιση στοιβαγμού τριών αντικειμένων.	187
Σχήμα 6-41 Διαγράμματα ροής διαδικασιών βελτιστοποίησης με χρήση Γενετικών Αλγόριθμων.	190
Σχήμα 6-42 Διαγράμματα ροής διαδικασιών βελτιστοποίησης με χρήση Προσομοιωμένης Ανόπτησης.	191
Σχήμα 6-43 Σχηματική αναπαράσταση μέτρων αξιολόγησης διάταξης στοιβαγμού.	194
Σχήμα 6-44 Σχηματική απεικόνιση αντικειμένων προβλημάτων αναφοράς.	195
Σχήμα 6-45 Σχηματική απεικόνιση αντικειμένων προς στοιβαγμό πραγματικού προβλήματος.	196
Σχήμα 6-46 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΓΑ για το πρόβλημα αναφοράς Albano.	198
Σχήμα 6-47 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΠΑ για το πρόβλημα αναφοράς Albano.	198
Σχήμα 6-48 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΓΑ για το πρόβλημα αναφοράς Blazewicz.	199
Σχήμα 6-49 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΠΑ για το πρόβλημα αναφοράς Blazewicz.	200
Σχήμα 6-50 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΓΑ για το πρόβλημα αναφοράς Mao.	201
Σχήμα 6-51 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΠΑ για το πρόβλημα αναφοράς Mao.	202
Σχήμα 6-52 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΓΑ και LBDB&TBA.	203
Σχήμα 6-53 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΓΑ και LBDB&NFP.	203
Σχήμα 6-54 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΓΑ και NFP.	203
Σχήμα 6-55 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΠΑ και LBDB&TBA.	204
Σχήμα 6-56 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΓΑ και LBDB&NFP.	204
Σχήμα 6-57 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΠΑ και NFP.	204
Σχήμα 6-58 Σχηματική απεικόνιση εναλλακτικών διατάξεων στοιβαγμού.	207
Σχήμα 6-59 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού η οποία περιέχει το μοντέλο γνάθου.	208

Πίνακας 2-1 Κατηγοριοποίηση μεθόδων ΤΚΕ.....	19
Πίνακας 3-1 Προσδιοριστικοί παράγοντες κόστους ΣΚ.	30
Πίνακας 5-1 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης απλού αντικειμένου.	114
Πίνακας 5-2 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης καμπύλου αγωγού.	120
Πίνακας 5-3 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης μοντέλου πλοίου.	121
Πίνακας 5-4 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης μοντέλου αεροσκάφους.....	129
Πίνακας 6-1 Χρόνος δημιουργίας $NFP_{AB_ESTIMATOR}$ σε σχέση με βήμα ολίσθησης.....	183
Πίνακας 6-2 Αποτελέσματα δοκιμών.	197
Πίνακας 6-3 Μέσος χρόνος δημιουργίας φυσικής διάταξης στοιβαγμού.....	197
Πίνακας 6-4 Μέσος χρόνος ολοκλήρωσης διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	197

1

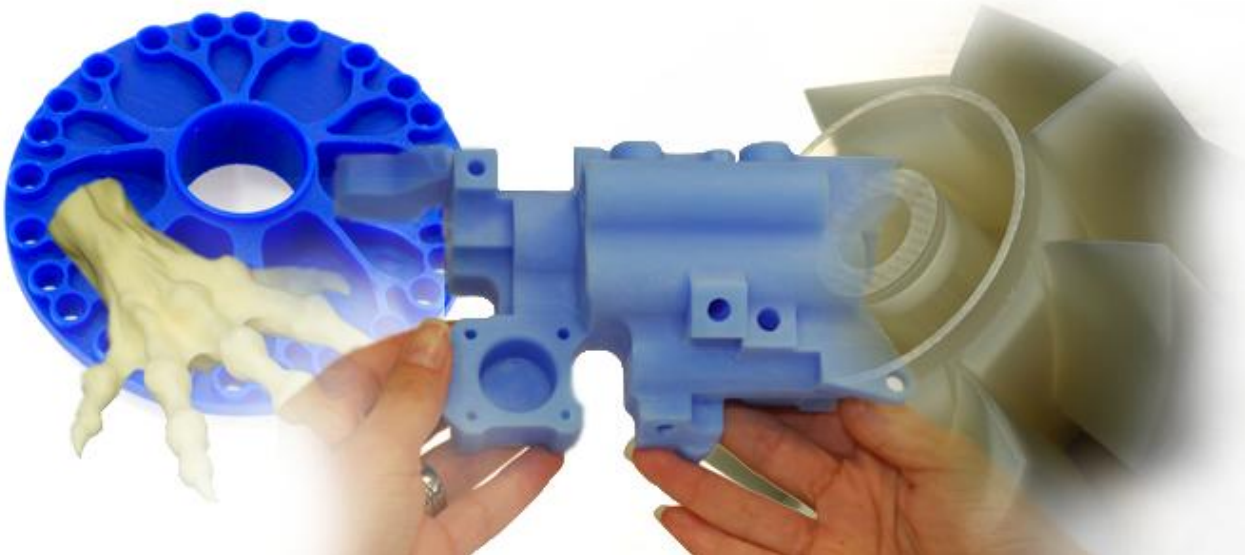
Στόχοι και δομή της διατριβής

1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο Στρωματική Κατασκευή (Layer Manufacturing) ή εναλλακτικά Προσθετική Κατασκευή-Παραγωγή (Additive Fabrication/Manufacturing) περιγράφεται μια σχετικά νέα ομάδα κατασκευαστικών τεχνολογιών και μεθόδων παραγωγής που κατασκευάζουν αντικείμενα-κομμάτια μέσω διαδικασιών ελεγχόμενης πρόσθεσης υλικού, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους κοπής, χύτευσης και διαμόρφωσης. Στις πιο γνωστές τεχνολογίες Στρωματικής Κατασκευής (ΣΚ) συγκαταλέγονται η Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SL), η Μοντελοποίηση με Εναπόθεση Υλικού (Fused Deposition Modelling-FDM), η Επιλεκτική (πυρο-)Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering-SLS), η Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D printing-3DP), η Μοντελοποίηση με Πολλαπλή Έγχυση (Multi-jet Modelling-MJM) και η Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing-LOM). Αναλόγως της τεχνολογίας χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών υλικά όπως φωτοπολυμερή, μέταλλα, θερμοπλαστικά πολυμερή, κεραμικά ή χαρτί σε διάφορες μορφές (υγρή, σε κόκκους, νήματα ή φύλλα), τα οποία διαμορφώνονται

συνήθως σε λεπτά στρώματα και προστίθενται σταδιακά μέχρι να «χτιστεί» το αντικείμενο εξού και ο όρος Στρωματική Κατασκευή/Παραγωγή.

Τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης και εξέλιξης των τεχνολογιών ΣΚ, βασικό πεδίο εφαρμογής τους αποτελούσε η κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων για την αξιολόγηση και μελέτη υπό ανάπτυξη προϊόντων, γι' αυτό και αρχικά επικράτησε ο όρος Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping) για την περιγραφή τους. Στην πορεία και καθώς οι τεχνολογίες ΣΚ ωρίμαζαν και οι επιδόσεις των αντίστοιχων μηχανών και υλικών βελτιώνονταν, η χρήση τους επεκτάθηκε στην κατασκευή καλουπιών και μητρών για περιορισμένη παραγωγή, εφαρμογή γνωστή και ως Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (Rapid Tooling). Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογίες ΣΚ χρησιμοποιούνται όλο και συχνότερα για την παραγωγή προϊόντων προοριζόμενων για τον τελικό χρήστη ή καταναλωτή αντικαθιστώντας συμβατικές μεθόδους παραγωγής, όπως οι διάφορες μέθοδοι χύτευσης (Σχήμα 1-1). Το πεδίο εφαρμογής αυτό συχνά αναφέρεται με τον όρο Ταχεία Παραγωγή (Rapid Manufacturing) λόγω του σχετικά μικρού απαιτούμενου κατασκευαστικού χρόνου. Προϋπόθεση για την οικονομική σκοπιμότητα της Ταχείας Παραγωγής (ΤΠ) είναι η κατασκευή σχετικά μικρού αριθμού εξειδικευμένων ή εξατομικευμένων προϊόντων (custom made), όπως ειδικά ιατρικά προϊόντα (π.χ. συσκευές υποβοήθησης της ακοής, ορθοδοντικά μηχανήματα και εμφυτεύματα), συλλογές εργαλείων επισκευής για αεροσκάφη, αισθητήρες ασφαλείας για εργασίες εξόρυξης, εξαρτήματα για αγωνιστικά αυτοκίνητα F1, κοσμήματα κ.α.



Σχήμα 1-1 Παραδείγματα προϊόντων κατασκευασμένων με διαδικασίες ΣΚ.

Η διαδικασία κατασκευής με μεθόδους ΣΚ χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια, το προπαρασκευαστικό στάδιο, το στάδιο κατασκευής στην μηχανή ΣΚ και το μεταπαρασκευαστικό

στάδιο. Στην προπαρασκευαστική φάση εκτελούνται αφενός οι εργασίες υπολογισμού της γεωμετρίας των στρωμάτων με βάση το τριδιάστατο (3D) ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου και αφετέρου οι εργασίες προγραμματισμού της λειτουργίας της μηχανής ΣΚ. Το στάδιο της κατασκευής πραγματοποιείται αυτόματα από τη μηχανή ΣΚ και αφορά το σταδιακό «χτίσιμο» του αντικειμένου με τη δημιουργία και πρόσθεση διαδοχικών στρωμάτων. Τέλος, στο μεταπαρασκευαστικό στάδιο πραγματοποιούνται εργασίες καθαρισμού, λείανσης και τελειοποίησης (φινίρισμα) του αντικειμένου. Συγκρινόμενες με τις συνήθεις κατεργασίες κοπής οι τεχνολογίες ΣΚ δεν απαιτούν ιδιαίτερα εργαλεία και ιδιοσυσκευές, ενώ και ο προγραμματισμός παραγωγής είναι σχετικά απλούστερος, με αποτέλεσμα να απαιτείται λιγότερος χρόνος και μικρότερο κόστος παραγωγής, ειδικά για αντικείμενα πολύπλοκης και ελεύθερης γεωμετρίας (complex free form geometries).

Στο προπαρασκευαστικό στάδιο εκτελούνται από τον χρήστη δύο βασικές εργασίες. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η επιλογή των κατασκευαστικών παραμέτρων, με κυριότερες εξ αυτών τον προσανατολισμό κατασκευής σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής και το πάχος του στρώματος, συνδέεται με την επιφανειακή ποιότητα του παραγόμενου κομματιού/προϊόντος και το συνολικό κόστος κατασκευής αλλά και με τη μηχανική του συμπεριφορά/αντοχή, η οποία δεν είναι ομοιογενής λόγω του στρωματικού χαρακτήρα της ΣΚ. Συγκεκριμένα, η επιλογή του προσανατολισμού κατασκευής καθορίζει σε ποιες επιφάνειες θα εμφανιστεί το φαινόμενο κλίμακας (stair stepping effect), το βαθμό εμφάνισης σφαλμάτων τεμαχισμού, τον συνολικό χρόνο κατασκευής καθώς και το χρόνο εκτέλεσης των προπαρασκευαστικών εργασιών. Επειδή τα παραπάνω αναφερθέντα κύρια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, του κόστους ή ισοδύναμα συνολικού χρόνου κατασκευής και της επιφανειακής ποιότητας είναι μεταξύ τους αντικρουόμενα, είναι προφανές ότι μέσω της επιλογής καταλλήλων παραμέτρων κατασκευής επιδιώκεται η επίτευξη του βέλτιστου δυνατού συμβιβασμού μεταξύ κόστους και ποιότητας.

Η μέγιστη εκμετάλλευση του χώρου της μηχανής ΣΚ κατά την δημιουργία μίας παρτίδας παραγωγής αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα από άποψη κόστους για ένα σύστημα ΤΠ, λόγω του σχετικά υψηλού κεφαλαιουχικού και λειτουργικού κόστους του συγκεκριμένου εξοπλισμού. Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης μιας σειράς αντικειμένων διαφορετικής γεωμετρίας σε δεδομένο χώρο αποτελεί ένα πρόβλημα ιδιαίτερης πολυπλοκότητας και υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων ειδικά εάν ληφθούν υπόψη και οι διάφοροι περιορισμοί κατασκευαστικής ακρίβειας και επιφανειακής ποιότητας του κομματιού.

1.2 Στόχοι διατριβής

Η αποδοτική εκμετάλλευση των τεχνολογιών ΣΚ απαιτεί αφενός μεν τη μελέτη θεμάτων προγραμματισμού της διαδικασίας παραγωγής και βελτιστοποίησης των σχετικών διαδικασιών αφετέρου δε την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των αντίστοιχων υπολογιστικών εργαλείων. Ο στόχος της παρούσας διατριβής είναι διττός ήτοι:

α) Η μελέτη και διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων και τεχνικών βελτιστοποίησης για τον προγραμματισμό των διαδικασιών ΣΚ εστιασμένη στην τεχνική της Στερεολιθογραφίας, η οποία αποτελεί σήμερα μία από τις δημοφιλέστερες και πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες ΣΚ. Η συστηματική μελέτη των προαναφερθέντων θεμάτων εκτιμάται ότι μπορεί να συμβάλει στην βελτίωση της αποδοτικότητας των αντίστοιχων συστημάτων, αλλά και στην καλύτερη κατανόηση των προβλημάτων προγραμματισμού τεχνολογιών ΣΚ εν γένει, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η ευρεία εφαρμογή διαδικασιών ΤΠ στην βιομηχανική παραγωγή.

β) Η ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων για τη βελτιστοποίηση των αποφάσεων κατά την επιλογή προσανατολισμού και τον σχεδιασμό της παρτίδας παραγωγής. Στο πεδίο της επιλογής προσανατολισμού εξετάζονται υπολογιστικές μέθοδοι και τεχνικές και αναπτύχθηκαν εργαλεία που επιτρέπουν την αυτοματοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων περί της βέλτιστης δυνατής επίτευξης πιθανώς αντικρουόμενων στόχων, όπως η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής, των μεταπαρασκευαστικών εργασιών και των κατασκευαστικών σφαλμάτων. Αντίστοιχα, στο πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης πλήθους αντικειμένων στον χώρο της μηχανής για τη δημιουργία μιας παρτίδας παραγωγής εξετάζονται, αξιολογούνται και αναπτύσσονται υπολογιστικές τεχνικές, με σκοπό την εξαγωγή μίας βέλτιστης λύσης ή σειράς καλών λύσεων σε εύλογο από πρακτικής άποψης χρόνο. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, ανήκουν στην κατηγορία των μετα-ευρετικών (meta-heuristic) τεχνικών βελτιστοποίησης, έτσι όπως αυτές βρίσκουν εφαρμογή στο ευρύτερο γνωστικό πεδίο της επίλυσης προβλημάτων στοιβαγμού (packing problems), και είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithm) και η Προσομοιωμένη Ανόπτωση (Simulated Annealing).

1.3 Δομή Διατριβής

Η δομή της διατριβής, που ακολουθεί, είναι η εξής:

Στο κεφάλαιο 2 επιχειρείται μια γενική περιγραφή των κυριοτέρων τεχνολογιών ΣΚ που απαντώνται στον κατασκευαστικό τομέα, καθώς και των πεδίων στα οποία εφαρμόζονται αυτές. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται και αναλύεται η διαδικασία της Στερεολιθογραφίας. Πιο

συγκεκριμένα αναλύονται ο χρόνος, το κόστος και η ποιότητα κατασκευής ενός κομματιού/αντικειμένου και αξιολογείται η σημασία των διαφόρων παραμέτρων κατασκευής, έτσι ώστε να καθοριστούν τα κριτήρια λήψης αποφάσεων κατά τον προγραμματισμό τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν τελικά στα υπολογιστικά εργαλεία και κώδικες που αναπτύχτηκαν.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται και αναλύονται στα συστατικά τους μέρη δύο από τις κυριότερες μετα-ευρετικές τεχνικές βελτιστοποίησης οι οποίες αποτέλεσαν τον κορμό των υπολογιστικών εργαλείων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή και περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) οι οποίοι εμπνέονται από τη βιολογική εξέλιξη και τη σταδιακή προσαρμογή των νέων γενεών σε μεταβαλλόμενες συνθήκες επιβίωσης και οι οποίοι υλοποιούνται σύμφωνα με τις βιολογικές λειτουργίες διασταύρωσης, αναπαραγωγής, μετάλλαξης και επιλογής. Αναλύεται επίσης η τεχνική της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing) η οποία είναι το ψηφιακό/υπολογιστικό ανάλογο της φυσικής διαδικασίας της ανόπτωσης στερεών σωμάτων κρυσταλλικής δομής.

Το κεφάλαιο 5 πραγματεύεται το πρόβλημα της επιλογής του βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής ενός αντικείμενου με τη μέθοδο της Στερεολιθογραφίας. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζεται αρχικά μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μελετών γύρω από το πρόβλημα. Με βάση και τα αποτελέσματα της έρευνας αναπτύσσονται και υλοποιούνται δυο τρόποι επιλογής του βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής, όπου η συμμετοχή του χρήστη στην διαδικασία λήψης απόφασης πραγματοποιείται είτε στην αρχή της διαδικασίας (a priori προσέγγιση) είτε στο τέλος (a posteriori προσέγγιση). Τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται τέσσερις αντιπροσωπευτικές μελέτες περιπτώσεων και συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα από την εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνικών.

Στο κεφάλαιο 6 διερευνάται το πρόβλημα του σχεδιασμού μίας παρτίδας παραγωγής για κατασκευή με χρήση Στερεολιθογραφίας, το οποίο αφορά κυρίως στην βέλτιστη τοποθέτηση πλήθους αντικειμένων στον χώρο της μηχανής. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά η βιβλιογραφική ανασκόπηση των σχετικών μελετών, ειδικότερα γύρω από το διδιάστατο πρόβλημα στοιβαγμού, το οποίο αποτελεί το πλησιέστερο αντίστοιχο του υφιστάμενου προβλήματος. Εξετάζεται επίσης και υλοποιείται ένας ικανός αριθμός μεθοδολογιών στοιβαξης, σε συνδυασμό με μετα-ευρετικές τεχνικές βελτιστοποίησης, οι οποίες εφαρμόζονται και αξιολογούνται μέσω πρότυπων και ειδικά σχεδιασμένων μελετών περιπτώσεων.

Ολοκληρώνοντας, στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα και προτείνονται πιθανές μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις.

2

Τεχνολογίες Στρωματικής Κατασκευής και Εφαρμογές

2.1 Τεχνολογίες Στρωματικής Κατασκευής

Σύμφωνα με τους Kochan et al. [1] η επιστήμη της μορφοποίησης (Shaping Science) είναι η επιστήμη που μελετά πιθανούς τρόπους μεταποίησης υλικών προκειμένου να δημιουργηθούν τριδιάστατα αντικείμενα με καθορισμένη μορφή και συγκεκριμένες λειτουργικές ιδιότητες. Αποτελεί ένα πλαίσιο βασικών θεωριών, αρχών και μεθόδων που αφορούν στην διαδικασία της μορφοποίησης (shaping), ανεξάρτητο από τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές, και χρησιμοποιείται για να κατευθύνει την εφαρμογή αυτών των τεχνικών. Τα διάφορα είδη τεχνικών «μορφοποίησης» που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο ή παρατηρούνται στην φύση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις γενικές κατηγορίες ως εξής.

- **Αφαιρετική Μορφοποίηση (Subtracting Shaping):** Είναι η διαδικασία κατά την οποία το τελικό αντικείμενο σχηματίζεται αφαιρώντας το πλεονάζον υλικό από τον αρχικό όγκο στερεάς πρώτης ύλης, όπως το πλάνισμα, η διάτρηση, η κοπή με λέιζερ κλπ.
- **Εξαναγκασμένη Μορφοποίηση-Διαμόρφωση (Forced Shaping):** Σε αυτήν την διαδικασία ένα αντικείμενο διαμορφώνεται βάσει της δυνατότητας παραμόρφωσης

του υλικού κατασκευής του είτε σε στερεά είτε σε υγρή μορφή όπως συμβαίνει στις διαφορές μεθόδους χύτευσης, σφυρηλάτησης, έγχυσης πλαστικού.

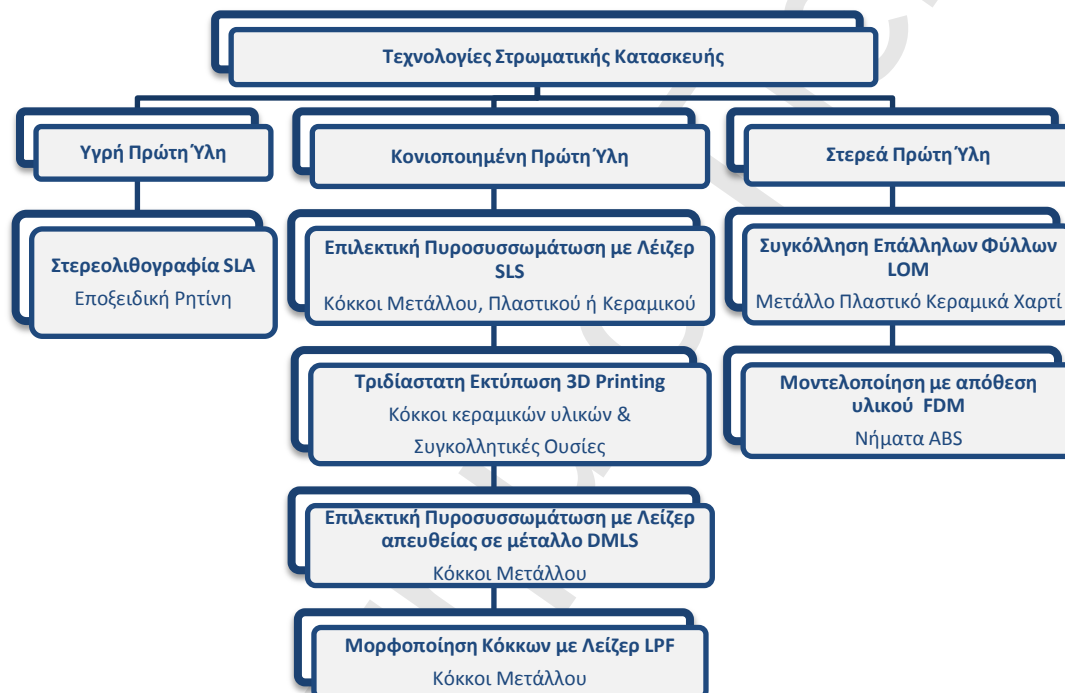
- **Προσθετική Μορφοποίηση (Stacking Shaping):** Αναδυόμενη προς το τέλος της δεκαετίας του '80, η προσθετική μορφοποίηση αποτελεί τη νεώτερη κατηγορία τεχνικών μορφοποίησης. Κατά την προσθετική μορφοποίηση ένα αντικείμενο δημιουργείται με διαδοχική απόθεση λεπτών στρωμάτων κατάλληλης πρώτης ύλης.
- **Εξελικτική Μορφοποίηση (Growth Shaping):** Αυτή τη στιγμή, αυτός ο τύπος διαδικασίας υπάρχει μόνο στα φυσικά συστήματα και δεν μπορεί να αναπαραχθεί από τον άνθρωπο. Παράδειγμα εξελικτικής διαμόρφωσης αποτελεί η διαμόρφωση του σκελετού ενός έμβριου όντος.

Η αφαιρετική και η εξαναγκασμένη μορφοποίηση αποτελούν τις συμβατικότερες και τις πιο ώριμες κατηγορίες μεταξύ των τεσσάρων προαναφερθέντων. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας πάνω από 30 οίκοι παγκοσμίως αναπτύσσουν και εμπορεύονται παραγωγικό εξοπλισμό ο οποίος βασίζεται στις αρχές της προσθετικής μορφοποίησης. Αυτός ο εξοπλισμός διαφοροποιείται ως προς τον τρόπο υλοποίησης και τις φυσικές αρχές που χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ανεξάρτητα από τις διαφορές τους όλες οι εμπλεκόμενες τεχνολογίες στηρίζονται στην βασική αρχή της Προσθετικής Κατασκευής (Additive Fabrication), ήτοι της διαδοχικής στρωματικής κατασκευής ενός αντικειμένου [2, 3]. Για τον λόγο αυτό στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιείται και ο όρος «Στρωματική Κατασκευή» (ΣΚ) εναλλακτικά εκείνου της «Προσθετικής Κατασκευής» (ΠΚ). Οι αντιπροσωπευτικότερες από τις τεχνολογίες αυτές και μία βασική ταξινόμηση με βάση την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη ανά κατηγορία παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-1 [2].

Όλες οι τεχνολογίες ΣΚ μοιράζονται αρκετά κοινά γενικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Ωστόσο, η ανάπτυξη αλλά και η υιοθέτησή τους από τον παραγωγικό τομέα βασίζεται στις νέες δυνατότητες και τις εφαρμογές που προσφέρει η εκάστοτε τεχνολογία, όπως αυτές διαμορφώνονται από τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των αντικειμένων/κομματιών, τη χρησιμοποιούμενη φυσική διαδικασία, καθώς και την απόδοσή της (ταχύτητα κατασκευής, μηχανική αντοχή κλπ).

Ένα από τα ελκυστικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των τεχνολογιών ΣΚ είναι η γεωμετρική ανεξαρτησία των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν. Αντικείμενα, τα οποία μπορούν να διαθέτουν μορφολογικά χαρακτηριστικά ελεύθερης γεωμετρίας ακόμα και στοιχειώδους μεγέθους, μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα σε αντίθεση με τις κλασσικές κατασκευαστικές τεχνολογίες. Αυτή η παρεχόμενη ευελιξία ως προς το εύρος των παραγόμενων αντικειμένων

καθιστούν τις τεχνολογίες ΣΚ ιδιαίτερα κατάλληλες για κατασκευή εξατομικευμένων αντικειμένων σε μικρές παρτίδες. Το μέγεθος του παραγόμενου αντικειμένου είναι συνισταμένη της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας ΣΚ και του τρόπου υλοποίησής της. Οι τεχνολογίες της Επιλεκτικής (πυρο-)Συρρσωμάτωσης με Λείζερ (Selective Laser Sintering-SLS), της Στερεολιθογραφίας (Stereolithography-SLA) και της Μοντελοποίησης με Εναπόθεση Υλικού (Fused Deposition Modeling-FDM) π.χ. χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μεσαίου μεγέθους αντικειμένων ενώ για πολύ μεγάλου μεγέθους αντικείμενα η χρήση τους είναι περιορισμένη λόγω του απαγορευτικού κόστους, της χαμηλής σχετικά απόδοσης καθώς και της μη εμπορικής διαθεσιμότητας κατάλληλου εξοπλισμού [3,4,5].

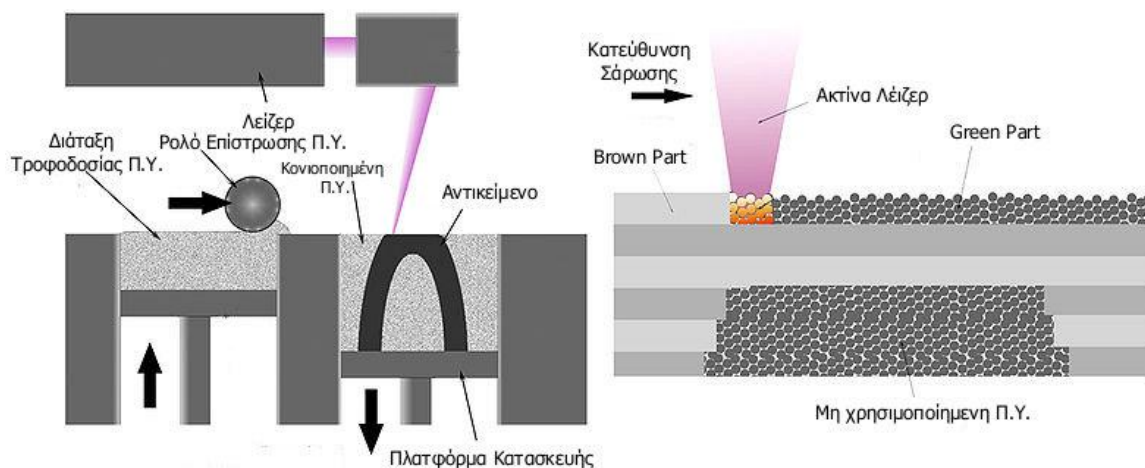


Σχήμα 2-1 Ταξινόμηση των τεχνολογιών ΣΚ σύμφωνα με την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη.

Ο συνδυασμός της ελευθερίας ως προς τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που δύνανται να κατασκευαστούν με τη χρήση τεχνολογιών ΣΚ καθώς και ως προς τον όγκο παραγωγής, διευρύνει τις προοπτικές για χρήση τους σε ποικίλες καινοτόμες εφαρμογές (π.χ. ιατρικές εφαρμογές όπως δόντια, κόκκαλα, μοσχεύματα κλπ). Εντούτοις, η γεωμετρική ελευθερία μερικών διαδικασιών περιορίζεται σε κάποιες περιπτώσεις [3], από την ανάγκη να δημιουργηθούν και μετέπειτα να αφαιρεθούν κατάλληλες δομές στήριξης (support structure) κάτω από το κατασκευαζόμενο αντικείμενο και μέσα στις εσωτερικές κοιλότητές του. Ένα επιπλέον πρόβλημα σχετίζεται με την δυσκολία αφαίρεσης μη στερεοποιημένου υλικού που συγκεντρώνεται στις εκάστοτε κλειστές κοιλότητες των αντικειμένων.

2.1.1 Επιλεκτική (πυρο-) Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering-SLS)

Η διαδικασία της Επιλεκτικής (πυρο-)Συσσωμάτωσης με Λείζερ (Selective Laser Sintering-SLS) [6] αναπτύχθηκε από την DTM Corporation στις Ηνωμένες Πολιτείες στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Η διαδικασία χρησιμοποιεί ένα υψηλής ισχύος λέιζερ CO₂ προκειμένου να μπορεί να κατεργαστεί μια ποικιλία κονιοποιημένης πρώτης ύλης. Κατά αυτό τον τρόπο η διαδικασία SLS μπορεί να χρησιμοποιήσει ως πρώτη ύλη νάιλον, γυαλί, ελαστομερή υλικά, κεριά, κεραμικά υλικά καθώς και συγκεκριμένα κράματα μετάλλων. Η κατασκευή ενός αντικειμένου με χρήση SLS πραγματοποιείται μέσω της επαναληπτικής απόθεσης στρώσεων κατάλληλου πάχους πρώτης ύλης σε κόνη και της επιλεκτικής θέρμανσης τους με λέιζερ προκειμένου να προκληθεί η κατά τόπους συσσωμάτωση/προσκόλληση των σωματιδίων της πρώτης ύλης (βλ. Σχήμα 2-2). Για κάποια υλικά μπορεί να απαιτηθεί και σκλήρυνση εκ των υστέρων.



Σχήμα 2-2 Επιλεκτική (Πυρο-)Συσσωμάτωση με Λείζερ (SLS).

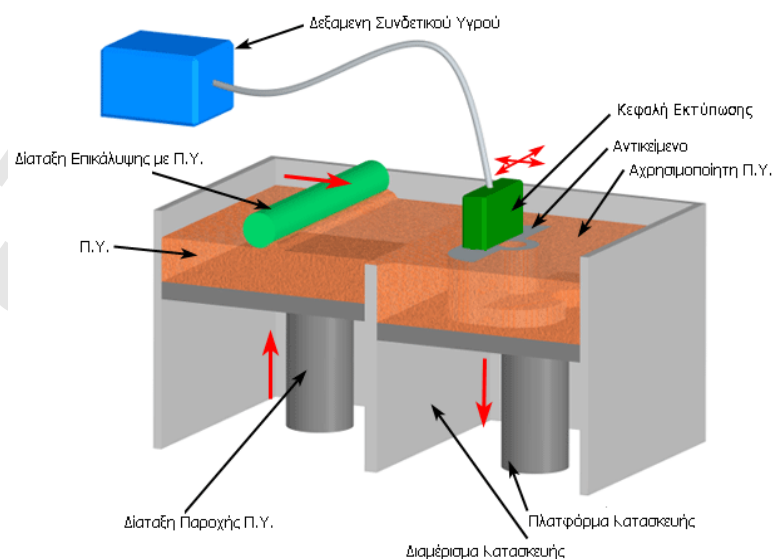
Η διεργασία SLS μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε εύτηκτο υλικό, ακόμα και μέταλλο, αν το λέιζερ είναι αρκετά ισχυρό. Στην πράξη, για μεταλλική κόνη η οποία διαθέτει επικάλυψη με θερμοπλαστικό υλικό χρησιμοποιείται μία διαδικασία έμμεσης (πυρο-) συσσωμάτωσης δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο εφαρμόζεται η δέσμη λέιζερ με αποτέλεσμα το συνθετικό υλικό να λειώσει και να συνδέσει τα σωματίδια της μεταλλικής κόνης σε έναν χαλαρό συνδετικό σχηματισμό προκειμένου να σχηματιστεί το επιθυμητό σχήμα. Το αποτέλεσμα της πρώτης φάσης ονομάζεται «πράσινο εξάρτημα» (Green Part). Θα πρέπει να τονιστεί ότι το λέιζερ πρέπει να έχει κατάλληλη ισχύ ώστε να λειώσει μόνο το συνθετικό υλικό. Στη δεύτερη φάση κατεργασίας, το «πράσινο εξάρτημα» υφίσταται επεξεργασία, σε κατάλληλο φούρνο, όπου το συνδετικό υλικό καίγεται και η μεταλλική κόνη συγκολλάται σε έναν πιο ισχυρό συνδετικό σχηματισμό. Το

εξάρτημα το οποίο προκύπτει ονομάζεται «καφέ εξάρτημα» (Brown Part). Αν δεν υποστεί κάποια πρόσθετη επεξεργασία, το εξάρτημα θα είναι αρκετά πορώδες λόγω του χώρου που καταλάμβανε προηγουμένως το συνθετικό υλικό που κάηκε. Για να μειωθεί η πορώδης μορφή του αντικειμένου, προστίθεται μέσα στο φούρνο ένα δεύτερο υλικό, ο «διηθητής» (infiltrator). Ο μεταλλικός διηθητής υγροποιείται υπό την υψηλή θερμοκρασία του φούρνου και διηθείται μέσα στο καφέ εξάρτημα εκμεταλλευόμενο τις τριχοειδείς δράσεις που αναπτύσσονται.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η σχετικά υψηλή μηχανική αντοχή του αντικειμένου που κατασκευάζεται καθώς και η δυνατότητα επιλογής από μια ευρεία γκάμα πρώτων υλών. Επίσης, δεν απαιτείται δομή υποστήριξης επειδή τα κενά κάθε στρώσης γεμίζουν από την εναπομείνουσα ανεπεξέργαστη κόνη. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η σχετικά μεγάλη τραχύτητα των επιφανειών του τελικού αντικειμένου, η χαμηλή ακρίβεια καθώς και η σχετικά πορώδης υφή του [7].

2.1.2 Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)

Η μέθοδος της τριδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing) αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (Massachusetts Institution of Technology), και πήρε το όνομά της από την ομοιότητα που παρουσιάζει με την εκτύπωση ψεκασμού (inkjet printing). Στην τριδιάστατη εκτύπωση, αντί για μελάνι εγχύεται ένα υγρό συνδετικό υλικό. Η κατασκευή ενός αντικειμένου με χρήση της τριδιάστατης εκτύπωσης πραγματοποιείται μέσω της επαναληπτικής απόθεσης στρώσεων κατάλληλου πάχους κεραμικής κόνωσης και του επιλεκτικού ψεκασμού υγρού συνδετικού υλικού προκειμένου να προκληθεί προσκόλληση των σωματιδίων της πρώτης ύλης. Τέλος, εφαρμόζεται θερμική κατεργασία για την στερεοποίηση του υπό κατασκευή αντικειμένου (βλ. Σχήμα 2-3).

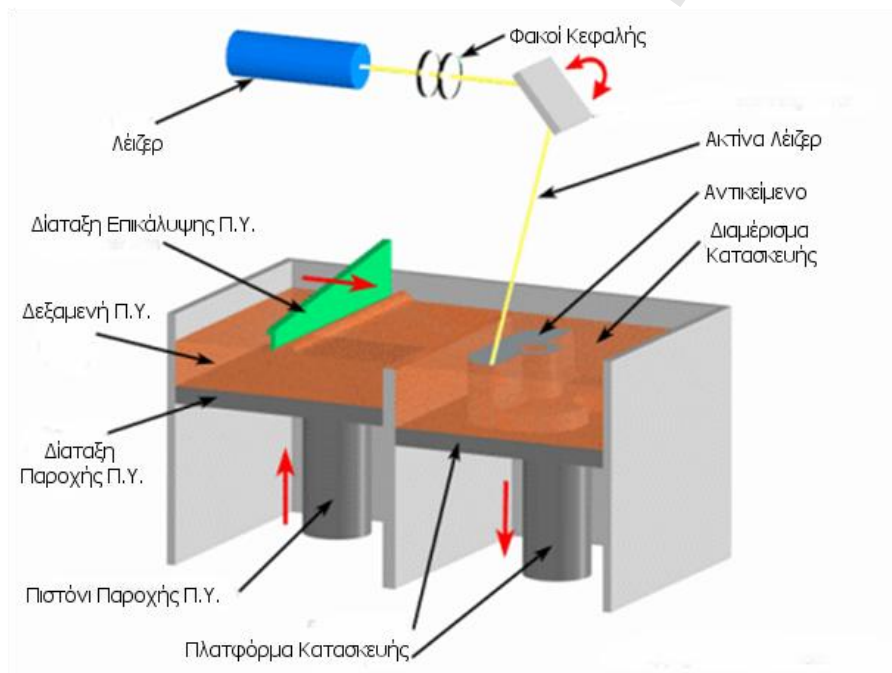


Σχήμα 2-3 Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D-Printing).

Η τεχνολογία της τριδιάστατης εκτύπωσης θεωρείται ιδανική για τη κατασκευή καλουπιών χύτευσης, εξαιτίας της δυνατότητας δημιουργίας ενός ενιαίου καλουπιού αποτελούμενου και από το κέλυφος και από τους πυρήνες. Ωστόσο, τα καλούπια χύτευσης που παράγονται με τις υφιστάμενες υλοποιήσεις δεν έχουν ικανοποιητική ποιότητα επιφανειών [6, 7, 8].

2.1.3 Επιλεκτική (πυρο-)Συσσωμάτωση με λέιζερ απευθείας σε μέταλλο (Direct Metal Laser Sintering - DMLS)

Η μέθοδος DMLS [3] (Direct Metal Laser Sintering) αναπτύχθηκε περί το 1994 από κοινού από τις εταιρείες Rapid Prototyping Innovations (RPI) και EOS GmbH και αποτελούν την πρώτη εμπορική μέθοδο ΣΚ παραγωγής μεταλλικών αντικειμένων χωρίς να απαιτούνται συνδεδετικά υλικά ή διηθητές. Έτσι χρησιμοποιείται υψηλής ισχύος λέιζερ το οποίο συσσωματώνει απ'ευθείας την μεταλλική κονιοποιημένη πρώτη ύλη. Κατά αυτόν τον τρόπο το κατασκευαζόμενο αντικείμενο διατηρεί τις ιδιότητες της αρχικής πρώτης ύλης.



Σχήμα 2-4 Επιλεκτική (πυρο-)Συσσωμάτωση με Λείζερ απευθείας σε μέταλλο (DMLS).

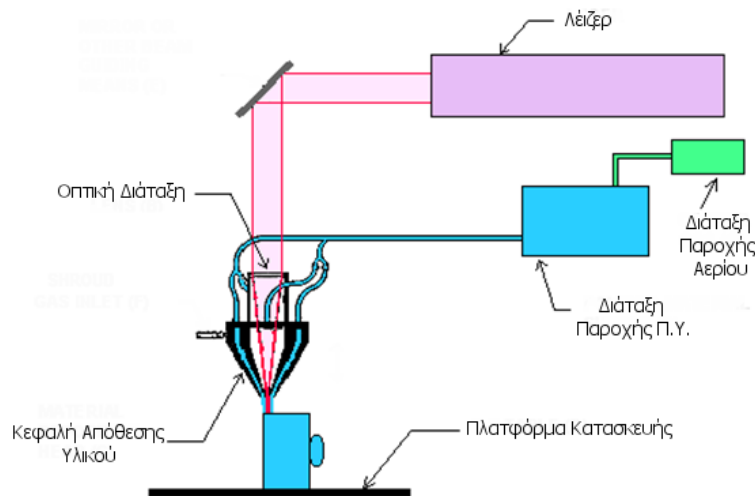
Η αποφυγή χρησιμοποίησης συνδεδετικού υλικού βοηθάει στην κατασκευή ενός μεταλλικού αντικειμένου υψηλής πυκνότητας (~95%) σε σύγκριση με την πυκνότητα της τάξης του 75% που παράγει η απλή SLS [9, 10]. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου σε σχέση με την SLS είναι το υψηλότερο επίπεδο λεπτομέρειας, εξαιτίας της δυνατότητας επιλογής λεπτότερου πάχους στρώματος κατασκευής και πιο λεπτόκοκκης πρώτης ύλης. Η μέθοδος επιτρέπει την επιλογή πρώτης ύλης από μια ευρεία γκάμα υλικών όπως κράματα ατσάλιου, κοβαλτίου-χρωμίου,

αλουμίνιο, τιτάνιο κ.α. Η διαδικασία μπορεί να παράγει αντικείμενα με δύο διαφορετικούς τρόπους υλοποίησης, οι οποίοι διαφέρουν στον τρόπο εναπόθεσης της πρώτης ύλης πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Στην πρώτη μέθοδο η μεταλλική πρώτη ύλη βρίσκεται σε κατάλληλη κεφαλή η οποία φροντίζει να λιώσει τη μεταλλική κόνη και να την εναποθέσει σε λεπτά στρώματα πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Στην δεύτερη μέθοδο η μεταλλική πρώτη ύλη εναποτίθεται ομοιόμορφα πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής μέσω μιας ειδικής διάταξης και στη συνέχεια το λέιζερ συσσωματώνει μόνο την κόνη που ανήκει στο σχήμα της επιθυμητής διατομής (βλ. Σχήμα 2-4). Η πρώτη μέθοδος παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερα από ένα υλικά για το ίδιο αντικείμενο ενώ η δεύτερη περιορίζεται στην αποκλειστική χρήση ενός και μόνου υλικού.

2.1.4 Μορφοποίηση κόκκων με λέιζερ (Laser Powder Forming – LPF)

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον κινείται γύρω από την ανάπτυξη των τεχνολογιών μορφοποίησης κόκκων με λέιζερ (Laser Powder Forming LPF). Το κυρίαρχο πλεονέκτημα αυτής της οικογένειας των τεχνολογιών είναι ότι μπορούν να παράγουν αμιγώς μεταλλικά αντικείμενα με καλές μεταλλουργικές ιδιότητες σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ένα παράδειγμα αυτής της οικογένειας τεχνολογιών αποτελεί η τεχνική των Sandia National Labs η οποία και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-5. Μία υψηλής ενεργείας ακτίνα λέιζερ χρησιμοποιείται για να τήξει τους μεταλλικούς κόκκους οι οποίοι παρέχονται ομοαξονικά με την ακτίνα λέιζερ, μέσω κατάλληλης κεφαλής απόθεσης υλικού. Η ακτίνα λέιζερ συνήθως διέρχεται διαμέσου του κεντρικού άξονα της κεφαλής και συγκεντρώνεται σε ένα σημείο (μικρή περιοχή), χρησιμοποιώντας έναν ή περισσότερους φακούς. Στην συγκεκριμένη μέθοδο η διάταξη της κεφαλής παραμένει συνήθως σταθερή ενώ η πλατφόρμα κατασκευής έχει τη δυνατότητα να κινείται κατά τους άξονες X και Y έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η σάρωση μιας διατομής του αντικείμενου. Οι μεταλλικοί κόκκοι τροφοδοτούνται στην κεφαλή είτε με την βοήθεια της δύναμης της βαρύτητας είτε χρησιμοποιώντας πεπιεσμένο αέριο. Ακόμα και εάν το πεπιεσμένο αέριο δεν χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία της κεφαλής με πρώτη ύλη, χρησιμοποιείται για την απομόνωση της δεξαμενής κατασκευής από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερος έλεγχος των τελικών ιδιοτήτων του κατασκευαζόμενου αντικείμενου και καλύτερη συγκόλληση των στρωμάτων από τα οποία αποτελείται. Ως πρώτη ύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ευρεία γκάμα υλικών όπως χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός κ.α. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της παραγωγής η πρώτη ύλη μπορεί να εναλλάσσεται και ότι ως μέθοδος έχει λιγότερους περιορισμούς σε σχέση με την κλασική SLS διαδικασία και δεν απαιτεί δευτερεύουσες διεργασίες

φινιρίσματος. Η διαδικασία χρησιμοποιείται όχι μόνο για την κατασκευή αλλά και για την επιδιόρθωση αντικειμένων λόγω της εγγενούς ευελιξίας που παρουσιάζει.



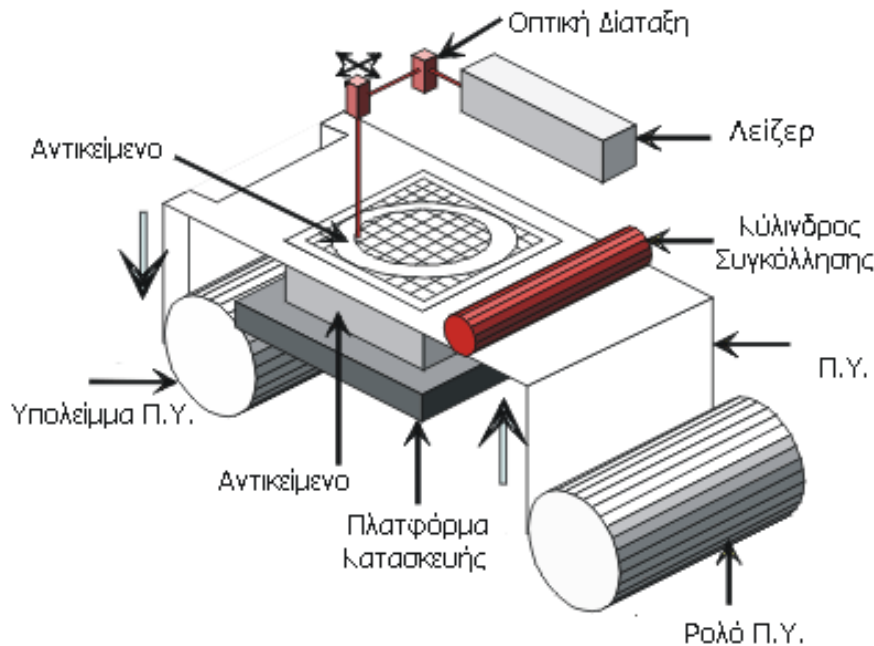
Σχήμα 2-5 Μορφοποίηση κόκκων με λέιζερ.

2.1.5 Συγκόλληση Επαλλήλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing-LOM)

Η διεργασία της συγκόλλησης επαλλήλων φύλλων (Laminated Object Manufacturing - LOM) διατέθηκε στο εμπόριο από την εταιρεία Helisys Inc βασιζόμενη στις επιστημονικές εργασίες του Nakagawa για ταχεία κατασκευή εργαλείων μέσω συγκόλλησης επαλλήλων μεταλλικών φύλλων [6]. Η διαδικασία παράγει ένα εξάρτημα περικόπτοντας με λέιζερ και συγκολλώντας επάλληλες στρώσεις υλικών που παραδίδονται σε μορφή φύλλων με επικάλυψη θερμικής κόλλας. Η διαδικασία κατασκευής ενός αντικειμένου λειτουργεί σύμφωνα με τα εξής βήματα:

1. Η πρώτη ύλη τροφοδοτείται από ένα συνεχές ρολό στη μια πλευρά της μηχανής και το υπόλειμμα παραλαμβάνεται από την άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6. Ένας θερμός κύλινδρος είναι επιφορτισμένος με την παροχή κατάλληλης πίεσης και θερμότητας οι οποίες είναι απαραίτητες για την συγκόλληση των επαλλήλων στρωμάτων υλικού.
2. Μετά από την απόθεση μιας στρώσης, ένα λέιζερ διατρέχει την καμπύλη που αντιστοιχεί στο εξωτερικό ή/και εσωτερικό περίγραμμα της στρώσης της τρέχουσας διατομής. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα λέιζερ CO₂ ισχύος 25-50 Watt. Κατά την φάση αυτή το λέιζερ διατρέχει μόνο τις ισοϋψείς καμπύλες. Αυτό κάνει την διεργασία πιο αποδοτική από τις διεργασίες που απαιτούν πλήρη σάρωση της διατομής. Οι περιοχές της στρώσης που βρίσκονται εκτός του περιγράμματος της διατομής διαγραμμίζονται από το λέιζερ (δηλ κόβονται σε μικρά κομμάτια που ονομάζονται πλακίδια ή tiles).

3. Αφού κοπούν και συγκολληθούν όλες οι στρώσεις, το αποτέλεσμα είναι ένα αντικείμενο εγκιβωτισμένο σε ένα μπλοκ υλικού υποστήριξης. Το υλικό αυτό στη συνέχεια κόβεται σε κομμάτια κατά μήκος των ευθειών της διαγράμμισης.
4. Το αντικείμενο που προκύπτει μπορεί κατόπιν να επικαλυφθεί με ένα στεγανωτικό υλικό ώστε να προφυλαχθεί από την υγρασία



Σχήμα 2-6 Συγκόλληση Επαλλήλων Φύλλων (LOM).

Η διαδικασία της συγκόλλησης επαλλήλων φύλλων είναι εγγενώς κατάλληλη για την κατασκευή ογκωδέστερων σχετικά αντικειμένων καθώς το λέιζερ ακολουθεί αναλογικά μικρότερες διαδρομές για την δημιουργία των στρωμάτων. Επίσης, η διαδικασία χαρακτηρίζεται από την ευκολία διαχείρισης μιας ευρείας γκάμας πρώτων υλών όπως χαρτί, πλαστικό και μέταλλο.

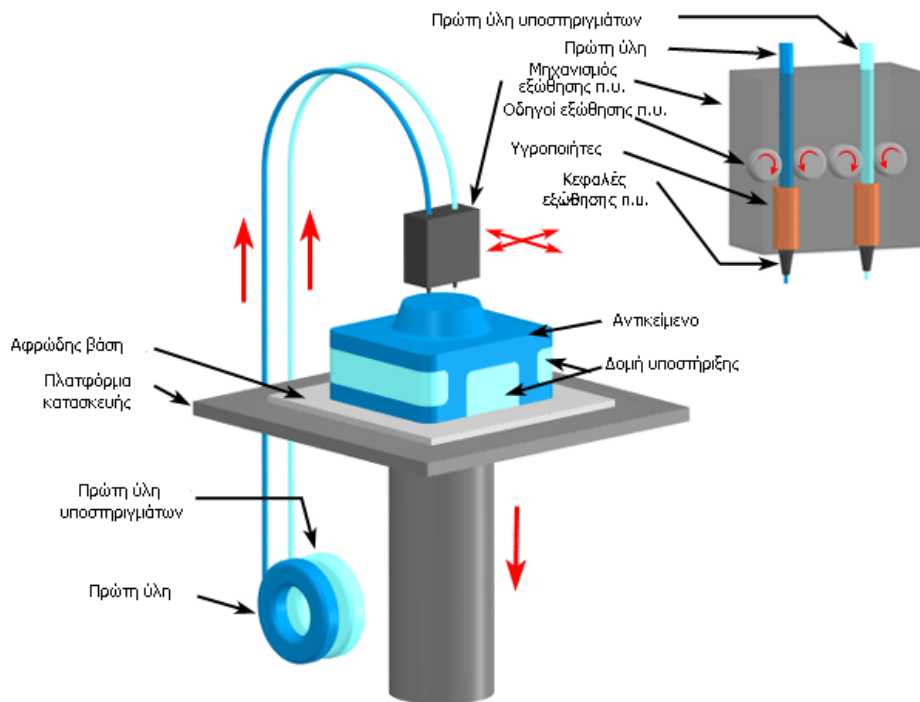
Ένα από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα επίσης της μεθόδου, είναι και η παρουσία υλικού υποστήριξης γύρω από το κατασκευαζόμενο αντικείμενο. Καταρχάς, καθίσταται περιττή η δημιουργία πλέγματος υποστήριξης καθώς το εξάρτημα κατασκευάζεται εγκιβωτισμένο σε ένα μπλοκ υλικού υποστήριξης, σταθεροποιώντας έτσι ολόκληρη τη γεωμετρία κατά την κατασκευαστική φάση. Ωστόσο, ο εγκιβωτισμός του τελικού αντικείμενου μέσα σε ένα μπλοκ υποστηρικτικού υλικού δημιουργεί προβλήματα κατά την διαδικασία απόρριψης του περισσεύματος του υλικού μετά από τη δημιουργία του εξαρτήματος. Απαιτείται μια προσεκτική διεργασία καθαρισμού με το χέρι για να εξασφαλιστεί ότι θα αφαιρεθεί μόνο το άχρηστο υλικό και ότι δε θα υποστούν ρήγματα κάποιες εύθραυστες περιοχές του εξαρτήματος. Επιπρόσθετα, όλα τα κοίλα μορφολογικά χαρακτηριστικά με κλειστές επιφάνειες δεν μπορούν να δημιουργηθούν σαν

ένα ενιαίο τμήμα λόγω του περισσεύματος του υλικού που παγιδεύεται στο εσωτερικό των κοιλοτήτων. Επίσης, η μεγαλύτερη ποσότητα του υλικού που καταναλώνει η μέθοδος δεν συνεισφέρει στο ίδιο το εξάρτημα. Το κόστος αυτού του άχρηστου υπολείμματος μπορεί να είναι σημαντικό όταν χρησιμοποιούνται υλικά πιο ακριβά από το χαρτί.

2.1.6 Μοντελοποίηση με απόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM)

Η διαδικασία μοντελοποίησης με απόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling- FDM) (σε κατάσταση τήξης) [6] αναπτύχθηκε εμπορικά από την εταιρία Stratasys το 1990. Μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας μπορούν να παραχθούν αντικείμενα που έχουν ως πρώτη ύλη πλαστικό ABS ή άλλα πολυμερή γνωστά για την ανθεκτικότητά τους. Έτσι, η μέθοδος αυτή συχνά επιλέγεται όταν η μηχανική αντοχή καθίσταται κρίσιμη για το κατασκευαζόμενο αντικείμενο. Όπως και οι υπόλοιπες μέθοδοι η μοντελοποίηση με απόθεση υλικού λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή της διαδοχικής στρωματικής κατασκευής. Κάθε στρώση παράγεται μέσω της εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού σε υγρή κατάσταση. Το υλικό εξωθείται μέσω κατάλληλης κεφαλής σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης του. Η κεφαλή βρίσκεται τοποθετημένη σε κατάλληλη διάταξη η οποία της επιτρέπει να κινείται σε δύο άξονες (X και Y) και να εναποθέτει ένα λεπτό στρώμα πλαστικού πάνω στη πλατφόρμα κατασκευής (Σχήμα 2-7). Όλη η διάταξη λειτουργεί εγκιβωτισμένη σε κατάλληλο θάλαμο, ο οποίος διατηρεί την θερμοκρασία της διάταξης λίγο πιο χαμηλά από την θερμοκρασία τήξης της πρώτης ύλης. Με αυτόν τον τρόπο μόνο μια μικρή ποσότητα θερμικής ενέργειας πρέπει να διοχετεύεται στην κεφαλή προκειμένου να τηχθεί η πρώτη ύλη, καθιστώντας την διαδικασία εξαιρετικά αποδοτική και καλύτερα ελεγχόμενη.

Η διαδικασία της μοντελοποίησης με απόθεση υλικού απαιτεί την χρησιμοποίηση πλέγματος υποστήριξης για κάθε μη αυτό-υποστηριζόμενη επιφάνεια. Υπάρχει πληθώρα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία του πλέγματος υποστήριξης όπως νάιλον, πολυμερή και κεριά. Η εισαγωγή του πλαστικού ABS ως πρώτης ύλης ώθησε εμπορικά την συγκεκριμένη μέθοδο προσδίδοντας καλύτερη συνοχή μεταξύ των στρωμάτων από τα οποία αποτελείται ένα αντικείμενο και εν τέλει βελτωμένες μηχανικές ιδιότητες. Επίσης, ως πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου λογίζεται η ευκολία απομάκρυνσης της δομής υποστήριξης καθώς έχουν γίνει εμπορικά διαθέσιμα υδατοδιαλυτά υλικά κατασκευής του πλέγματος υποστήριξης. Η πρόσφατη εισαγωγή πολυανθρακικής (polycarbonate), μεταλλικής και κεραμικής πρώτης ύλης, διέυρυνε τις δυνατότητες εφαρμογής της μεθόδου αναφορικά με τους περιορισμούς της θερμοκρασίας και της μηχανικής αντοχής [7].



Σχήμα 2-7 Μοντελοποίηση με Απόθεση Υλικού (FDM)

2.1.7 Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SL)

Ο όρος Στερεολιθογραφία [6] πρωτοχρησιμοποιήθηκε το 1986 από τον Charles W. Hull για να περιγράψει μια μέθοδο, καθώς και την αντίστοιχη συσκευή, για την δημιουργία στερεών αντικείμενων μέσω διαδοχικής απόθεσης φωτοπολυμερούς ρητίνης και επιλεκτικής έκθεσής της σε υπεριώδη ακτινοβολία. Έτσι η διαδικασία της Στερεολιθογραφίας δημιουργεί ένα στερεό αντικείμενο στερεοποιώντας μέσω ακτίνας λέιζερ διαδοχικές διατομές του αντικείμενου στην επιφάνεια υγρής ρητίνης. Η Στερεολιθογραφία απαιτεί τη χρήση πλέγματος υποστήριξης για να σταθεροποιήσει το αντικείμενο στην πλατφόρμα κατασκευής καθώς και για να αποτρέψει δομικές στρεβλώσεις ή την πιθανή καταστροφή του αντικειμένου από τα κινούμενα μέρη της μηχανής. Το πλέγμα υποστήριξης δημιουργείται αυτόματα κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας των τριδιάστατων μοντέλων CAD και θα πρέπει να αφαιρεθεί με μεγάλη προσοχή από το ολοκληρωμένο προϊόν, διαδικασία η οποία επαφίεται στην ικανότητα του χειρίστη της μηχανής. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και η επιφανειακή ποιότητα των αντικειμένων που δύναται να παράγει. Εκτενής ανάλυση της μεθόδου της Στερεολιθογραφίας παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 δεδομένου ότι η συγκεκριμένη διεργασία αποτελεί το κυρίως θέμα της παρούσας διατριβής.

2.2 Εφαρμογές Τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής

2.2.1 Ταχεία Πρωτοτυποποίηση

Οι τεχνολογίες ΣΚ υιοθετήθηκαν αρχικά ως μέσο κατασκευής φυσικών πρωτοτύπων και μοντέλων νέων προϊόντων που βρίσκονται στη φάση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης. Στο γεγονός αυτό αποδίδεται και η αρχική ονομασία με την οποία έγιναν γνωστές στο ευρύτερο κοινό, δηλαδή ως τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης (Rapid Prototyping). Οι τεχνολογίες αυτές επέτρεψαν στους σχεδιαστές να υλοποιούν τις ιδέες τους σε φυσικά πρωτότυπα τα οποία προσεγγίζουν το τελικό προϊόν ως προς τη γεωμετρική μορφή (γεωμετρικά πρωτότυπα – geometric prototypes) και τη λειτουργία. Τα φυσικά αυτά πρωτότυπα μπορούν να λειτουργήσουν ως απτό μέσο επικοινωνίας μεταξύ των μελών της σχεδιαστικής ομάδας, των εξωτερικών συνεργατών (προμηθευτές, υπεργολάβοι, κλπ) αλλά και μεταξύ της ομάδας και των τελικών πελατών ή χρηστών. Επίσης, τα φυσικά πρωτότυπα αποτελούν μια ασφαλιστική δικλίδα για την πρόληψη σχεδιαστικών λαθών όσον αφορά τη λειτουργικότητα, την αισθητική, την εργονομία και την πολυπλοκότητα της συναρμολόγησης (λειτουργικά πρωτότυπα-functional prototypes), γεγονός το οποίο συνεισφέρει τόσο στη μείωση του κόστους όσο και στη ελαχιστοποίηση του χρόνου για την εισαγωγή ενός νέου προϊόντος στην αγορά [11, 12, 13, 14].

Η χρησιμοποίηση του όρου ταχεία πρωτοτυποποίηση αν και ευρέως αποδεκτή αποδεικνύεται σχετική, καθώς το επίθετο "ταχεία" αναφέρεται κυρίως στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας μετατροπής ενός μοντέλου CAD σε φυσικό πρωτότυπο και λιγότερο στην ταχύτητα των ίδιων των τεχνολογιών. Ο χρόνος παραγωγής ενός αντικείμενου αναλόγως των διαστάσεων του κυμαίνεται από ώρες μέχρι ημέρες, ειδικά όταν το αντικείμενο αποτελείται από μορφολογικά χαρακτηριστικά υψηλής πολυπλοκότητας ή όταν απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι για την "ωρίμανση" του υλικού του. Ωστόσο, ακόμα και έτσι οι χρόνοι παραγωγής που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της κατασκευής ενός φυσικού πρωτοτύπου είναι συνήθως πολύ μικρότεροι σε σχέση με τους χρόνους που απαιτούνται για την κατασκευή του ίδιου αντικείμενου με τις κλασικές/συμβατικές μεθόδους παραγωγής [11].

Σε γενικές γραμμές τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η υιοθέτηση τεχνολογιών ταχείας πρωτοτυποποίησης μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Μείωση της δυσκολίας παραγωγής ενός πολύπλοκου μορφολογικά αντικείμενου μέσω της μετατροπής του σε σύνολο διαδοχικών λεπτών στρωμάτων κατάλληλα διαμορφωμένης πρώτης ύλης.

- Ευκολία υιοθέτησης των τεχνολογιών καθώς απαιτείται σχετικά σύντομη διαδικασία προγραμματισμού και μεταπαρασκευαστικών εργασιών.
- Αποφυγή του υψηλού κόστους χρησιμοποίησης εξειδικευμένων εργαλείων (π.χ. μήτρες, καλούπια, κλπ) για την παραγωγή κάθε φυσικού πρωτοτύπου.
- Γρηγορότερη και ευκολότερη ενσωμάτωση καινοτομιών σε ένα νέο προϊόν.
- Επιτάχυνση της διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος με την ταυτόχρονη εκτέλεση μεταγενέστερων εργασιών ή φάσεων όπως ο σχεδιασμός και η κατασκευή του καλουπιού ενός πολύπλοκου γεωμετρικά προϊόντος.

2.2.2 Ταχεία κατασκευή εργαλείων παραγωγής

Ο τομέας της κατασκευής εργαλείων παραγωγής (Rapid Tooling) [3, 15, 16] αποτελεί το δεύτερο πεδίο που υιοθέτησε τις τεχνολογίες ΣΚ. Με τον όρο Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (ΤΚΕ) προσδιορίζεται η δημιουργία εργαλείων, για περιορισμένου μεγέθους παραγωγή, μέσω τεχνολογιών ΣΚ. Τα συγκεκριμένα εργαλεία έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής και αντοχή σε σχέση με τα αντίστοιχα εργαλεία που έχουν κατασκευαστεί με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής. Ωστόσο, είναι ιδανικά για την παραγωγή μικρού σχετικά αριθμού προϊόντων παρουσιάζοντας σημαντικά μικρότερο κόστος και μικρότερους συνολικά χρόνους κατασκευής σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Ο πιο συχνός τύπος παραγόμενων εργαλείων κατασκευασμένων με χρήση τεχνολογιών ΣΚ είναι τα καλούπια και οι μήτρες που προορίζονται κυρίως για κατασκευή πλαστικών προϊόντων. Οι μέθοδοι ταχείας κατασκευής εργαλείων μπορούν να διαχωριστούν σε έμμεσες και άμεσες, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο ενσωματώνουν τις τεχνολογίες ΣΚ. Επιπλέον κάθε κατηγορία μεθόδων μπορεί να διαχωριστεί περαιτέρω ανάλογα με την πρώτη ύλη των εργαλείων που χρησιμοποιεί (Πινάκας 2.1). Κατά αυτόν τον τρόπο έχουμε:

1. τις μεθόδους άμεσης κατασκευής εργαλείων, όπου το εργαλείο παράγεται απ'ευθείας με την χρήση μιας τεχνολογίας ΣΚ και
2. τις μεθόδους έμμεσης κατασκευής όπου οι τεχνολογίες ΣΚ χρησιμοποιούνται είτε για την κατασκευή των προτύπων (patterns) για την αποτύπωση της γεωμετρίας σε παραδοσιακές διαδικασίες χύτευσης (όπως η χύτευση εν κενώ και η χύτευση με τη μέθοδο του χαμένου κεριού) είτε για την κατασκευή μιας ενδιάμεσης μορφής του εργαλείου το οποίο όμως υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία έτσι ώστε να αυξηθεί η αντοχή του.

Πρώτη Ύλη	Άμεση Κατασκευή	Έμμεση Κατασκευή
Πολυμερές	Bridge Tooling CuPA-SLS (3D-SYSTEMS) SLS/SLA Soft Shells	Silicon Rubber RTV Swift Tooling
Μεταλλικό	DMLS (EOS) Rapid Steel 2 LaserForm (3d-Systems) 3d Printing (ProMetal)	KelTool (3D Systems) Cast Tools Metal Spraying Metal Deposition

Πίνακας 2-1 Κατηγοριοποίηση μεθόδων ΤΚΕ.

2.2.3 Ταχεία Παράγωγή

Ο όρος Ταχεία Παράγωγή (Rapid Manufacturing) έχει ερμηνευθεί με ποικίλους τρόπους επικαλύπτοντας κατά καιρούς μέρος από τα υπόλοιπα πεδία εφαρμογής των τεχνολογιών ΣΚ. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας την διεθνή επικρατούσα τάση, ως Ταχεία Παράγωγή ορίζεται η χρήση τεχνολογιών ΣΚ προκειμένου να κατασκευαστούν αντικείμενα τα οποία χρησιμοποιούνται άμεσα ως ολοκληρωμένα προϊόντα ή ως συστατικά μέρη/εξαρτήματα ενός ολοκληρωμένου προϊόντος. Η αντικατάσταση των συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής με τεχνολογίες ΣΚ πηγάζει κυρίως από την ανάγκη παράγωγης μικρού αριθμού πολύπλοκων μορφολογικά προϊόντων, τα οποία θα μπορούσαν να παραμετροποιηθούν ατομικά σύμφωνα με τον τελικό χρήστη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους εξατομικευμένης παραγωγής αποτελεί η παράγωγή ακουστικών βαρηκοΐας από την Siemens (Σχήμα 2-8) χρησιμοποιώντας μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών ΣΚ (SLS, SLA, 3D Printing) [17]. Επιπλέον η χρησιμοποίηση τεχνολογιών ΣΚ ως μέσων παραγωγής αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στη βελτιστοποίηση της μορφολογίας των τελικών προϊόντων, εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν υπάρχει σχεδόν κανένας περιορισμός ο οποίος να αφορά στη γεωμετρική και μορφολογική πολυπλοκότητα του τελικού προϊόντος. Ο μηχανικός μπορεί να καθορίσει τις προδιαγραφές και να χρησιμοποιήσει εμπορικά διαθέσιμο λογισμικό [18] προκειμένου να βελτιστοποιήσει τη μορφή σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η βέλτιστη μορφή γίνεται πολύ σύνθετη (π.χ. δημιουργούνται κοιλότητες) γεγονός το οποίο καθιστά δύσκολη ή ακόμα και αδύνατη την παραγωγή της βελτιστοποιημένης αυτής μορφής χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνολογίες. Έτσι ο μηχανικός οδηγείται στην αναπροσαρμογή της μορφής, η οποία λόγω των συμβιβασμών που αναγκαστικά γίνονται, απέχει τελικά αρκετά από την βέλτιστη. Σε αντίθεση η χρησιμοποίηση τεχνολογιών ΣΚ επιτρέπει την κατασκευή της βελτιστοποιημένης εκδοχής του προϊόντος, χωρίς σχεδόν κανένα πρόβλημα.

Η χρησιμοποίηση τεχνολογιών ΣΚ για την παραγωγή τελικών προϊόντων μπορεί να προσδώσει συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με ανταγωνιστικά προϊόντα τα οποία παράγονται με συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής, κάτι το οποίο προκύπτει από το γεγονός ότι η διαδικασία δεν απαιτεί

επιπρόσθετο εξειδικευμένο παραγωγικό εξοπλισμό (zero tooling). Το συγκριτικό πλεονέκτημα παρουσιάζεται όχι μόνο όταν συγκρίνουμε τις τεχνολογίες ΣΚ με διαδικασίες παραγωγής όπως η έγχυση υπό πίεση (injection moulding), αλλά και σε σχέση με εχνολογίες αφαιρετικής μορφοποίησης (π.χ. κοπή με εργαλειομηχανές CNC) εξαιτίας της δυνατότητας κατασκευής πολύπλοκων μορφολογικά γεωμετρικών χαρακτηριστικών, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για χαμηλούς όγκους παραγωγής [18].



Σχήμα 2-8 Ακουστικό Βαρηκοΐας (Siemens).

Η χρησιμοποίηση τεχνολογιών ΣΚ στην παραγωγή προϊόντων μπορεί να αποδειχθεί ευεργετική και σε όρους δεικτών απόδοσης επένδυσης (ROI), δεδομένου ότι η πλειοψηφία των επιχειρήσεων που εγκαταλείπουν την δραστηριοποίησή τους στον παραγωγικό τομέα παρουσιάζουν προβλήματα ταμειακών ροών. Συγκεκριμένα, η ελαχιστοποίηση ή η μη χρησιμοποίηση εξειδικευμένων εργαλείων παράγωγης μπορεί να συμπιέσει σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο και το κόστος, που απαιτείται από την αρχική φάση του σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος μέχρι την εισαγωγή του στην αγορά και τις αρχικές πωλήσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο οι ταμειακές ροές τείνουν σε θετικό πρόσημο πολύ πιο σύντομα, πραγματοποιώντας ταχύτερη απόσβεση των αρχικών επενδύσεων και ισχυροποιώντας την θέση του προϊόντος σε σχέση με τον ανταγωνισμό. Η μη χρησιμοποίηση εξειδικευμένων εργαλείων παραγωγής (π.χ. καλούπια) στην παραγωγή αυξάνει επίσης τις δυνατότητες κατασκευής στον ίδιο τον τόπο πώλησης ή κοντά σε αυτόν και αντίστοιχα σε ή κοντά στο χρόνο της πώλησης. Οι δυνατότητες αυτές ωστόσο απαιτούν αλλαγή στη φιλοσοφία κάτω από την οποία δραστηριοποιείται μια επιχείρηση καθώς και αρκετό χρόνο αφομοίωσης προκειμένου να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα και αποδοτικά, ιδιαίτερα δε από τις μεγαλύτερες επιχειρήσεις με πολύπλοκες οργανωτικές δομές. Συνήθως αυτή η μορφή ευέλικτης παραγωγής δείχνει καταλληλότερη για μικρούς προμηθευτές ειδικών προϊόντων που μπορούν να είναι αρκετά ευέλικτοι.

Η βιωσιμότητα είναι ένα επίσης κρίσιμο και ιδιαίτερης σημασίας ζήτημα για πολλά προϊόντα και υπηρεσίες. Η ικανότητα προσφοράς των τεχνολογιών ΣΚ σε αυτό το πεδίο προκύπτει από την ελευθερία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που μπορούν να κατασκευαστούν, αντικαθιστώντας προϊόντα που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων ή μερών και διαφορετικών πρώτων υλών, τα οποία είναι επίσης δύσκολο να ανακυκλωθούν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένα πρόγραμμα συνεργασίας του Πανεπιστημίου του Loughborough και της βιομηχανίας αυτοκινήτων Jaguar [19]. Το πρόγραμμα αφορούσε την αλλαγή του σχεδιασμού της λαβής των θυρών αυτοκινήτων, η οποία αποτελούνταν από 11 διαφορετικά εξαρτήματα κατασκευασμένα από οκτώ διαφορετικά υλικά. Η λύση που τελικά προτάθηκε και υιοθετήθηκε αποτελούνταν από ένα ενιαίο εξάρτημα κατασκευασμένο με χρήση της τεχνολογίας SLS και βασισμένο σε μια μόνο πρώτη ύλη (Σχήμα 2-9).



Σχήμα 2-9 Παραγωγή λαβής πόρτας αυτοκινήτου με χρήση SLS

Μερικά από τα πιο ενδιαφέροντα και λιγότερα διαισθητικά οφέλη της χρησιμοποίησης τεχνολογιών ΣΚ παρουσιάζονται στη φάση της χρήσης των προϊόντων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα σύνθετα συστήματα παροχέτευσης αέρα που χρησιμοποιούνται στα στρατιωτικά αεροσκάφη [20, 21]. Τα προφανή οφέλη σε πρώτη ματιά αφορούν τα ζητήματα που συζητήθηκαν ανωτέρω, όπως η ελευθερία της επιτρεπόμενης γεωμετρίας που επιτρέπει τη βελτιωμένη λειτουργία μέσω της δημιουργίας πιο σύνθετων μορφολογικά εξαρτημάτων παροχέτευσης. Επιπλέον, οι νέοι αγωγοί αποτελούν ένα ενιαίο εξάρτημα το οποίο αντικατέστησε την προηγούμενη σύνθετη λύση που αποτελούταν από πολλά ανεξάρτητα τμήματα με πολλαπλά σημεία σύνδεσης. Κατά τη διάρκεια της ζωής των αεροσκαφών, τα πολλαπλά σημεία σύνδεσης έπρεπε να επιθεωρούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Κατά αυτό τον τρόπο η αποφυγή χρήσης σημείων σύνδεσης η οποία κατέστη δυνατή μόνο με την παραγωγή του συστήματος παροχέτευσης από τεχνολογίες ΣΚ μείωσε σε σημαντικό βαθμό τις δαπάνες συντήρησης καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής των αεροσκαφών.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή τεχνολογιών ΣΚ στην παραγωγή προσφέρει νέες ευκαιρίες για υψηλής προστιθέμενης αξίας προϊόντα μέσω της εκμετάλλευσης της παρεχόμενης ευελιξίας όσον αφορά την παραγωγή πολύπλοκων μορφολογικά χαρακτηριστικών. Καθίσταται έτσι όλο και περισσότερο εμφανές ότι η ταχεία παραγωγή πληροί όλες τις προϋποθέσεις για την παραγωγή καινοτόμων προϊόντων καθοδηγούμενη από τις απαιτήσεις της σύγχρονης αγοράς για :

- τμηματική προσαρμογή της παραγωγής,
- εξατομικευμένα προϊόντα,
- χαμηλού όγκου παραγωγής προϊόντα, υψηλής προστιθέμενης αξίας,
- προϊόντα σύνθετης γεωμετρίας παραγόμενα σε σχετικά μικρούς χρόνους.

2.2.4 Ιατρικές Εφαρμογές

Η ελευθερία όσον αφορά τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων που μπορούν να παραχθούν με τις τεχνολογίες ΣΚ αποτέλεσε την κύρια αίτια δοκιμής τους σε εφαρμογές που αφορούν τον ιατρικό τομέα. Αυτό που κάνει τις τεχνολογίες ΣΚ ακόμα πιο ελκυστικές είναι ότι δύνανται να χρησιμοποιήσουν, σχεδόν άμεσα, ιατρικά δεδομένα που λαμβάνονται από τεχνικές όπως η αξονική τομογραφία (Computed Tomography-CT) και η μαγνητική τομογραφία (Magnetic Resonance Imaging-MRI), για την παραγωγή εξατομικευμένων αντικειμένων-βοηθημάτων ανάλογα με την επιθυμούμενη χρήση και τον εκάστοτε ασθενή. Οι αναφερόμενες ιατρικές εφαρμογές των τεχνολογιών ΣΚ μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες [22]:

- Μοντελοποίηση (Biomodelling), η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων των μερών της ανθρώπινης ανατομίας και βιολογικών δομών γενικά, για τον προγραμματισμό χειρουργικών επεμβάσεων.
- Σχεδίαση και κατασκευή εξατομικευμένων μοσχευμάτων για προσθετικές επεμβάσεις αποκατάστασης και πλαστικές χειρουργικές επεμβάσεις.
- Εφαρμοσμένη μηχανική ιστού και κατασκευή πορώδων μοσχευμάτων και κριωμάτων (Tissue Engineering and Scaffolding)
- Κατασκευή συγκεκριμένων χειρουργικών βοηθημάτων και εργαλείων.
- Κατασκευή ιατρικών συσκευών για χορήγηση φαρμάκων.
- Κατασκευή ιατρικών συσκευών σε μικρό-κλίμακα.

Παρόλη την εγγενή ευελιξία τους και τις δυνατότητές τους, οι τεχνολογίες ΣΚ δεν έχουν υιοθετηθεί ακόμα ευρέως στον ιατρικό τομέα και στους τομείς της υγειονομικής περίθαλψης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο υψηλό κόστος και χρόνο που απαιτείται για την κατασκευή αντικειμένων,

δικαιολογώντας κατά αυτόν τον τρόπο την χρήση τους μόνο σε σχετικά σύνθετες και σοβαρές ιατρικές περιπτώσεις. Εκτός από τα ζητήματα του χρόνου και του κόστους, υπάρχει και το ζήτημα της ακρίβειας των συστημάτων ΣΚ που αυτήν την χρονική στιγμή δεν είναι τόσο ικανοποιητικό όσο απαιτούν ορισμένες εφαρμογές. Η μη ικανοποιητική ακρίβεια οφείλεται κυρίως στη μη ικανοποιητική ακρίβεια των λαμβανόμενων ιατρικών δεδομένων απεικόνισης πάρα στην ακρίβεια των διαδικασιών παραγωγής των ίδιων τεχνολογιών ΣΚ. Επιπρόσθετα, υπάρχει και το ζήτημα των υλικών και των ιδιοτήτων τους όσον αφορά κυρίως στην βιοσυμβατότητα, στην αντοχή και στην ευκαμψία τους.

Εντούτοις, οι τεχνολογίες ΣΚ γενικά παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες στην εφαρμογή τους στον τομέα της ιατρικής και υγειονομικής περίθαλψης. Το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό και από το εύρος των μελετών παγκοσμίως, οι οποίες προσπαθούν να καταστήσουν αποδοτική την χρήση τους στον ιατρικό τομέα εξετάζοντας το θέμα από διάφορες οπτικές όπως η οικονομικά αποδοτική εφαρμογή των καθιερωμένων τεχνολογιών, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, η εικονική μοντελοποίηση-απεικόνιση των ιατρικών δεδομένων και η ανάπτυξη βιοσυμβατών υλικών. Εμπειρισιακή και διεξοδική ανασκόπηση των τεχνολογιών ΣΚ στις ιατρικές και υγειονομικές εφαρμογές έχει πρόσφατα παρουσιαστεί από τους Giannatsis & Dedoussis [22].

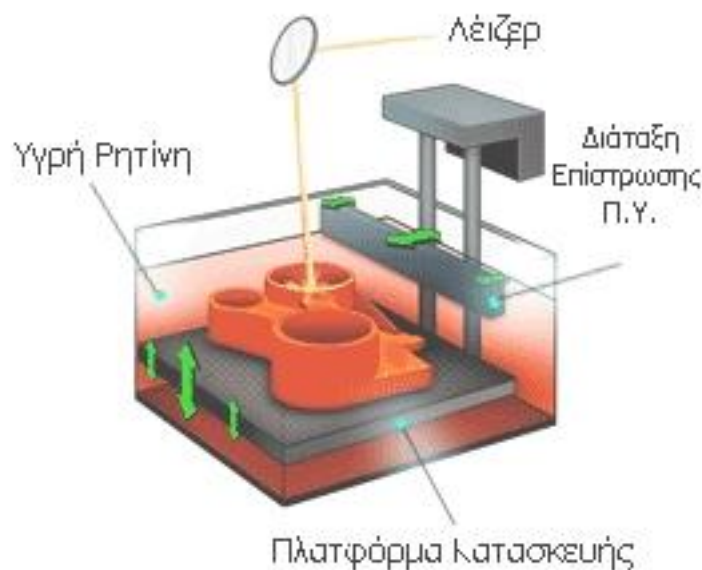
3

Ανάλυση Μεθόδου Στερεολιθογραφίας

3.1 Στερεολιθογραφία

Η Στερεολιθογραφία αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και γνωστή τεχνολογία στρωματικής κατασκευής, καθώς ήταν η πρώτη τεχνική η οποία αξιοποιήθηκε εμπορικά. Το πρώτο σύστημα Στερεολιθογραφίας SLA-1 σχεδιάστηκε από την 3D Systems και παρουσιάστηκε το Νοέμβριο του 1987 στην έκθεση AUTOFACT. Αντίστοιχα το πρώτο εμπορικό σύστημα Στερεολιθογραφίας τέθηκε σε λειτουργία το 1988. Πρώτη ύλη για την τεχνική της Στερεολιθογραφίας αποτελούν διάφοροι τύποι φωτοπολυμεριζόμενων εποξειδικών ρητινών, πολυμερών δηλαδή 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 3-1).

Η διαδικασία παραγωγής ενός αντικειμένου με την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας αποτελείται από τέσσερις διακριτές φάσεις:



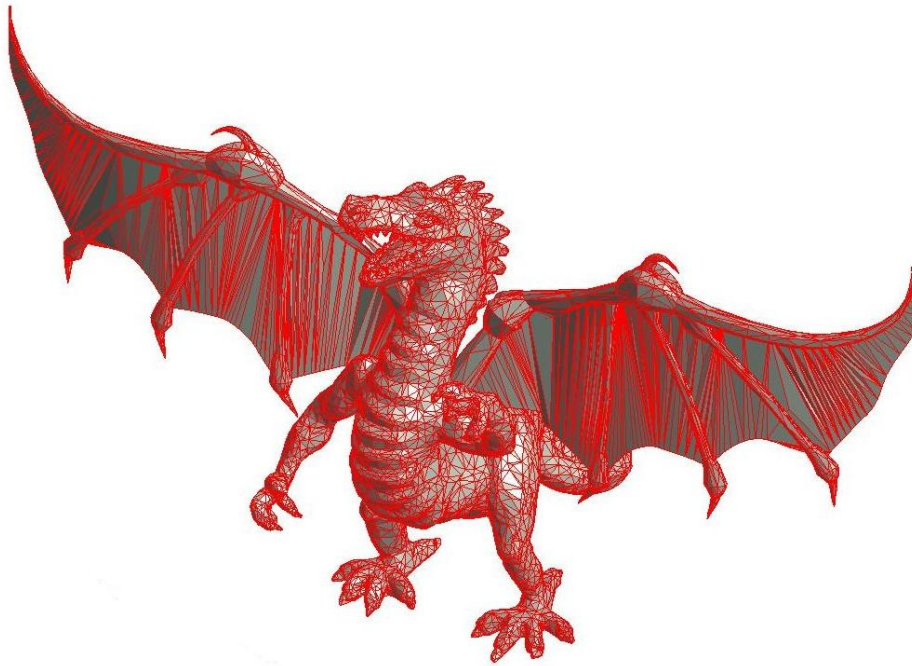
Σχήμα 3-1 Σχηματική Αναπαράσταση Μηχανής Στερεολιθογραφίας.

- Η σχεδίαση του τριδιάστατου μοντέλου,
- Η φάση των προπαρασκευαστικών εργασιών,
- Η κατασκευαστική φάση και
- Η φάση των μεταπαρασκευαστικών εργασιών.

Το πρώτο στάδιο, όπως ισχύει και για κάθε τεχνολογία ΣΚ, 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 [23]. Σε αντίθεση με κάποιες από τις προηγούμενες εφαρμογές στην περίπτωση των τεχνολογιών ΣΚ 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 ποιο τμήμα του χώρου είναι εντός του μοντέλου και ποιο εκτός. Σε ένα στερεό μοντέλο είναι επίσης σαφώς καθορισμένη η τοπολογία των επιφανειών [24], ποιες δηλαδή επιφάνειες συνδέονται μεταξύ τους και μέσω ποιών 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 συνενωμένων μεταξύ τους τριγώνων, των οποίων το μέγεθος καθορίζει την ανάλυση. Κάθε τρίγωνο ορίζεται από τις τρεις κορυφές του και το κάθετο στην επιφάνειά του μοναδιαίο διάνυσμα (δηλαδή τα συνημίτονα κατεύθυνσης του), το οποίο έχει φορά προς το εξωτερικό του μοντέλου. Στο Σχήμα 3-2 απεικονίζεται η STL προσέγγιση του 3D μοντέλου ενός δράκου.



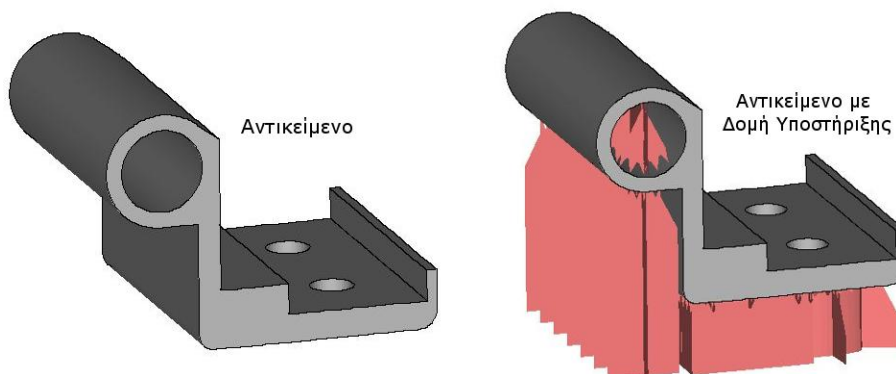
Σχήμα 3-2 Πολυεδρική Απεικόνιση STL Μοντέλου Δράκου

Το πρότυπο STL παρά τα εγγενή μειονεκτήματά του, όπως την επανάληψη των γεωμετρικών πληροφοριών (οι συντεταγμένες των κορυφών των τριγώνων εμφανίζονται τουλάχιστον από δύο φορές – κοινές ακμές) και την προσεγγιστική περιγραφή των παραμετρικών επιφανειών, αποτελεί ουσιαστικά το βασικό πρότυπο μεταφοράς και αποθήκευσης γεωμετρικών δεδομένων για τις τεχνολογίες ΣΚ, λόγω κυρίως της απλότητάς του.

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 είναι εξ ορισμού ο κάθετος στην πλατφόρμα της μηχανής άξονας και ταυτίζεται με την διεύθυνση 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 είναι το πάχος στρώματος

(layer thickness), το οποίο είναι ενιαίο για όλο το αντικείμενο.

Αφού επιλεγούν οι βασικές παράμετροι υπολογίζονται αυτόματα οι περιοχές που χρειάζονται στήριξη και δημιουργείται το πλέγμα στήριξης (support structure). 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 τον μηχανισμό εναπόθεσης πρώτης υλης κατά την κατασκευαστική φάση 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 3-3). 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 με εκείνο της πλατφόρμας. Στην περίπτωση του τεμαχισμού είναι ακριβέστερο να χρησιμοποιείται ο όρος «διάστημα τεμαχισμού» αντί του «πάχους 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 ή αντίστοιχα στρώματα υγρής ρητίνης που πρέπει να στερεοποιηθούν από τη μηχανή για να «χτισθεί» το αντικείμενο.



Σχήμα 3-3 Σχηματική Αναπαράσταση Πλέγματος Στήριξης.

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. Η διαδικασία

κατασκευής ξεκινά με την πλατφόρμα της μηχανής, πάνω στην οποία θα κατασκευασθεί το αντικείμενο, βυθισμένη ελάχιστα κάτω, δηλαδή όσο το πάχος του πρώτου στρώματος, 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 λέιζερ σαρώνει το εσωτερικό της πρώτης από τις εγκάρσιες τομές του αντικειμένου διαγράφοντας διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα. Η σάρωση (scanning) έχει ως αποτέλεσμα τη στερεοποίηση / πολυμερισμό ενός λεπτού στρώματος ρητίνης στην περιοχή της συγκεκριμένης τομής ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια παραμένει σε υγρή κατάσταση. Στη συνέχεια η πλατφόρμα βυθίζεται ελάχιστα (0,05-0,25 mm) ανάλογα με το προκαθορισμένο/επιλεχθέν κατά την προηγούμενη φάση πάχος στρώματος, 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 διαδοχικά όλα τα στρώματα που αποτελούν το αντικείμενο/κομμάτι ωστόσο να ολοκληρωθεί το «χτίσιμο» του μέσα στον κάδο της μηχανής που περιέχει την ρητίνη. 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 τοξική ενώ και οι αναθυμιάσεις του χρησιμοποιούμενου διαλύτη, ακετόνης ή TRM, 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, σε «ανώριμη» κατάσταση ή «πράσινο» (green state). Αυτό συμβαίνει διότι δεν έχει ολοκληρωθεί εντελώς η διαδικασία πολυμερισμού των στρωμάτων της ρητίνης, διαδικασία η οποία υπό κάποιες συνθήκες μπορεί να συνεχισθεί για αρκετές ώρες ή ακόμα και ημέρες [25]. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία πολυμερισμού το αντικείμενο τοποθετείται εντός του θαλάμου «ωρίμανσης» (curing) 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 φινιρίσματος, όπως η λείανση και το βάψιμο των επιφανειών [26].

Η μέθοδος της Στερεολιθογραφίας είναι όπως προαναφέρθηκε η πιο διαδεδομένη, γεγονός που οφείλεται εν μέρει και στο ότι είναι μία από τις παλαιότερες τεχνολογίες ΣΚ. Πέραν όμως αυτού η διάδοση και αποδοχή της Στερεολιθογραφίας οφείλεται και σε ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες ΣΚ [27]. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η:

- σχετικά υψηλή κατασκευαστική ακρίβεια.
- η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων οποιασδήποτε γεωμετρικής πολυπλοκότητας.
- η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων με λεπτά τοιχώματα και υψηλό βαθμό λεπτομέρειας.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συμπεριλαμβάνονται:

- η σχετικά μικρή ταχύτητα κατασκευής αντικείμενων μεγάλου όγκου.
- η τοξικότητα και οι περιορισμένες 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. Επιπλέον η ανάγκη για διαφοροποίηση της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης οδήγησε στην δημιουργία εναλλακτικών μεθόδων Στερεολιθογραφίας. Παραδείγματος χάρη η διαδικασία OPTOFORM (Paste Stereolithography) [3] αποτελεί μία παραλλαγή της κλασικής διαδικασίας της Στερεολιθογραφίας κατά την οποία η υγρή φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη αντικαθίσταται από μια χαμηλής ρευστότητας πάστα πολυμερούς. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι ότι η πρώτη ύλη σε μορφή πάστας μπορεί να εμπλουτιστεί από μεγάλες ποσότητες μεταλλικής ή κεραμικής κόνης. Η αναλογία της μεταλλικής κόνης στην πρώτη ύλη μπορεί να ανέρχεται στο 60% του όγκου ή αντίστοιχα στο 90% του βάρους. Στην συνέχεια όταν το αντικείμενο υφίσταται την τελική κατεργασία της (πυρο-)συσσωμάτωσης δημιουργείται ένα αντικείμενο σχεδόν 100% μεταλλικό ή κεραμικό αντίστοιχα. Η διαδικασία έχει δοκιμαστεί χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη κυρίως χάλυβα, τιτάνιο και κεραμικά υλικά.

3.2 Κόστος Κατασκευής Αντικείμενου με Στερεολιθογραφία

Το κόστος δημιουργίας/κατασκευής ενός αντικείμενου/κομματιού χρησιμοποιώντας ΣΚ μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερις βασικούς προσδιοριστικούς παράγοντες, οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1 [28]. Οι παράγοντες κόστους που ανήκουν στην πρώτη και τέταρτη στήλη είναι σχετικά εύκολα προσδιορίσιμοι και δύνανται να ποσοτικοποιηθούν επίσης εύκολα. Αντίθετα η εκτίμηση

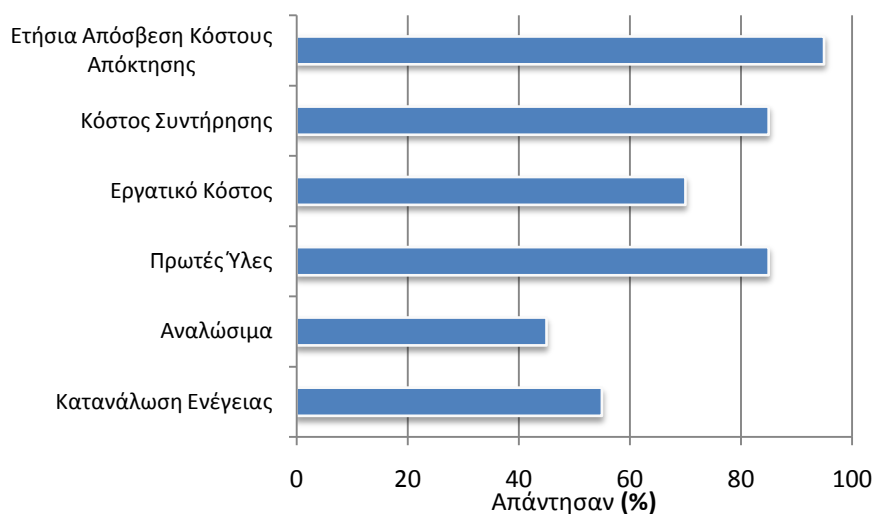
των παραγόντων κόστους που ανήκουν στη δεύτερη και τρίτη στήλη είναι πιο σύνθετη και για να είναι ακριβής η οποία εκτίμηση πρέπει να βασίζεται σε εκτενή παρατήρηση και πειραματισμό.

Κόστος Κτήσης	Κόστος Πρώτων Υλών	Λειτουργικό Κόστος	Εργατικό Κόστος
Κόστος απόκτησης κυρίως εξοπλισμού και παρελκόμενων	Όγκος υλικού ανά αντικείμενο	Αριθμός αντικειμένων ανά κατασκευαστική παρτίδα	Ωριαία αποζημίωση χειριστή
Ετήσια απόσβεση του κόστους απόκτησης	Όγκος πλέγματος υποστήριξης ανά αντικείμενο	Συνολικός χρόνος κατασκευής μιας παρτίδας αντικειμένων	Χρόνος προπαρασκευαστικών εργασιών
Κόστος συντήρησης ανά έτος	Κόστος πρώτης ύλης ανά kg	Ώρες λειτουργίας ανά έτος	Χρόνος μεταπαρασκευαστικών εργασιών

Πίνακας 3-1 Προσδιοριστικοί παράγοντες κόστους ΣΚ.

Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζονται οι απαντήσεις διαφόρων επιχειρήσεων, που ενσωματώνουν στην παραγωγική τους διαδικασία τεχνολογίες ΣΚ, ως προς τις πηγές κόστους χρησιμοποιούν για την κοστολόγηση της παραγωγής τους [28]. Παρατηρείται ότι οι τρεις κυριότερες πηγές κόστους που προσδιορίστηκαν ήταν το κόστος της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης, το κόστος συντήρησης καθώς και η ετήσια απόσβεση του κόστους απόκτησης της τεχνολογίας ΣΚ.

Από τις αναφερόμενες πηγές κόστους παρατηρούμε ότι η σημαντικότερη για τις εταιρείες σε ποσοστό άνω του 90%, θεωρείται το κόστος απόσβεσης συνεπικουρούμενο από το κόστος συντήρησης της μηχανής. Συνεπώς, το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους είναι άμεσα συνδεδεμένο με την απόκτηση και κατοχή του εξοπλισμού. Επί του προκειμένου, το κόστος απόκτησης ενός συστήματος Στερεολιθογραφίας μαζί με τα παρελκόμενά του (ηλεκτρονικός υπολογιστής, λογισμικό κλπ) κυμαίνεται περίπου στα 200.000 ευρώ. Το χρονικό διάστημα απόσβεσης το οποίο φαίνεται να χρησιμοποιούν οι επιχειρήσεις για την κοστολόγηση της παραγωγής τους ανέρχεται περίπου στα έξι χρόνια.



Σχήμα 3-4 Πηγές κόστους που χρησιμοποιούνται για την κοστολόγηση της παράγωγης.

Η έρευνα δείχνει επίσης ότι παρόλο που το χρονικό διάστημα απόσβεσης της αρχικής επένδυσης είναι μικρό, οι εταιρείες διατηρούν τον εξοπλισμό για αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται ιδιαίτερα όταν η αρχική δαπάνη για την απόκτηση κάποιας τεχνολογίας ΣΚ είναι ιδιαίτερα υψηλή όπως συμβαίνει π.χ. με την απόκτηση ενός συστήματος Στερεολιθογραφίας.

Καθίσταται έτσι επιτακτική η ανάγκη συντήρησης του εξοπλισμού η οποία δημιουργεί ένα επιπρόσθετο ετήσιο κόστος συντήρησης, το οποίο αν και προσδιορίζεται κατά περίπτωση, μπορεί να θεωρηθεί ότι κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των 3.000-15.000 ευρώ. Ο συνδυασμός λοιπόν του κόστους απόσβεσης καθώς και του κόστους συντήρησης χρησιμοποιείται τελικά για τον υπολογισμό του ωριαίου κόστους λειτουργίας της μηχανής και κατά συνέπεια αποτελεί τη βάση για την κοστολόγηση της χρήσης της μηχανής της Στερεολιθογραφίας.

Το κόστος το οποίο συνδέεται με τη πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται είναι εύκολα προσδιορίσιμο και ποσοτικοποιήσιμο. Καθώς η πρώτη ύλη η οποία δεν αναλώνεται είτε στην κατασκευή ενός αντικείμενου είτε στη δημιουργία κατάλληλου πλέγματος στήριξης μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, το κόστος καταναλώσεως πρώτης ύλης συνδέεται αποκλειστικά με τον όγκο του αντικειμένου καθώς και με τον όγκο του αντίστοιχου πλέγματος υποστήριξης. Αναλογιζόμενοι ότι το κόστος της φωτοπολυμερούς ρητίνης είναι αρκετά υψηλό (περίπου 220€/Kg), καθίσταται έκδηλη η ανάγκη περιορισμού του όγκου του πλέγματος υποστήριξης προκειμένου να μειωθεί το κόστος παραγωγής. Το κόστος ανάλωσης πρώτης ύλης συνήθως συνεισφέρει σε ένα ποσοστό 15% στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους κατασκευής.

Το κόστος εργασίας συνδέεται κυρίως με την προπαρασκευαστική και τη μεταπαρασκευαστική φάση της διαδικασίας παραγωγής. Κατά αυτόν τον τρόπο το κόστος εργασίας αναλύεται στο κόστος των προπαρασκευαστικών εργασιών και στο κόστος των μεταπαρασκευαστικών εργασιών. Το κόστος των προπαρασκευαστικών εργασιών είναι συνάρτηση του χρόνου απασχόλησης του χειριστή, καθώς και του ωριαίου κόστους χρήσης του εξειδικευμένου λογισμικού. Αντίστοιχα, το κόστος των μεταπαρασκευαστικών εργασιών είναι συνάρτηση της ωριαίας αποζημίωσης του τεχνίτη, του κόστους αναλώσιμων καθώς και του κόστους των μικρο-εργαλείων που συνήθως απαιτούνται. Παρόλο που ο μέσος χρόνος διεκπεραίωσης των προπαρασκευαστικών και μεταπαρασκευαστικών εργασιών εξαρτάται σημαντικά από την εμπειρία του τεχνίτη και τις ικανότητές του, μια μέση εκτίμηση για τις προπαρασκευαστικές εργασίες σε όρους χρόνου κυμαίνεται στα 30-60 min ενώ για τις μεταπαρασκευαστικές εργασίες η εκτίμηση ανέρχεται στη 1-3 ώρες, σύμφωνα με την εμπειρία μας στο εργαστήριο. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι ενώ για την παραγωγή λίγων αντικειμένων ή για την παραγωγή αντικειμένων χαμηλής γεωμετρικής

πολυπλοκότητας το εργατικό κόστος δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, για την παραγωγή μεγάλου αριθμού αντικειμένων ή αντικειμένων υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας το εργατικό κόστος (κυρίως το κόστος των μεταπαρασκευαστικών εργασιών) μπορεί να γίνει κρίσιμο. Το ωριαίο εργατικό κόστος εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ των 20 και 35 ευρώ ανά ώρα.

Προηγούμενες μελέτες δείχνουν ότι ο μέσος χρόνος χρησιμοποίησης του εξοπλισμού της Στερεολιθογραφίας ανέρχεται περίπου στις 10 με 16 ώρες ανά ημέρα. Ωστόσο, κοινή πρακτική για τις εταιρείες αποτελεί η αδιάκοπη εικοσιτετράωρη παραγωγή και κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου [28] έτσι ώστε να επιτευχθεί η μείωση του κόστους κατοχής μέσω της μείωσης των νεκρών χρονικών διαστημάτων (μη παραγωγικής λειτουργίας) του εξοπλισμού.

Γίνεται προφανές από την παραπάνω ανάλυση ότι το κόστος κατασκευής ενός αντικειμένου/κομματιού με την τεχνική της Στερεολιθογραφίας είναι συνάρτηση του χρόνου κατασκευής, του χρόνου προπαρασκευαστικών και μεταπαρασκευαστικών εργασιών καθώς και του κόστους της αναλωθείσας πρώτης ύλης και μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$C_{Total} = T_b * C_{op} + (T_{pre} + T_{post}) * C_h + (V + V_{sup}) * C_{mat} \quad (3.1)$$

όπου:

- C_{Total} είναι το συνολικό κόστος
- T_b ο χρόνος κατασκευής
- C_{op} το ωριαίο λειτουργικό κόστος
- T_{pre} ο χρόνος των προπαρασκευαστικών εργασιών
- T_{post} ο χρόνος των μεταπαρασκευαστικών εργασιών
- C_h η ωριαία αποζημίωση του τεχνίτη
- V ο όγκος του αντικείμενου
- V_{sup} ο όγκος του πλέγματος υποστήριξης
- C_{mat} το κόστος της πρώτης ύλης

Συμπερασματικά, η ακριβής εκτίμηση του χρόνου κατασκευής ενός αντικειμένου καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική για την ακριβή πρόβλεψη του κόστους παραγωγής καθώς και για μια σειρά άλλων πρακτικών προβλημάτων όπως ο χρονοπρογραμματισμός της παραγωγής, η σύνταξη προσφορών για την κατασκευή ενός αντικειμένου καθώς και η διερεύνηση της σκοπιμότητας παραγωγής ενός αντικειμένου με τη συγκεκριμένη μέθοδο.

3.3 Υπολογισμός Χρόνου Κατασκευής Αντικειμένου

Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 3.1 για την κατασκευή ενός αντικειμένου με τη μέθοδο της Στερεολιθογραφίας απαιτείται η δημιουργία μιας ιεραρχικής «στοίβας» διδιάστατων διατομών μέσω της διαδικασίας του τεμαχισμού του τριδιάστατου ψηφιακού μοντέλου. Η ιεραρχική αυτή στοίβα αποτελεί στην ουσία μια γεωμετρική προσέγγιση της μορφολογικής πολυπλοκότητας του ψηφιακού μοντέλου χρησιμοποιώντας μονάχα διδιάστατες διατομές και περιέχει τις οδηγίες για την κατασκευή των αντίστοιχων στρωμάτων από τη μηχανή. Ως χρόνος κατασκευής (Build Time) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται από τη μηχανή της Στερεολιθογραφίας για τον πολυμερισμό/στερεοποίηση όλων των στρωμάτων/διατομών με τις οποίες περιγράφεται ένα τριδιάστατο ψηφιακό μοντέλο. Μαθηματικά ο χρόνος κατασκευής μπορεί να οριστεί ως [29]:

$$T_b = \sum_{i=1}^n T_{Layer_i} \quad (3.2)$$

όπου T_{Layer} ο χρόνος κατασκευής της διατομής i κι n ο συνολικός αριθμός διατομών.

Η διαδικασία της κατασκευής μιας διατομής αποτελείται από δύο διακριτές φάσεις. Η πρώτη φάση της επίστρωσης περιλαμβάνει την εναπόθεση ενός στρώματος υγρής ρητίνης σε κατάλληλο πάχος. Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την επιλεκτική στερεοποίηση μέρους της επιφάνειας της υγρής ρητίνης σύμφωνα με το γεωμετρικό σχήμα της εκάστοτε διατομής. Συνεπώς, ο χρόνος κατασκευής της διατομής i περιγράφεται από το άθροισμα του χρόνου της διαδικασίας επίστρωσης και του χρόνου της διαδικασίας σάρωσης.

$$T_{Layer_i} = T_{Recoat_i} + T_{Scan_i} \quad (3.3)$$

Τόσο η διαδικασία της επίστρωσης όσο και η διαδικασία της σάρωσης μπορούν να αναλυθούν σε επιμέρους (υπο)διαδικασίες προκειμένου να περιγραφούν λεπτομερέστερα. Η διαδικασία της επίστρωσης ξεκινά με μια μικρή χρονοκαθυστέρηση (T_{Delay}), ακολουθεί η κίνηση του μηχανισμού επίστρωσης της ρητίνης ($T_{Recoater_i}$) και ολοκληρώνεται με κατάλληλη χρονοκαθυστέρηση ώστε να «προλάβει» να εξομαλυνθεί η επιφάνεια της ρητίνης που μόλις εναποτέθηκε ($T_{Smoothing}$). Σύμφωνα με αυτήν τη διαδικασία ο χρόνος επίστρωσης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής :

$$T_{Recoat_i} = T_{Delay} + T_{Recoater_i} + T_{Smoothing} \quad (3.4)$$

Ο χρόνος εναπόθεσης της ρητίνης μπορεί με τη σειρά του να περιγραφεί ως το πηλίκο της απόστασης που διανύει ο μηχανισμός (Rd_i) διά την ταχύτητα με την οποία κινείται (Rv_i) :

$$TRecoater_i = \frac{Rd_i}{Rv_i} \quad (3.5)$$

Στο υπό εξέταση σύστημα Στερεολιθογραφίας που διαθέτει το Πανεπιστήμιο Πειραιώς, ήτοι EOS Desktop S, η επίστρωση πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικές κινήσεις: (α) κίνηση από την θέση «αναπαύσεως» του μηχανισμού στα αριστερά της πλατφόρμας έως το δεξιό όριο του άξονα κίνησης και (β) κίνηση επιστροφής στην αρχική θέση. Το μήκος κίνησης του μηχανισμού από το ένα άκρο έως το άλλο ισούται με 305 mm. Η σχέση έτσι μετασχηματίζεται ως εξής:

$$TRecoater_i = \frac{n * 610}{Rv_i} \quad (3.6)$$

Όπου n είναι ο αριθμός των κύκλων επίστρωσης. Σε μικρού προς μεσαίου μεγέθους διατομές δεν απαιτούνται παραπάνω του ενός κύκλοι επίστρωσης. Ωστόσο, για μεγάλου εμβαδού διατομές απαιτούνται συνήθως δύο κύκλοι επίστρωσης (τιμή του $n = 1$ ή 2 αντίστοιχα).

Η διαδικασία της σάρωσης μιας διατομής μπορεί επίσης να διαχωριστεί σε δύο διακριτές φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την σάρωση του περιγράμματος της διατομής (Contouring) κατά την οποία η ακτίνα λέιζερ διαγράφει τα πολύγωνα που καθορίζουν τόσο το εξωτερικό όσο και το εσωτερικό περίγραμμα της. Ο χρόνος σάρωσης του εσωτερικού και εξωτερικού περιγράμματος ισούται θεωρητικά με το λόγο του συνολικού μήκους που διαγράφει η εστιασμένη ακτίνα λέιζερ (Cl_i) προς την αντίστοιχη ταχύτητα (Cv_i):

$$TContouring_i = \frac{Cl_i}{Cv_i} \quad (3.7)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι για τον υπολογισμό του χρόνου σάρωσης περιγράμματος απαιτείται ο ακριβής υπολογισμός του συνολικού μήκους του περιγράμματος, δηλαδή του συνολικού μήκους των πολυγώνων που περιγράφουν τα εσωτερικά και εξωτερικά περιγράμματα μιας διατομής. Όταν το αντικείμενο προς κατασκευή είναι κωδικοποιημένο σε μορφή στοιβάς διατομών (CLI file format)¹ καθίσταται εύκολος ο υπολογισμός του συνολικού μήκους περιγράμματος. Αντίθετα όταν ως πληροφορία υπάρχει μόνο το πολυεδρικό STL αρχείο η εξαγωγή της απαραίτητης πληροφορίας για τον υπολογισμό του ακριβούς μήκους περιγράμματος κάθε διατομής δεν είναι δυνατή. Ωστόσο, έχουμε τη δυνατότητα υπολογισμού του Συνολικού Μήκους Περιγράμματος (TCl) χρησιμοποιώντας τη σχέση που έχει προταθεί από τους Tata-Flynn [30]. Η σχέση αυτή ορίζει ότι το

¹ Πρότυπο περιγραφής της γεωμετρίας διαδοχικών παράλληλων τόμων για την κατασκευή ενός αντικειμένου με οποιαδήποτε τεχνολογία ΣΚ. Αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος “BRITe/EURAM-Rapid Prototyping Techniques” ως μέσο μεταφοράς των δεδομένων μαγνητικής ή αξονικής τομογραφίας προς τα συστήματα ΣΚ για την κατασκευή ιατρικών μοντέλων.

TCl μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος του αθροίσματος των εμβαδών των κάθετων προβολών όλων των τριγώνων του μοντέλου σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο της πλατφόρμας προς το πάχος στρώματος.

$$TCl = \frac{\sum_{i=1}^n Area(Projection(Facet(i)))}{Lth} \quad (3.8)$$

όπου n ο αριθμός των τριγώνων και Lth το επιλεγθέν πάχος στρώματος. Η σχέση (3.8) χρησιμοποιείται επίσης για τον υπολογισμό του μήκους σάρωσης του πλέγματος στήριξης.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας σάρωσης του περιγράμματος θα πρέπει να ανατρέξουμε στην σχέση που έχει διατυπωθεί από τον Jacobs [31] και αφορά το Βάθος Στερεοποίησης (Curing Depth). Γενικά όταν η ακτίνα λέιζερ σαρώνει ένα διάνυσμα πάνω στην φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη στερεοποιείται μια λεπτή γραμμή παραβολοειδούς διατομής. Οι ιδιότητες της χρησιμοποιούμενης ρητίνης, η ισχύς του λέιζερ, η διάμετρος του σημείου εστίασης καθώς και η ταχύτητα σάρωσης αποτελούν τους κύριους παράγοντες που διαμορφώνουν τη γεωμετρία της διατομής. Η σχέση του Jacobs [31] ορίζει ότι το βάθος στερεοποίησης υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$CD = D_p * \ln \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s E_c} \right) \quad (3.9)$$

όπου με P_L συμβολίζεται η ισχύς του λέιζερ, 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.

Συνεπώς, αναλύοντας τη σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε τη ταχύτητα σάρωσης περιγράμματος ως εξής:

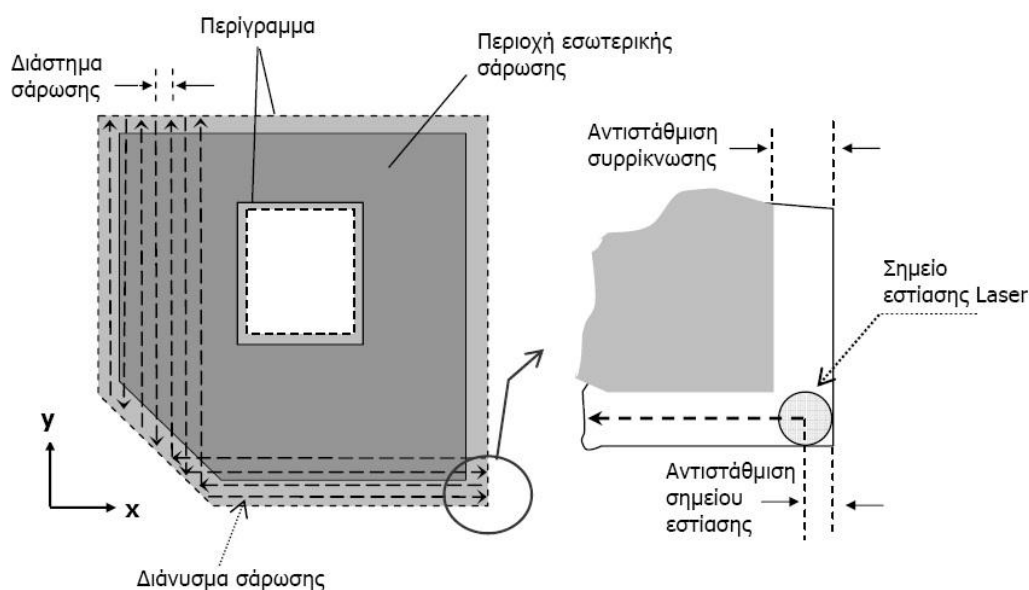
$$Cv_i = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 E_c e^{(CD(i)/D_p)}} \quad (3.10)$$

Η δεύτερη φάση της διαδικασίας σάρωσης περιλαμβάνει την σάρωση του εσωτερικού της διατομής. Η σάρωση του εσωτερικού ακολουθεί ένα σταθερό πρότυπο το οποίο έχει ορθογωνική μορφή, αποτελείται δηλαδή από διαδοχικά διανύσματα παράλληλα στους X και Y άξονες της μηχανής που αντιπροσωπεύουν την έννοια του μήκους και του πλάτους της πλατφόρμας αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παράλληλων διανυσμάτων σάρωσης ορίζεται ως το διάστημα σάρωσης. Κατά αντιστοιχία ο χρόνος σάρωσης του εσωτερικού μιας διατομής i ($THatch_i$) μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος του συνολικού μήκους που διαγράφει η εστιασμένη

ακτίνα λέιζερ (Hl_i) προς την αντίστοιχη ταχύτητα (Hv_i). Το συνολικό μήκος σάρωσης εσωτερικού κατά μια κατεύθυνση ισούται με το εμβαδόν της διατομής προς το αντίστοιχο διάστημα σάρωσης (βλ. Σχήμα 3-5).

$$THatch_i = \frac{Hl_i}{Hv_i} \quad (3.11)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι, όπως και στον υπολογισμό του χρόνου σάρωσης περιγράμματος, ο υπολογισμός του συνολικού μήκους σάρωσης εσωτερικού κάθε διατομής δεν είναι εύκολος παρά μόνο όταν διαθέτουμε την ιεραρχική στοίβα διατομών.



Σχήμα 3-5 Σχηματική αναπαράσταση ορθογωνικού προτύπου και παραμέτρων σάρωσης [29].

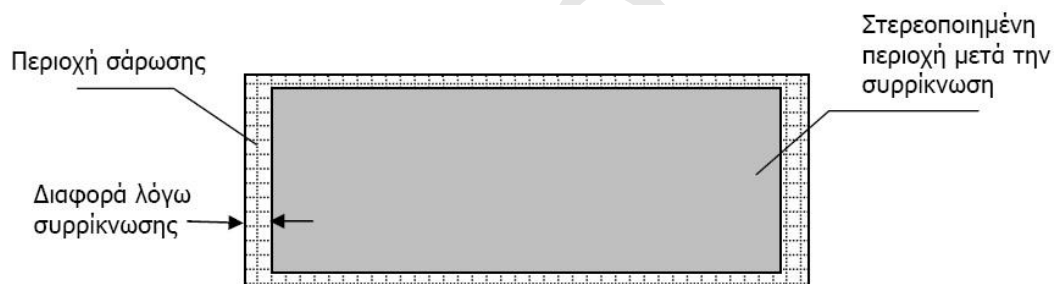
Όστόσο, ακόμα κι αν η διαθέσιμη γεωμετρική πληροφορία προέρχεται από το πολυεδρικό STL αρχείο μπορούμε να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια [30] το συνολικό μήκος σάρωσης εσωτερικού όλως των διατομών (THI) χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$THI = \frac{V}{Lth * hs} \quad (3.12)$$

Όπου με V συμβολίζεται ο όγκος του αντικειμένου, Lth το πάχος στρώματος και hs το διάστημα σάρωσης.

Για τον ακριβή υπολογισμό του συνολικού μήκους σάρωσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αντιστάθμιση συρρίκνωσης (βλ. Σχήμα 3-5). Το φαινόμενο της συρρίκνωσης αποτελεί από τις πιο σημαντικές πηγές αποκλίσεων στη γεωμετρία και τις διαστάσεις μεταξύ του αρχικού τριδιάστατου μοντέλου και του τελικά κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Η συρρίκνωση μπορεί να εμφανιστεί σε

διάφορες φάσεις της διαδικασίας κατασκευής επηρεάζοντας ανάλογα τη διαστασιολογική ακρίβεια του αντικειμένου. Αποτέλεσμα της συρρίκνωσης αποτελεί η διαφορά μεταξύ των διαστάσεων κατά την X και Y διεύθυνση του τελικού στερεοποιημένου/πολυμερισμένου στρώματος ρητίνης και των αντίστοιχων «πραγματικών» διαστάσεων της περιοχής, η οποία εκτέθηκε σε ακτινοβολία, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-6. Η απώλεια στις διαστάσεις είναι ευθέως ανάλογη των διαστάσεων της υπό έκθεση περιοχής 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 τη μηχανή [32]. Με τον όρο βαθμός ή ποσοστό πολυμερισμού ορίζεται το ποσοστό του όγκου του αντικειμένου που έχει πολυμεριστεί πλήρως σε σχέση με το συνολικό όγκο.



Σχήμα 3-6 Σχηματική αναπαράσταση γραμμικής συρρίκνωσης [29].

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) προσδιορίζονται πειραματικά μέσω της κατασκευής και μέτρησης ειδικών δοκιμίων [33].

Το διάστημα σάρωσης θεωρείται κρίσιμος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την διαστασιολογική ακρίβεια και κατά συνέπεια και τον υπολογισμό του χρόνου σάρωσης διατομής. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος το διάστημα σάρωσης θεωρείται ότι πρέπει να είναι τόσο ώστε να αποφευχθούν περιοχές μη στερεοποιημένης ρητίνης εντός του αντικείμενου που θα οδηγήσουν σε περαιτέρω συρρίκνωση του αντικειμένου κατά τη φάση της ωρίμανσης [32, 34]. Έτσι το διάστημα σάρωσης θεωρείται σταθερό και ίσο με το 60% της ακτίνας του σημείου εστίασης, προκειμένου να επικαλύπτονται οι διαδοχικές γραμμές σάρωσης [35]. Η χρησιμοποίηση μικρού διαστήματος

σάρωσης, συνεπάγεται μεγαλύτερο βάθος στερεοποίησης, το οποίο αυξάνεται ακόμα περισσότερο αν πραγματοποιηθεί σάρωση και ως προς τους δύο άξονες (X και Y) καθώς η διατομή λαμβάνει πολλαπλάσια ενέργεια. Κατ' αυτόν τον τρόπο το βάθος στερεοποίησης (CD_L – Layer Curing Depth) του εσωτερικού μιας διατομής μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$CD_L = D_P \ln \left(\frac{mP_L}{h_S V_S E_C} \right) \quad (3.13)$$

Όπου με h_S συμβολίζεται το διάστημα σάρωσης (Hatching Space) και με m ο αριθμός σαρώσεων της διατομής.

Έτσι η ταχύτητα σάρωσης εσωτερικού μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Hv = \frac{mP_L}{h_S E_C e^{(CD_L/D_P)}} \quad (3.14)$$

Συνεπώς, ο συνολικός χρόνος σάρωσης του εσωτερικού όλων των διατομών $THatch$ μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$THatch = \frac{(1 + \text{Αντιστάθμιση Γραμμικής Συρρίκνωσης}) * V}{Lth * h_S * Hv} \quad (3.15)$$

3.4 Ποιότητα αντικειμένων κατασκευασμένων με Στερεολιθογραφία

Η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζει η διαδικασία παραγωγής ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας Στερεολιθογραφία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες που προσδιορίζουν την ποιότητα του τελικού παραχθέντος αντικειμένου. Ένα μεγάλο υποσύνολο ιδιοτήτων, όπως οι μηχανικές, οι χημικές και οι θερμικές ιδιότητες καθορίζονται κυρίως από το είδος της χρησιμοποιούμενης εποξειδικής ρητίνης. Σε αντιδιαστολή, οι ιδιότητες που σχετίζονται με την πιστή αναπαραγωγή των μορφολογικών χαρακτηριστικών του αντικειμένου, όπως η διαστασιολογική ακρίβεια και η τραχύτητα των παραχθέντων επιφανειών, αποτελούν συνιστώσες των επιλεχθέντων κατασκευαστικών παραμέτρων [36].

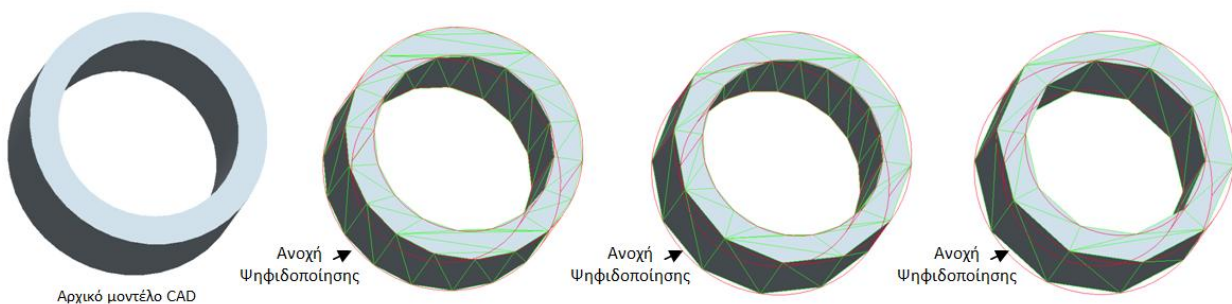
Στην Στερεολιθογραφία μπορούμε να διακρίνουμε έξι βασικές πηγές κατασκευαστικών σφαλμάτων και αποκλίσεων στη γεωμετρία και στις διαστάσεις μεταξύ του τελικά παραχθέντος αντικειμένου και του τρισδιάστατου μοντέλου [37]:

- η ψηφιοποίηση (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)

3.4.1 Ψηφιοποίηση του 3D μοντέλου

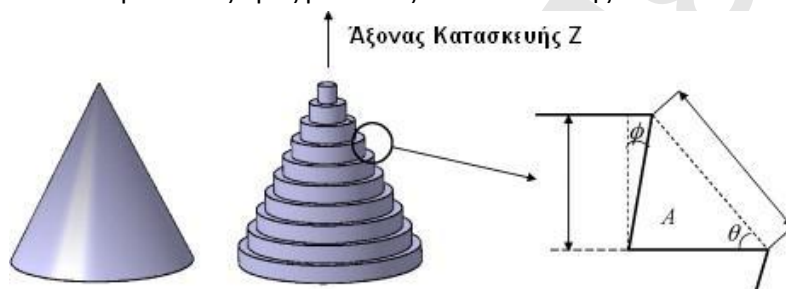
Η διαδικασία προσεγγιστικής απόδοσης των επιφανειών ενός τρισδιάστατου μοντέλου μέσω μικρών τριγώνων - τριγωνικών ψηφίδων (triangulation/tessellation) αποτελεί την πρώτη πηγή αποκλίσεων. Για τον έλεγχο της πιστότητας του πολυεδρικού μοντέλου STL σε σχέση με το αρχικό 3D μοντέλο, χρησιμοποιείται η ανοχή ψηφιοποίησης, η οποία ορίζεται ως η μέγιστη επιτρεπόμενη-αποδεκτή απόσταση/απόκλιση μεταξύ της αρχικής επιφάνειας και των αντίστοιχων τριγωνικών επιφανειών. Στο Σχήμα 3.7 παρατηρούμε το ίδιο αρχικό μοντέλο κυλίνδρου ψηφιοποιημένο με τρεις διαφορετικές τιμές ανοχής ψηφιοποίησης. Γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο μεγάλη είναι η ανοχή τόσο λιγότερο προσεγγίζει το μοντέλο STL τη γεωμετρία του 3D μοντέλου. Αντίθετα η χρησιμοποίηση μικρής ανοχής ψηφιοποίησης βελτιώνει την πιστότητα του πολυεδρικού μοντέλου αλλά ταυτόχρονα αυξάνει και τον απαραίτητο αριθμό τριγώνων ειδικά στις μη επίπεδες επιφάνειές του. Οι αυξημένες δυνατότητες των νέων ηλεκτρονικών υπολογιστών τόσο σε μνήμη όσο και σε υπολογιστική ισχύ έχουν επιλύσει σε σημαντικό βαθμό όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με την διαχείριση μεγάλου μεγέθους πολυεδρικών αρχείων. Συνεπώς, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μικρής ανοχής ψηφιοποίησης (μικρότερη του 0,001 mm), γεγονός που ελαχιστοποιεί πρακτικά την επίδραση της ψηφιοποίησης στην ακρίβεια κατασκευής ενός αντικειμένου.



Σχήμα 3-7 Σχηματική απεικόνιση της STL απεικόνισης ενός 3Dμοντέλου.

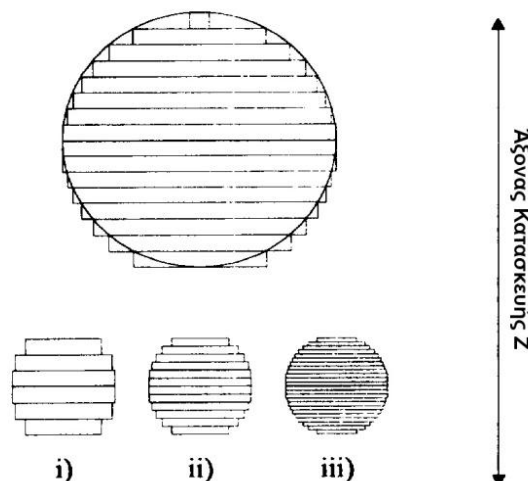
3.4.2 Κλιμακωτή υφή επικλινών επιφανειών

Η δεύτερη πηγή λάθους προέρχεται από τη στρωματική φύση της διαδικασίας παραγωγής της Στερεολιθογραφίας κατά την οποία δημιουργείται ένα τριδιάστατο φυσικό αντικείμενο στοιβάζοντας ιεραρχικά 2-1/2 διαστάσεων στερεοποιημένα στρώματα ρητίνης κατά συγκεκριμένη φορά. Λόγω της σχεδόν ορθογωνικής φύσης των στρωμάτων ρητίνης, κατά την έννοια του άξονα κατασκευής (βλ. Σχήμα 3-8), δημιουργούνται γεωμετρικές αποκλίσεις μεταξύ του 3Δ μοντέλου και του αντικείμενου που τελικά κατασκευάζεται. Η αναπόφευκτη δημιουργία αυτό του είδους γεωμετρικών αποκλίσεων ονομάζεται φαινόμενο «κλίμακας» (stair stepping effect) και γίνεται ιδιαίτερο εμφανές σε όλες τις επικλινείς επιφάνειες, σε όλες δηλαδή τις μη οριζόντιες ή κάθετες επιφάνειες του αντικείμενου ως προς με τον άξονα κατασκευής.



Σχήμα 3-8 Σχηματική αναπαράσταση στρωματικής κατασκευής πυραμίδας.

Στο Σχήμα 3-8 παρουσιάζεται η αρχική τριδιάστατη απεικόνιση ενός αντικείμενου καθώς και η προσέγγιση που χρησιμοποιείται στη Στερεολιθογραφία προκειμένου να κατασκευαστεί από διαδοχικά στρώματα ρητίνης. Παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος των στρωμάτων που χρησιμοποιούνται τόσο περισσότερο το τελικό αντικείμενο θα παρεκκλίνει από την αρχική του γεωμετρία (βλ. Σχήμα 3-9). Εάν το φαινόμενο κλίμακας οδηγεί σε απώλεια όγκου σε σχέση με το τριδιάστατο μοντέλο, όπως στο άνω μέρος της σφαίρας του Σχήματος 3-9, τότε έχουμε αρνητικό σφάλμα κλίμακας. Αντίθετα εάν το φαινόμενο κλίμακας προκαλεί προσθήκη επιπλέον υλικού όπως στο κάτω μέρος της σφαίρας του Σχήματος 3-9 τότε έχουμε θετικό σφάλμα κλίμακας.



Σχήμα 3-9 Σχηματική απεικόνιση φαινομένου κλίμακας.

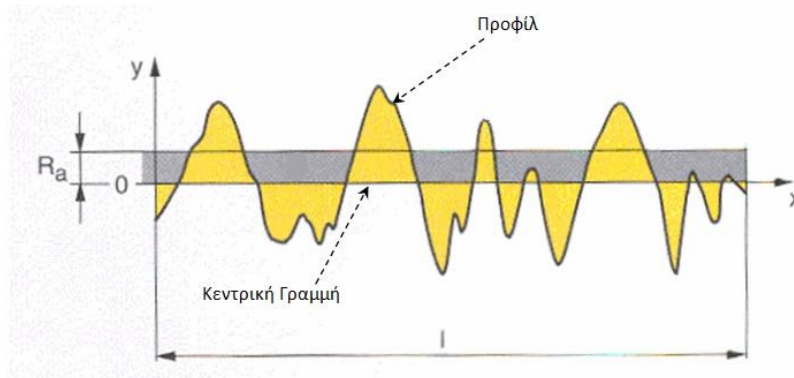
Το φαινόμενο κλίμακας καθώς και η αλλοίωση της υφής όλων των επιφανειών οι οποίες έχουν ανάγκη υποστήριξης (μέσω στηριγμάτων) προκειμένου να κατασκευαστούν, είναι τα γενεσιουργά αίτια της εμφάνισης σχετικά μεγάλης τραχύτητας σε ορισμένες από τις επιφάνειες ενός κομματιού που κατασκευάζεται με την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας. Η ποιότητα των επιφανειών ενός αντικειμένου σε όρους τραχύτητας αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό αξιολόγησης της καταλληλότητας του να εκπληρώσει τη λειτουργική και αισθητική του αποστολή. Οι μήτρες και τα εργαλεία χύτευσης αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αντικειμένων που η λειτουργική τους αποστολή απαιτεί η τραχύτητα των επιφανειών τους να διατηρείται στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο. Γνωρίζοντας επίσης ότι η πλήρης εξαφάνιση του φαινομένου κλίμακας καθώς και των στηριγμάτων είναι πρακτικά αδύνατη, αφιερώνεται αρκετά σημαντικός χρόνος στις μετα-παρασκευαστικές εργασίες λείανσης/κάλυψης οι οποίες εκτελούνται συνήθως χειρωνακτικά, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών και των ονομαστικών διαστάσεων ενός αντικειμένου.

Συνοψίζοντας, το είδος και η ένταση των εργασιών φινιρίσματος καθορίζονται από την τραχύτητα των επιφανειών του ακατέργαστου αντικειμένου έτσι όπως αυτό εξάγεται από την μηχανή αφού υποστεί ελαφρύ καθαρισμό σε διαλύτη για την αφαίρεση των υπολειμμάτων της υγρής ρητίνης και του πλέγματος στήριξης. Η τραχύτητα των επιφανειών του ακατέργαστου μοντέλου αντίστοιχα, εξαρτάται από τον προσανατολισμό κατασκευής και το πάχος στρώματος, καθώς αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την έκταση και την ένταση του φαινομένου κλίμακας. Επιπρόσθετα, ανάλογα με τον προσανατολισμό κατασκευής καθορίζονται επίσης εμμέσως και οι στηριζόμενες επιφάνειες, οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένη τραχύτητα λόγω ακριβώς της παρουσίας υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης. Είναι συνεπώς χρήσιμο κατά την προπαρασκευαστική φάση, όπου καθορίζεται τόσο ο προσανατολισμός κατασκευής όσο και το πάχος στρώματος, να μπορεί να εκτιμηθεί η τραχύτητα των επιφανειών του αντικειμένου για διαφορετικά πάχη στρώματος και προσανατολισμούς.

Δεδομένης της τιμής του πάχους στρώματος μίας επιφάνειας και της γωνίας που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο μπορούμε να υπολογίσουμε αναλυτικά την ποιότητα της. Μία ένδειξη της ποιότητας της επιφάνειας αποτελεί η εκτίμηση του ύψους «οδόντωσης» ή της μέσης τραχύτητας (roughness average) R_a η οποία ορίζεται ως η μέση τιμή των απόλυτων αποκλίσεων $|y(x)|$ του μετρούμενου «προφίλ» (ίχνους) της επιφάνειας, της θεωρητικής δηλαδή γραμμής που προκύπτει από την τομή της μετρούμενης επιφάνειας με το κάθετο εκείνο επίπεδο κατά μήκος του οποίου γίνεται η μέτρηση (βλ. Σχήμα 3-10), από την ιδεατή κεντρική γραμμή για μήκος l . Η μέση επομένως τραχύτητα μιας επιφάνειας δίνεται από την σχέση:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3.16)$$

Μεγεθύνοντας το προφίλ μιας επικλινούς επιφάνειας ενός αντικείμενου κατασκευασμένου με την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας θα παρουσιάζει τη μορφή του Σχήματος 3-8 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 3-10 Σχηματική αναπαράσταση της μέσης τραχύτητας επιφάνειας [3.8].

Στηριζόμενοι στη παραπάνω παραδοχή αναφορικά με την γεωμετρική μορφή του προφίλ μιας επικλινούς επιφάνειας ενός αντικείμενου κατασκευασμένου με την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας οι Reeves και Cobb [38] διατύπωσαν ότι η μέση τραχύτητα R_a μιας ακατέρραστης επίπεδης επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R_a(up) = \frac{Lth(\tan \varphi \sin \theta + \cos \theta)}{4} \quad (3.17)$$

$$R_a(down) = \frac{Lth(\tan \varphi_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1)}{4} \quad (3.18)$$

όπου $R_a(up)$ είναι η μέση τραχύτητα των άνω επιφανειών ($0 < \theta \leq 90 + \varphi$) και $R_a(down)$ η μέση τραχύτητα των κάτω επιφανειών ($90 + \varphi < \theta < 180$). Στη σχέση υπολογισμού της τραχύτητας κάτω επιφανειών χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές ϑ_1 και φ_1 που ορίζονται ως:

$$\vartheta_1 = 180^\circ - \vartheta \text{ και } \varphi_1 = -\varphi \quad (3.19)$$

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

$$R_a(0^\circ) = R_a(180^\circ) = 0 \quad (3.20)$$

Όπως προαναφέρθηκε το θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού της τραχύτητας αναπτύχθηκε προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών προσανατολισμών

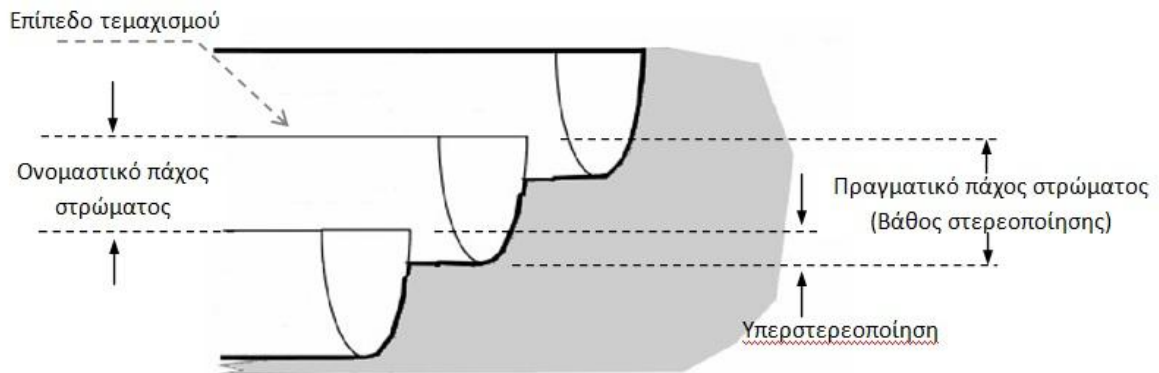
και τιμών του πάχους στρώματος. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό δεν λαμβάνει υπόψη του την επίδραση των υπολειμμάτων του πλέγματος στήριξης στην τραχύτητα των στηριζόμενων επιφανειών. Το γεγονός αυτό συνεπικουρούμενο από πειραματικά αποτελέσματα μέτρησης της τραχύτητας ειδικών δοκιμίων αποδεικνύουν ότι το θεωρητικό μοντέλο δεν αποτελεί συνεπή εκτιμήτρια της πραγματικής τιμής της τραχύτητας [38, 39, 40].

3.4.3 Τεμαχισμός με σταθερό διάστημα τεμαχισμού

Η χρησιμοποίηση σταθερού διαστήματος τεμαχισμού κατά την διάρκεια της φάσης του τεμαχισμού αποτελεί ακόμα μία αιτία για την παρουσίαση κατασκευαστικών αποκλίσεων. Όπως προαναφέρθηκε με τη διαδικασία του τεμαχισμού αντλούμε όλη την απαραίτητη γεωμετρική πληροφορία για την έναρξη της διαδικασίας της κατασκευής. Συνεπώς, η χρήση σταθερής απόστασης μεταξύ των διαδοχικών διατομών μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια στην ακρίβεια απόδοσης ορισμένων μορφολογικών χαρακτηριστικών είτε διότι 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). Προφανώς, τα κατασκευαστικά λάθη που οφείλονται στη διαδικασία του τεμαχισμού μπορούν να ελαχιστοποιηθούν χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν πιο μικρά διαστήματα τεμαχισμού. Μολαταύτα, μια τέτοια προσέγγιση είναι συνήθως τεχνικά αδύνατη ή εξαιρετικά δαπανηρή και χρονοβόρα.

3.4.4 Υπερστερεοποίηση (overcure)

Η υπερστερεοποίηση (overcure) αποτελεί φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται σε ορισμένες από τις επιφάνειες του αντικειμένου, εξαιτίας της στερεοποίησης των στρωμάτων σε βάθος μεγαλύτερο του ονομαστικού πάχους στρώματος προκειμένου να υπάρξει σύνδεση και συνεκτικότητα μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι το πραγματικό πάχος (ή βάθος στερεοποίησης) κάθε στρώματος να είναι μεγαλύτερο της ονομαστικής / θεωρητικής του τιμής (βλ. Σχήμα 3-11). Κατά αυτό τον τρόπο υπάρχουν αποκλίσεις στις διαστάσεις όλων εκείνων των επιφανειών οι οποίες «βλέπουν» προς την πλατφόρμα κατασκευής. Το φαινόμενο υπερστερεοποίησης αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή αντίστοιχης ανοχής (αντιστάθμισης) στο πολυεδρικό μοντέλο STL μέσω ειδικού λογισμικού.



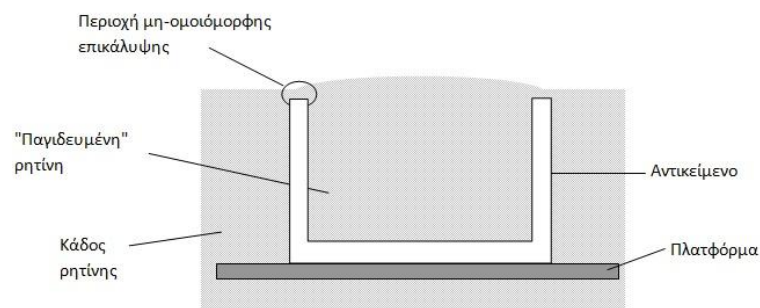
Σχήμα 3-11 Σχηματική αναπαράσταση φαινομένου υπερστερεοποίησης [39]

3.4.5 Συρρίκνωση (shrinkage)

Το φαινόμενο της συρρίκνωσης, όπως αυτό περιγράφεται στην παράγραφο 3.3 παρουσιάζεται σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας κατασκευής επηρεάζοντας ανάλογα την διαστασιολογική ακρίβεια του αντικειμένου. Αποτέλεσμα της συρρίκνωσης αποτελεί η διαφορά μεταξύ των διαστάσεων κατά την Χ και Υ διεύθυνση (ως ΧΥ ορίζουμε το επίπεδο της πλατφόρμας της μηχανής) του τελικού στερεοποιημένου/πολυμερισμένου στρώματος ρητίνης και των αντίστοιχων διαστάσεων της περιοχής, η οποία εκτίθεται σε ακτινοβολία.

3.5 Παγίδευση υγρής ρητίνης εντός του αντικειμένου κατά την κατασκευή

Για την περιγραφή του φαινομένου κατά το οποίο παγιδεύεται ρητίνη εντός αντικειμένου κατά την διάρκεια της κατασκευής του έχει επικρατήσει ο όρος «πρόβλημα δοχείου» (container effect) ή «κλειστού όγκου» (closed volume). Το συγκεκριμένο φαινόμενο οφείλεται στις επιφανειακές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της ρητίνης όταν δεν επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή υγρής ρητίνης στα όρια μεταξύ των ήδη στερεοποιημένων περιοχών και της παγιδευμένης ρητίνης (βλ. Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3-12 Σχηματική αναπαράσταση του προβλήματος δοχείου [39].

Η ένταση του προβλήματος εξαρτάται από το ιξώδες της ρητίνης (όσο μεγαλύτερο τόσο μεγαλύτερες οι επιφανειακές τάσεις) και στη γεωμετρία της περιοχής όπου παγιδεύεται ποσότητα

ρητίνης [41]. 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 [42]. 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 του φινιρίσματος.

4

Μετα-ευρετικές Τεχνικές Βελτιστοποίησης

4.1 Ορισμοί

Ορισμός 1. (Βελτιστοποίηση). Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης [43] μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ζεύγος (S, f) , όπου το $S \neq \emptyset$ αντιπροσωπεύει το χώρο λύσης ή το διάστημα αναζήτησης του προβλήματος, ενώ η f περιγράφει ένα ποιοτικό κριτήριο γνωστό και ως αντικειμενική συνάρτηση η οποία ορίζεται ως εξής:

$$f: S \rightarrow \mathbb{R} \quad (4.1)$$

Κατά συνέπεια, η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης συνίσταται στην εύρεση ενός συνόλου τιμών i^* για τις μεταβλητές απόφασης έτσι ώστε η λύση που αντιπροσωπεύεται από αυτές τις τιμές να ικανοποιεί την ακόλουθη ανισότητα:

$$f(i^*) \leq f(i), \quad \forall i \in S \quad (4.2)$$

Η γενικότητα των αποτελεσμάτων δεν περιορίζεται από την υπόθεση για την φύση του προβλήματος (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση), δεδομένου ότι μπορούμε να καθιερώσουμε μια ισοδυναμία μεταξύ των προβλημάτων μεγιστοποίησης και ελαχιστοποίησης ως εξής:

$$\max \{f(i) | i \in S\} \equiv \min \{-f(i) | i \in S\} \quad (4.3)$$

Σύμφωνα με την περιοχή του S , μπορούμε να ορίσουμε τη δυαδική βελτιστοποίηση ($S \subseteq \mathbb{B}$), τη φυσική βελτιστοποίηση ($S \subseteq \mathbb{N}$), τη συνεχή βελτιστοποίηση ($S \subseteq \mathbb{R}$), και την ετερογενή ή μικτή βελτιστοποίηση ($S \subseteq \{\mathbb{B} \cup \mathbb{N} \cup \mathbb{R}\}$).

Ο ορισμός της έννοιας της εγγύτητας μεταξύ των διαφορετικών λύσεων του χώρου λύσης είναι απαραίτητη για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Δύο λύσεις ορίζονται ως γειτονικές μεταξύ τους εάν ανήκουν στην ίδια γειτονιά του χώρου λύσης όπου ως γειτονιά (neighborhood) ορίζεται:

Ορισμός 2 (γειτονιά). Έστω (S, f) πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορούμε να ορίσουμε την δομή της γειτονιάς [43] στο S ως:

$$N: S \rightarrow S \quad (4.4)$$

έτσι ώστε για κάθε λύση $i \in S$ να ορίζεται ένα υποσύνολο $S_i \subseteq S$. Επίσης, αν και μόνο αν το i είναι στη γειτονιά του j , τότε και το j είναι επίσης στη γειτονιά του i .

$$j \in S_i \text{ iff } i \in S_j \quad (4.5)$$

Γενικά, σε ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να παρουσιάζει συχνά μια βέλτιστη λύση η οποία είναι βέλτιστη μόνο στη γειτονιά της (τοπικό βέλτιστο), αλλά που δεν είναι βέλτιστη εάν εξετάσουμε ολόκληρο το χώρο λύσης (ολικό βέλτιστο). Επομένως, μια μέθοδος βελτιστοποίησης μπορεί να παγιδευτεί σε ένα ακρότατο μίας συγκεκριμένης γειτονιάς, δημιουργώντας κατά συνέπεια την έννοια του τοπικού βέλτιστου:

Ορισμός 3 (τοπικό βέλτιστο). Έστω (S, f) πρόβλημα βελτιστοποίησης, και $S_{i'}$ η γειτονιά της λύσης $i' \in S_{i'}$, τότε i' είναι ένα τοπικό βέλτιστο [43] εάν ικανοποιείται η εξής ανισότητα (υποθέτοντας ελαχιστοποίηση):

$$f(i') \leq f(i), \quad \forall i \in S_{i'} \quad (4.6)$$

Κατά την αντιμετώπιση πραγματικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, αναγκαζόμαστε συνήθως να εξετάσουμε το πρόβλημα υπό το πρίσμα συγκεκριμένων περιορισμών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο τομέας των εφικτών λύσεων S περιορίζεται σε εκείνες που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς.

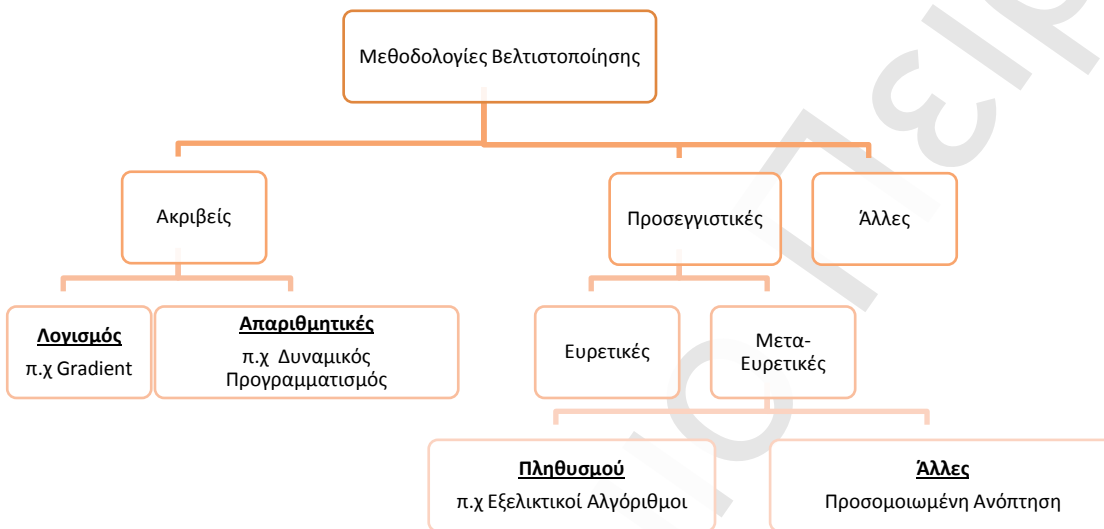
Ορισμός 4 (βελτιστοποίηση με περιορισμούς). Όντας (S, f) ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, ορίζουμε $M = \{i \in S \mid g_k(i) \geq 0 \forall k \in [1, \dots, q]\}$ ως την περιοχή των εφικτών λύσεων της αντικειμενικής συνάρτησης $f: S \rightarrow \mathbb{R}$. Οι συναρτήσεις $g_k: S \rightarrow \mathbb{R}$ ονομάζονται περιορισμοί [43].

4.2 Μεθοδολογίες Βελτιστοποίησης

Παραθέτουμε παρακάτω μία πολύ σύντομη παρουσίαση των κυριότερων παραδοσιακών μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης (βλ. Σχήμα 4-1) οι οποίες παρουσίασαν αξιόλογα αποτελέσματα, όσον αφορά την εφαρμογή τους σε υπολογιστικές μηχανές και κυριάρχησαν για πολλά χρόνια [44].

1. Μέθοδοι βασισμένες στο λογισμό (calculus-based methods): Έχουν γίνει αντικείμενο ευρείας μελέτης και διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις έμμεσες και τις άμεσες. Οι έμμεσες ασχολούνται με την εύρεση τοπικών ακρότατων επιλύοντας συνήθως ένα σύνολο μη γραμμικών συναρτήσεων. Οι άμεσες από την πλευρά τους ψάχνουν για τοπικά ακρότατα κάνοντας μικρά άλματα στη συνάρτηση (hillclimbing). Αν και αρκετά δοκιμασμένες και οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα. Το βασικότερο από αυτά είναι ότι εμφανίζουν τοπικότητα στην εμβέλεια.
2. Απαριθμητικές (enumerative) ή τυχαίες (random) μέθοδοι: Συναντώνται σε πολλές μορφές και σε διάφορα προβλήματα. Μέσα σε ένα πεπερασμένο (ή άπειρα διακριτό) χώρο λύσης, επιδιώκεται η εύρεση των βέλτιστων με αναζήτηση από σημείο προς σημείο. Παρόλο που η απλότητα στην εφαρμογή τους τις καθιστά ελκυστικές, γίνεται προφανές ότι η αποδοτικότητά τους είναι πολύ χαμηλή, κάτι που δεν τις κάνει ιδιαίτερα δημοφιλείς. Σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιούνται μόνες τους, αλλά σε συνδυασμό με άλλες αποδοτικότερες μεθόδους.
3. Μέθοδοι επαναληπτικής αναζήτησης (iterative search): Πρόκειται για ένα παραγωγικό συνδυασμό των μεθόδων των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Μόλις η μέθοδος hillclimbing εντοπίσει ένα τοπικό μέγιστο ή ένα τοπικό ελάχιστο, επιλέγεται τυχαία ένα νέο σημείο και αρχίζει ξανά η ίδια διαδικασία για τον εντοπισμό ενός νέου ακρότατου. Αυτό επαναλαμβάνεται αρκετές φορές διατηρώντας πάντα την καλύτερη τιμή που έχει ανακαλυφθεί. Η τεχνική αυτή έχει το πλεονέκτημα της απλότητας (δεν υπάρχει περίπτωση παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα), αλλά όταν τα τοπικά ακρότατα είναι πολλά, η απόδοσή της ελαττώνεται σημαντικά.
4. Μέθοδοι δυναμικού προγραμματισμού (Dynamic Programming): Αποτελεί προγραμματιστική τεχνική που βρίσκει εφαρμογή σε περιορισμένη περιοχή προβλημάτων. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη βελτιστοποίηση της λύσης ενός προβλήματος πολλαπλών φάσεων, για καθεμία από τις οποίες είναι διαθέσιμος ένας αριθμός εναλλακτικών αποφάσεων.

5. Ευρετικές μέθοδοι (heuristic methods): Ευρετική ονομάζεται κάθε μη αλγοριθμική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, στην οποία η πορεία προς ένα τελικά αποδεκτό αποτέλεσμα στηρίζεται σε μια σειρά εμπειρικών κανόνων (Rules of thumb). Αν και οι ευρετικές μέθοδοι δίνουν απλές και ικανοποιητικές λύσεις σε αρκετά προβλήματα, τίποτα δεν εγγυάται ότι αυτές οι λύσεις είναι οι βέλτιστες δυνατές. Συνήθως δίνουν προσεγγίσεις των βέλτιστων λύσεων και κάποιες φορές προτιμώνται, επειδή δίνουν αποδεκτές, ικανοποιητικές δηλαδή ακριβείας/ποιότητας, απαντήσεις σε σύντομο χρόνο.



Σχήμα 4-1 Σχηματική κατηγοριοποίηση μεθοδολογιών βελτιστοποίησης

4.2.1 Μετά-ευρετικές Τεχνικές Βελτιστοποίησης

Κατά την διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών ένα νέο είδος προσεγγιστικών τεχνικών βελτιστοποίησης έχει ανελιχτεί, προερχόμενο βασικά από τη συσσωμάτωση ad hoc ευρετικών μεθόδων (προσεγγιστικές τεχνικές που αποτελούνται από πιθανολογικά καθοδηγούμενα συστατικά μέρη) σε υψηλού επιπέδου περιβάλλοντα προκειμένου να καταστεί δυνατή η «εξερεύνηση» ενός χώρου λύσεων αποτελεσματικά και αποδοτικά. Αυτές οι μέθοδοι έγιναν γνωστές με τον όρο μετα-ευρετικές μέθοδοι (Metaheuristics) [43]. Γενικά μπορούμε να ορίσουμε ότι οι μετα-ευρετικές μέθοδοι είναι στρατηγικές υψηλού επιπέδου που διαθέτουν ορισμένη δομή η οποία «προγραμματίζει» την εφαρμογή ενός συνόλου τελεστών (Variation Operators) για να ερευνήσει χώρους λύσεων υψηλών διαστάσεων και σύνθετης φύσης.

Η έρευνα που αφορά την εφαρμογή ευρετικών καθώς και μετα-ευρετικών μεθοδολογιών για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης βρίσκεται σήμερα στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Το κύριο πλεονέκτημα που αντιπαραθέτουν στις προ-αναφερθείσες μεθοδολογίες

οι αλγόριθμοι ακριβείας είναι η εγγύηση ότι θα βρεθεί η βέλτιστη λύση για ένα πρόβλημα [45]. Ωστόσο, το κρίσιμο μειονέκτημα που παρουσιάζει η εφαρμογή ακριβών μεθόδων σε πραγματικά προβλήματα είναι η εκθετική αύξηση του χρόνου εκτέλεσης καθώς αυξάνει με το μέγεθος του εκάστοτε προβλήματος (NP-Hard), καθώς επίσης και οι πλασματικοί περιορισμοί που επιβάλλονται συχνά προκειμένου να προσαρμοστούν οι μεθοδολογίες στη φύση του εκάστοτε προβλήματος και να καταστεί δυνατή η λύση του. Επιπρόσθετα, η χρήση ειδικών ευρετικών αλγορίθμων τείνει να δίνει αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα [46], αλλά οι αποκτηθείσες λύσεις δεν είναι γενικά υψηλής ποιότητας [47]. Αντίθετα, η εφαρμογή μεταευρετικών μεθόδων παρουσιάζει μια ισόρροπη κλιμάκωση, υπολογίζοντας καλές λύσεις (ακόμα και το ολικό βέλτιστο μερικές φορές) συνήθως σε εύλογο χρόνο.

Λόγω της ευρείας ανάπτυξής τους τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζεται ένας μεγάλος αριθμός μετα-ευρετικών τεχνικών στη βιβλιογραφία [48, 49], οι οποίες προορίζονται για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διαφορετικές ομάδες σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες που τις χαρακτηρίζουν. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε μεταξύ των μετα-ευρετικών μεθόδων που αντλούν από τις διαδικασίες της φύσης ή όχι, μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποιούν πληθυσμούς λύσεων έναντι αυτών που βασίζονται στην εξέλιξη μιας λύσης, μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποιούν στατικές αντικειμενικές συναρτήσεις έναντι αυτών που χρησιμοποιούν δυναμικές αντικειμενικές συναρτήσεις, μεταξύ αυτών που χρησιμοποιούν μια ή περισσότερες δομές γειτνίασης, ή μεταξύ των μεθόδων που απομνημονεύουν προηγούμενα βήματα αναζήτησης έναντι των τεχνικών εκείνων που η μνήμη τους περιορίζεται στην εκάστοτε παρούσα λύση (Memoryless Techniques). Μεταξύ των γνωστότερων μετα-ευρετικών μεθοδολογιών κατατάσσονται οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms)[50], η Επαναληπτική Τοπική Αναζήτηση (Iterative Local Search) [51], η Προσομοιωμένη Ανόπτωση (Simulated Annealing) [52], η Αναζήτηση Ταμπού (Tabu Search) [53], η Αναζήτηση Μεταβλητής Γειτονιάς (Variable Neighborhood Search) [54], και η Βελτιστοποίηση Αποικιών Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) [55].

Μεταξύ των προαναφερθεισών μεθοδολογιών, οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι καθώς και οι Προσομοιωμένη Ανόπτωση [52, 53] είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες και περισσότερο δοκιμασμένες τεχνικές βελτιστοποίησης. Σε γενικές γραμμές οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι συνίστανται στην εξέλιξη/βελτίωση ενός πληθυσμού «ατόμων» όπου κάθε άτομο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα, μιμούμενοι τη βιολογική διαδικασία της εξέλιξης μέσω μιας επαναληπτικής και πιθανολογικής διαδικασίας. Για να μετρηθεί η καταλληλότητα ενός ατόμου να αποτελέσει τη βέλτιστη λύση ορίζεται μια αντικειμενική αξία. Αυτή η αξία αντιπροσωπεύει τις ποσοτικές

πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο για να καθοδηγήσουν την αναζήτηση νέων λύσεων. Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι παρουσιάζουν έως τώρα τις καλύτερες προοπτικές και επιδόσεις όσον αφορά στην ισορροπία μεταξύ της εξερεύνησης νέων «περιοχών» του χώρου λύσης και της εκμετάλλευσης των καλών λύσεων που ανακαλύπτονται. Αυτή η ισορροπία εξερεύνησης/εκμετάλλευσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί ακόμα περισσότερο με την προσαρμογή στη φύση κάθε προβλήματος των παραμέτρων του αλγορίθμου, όπως το μέγεθος του χρησιμοποιούμενου πληθυσμού, οι τελεστές διαφοροποίησης (Variation Operators) που εφαρμόζονται, ή η πιθανότητα της εφαρμογής τους.

Η Προσομοιωμένη Ανόπτηση [56] είναι μια γενίκευση της μεθόδου Monte Carlo, κατάλληλη για προβλήματα βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας, ειδικά για εκείνα όπου το επιθυμητό ολικό βέλτιστο περιβάλλεται από πολλά τοπικά βέλτιστα. Η λειτουργία της βασίζεται στις θερμοδυναμικές αρχές της αντίστοιχης διαδικασίας της ανόπτησης στα κρυσταλλικά στερεά υλικά. Στη διαδικασία ανόπτησης στερεών, το υλικό θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία που επιτρέπει σε πολλά μόρια να κινούνται ελεύθερα το ένα ως προς το άλλο. Κατόπιν το στερεό ψύχεται, με μια σχετικά αργή χρονικά διαδικασία, έως ότου το υλικό παγώσει και μετατρέπεται σε κρύσταλλο με αποτέλεσμα τα μόρια του να είναι τέλεια διατεταγμένα. Τότε το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ελάχιστης εσωτερικής ενέργειας. Η θερμοκρασία του υλικού πρέπει να ελαττώνεται βαθμιαία έτσι ώστε σε κάθε θερμοκρασία τα άτομα να μπορούν να κινηθούν αρκετά προς πιο σταθερές δομές. Γνωρίζοντας ότι ο στόχος σε ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι να βρεθεί μια καλή προς βέλτιστη λύση, δηλαδή η «ελάχιστη ενεργειακή κατάσταση του εν λόγω προβλήματος», η τεχνική της Προσομοιωμένης Ανόπτησης χρησιμοποιεί μια ανάλογη λειτουργία «ψύξης» για το μετασχηματισμό μιας «φτωχής», άτακτης λύσης σε μια διατεταγμένη, επιθυμητή λύση, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, να ελαχιστοποιηθεί δηλαδή η «εσωτερική του ενέργεια».

4.2.2 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Η βιολογική εξέλιξη παρήγαγε εξαιρετικά σύνθετα και αυτόνομα έμβια όντα τα οποία μπορούν να «λύσουν» εξαιρετικά δύσκολα προβλήματα, όπως για παράδειγμα η συνεχής προσαρμογή σε σύνθετα και αβέβαια περιβάλλοντα. Για αυτόν το λόγο, τα ανώτερα έμβια όντα, όπως τα θηλαστικά, είναι εξοπλισμένα με άριστες ικανότητες αναγνώρισης (Patterns Recognition), εκπαίδευσης και νοημοσύνης. Η μεγάλη ποικιλία των καταστάσεων στις οποίες η ζωή προσαρμόστηκε δείχνει ότι η διαδικασία της εξέλιξης βασίζεται σε γερά θεμέλια και είναι σε θέση να επιλύει πολλές κατηγορίες προβλημάτων. Η διαπίστωση αυτή αποδεικνύει ότι υπάρχουν και

άλλοι τρόποι, που προέρχονται κυρίως από την ποιοτική γνώση των φυσικών νόμων, πέρα από τις καθιερωμένες ακριβείς αναλυτικές (μαθηματικές) διαδικασίες προκειμένου να δημιουργηθούν σύνθετα και αποδοτικά συστήματα [57].

Σύμφωνα με τον Δαρβίνο [58], οι αρχικοί μηχανισμοί της εξέλιξης των έμβιων όντων στηρίζονται στη διαδικασία του ανταγωνισμού η οποία επιλέγει τα καλύτερα προσαρμοσμένα στο περιβάλλον τους άτομα, εξασφαλίζοντας ότι κατά την μετάβαση από τη μια γενιά στην επόμενη θα μεταδοθούν στους απογόνους τα χρήσιμα χαρακτηριστικά που επέτρεψαν την επιβίωση των γονέων στους απογόνους τους. Ειδικότερα, αυτός ο μηχανισμός κληρονομιάς είναι βασισμένος σε μια μορφή συνεργασίας που εφαρμόζεται κατά την αναπαραγωγή. Η υπόθεση ότι η θεωρία του Δαρβίνου, που εμπλουτίζεται από την τρέχουσα γνώση της γενετικής, περιγράφει τους μηχανισμούς της εξέλιξης δεν έχει ακόμα τεκμηριωθεί πλήρως. Κανένας δεν μπορεί να επιβεβαιώσει μέχρι σήμερα ότι αυτοί οι μηχανισμοί είναι σαφώς κατανοητοί, και ότι δεν υπάρχει κανένα ουσιαστικό φαινόμενο που παραμένει ανεξερεύνητο. Εντούτοις, ο νέο-Δαρβινισμός θεωρείται η πιο πλήρης διαθέσιμη θεωρία της εξέλιξης μέχρι στιγμής. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών διευκόλυνε τη μελέτη αυτής της θεωρίας μέσω προσομοίωσης και μερικοί ερευνητές εξέφρασαν την επιθυμία να εξετάσουν την εφαρμογή της σε εφαρμοσμένα τεχνικά προβλήματα ήδη από την δεκαετία του 1950. Η εργασία όμως αυτή δεν είχε πειστικά ευρήματα λόγω της ανεπαρκούς διαθέσιμης γνώσης στο πεδίο της γενετικής εκείνη την περίοδο καθώς επίσης και λόγω των ανεπαρκών επιδόσεων των υπολογιστών εκείνης της εποχής. Επιπλέον, η ακραία βραδύτητα με την οποία σημειώνει πρόοδο η εξέλιξη φάνταζε ως ανυπέρβλητο εμπόδιο στην ιδέα ότι μια τέτοια διαδικασία μπορεί να λειτουργεί πρακτικά.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '60 και της δεκαετίας του '70, όπου η υπολογιστική ισχύς πολλαπλασιάστηκε άρχισαν οι πρώτες προσπάθειες να μοντελοποιηθεί η διαδικασία της εξέλιξης και να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Μεταξύ εκείνων, τρεις προσεγγίσεις προέκυψαν ανεξάρτητα, χωρίς να γνωρίζει η μια την ύπαρξη της άλλης μέχρι την αρχή της δεκαετίας του '90:

- Οι Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolutionary Strategies) των H.P. Schwefel και του I.Rechenberg [59, 60] που αναπτύχθηκαν στο μέσο της δεκαετίας του '60 ως μέθοδος βελτιστοποίησης με πρώτη εφαρμογή τους την βελτιστοποίηση του αεροδυναμικού σχεδιασμού σωμάτων προκειμένου να μειωθεί η δύναμη (αεροδυναμική αντίσταση) οπισθέλκουσα που παρουσίαζαν μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα.

- Ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming) του Fogel [61] που στόχευε, επίσης κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '60, να χρησιμοποιήσει την προσομοίωση της εξέλιξης ως διαδικασία «εκμάθησης» προκειμένου να βελτιώσει την «τεχνητή νοημοσύνη».
- Ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm) του J.H. Holland [62] που παρουσιάστηκε το 1975 και ήταν ο πρώτος αλγόριθμος που χρησιμοποίησε εκτός από την μετάλλαξη και την «βιολογική αναπαραγωγή» ως μηχανισμό δημιουργίας νέων λύσεων.

Έκτοτε, αυτές οι προσεγγίσεις υποβλήθηκαν σε πολλές τροποποιήσεις σύμφωνα με την ποικιλία των προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έγιναν εξαιρετικά δημοφιλείς μετά από τη δημοσίευση του βιβλίου “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning” του Goldberg D. E. το 1989 [63]. Αυτό το βιβλίο, το οποίο δημοσιεύθηκε παγκοσμίως, οδήγησε σε μια εκθετική αύξηση του ενδιαφέροντος για αυτόν τον τομέα.

4.2.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) είναι τεχνικές βελτιστοποίησης οι οποίες βασίζονται στην «εξέλιξη» πληθυσμών λύσεων προκειμένου να καταστεί δυνατή η αναζήτηση βέλτιστων τιμών σε σύνθετους χώρους λύσης. Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γενετικούς Αλγόριθμους είναι η μίμηση των μηχανισμών της φύσης, όπως η «φυσική επιλογή» [64] και η γενετική κληροδότηση [64] καλών γνωρισμάτων από τους προγόνους στους απογόνους. Μεγάλο μέρος της εξέλιξης εξαρτάται από τη διαδικασία της «φυσικής επιλογής» διαφορετικών ατόμων που ανταγωνίζονται για τους πόρους του περιβάλλοντος. Οι δυσκολίες, τα εμπόδια και οι αντιξοότητες που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής των οργανισμών είναι οι παράγοντες, που καθορίζουν ποιοι από αυτούς θα κατορθώσουν να ζήσουν και να πολλαπλασιαστούν βάσει της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται στην αλλαγή του περιβάλλοντος και των συνθηκών διαβίωσης, αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά τους. Κατά αυτό τον τρόπο σε κάθε βιολογικό είδος, μερικά άτομα αφήνουν περισσότερους απογόνους σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και έτσι τα κληροδοτούμενα χαρακτηριστικά των αναπαραγωγικά επιτυχημένων ατόμων γίνονται περισσότερα στην επόμενη γενιά.

Κατά αντιστοιχία η γενετική ομάδα ενός δεδομένου πληθυσμού περιέχει ενδεχομένως τη βέλτιστη λύση, ή μια καλή λύση, σε ένα δεδομένο προσαρμοστικό πρόβλημα. Αυτή η λύση δεν είναι "ενεργή" επειδή ο γενετικός συνδυασμός στον οποίο στηρίζεται είναι διεσπαρμένος ανάμεσα στα «άτομα» που αποτελούν τον πληθυσμό. Μόνο η ένωση των διαφορετικών γονιδιωμάτων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία της επιθυμητής λύσης. Η ένωση αυτή οδηγεί σε αλλαγές που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των ατόμων και πραγματοποιείται στο επίπεδο των χρωμοσωμάτων τους (chromosomes), που είναι πολύπλοκα οργανικά μόρια τα οποία

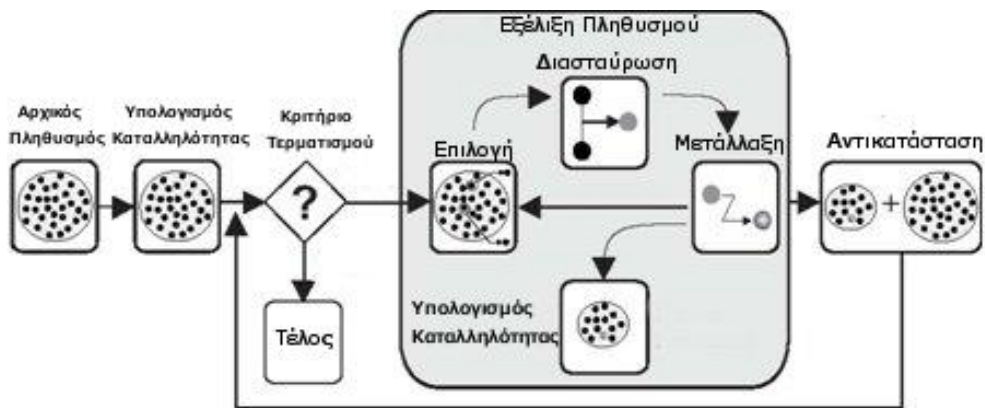
κωδικοποιούν τη δομή των χαρακτηριστικών των ατόμων. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, γνωστά ως γονίδια (genes). Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια ονομάζεται γενότυπος (genotype). Η δημιουργία ενός νέου οργανισμού περιλαμβάνει την αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων. Το σύνολο των «ορατών» χαρακτηριστικών του και της συμπεριφοράς του, που καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων, συνιστούν το φαινότυπο (phenotype) [65].

Κυρίαρχες λειτουργίες για την εξέλιξη ενός πληθυσμού είναι η αναπαραγωγή (reproduction) και η μετάλλαξη (mutation). Κατά τη μετάλλαξη γίνεται με τυχαίο τρόπο η αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων, συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. ακτινοβολία), έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό. Η μετάλλαξη, μερικές φορές, μπορεί να προκαλέσει βελτιώσεις και, χωρίς αμφιβολία, μερικά λάθη που έγιναν αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την προοδευτική εξέλιξη της ζωής [44, 65].

Προϊόν της αναπαραγωγής είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται τόσο από τον πατέρα όσο και από τη μητέρα. Έτσι, για κάθε χαρακτηριστικό, το νέο άτομο έχει πάρει γονίδια και από τους δύο γονείς. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος που καλούνται τόποι (loci). Κάθε γονίδιο σε συγκεκριμένο τόπο μπορεί να πάρει ορισμένες τιμές. Το γονίδιο (δηλαδή η τιμή του γονιδίου) που τελικά καθορίζει το χαρακτηριστικό λέγεται κυρίαρχο ή επικρατές (dominant) και το άλλο υπολειπόμενο (recessive). Γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα (που είναι υπεύθυνα δηλαδή για το ίδιο χαρακτηριστικό), λέγονται αλληλόμορφα (alleles).

4.2.3.1 Περιγραφή λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων

Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζεται η δομή της λειτουργίας ενός Γενετικού αλγορίθμου. Όπως γίνεται αντιληπτό ο ΓΑ λειτουργεί επαναληπτικά εξελίσσοντας συνεχώς έναν πληθυσμό ατόμων. Αυτή η εξέλιξη προκύπτει ως συνέπεια της εφαρμογής πιθανολογικών τελεστών τροποποίησης (Variation Operators) όπως η επιλογή, η αναπαραγωγή, και η μετάλλαξη στον πληθυσμό προκειμένου να δημιουργηθεί μια ολόκληρη γενιά νέων ατόμων.



Σχήμα 4-2 Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός ΓΑ [4.1].

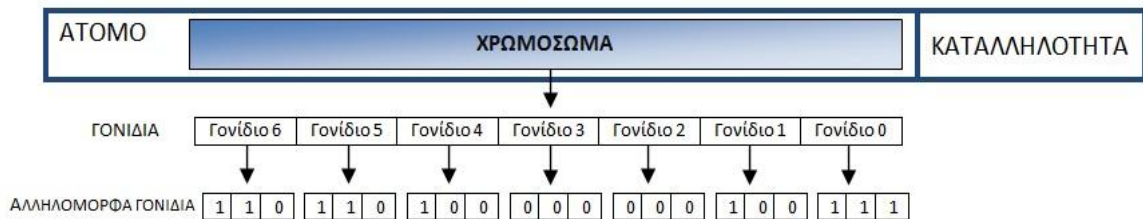
Ο αρχικός πληθυσμός παράγεται συνήθως τυχαία, αν και είναι επίσης συνηθισμένο να χρησιμοποιείται κάποια τεχνική επιλεκτικής εισαγωγής αρχικών λύσεων καλής ποιότητας προκειμένου να επιταχυνθεί η αναζήτηση από την έναρξή της. Η διαδικασία του υπολογισμού της καταλληλότητας (Fitness) αποδίδει μια τιμή σε κάθε άτομο, η οποία είναι αντιπροσωπευτική της καταλληλότητάς του να αποτελέσει λύση στο υφιστάμενο πρόβλημα. Αυτή η αξιολόγηση μπορεί να εκτελεσθεί μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης (π.χ., υπό μορφή μαθηματικής έκφρασης ή μέσω προσομοίωσης) ή υποκειμενικά, με την επιλογή των καλύτερων λύσεων από έναν εξωτερικό πράκτορα (Agent). Μετά από την παραγωγή του αρχικού πληθυσμού και τον υπολογισμό της καταλληλότητας κάθε ατόμου του, αρχίζει ο αναπαραγωγικός κύκλος. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία αποτελείται από τη διαδοχική παραγωγή νέου πληθυσμού μέσω της επιλογής γονέων, την αναπαραγωγή τους, την πιθανή μετάλλαξη μέρους των αποκτηθέντων απογόνων, την αξιολόγηση της τιμής καταλληλότητάς τους και τελικά την αντικατάσταση μέρους του πληθυσμού από τους απογόνους έως ότου ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού. Το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου αποτελεί συνήθως η επίτευξη ενός προκαθορισμένου αριθμού αναπαραγωγικών επαναλήψεων/κύκλων, ή η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης του υφιστάμενου προβλήματος.

4.2.3.2 Δομικά Στοιχεία των Γενετικών Αλγορίθμων

4.2.3.2.1 Άτομα

Όπως προαναφέρθηκε οι Γενετικοί Αλγόριθμοι λειτουργούν εξελίσσοντας έναν πληθυσμό ατόμων. Ένα άτομο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση του υφιστάμενου προβλήματος και περιγράφεται χρησιμοποιώντας την γενοτυπική και φαινοτυπική του απεικόνιση. Οι απεικονίσεις αυτές

προέρχονται από την παρατήρηση ότι η φύση διακρίνει μεταξύ του γενετικού κώδικα ενός ατόμου και των φυσικών του χαρακτηριστικών του, όπως η εξωτερική εμφάνιση. Ο γενέτυπος αντιπροσωπεύει όλες τις πληροφορίες που αποθηκεύονται στα χρωμοσώματα και μας επιτρέπει να περιγράψουμε ένα άτομο σε επίπεδο γονιδίων. Αντίστοιχα, ο φαινότυπος περιγράφει την εξωτερική εμφάνιση ενός ατόμου. Για την κατασκευή του φαινότυπου εφαρμόζεται κατάλληλος μετασχηματισμός ο οποίος χρησιμοποιεί τη γενετική πληροφορία [66].



Σχήμα 4-3 Σχηματική αναπαράσταση γενέτυπου και γονιδίων.

Στο Σχήμα 4-3 παρατηρούμε την δομή και τις διαφορές μεταξύ του γενέτυπου, των αλληλόμορφων γονιδίων και των γονιδίων. Αν και η φύση χρησιμοποιεί συχνά περισσότερα από ένα χρωμοσώματα, οι περισσότερες εφαρμογές ΓΑ χρησιμοποιούν μόνο ένα χρωμόσωμα για την κωδικοποίηση των γενετικών πληροφοριών. Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από πολλά αλληλόμορφα γονίδια. Τα αλληλόμορφα γονίδια είναι οι μικρότερες μονάδες πληροφοριών σε ένα χρωμόσωμα. Στη φύση, τα αλληλόμορφα γονίδια υπάρχουν σε ζεύγη, ενώ στις περισσότερες εφαρμογές ΓΑ ένα αλληλόμορφο γονίδιο αντιπροσωπεύεται από ένα και μόνο σύμβολο. Εάν π.χ. χρησιμοποιήσουμε μια δυαδική αντιπροσώπευση, ένα αλληλόμορφο γονίδιο έχει είτε την τιμή 0 είτε 1.

Εάν μια φαινοτυπική ιδιότητα ενός ατόμου, όπως το μέγεθος των ματιών του, καθορίζεται από ένα ή περισσότερα αλληλόμορφα γονίδια, τότε αυτά τα αλληλόμορφα γονίδια μαζί ομαδοποιούνται ως ένα γονίδιο. Ένα γονίδιο είναι μια περιοχή σε ένα χρωμόσωμα που χαρακτηρίζεται ως ενιαία και το οποίο είναι υπεύθυνο για μια συγκεκριμένη φαινοτυπική ιδιότητα. Η διάκριση μεταξύ των γενετικών και των φαινοτύπων των ατόμων ενός πληθυσμού είναι πολύ σημαντική. Η φαινοτυπική απεικόνιση ενός ατόμου καθορίζει τις πιθανότητες επιβίωσής του. Επομένως, όταν πραγματοποιείται σύγκριση των δυνατοτήτων των ατόμων ενός πληθυσμού πρέπει να γίνεται στο επίπεδο του φαινότυπου. Εντούτοις, η αναπαραγωγή των ατόμων προς δημιουργία του νέου πληθυσμού, πρέπει να πραγματοποιείται στο επίπεδο του γενέτυπου. Κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής, οι απόγονοι δεν κληρονομούν τις φαινοτυπικές ιδιότητες των γονέων τους, αλλά μόνο τις γενετικές. Το γεγονός ότι οι απόγονοι κληρονομούν το γενετικό

υλικό και από τους δύο γονείς έχει ως αποτέλεσμα οι τελεστές τροποποίησης να εφαρμόζονται στο επίπεδο του γενέτυπου, ενώ η αξιολόγηση των ατόμων να εκτελείται στο επίπεδο του φαινοτύπου.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι οι ΓΑ δουλεύουν βάσει κωδικοποίησης ενός συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος. Έτσι οι ΓΑ απαιτούν το σύνολο των φυσικών παραμέτρων της βελτιστοποίησης να κωδικοποιηθεί σε συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους κάνοντας χρήση μιας συγκεκριμένης κωδικοποίησης. Ο πιο κοινός τρόπος κωδικοποίησης είναι η δυαδική απεικόνιση (βλ. Σχήμα 4-3) όπου ένα χρωμόσωμα αποτελείται από μια συμβολοσειρά δυαδικών ψηφίων που αντιπροσωπεύουν κάποια χαρακτηριστικά της λύσης. Αποτελεί επίσης κοινή πρακτική ολόκληρη η συμβολοσειρά των δυαδικών ψηφίων να αντιπροσωπεύει έναν αριθμό που αποτελεί και την λύση του προβλήματος [67]. Η δυαδική κωδικοποίηση μπορεί να περιγράψει πολλά πιθανά χρωμοσώματα χρησιμοποιώντας μικρό αριθμό αλληλόμορφων γονιδίων. Ωστόσο, αυτού του είδους η κωδικοποίηση δεν είναι φυσική για πολλά προβλήματα, με αποτέλεσμα μερικές φορές να πρέπει να γίνουν διορθώσεις αφότου ολοκληρωθεί η γενετική λειτουργία της αναπαραγωγής. Εκτός από τη δυαδική κωδικοποίηση πολλές φορές χρησιμοποιούνται και άλλες μέθοδοι κωδικοποίησης με περισσότερα σύμβολα όπως η οκταδική και η δεκαεξαδική. Διαδεδομένος επίσης τρόπος κωδικοποίησης είναι η Απεικόνιση Τιμών (real coding) όπου κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από μια σειρά τιμών οι οποίες μπορεί να αφορούν σε οποιαδήποτε παράμετρο συνδέεται με το πρόβλημα. Αυτή η κωδικοποίηση παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα όταν απαιτείται να κωδικοποιηθούν περίπλοκες τιμές, όπως οι πραγματικοί αριθμοί, περίπτωση στην οποία η χρήση της δυαδικής απεικόνισης θα ήταν εξαιρετικά δυσχερής. Τέλος, πολύ συχνά χρησιμοποιείται και η Απεικόνιση Εναλλαγής (permutation coding) όπου το χρωμόσωμα αντιπροσωπεύει την σειρά διάταξης μιας ακολουθίας οντοτήτων (πχ τη σειρά με την οποία στοιβάζονται σε μια αποθήκη εμπορεύματα)

4.2.3.2.2 Πληθυσμός

Οι ΓΑ εκτελούν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα, αντίθετα από πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης όπου η αναζήτηση πραγματοποιείται βηματικά, εξερευνώντας το πεδίο ορισμού του προβλήματος από σημείο σε σημείο. Η βηματική αναζήτηση ενέχει αρκετούς κινδύνους, ο κυριότερος από τους οποίους είναι να εγκλωβιστεί η αναζήτηση σε περιοχή τοπικού ακρότατου, που δεν είναι ολικό. Οι ΓΑ μειώνουν αυτόν τον κίνδυνο εξερευνώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων το οποίο ονομάζουμε πληθυσμό.

Οι σημαντικότερες ερωτήσεις που εξετάζονται κατά το σχεδιασμό ενός ΓΑ είναι αρχικά το μέγεθος του πληθυσμού, και αφετέρου η μέθοδος με την οποία αυτός δημιουργείται. Η επιλογή του

μεγέθους του πληθυσμού έχει προσεγγιστεί από διάφορες θεωρητικές απόψεις, αν και η επικρατούσα τάση ήταν πάντα ένας συμβιβασμός μεταξύ της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο πληθυσμός τόσο ευκολότερο είναι να ερευνηθεί ο χώρος αναζήτησης. Ωστόσο, έχει τεκμηριωθεί ότι ο χρόνος που χρειάζεται για να συγκλίνει ένας ΓΑ απατούνται $O(n \log n)$ [65] υπολογισμοί σε όρους αντικειμενικής συνάρτησης, όπου n είναι το μέγεθος του πληθυσμού. Ορίζουμε ότι ο πληθυσμός έχει συγκλίνει όταν η σύνθεση όλων των ατόμων είναι τόσο όμοια ώστε περαιτέρω βελτίωση να μπορεί να προέλθει ενδεχομένως μόνο από μετάλλαξη και όχι μέσω αναπαραγωγής. Ο Goldberg [68, 69] έχει αποδείξει επίσης ότι η αποτελεσματικότητα του ΓΑ να φθάσει στο ολικό βέλτιστο αντί τοπικών είναι σε μεγάλο βαθμό ανάλογη του μεγέθους του πληθυσμού. Συνοψίζοντας, ένας μεγάλος πληθυσμός είναι αρκετά χρήσιμος αλλά ταυτόχρονα απαιτεί πολύ περισσότερο υπολογιστικό κόστος.

Διαισθητικά φαίνεται ότι πρέπει να υπάρχει κάποια βέλτιστη τιμή για το μέγεθος του πληθυσμού για ένα δεδομένο μήκος συμβολοσειράς, εξαιτίας του γεγονότος ότι ένας πάρα πολύ μικρός πληθυσμός δεν θα έδινε ικανοποιητικό περιθώριο για να εξερευνηθεί ο χώρος λύσης αποτελεσματικά, ενώ ένας πάρα πολύ μεγάλος πληθυσμός θα εξασθένιζε την αποδοτικότητα της μεθόδου τόσο ώστε να μην αναμένεται να βρεθεί μια καλή λύση σε ένα λογικό υπολογιστικό χρόνο. Η αρχική εργασία του Goldberg [68] προσπαθώντας να απαντήσει σε αυτήν την ερώτηση έδειξε ότι το μέγεθος του πληθυσμού πρέπει να αυξηθεί ως εκθετική συνάρτηση του μήκους της χρησιμοποιηθείσας συμβολοσειράς. Ωστόσο, τα εμπειρικά αποτελέσματα από πολλούς ερευνητές (Grefenstette [70], Schaffer et al. [71]) προτείνουν ότι ένα μικρό μέγεθος πληθυσμού ακόμα και της τάξης των 30 ατόμων είναι επαρκές στις περισσότερες περιπτώσεις. Επιπρόσθετα, πρόσφατες έρευνες οδήγησαν τον Goldberg [72] και τους συνεργάτες τους στο συμπέρασμα ότι ακόμα και η γραμμική εξάρτηση του μεγέθους πληθυσμού σε σχέση με το μήκος της συμβολοσειράς είναι επαρκής. Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι ένα μέγεθος πληθυσμού μεταξύ 30 και 100 ατόμων χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των υλοποιήσεων ΓΑ, αλλά οπωσδήποτε αυτό το μέγεθος μπορεί να τροποποιηθεί σύμφωνα με την ισορροπία μεταξύ διατιθέμενης υπολογιστικής ισχύος έναντι της ποιότητας του αποτελέσματος που επιτυγχάνεται.

4.2.3.2.3 Επιλογή και Αντικατάσταση

Σε κάθε γενεά, τα άτομα αναπαράγονται, επιζούν ή εξαφανίζονται από τον πληθυσμό στο πλαίσιο της δράσης δύο τελεστών επιλογής (Selection Operators) οι οποίοι είναι:

- Η επιλογή ατόμων προς αναπαραγωγή (Selection Scheme), ή αλλιώς η διαδικασία της επιλογής η οποία καθορίζει πόσες φορές ένα άτομο θα αναπαραχθεί σε μια δεδομένη γενεά.
- Η επιλογή για αντικατάσταση (Replacement Scheme), ή αλλιώς η διαδικασία της αντικατάστασης η οποία καθορίζει ποια άτομα θα πρέπει να εξαφανιστούν από τον πληθυσμό σε κάθε γενεά έτσι ώστε, από γενεά σε γενεά, το μέγεθος του πληθυσμού να παραμένει σταθερό ή σπανιότερα κάτω από τον έλεγχο μιας προκαθορισμένης πολιτικής.

Διαδικασία Επιλογής

Σύμφωνα με την θεωρία του Δαρβίνου, όσο καλύτερο/ικανότερο θεωρείται ένα άτομο, τόσο συχνότερα αυτό επιλέγεται για να αναπαραχθεί ή να επιζήσει. Ακόμα και εάν ένας από τους δύο τελεστές επιλογής δεν ευνοεί τα ικανότερα άτομα έναντι των άλλων, είναι απαραίτητο ως σύνολο οι δύο τελεστές κατά τη διάρκεια ζωής μιας γενεάς να λειτουργούν μεροληπτικά υπέρ του καλύτερου. Σύμφωνα με τον Back [73], η διαδικασία επιλογής μπορεί να ελέγξει το μέγεθος της εξερεύνησης του χώρου λύσεων ή την εκμετάλλευση των λύσεων που παράγονται, τροποποιώντας την έμφαση που δίνει η διαδικασία στα ικανότερα άτομα. Μια πιο αυστηρή διαδικασία επιλογής που μεροληπτεί περισσότερο προς τα ικανότερα άτομα-λύσεις, θα ωθήσει την διαδικασία της αναζήτησης προς την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των ήδη υπάρχουσών λύσεων, ενώ αντίθετα μια λιγότερο αυστηρή διαδικασία επιλογής ωθεί την αναζήτηση προς την εξερεύνηση μεγαλύτερου μέρους του χώρου λύσης. Εάν μια επιλογή μεροληπτεί υπέρ των ικανότερων λύσεων, εκμεταλλεύεται τη γνώση ότι η δομή του παρόντος χρωμοσώματος είναι καλή και ως εκ τούτου όταν ζευγαρώνεται με μια άλλη λύση πιθανώς θα παραχθεί ένας ικανός απόγονος, ο οποίος θα διατηρήσει ορισμένα από τα καλά γνωρίσματα. Εντούτοις, οι περισσότεροι χώροι λύσεων είναι κυματοειδούς μορφής (undulating) και μπορούν να περιέχουν πολλά διαφορετικά τοπικά βέλτιστα, στα οποία η αναζήτηση μπορεί να παγιδευτεί εάν δοθεί υπερβολική έμφαση στη λειτουργία της εκμετάλλευσης [74]. Αφ' ετέρου, εάν η διαδικασία επιλογής μεροληπτεί υπέρ των λιγότερων ικανών λύσεων (αν και σπάνια εμφανίζεται αυτή η περίπτωση καθώς παραβιάζει την αρχή της επιβίωσης του καταλληλότερου), τότε θεωρητικά ευνοεί και την εξερεύνηση μεγαλύτερου μέρους του χώρου λύσης δεδομένου ότι οι πιο «αδύναμες» λύσεις μπορούν να επιτρέψουν στον αλγόριθμο να αποφύγει την παγίδευση του σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Ωστόσο, η υπερβολική έμφαση στην εξερεύνηση μπορεί να οδηγήσει σε πιο χρονοβόρα αναζήτηση και πιθανώς να απαιτήσει και πιο μακροχρόνια εξελικτική διαδικασία.

Για να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της εξερεύνησης και της εκμετάλλευσης των λύσεων, οι περισσότεροι μηχανισμοί επιλογής προσπαθούν να αυξήσουν τον βαθμό τυχειότητας με τον οποίο

επιτυγχάνεται η επιλογή ενός ατόμου, εξασφαλίζοντας ότι η καταλληλότερη λύση δεν θα είναι η μοναδική αποκλειστική επιλογή και ότι ακόμα και η πιο αδύνατη λύση δεν θα αγνοείται πάντα. Εντούτοις, αυτή και μόνο η συνθήκη στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι ικανοποιητική και οδηγεί συνήθως σε πρώιμη σύγκλιση του πληθυσμού. Το φαινόμενο της πρόωρης σύγκλισης παρουσιάζεται όταν πάρα πολύ νωρίς στην εξελικτική διαδικασία, η αναζήτηση συγκλίνει προς τη δομή μίας ικανής λύσης και τελικά όλες οι λύσεις στον πληθυσμό καταλήγουν να εμπεριέχουν αυτήν τη συγκεκριμένη δομή. Συνήθως, το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται επειδή η διαφορά μεταξύ των ικανών λύσεων και των ακατάλληλων λύσεων είναι πάρα πολύ μεγάλη [74].

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι διάφορες μεθοδολογίες επιλογής περιλαμβάνουν και κάποια συνάρτηση αναγωγής της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, τη Συνάρτηση Καταλληλότητας (Fitness Function). Έτσι οι συναρτήσεις αναγωγής μετατρέπουν την ακατέργαστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κατάλληλη τιμή, η οποία συνήθως αναφέρεται και ως τιμή καταλληλότητας, με σκοπό να καθοριστεί πόσες φορές μπορεί να επιλεγεί κάθε άτομο για να αναπαραχθεί καθώς και το αν θα αντικατασταθεί από κάποιον απόγονο ή όχι. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η δημιουργία της συνάρτησης καταλληλότητας δεν είναι μια απλή διαδικασία δεδομένου ότι υπάρχουν συνήθως παράμετροι που διαφέρουν ανάλογα με τον εκάστοτε χώρο λύσης του υφιστάμενου προβλήματος.

Μέτρα απόδοσης μεθοδολογιών επιλογής

- Πίεση Επιλογής: Ως Πίεση Επιλογής (Selection Pressure) [57] ορίζεται η πιθανότητα επιλογής του καλύτερου ατόμου έναντι της μέσης πιθανότητας της επιλογής όλων των ατόμων. Τα άτομα, τα οποία θεωρούνται ικανότερα αναπαράγονται γενικά συχνότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα αντικαθιστώντας ταυτόχρονα και τα χειρότερα στον πληθυσμό. Συνεπώς, υπάρχει η πιθανότητα το καλύτερο άτομο να αναπαραγάγεται γρηγορότερα από τα άλλα άτομα, έως ότου τα αντίγραφα του «καταλάβουν» εντελώς τον πληθυσμό. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε στον πρώτο ορισμό της πίεσης επιλογής από τους Goldberg & Deb [75]. Ο χρόνος ανάληψης (Takeover Time) τ^* ορίζεται ως ο αριθμός των απαιτητών γενεών προκειμένου να γεμίσει ο πληθυσμός με αντίγραφα του καλύτερου ατόμου στο πλαίσιο της δράσης των μεθοδολογιών επιλογής. Η πίεση επιλογής είναι υψηλότερη όσο ο χρόνος τ^* είναι χαμηλός. Η ένταση επιλογής S είναι άλλη μία μέθοδος, που προσδιορίζει την πίεση επιλογής. Εάν \bar{f} είναι η μέση ικανότητα των μ ατόμων του πληθυσμού πριν από την επιλογή και \bar{g} είναι η μέση ικανότητα των λ απογόνων μετά από τη διαδικασία επιλογής τότε η ένταση επιλογής S μετρά την αύξηση της μέσης ικανότητας των ατόμων ενός πληθυσμού που καθορίζεται πριν και μετά από την επιλογή χρησιμοποιώντας τη

τυπική απόκλιση σ_f της συνάρτησης καταλληλότητας του πληθυσμού πριν από την επιλογή, η οποία λαμβάνεται ως μονάδα μέτρου:

$$S = \frac{\bar{g} - \bar{f}}{\sigma_f} \quad (4.7)$$

Οι ορισμοί που αναφέρθηκαν ανωτέρω είναι γενικοί και ισχύουν σε οποιαδήποτε τεχνική επιλογής. Χρησιμοποιώντας υψηλή πίεση επιλογής, υπάρχει υψηλός κίνδυνος πρόωρης σύγκλισης. Αυτή η περίπτωση εμφανίζεται όταν αναπαράγεται συνεχώς ένα μη βέλτιστο αλλά ικανότατο άτομο πιο γρήγορα σε σχέση με άλλα και τελικά καταλαμβάνει τον πληθυσμό. Κατόπιν, η εξερεύνηση του χώρου λύσης καθίσταται τοπική, δεδομένου ότι περιορίζεται στην γειτονική περιοχή αυτού του ικανότατου ατόμου, με αποτέλεσμα να υφίσταται ο κίνδυνος να μη προσεγγίσει ο αλγόριθμος το ολικό βέλτιστο σε περίπτωση που το ικανότατο άτομο αντιστοιχεί σε κάποιο τοπικό βέλτιστο.

- **Μεροληψία:** Ως μεροληψία (Bias) ορίζεται η απόλυτη διαφορά μεταξύ της πραγματικής ικανότητας ενός ατόμου και της αναμενόμενης πιθανότητας αναπαραγωγής του.
- **Εύρος:** Ως εύρος (Spread) ορίζεται η διαφορά μεταξύ του ελάχιστου και του μέγιστου αριθμού που μπορεί να επιλεχθεί ένα άτομο προς αναπαραγωγή.
- **Απώλεια ποικιλομορφίας:** Ως απώλεια της ποικιλομορφίας ορίζεται το ποσοστό των ατόμων ενός πληθυσμού που δεν επιλέγεται κατά τη διάρκεια της φάσης επιλογής.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο χαρακτηριστικές κατηγορίες στις οποίες ομαδοποιούνται οι διαδικασίες επιλογής. Η πρώτη κατηγορία είναι αυτή της αναλογικής επιλογής (Proportionate Selection) κατά την οποία η επιλογή ενός ατόμου προς αναπαραγωγή ή αντικατάσταση εξαρτάται αποκλειστικά από την σχέση της τιμής καταλληλότητας του σε σχέση με τις τιμές καταλληλότητας του υπόλοιπου πληθυσμού. Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή της επιλογής βάσει της κατάταξης (Ordinal-Based Selection) κατά την οποία η επιλογή ενός ατόμου προς αναπαραγωγή ή αντικατάσταση δεν εξαρτάται από την τιμή καταλληλότητας αλλά από την «τάξη» (Rank) του ανάμεσα στον πληθυσμό. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η πίεση επιλογής είναι ανεξάρτητη από την κατανομή της συνάρτησης καταλληλότητας του πληθυσμού, και βασίζεται απλά στην διάταξη (ταξινόμηση) του πληθυσμού [57, 74].

Αναλογική Επιλογή (Proportional Selection)

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία επιλογής προτάθηκε αρχικά από τον J. Holland [62] ειδικά για τους ΓΑ και χρησιμοποιείται μόνο ως διαδικασία για την επιλογή ατόμων προς αναπαραγωγή. Ο αναμενόμενος αριθμός επιλογής ενός ατόμου i προς αναπαραγωγή λ_i είναι ανάλογος προς την ικανότητά του f_i . Αυτό υπονοεί έμμεσα ότι οι τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας πρέπει να είναι θετικές στην περιοχή αναζήτησης και ότι το πρόβλημα προς λύση αφορά μεγιστοποίηση,

γεγονός το οποίο επιβάλλει μερικούς απλούς μετασχηματισμούς της αντικειμενικής συνάρτησης προκειμένου να ικανοποιούνται αυτοί οι περιορισμοί. Θεωρώντας ότι το μέγεθος του πληθυσμού είναι μ και ότι τα συνολικά άτομα που παράγονται από τη συγκεκριμένη διαδικασία επιλογής είναι λ , μπορούμε τότε να εκφράσουμε το μέγεθος λ_i ως εξής:

$$\lambda_i = \frac{\lambda}{\sum_{j=1}^{\mu} f_j} f_i \quad (4.8)$$

Για την υλοποίηση της Αναλογικής επιλογής έχουν προταθεί διάφορες στοχαστικές διαδικασίες δειγματοληψίας. Δύο από τις πιο διαδεδομένες οικογένειες τεχνικών αποτελούν η μέθοδος της ρουλέτας και η στοχαστική καθολική δειγματοληψία.

Η μέθοδος της εξαναγκασμένης ρουλέτας (Roulette Wheel Selection) χαρακτηρίζεται από την υψηλή δειγματοληπτική διασπορά (διακύμανση) που παρουσιάζει. Η μέθοδος προσομοιώνει ένα παίγνιο ρουλέτας όπου αυτή είναι χωρισμένη σε τόσα τμήματα όσα και τα άτομα του πληθυσμού. Η μέθοδος δεν είναι αμερόληπτη καθώς το μέγεθος κάθε τμήματος της ρουλέτας είναι ανάλογο της τιμής καταλληλότητας του κομματιού που αντιπροσωπεύει. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης η ρουλέτα «γυρνά» και επιλέγεται το άτομο στο οποίο αντιστοιχεί το τμήμα της ρουλέτας στο οποίο θα σταματήσει η «μπίλια». Για τον καθορισμό των θέσεων που θα σταματήσει η «μπίλια» χρησιμοποιείται μια γεννήτρια δημιουργίας τυχαίων ομοιόμορφα κατανομημένων αριθμών που αντιστοιχούν στα επιμέρους τμήματα της ρουλέτας. Στη συγκεκριμένη διαδικασία επιλογής υπάρχει η πιθανότητα ένα άτομο με υψηλή τιμή καταλληλότητας να μην επιλεγεί προς αναπαραγωγή και να ευνοηθούν λιγότερα ικανά άτομα. Για την ελαχιστοποίηση τέτοιων περιπτώσεων συστήνεται η χρησιμοποίηση μεγάλου πληθυσμού.

Η Στοχαστική Καθολική Δειγματοληψία (Stochastic Universal Sampling) παρουσιάζει μηδενική μεροληψία και ελάχιστο εύρος. Τα άτομα χαρτογραφούνται ως τμήματα μιας γραμμής, έτσι ώστε το τμήμα που αντιστοιχεί σε ένα άτομο να είναι ίσο με την τιμή της καταλληλότητάς του όπως ακριβώς στην μέθοδο της εξαναγκασμένης ρουλέτας. Στη συνέχεια παράγεται ένας τυχαίος αριθμός με αφετηρία τον οποίο δημιουργείται μια λίστα όπου κάθε τιμή ισαπέχει από την προηγούμενη κατά την ποσότητα $\frac{1}{\text{Επιθυμητός Αριθμός Απογόνων}}$. Τελικά, επιλέγονται εκείνα τα άτομα στα οποία τυχαίνει στο τμήμα στο οποίο έχουν χαρτογραφηθεί να ανήκει κάποια από τις τιμές της λίστας.

Στην αναλογική επιλογή μπορούμε να θέσουμε ως μέτρο της πίεσης επιλογής τον αναμενόμενο αριθμό επιλογών προς αναπαραγωγή του ικανότερου ατόμου του πληθυσμού p_s , ο οποίος εκφράζεται ως ο λόγος της τιμής καταλληλότητας του ικανότερου ατόμου \hat{f} προς τη μέση τιμή καταλληλότητας του πληθυσμού \bar{f} .

$$p_s = \frac{\hat{f}}{\bar{f}} \quad (4.9)$$

Εάν η τιμή p_s ισούται με τη μονάδα τότε όλα τα άτομα έχουν την ίδια πιθανότητα να επιλεγθούν, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πίεση επιλογής. Η παράμετρος της πίεσης επιλογής είναι κρίσιμης σημασίας για τη σύγκλιση του αλγορίθμου προς τη βέλτιστη λύση. Όταν ξεκινάει η προσομοίωση του ΓΑ και χρησιμοποιείται η αναλογική επιλογή εγγενώς η πίεση επιλογής είναι υψηλή. Ωστόσο, ακριβώς επειδή η πίεση επιλογής οδηγεί στην επιλογή ατόμων με υψηλές τιμές καταλληλότητας, μετά την εξέλιξη μερικών γενεών οδηγούμαστε σε πληθυσμούς που η τιμή της καταλληλότητας τους διαφέρει ελάχιστα αφού προέρχονται από τους ίδιους προγόνους. Το πρόβλημα αυτό ελαττώνει την πίεση επιλογής στην μονάδα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να συγκλίνει ο αλγόριθμος στο βέλτιστο ακρότατο. Το γεγονός αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τροποποίηση της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε διαφορετική γενεά. Ο πιο κοινός τρόπος αναγωγής της τιμής καταλληλότητας ενός ατόμου πραγματοποιείται συνήθως με γραμμικό μετασχηματισμό της ως εξής:

$$\hat{f}_i = f_i - a \quad (4.10)$$

Όπου το a λαμβάνει θετική τιμή εάν επιθυμείται αύξηση της επιλεκτικής πίεσης και αρνητική εάν επιθυμείται μείωση. Η τιμή αυτή παραμένει σταθερή για όλα τα άτομα μίας γενεάς. Η πίεση επιλογής γενικά συστήνεται να μην είναι ιδιαίτερα υψηλή, καθώς μπορεί να επέλθει πρόωμη σύγκλιση, αλλά ούτε και ιδιαίτερα χαμηλή έτσι ώστε να μπορέσει ο αλγόριθμος να συγκλίνει προς το βέλτιστο, όταν το ανακαλύψει. Ένας συνήθης τρόπος υπολογισμού της τιμής του a περιγράφεται από την εξής εξίσωση:

$$a = \frac{p_s \bar{f} - \hat{f}}{p_s - 1} \quad (4.11)$$

Όπου \hat{f} η τιμή καταλληλότητας του ικανότερου ατόμου, \bar{f} η μέση τιμή καταλληλότητας του πληθυσμού και p_s η πίεση επιλογής (συνήθως επιλέγεται μία τιμή ~ 2). Εάν ο μετασχηματισμός οδηγήσει σε αρνητικές τιμές τότε, λόγω των περιορισμών της αναλογικής επιλογής, αυτά τα άτομα δεσμεύονται να έχουν μηδενική τιμή καταλληλότητας ή κάποια πολύ μικρή θετική τιμή εάν θέλουμε να έχουν πιθανότητες επιλογής. Τέλος, εκτός από το γραμμικό μετασχηματισμό αρκετά συχνός είναι και ο εκθετικός μετασχηματισμός όπου η τιμή καταλληλότητας υψώνεται σε κατάλληλη δύναμη.

Η επιλογή μέσω πρωταθλημάτων

Η μεθοδολογία επιλογής ατόμων προς αναπαραγωγή μέσω διεξαγωγής πρωταθλημάτων (Tournament Selection) είναι μια από τις συχνότερα χρησιμοποιημένες μεθόδους κυρίως λόγω της

απλότητάς της. Μια ομάδα ατόμων επιλέγεται τυχαία από τον πληθυσμό και τα μέλη της συγκρίνονται στην συνέχεια το ένα με το άλλο, έτσι ώστε να επιλεγθεί το καταλληλότερο ως υποψήφιο προς αναπαραγωγή. Συνήθως, η πιο χαρακτηριστική υλοποίηση αυτής της μεθοδολογίας περιλαμβάνει την επιλογή μόνο δύο ατόμων προς σύγκριση. Ο καθορισμός της πίεσης επιλογής στην επιλογή μέσω πρωταθλημάτων λειτουργεί με την εισαγωγή ενός κατώτατου ορίου αποδοχής, τ , κατά τη διάρκεια της επιλογής. Σε κάθε πρωτάθλημα παράγεται ένας τυχαίος αριθμός, ρ ($0 \leq \rho \leq 1$) ο οποίος συγκρίνεται με το κατώτερο όριο αποδοχής τ και εάν ισχύει ότι $\rho < \tau$ επιλέγεται προς αναπαραγωγή το καταλληλότερο άτομο, αλλιώς επιλέγεται προς αναπαραγωγή το πιο αδύνατο άτομο. Συνήθως, η τιμή του τ ορίζεται να ανήκει στο διάστημα $[0.75 \ 1]$.

Η επιλογή βάσει κατάταξης

Η μεθοδολογία επιλογής ατόμων βάσει κατάταξης (Rank Selection) στηρίζεται στην ταξινόμηση των ατόμων με κριτήριο τις τιμές της αντικειμενικής τους συνάρτησης f_i . Τα άτομα ταξινομούνται από το καλύτερο (πρώτο) στο χειρότερο (τελευταίο). Η τιμή της καταλληλότητας κάθε ατόμου f'_i εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την θέση του ατόμου στη φθίνουσα κατάταξη. Μια από τις πιο συνηθισμένες συναρτήσεις καταλληλότητας που βασίζονται στην κατάταξη ενός ατόμου είναι η:

$$f'_r = \left(1 - \frac{r}{\mu}\right)^\rho \quad (4.12)$$

όπου μ είναι ο αριθμός γονέων, το r είναι η τάξη του ατόμου που εξετάζεται στον πληθυσμό μετά την ταξινόμηση και ρ είναι ένας εκθέτης που εξαρτάται από την επιθυμητή τιμή της πίεσης επιλογής. Μετά από την ταξινόμηση και με βάση τον υπολογισμό της τιμής καταλληλότητας μπορεί να εφαρμοστεί η αναλογική επιλογή των ατόμων για αναπαραγωγή. Στην επιλογή βάσει κατάταξης δεν υφίστανται περιορισμοί ως προς το πρόσημο της τιμής καταλληλότητας και ως εκ τούτου είναι κατάλληλη τόσο για προβλήματα μεγιστοποίησης όσο και για προβλήματα ελαχιστοποίησης. Εντούτοις, δεν εξετάζει τη σημασία των διαφορών των τιμών της καταλληλότητας των ατόμων και έτσι άτομα πολύ κακής ποιότητας, αλλά που δεν είναι στην τελευταία σειρά της κατάταξης θα δύναται να παραμείνουν στον πληθυσμό και να εξελιχθούν. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί την ακριβή γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά απλά να είναι δυνατή η κατά φθίνουσα ταξινόμηση των ατόμων. Η πίεση επιλογής της συγκεκριμένη μεθόδου μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$p_s = 1 - \rho \quad (4.13)$$

4.2.3.2.4 Διαδικασίες Αντικατάστασης

Αντικατάσταση Γενεάς

Αυτός ο τύπος αντικατάστασης είναι ο απλούστερος, δεδομένου ότι ο παραγόμενος πληθυσμός της γενεάς $g+1$ αποτελείται από τους απογόνους και μόνο του πληθυσμού της γενεάς g .

Σταθερή Αντικατάσταση

Η σταθερή αντικατάσταση παράγει ένα μικρό αριθμό απογόνων (έναν ή δύο) σε κάθε γενεά, και αντικαθιστά τον πιο αδύνατο (ή τους πιο αδύνατους) γονέα(-εις) προκειμένου να διαμορφώσει τον πληθυσμό της επόμενης γενεάς. Αυτή η στρατηγική είναι χρήσιμη ειδικά όταν η βέλτιστη λύση βρίσκεται διεσπαρμένη σε διάφορα άτομα, ή ενδεχομένως σε ολόκληρο τον πληθυσμό. Κατ' αυτό τον τρόπο, η απώλεια ενός μικρού αριθμού ατόμων σε κάθε γενεά δεν διαταράσσει τις λύσεις υπερβολικά, αλλά εξελίσσει τον πληθυσμό βαθμιαία προς τη λύση.

Η επιλογή των γονέων που θα αντικατασταθούν υπακούει σε διάφορα κριτήρια. Με την ομοιόμορφη αντικατάσταση, οι γονείς που θα αντικατασταθούν υποδεικνύονται τυχαία. Η επιλογή μπορεί επίσης να εξαρτηθεί από την καταλληλότητα κάθε γονέα, όπου συνήθως ο χειρότερος γονέας αντικαθίσταται, ή επιλέγεται στοχαστικά, σύμφωνα με μια κατανομή πιθανότητας που εξαρτάται από τη συνάρτηση καταλληλότητας ή άλλα κριτήρια.

Στρατηγικές Αντικατάστασης “(μ,λ)-ES”

Η συγκεκριμένη οικογένεια μεθοδολογιών αντικατάστασης περιλαμβάνει την δημιουργία ενός προσωρινού πληθυσμού $g+1_{temp}$ ο οποίος αποτελείται από μ άτομα της g γενεάς και λ απογόνους. Στην συνέχεια επιλέγονται για να αποτελέσουν τον πληθυσμό της $g+1$ γενεάς τα μ καλύτερα άτομα του προσωρινού πληθυσμού.

4.2.3.2.5 Τελεστές Αναπαραγωγής

Για να μπορεί ο ΓΑ να δημιουργήσει καλύτερα από τα ήδη υπάρχοντα άτομα-λύσεις, απαιτείται η εφαρμογή στα επιλεχθέντα προς αναπαραγωγή άτομα των τροποποιητικών τελεστών. Οι τροποποιητικοί τελεστές παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία αλλά μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

1. στους τελεστές διασταύρωσης, οι οποίοι παράγουν ένα ή περισσότερους απογόνους από τους συνδυασμούς δύο γονέων, και
2. στους τελεστές μετάλλαξης, οι οποίοι τροποποιούν ένα άτομο για να δημιουργήσουν τον απόγονό του.

Η κατηγοριοποίηση αυτών των τελεστών είναι βασισμένη στην έννοια της βιολογικής αναπαραγωγής, με τη διαφοροποίηση ότι ο εξελικτικός αλγόριθμος, που δεν γνωρίζει από βιολογικούς περιορισμούς, μπορεί να γενικεύσει την έννοια της αναπαραγωγής και να εφαρμόσει συνδυασμούς περισσότερων των δύο γονέων, ενδεχομένως και το συνδυασμό ολόκληρου του πληθυσμού.

Η μέθοδος σύμφωνα με την οποία ένα άτομο τροποποιείται για να σχηματίσει έναν απόγονο, εξαρτάται πολύ από τη δομή του. Εάν π.χ. επιδιώκεται να λυθεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης σε ένα συνεχές διάστημα, (μια περιοχή του R^n), η εκ των προτέρων άριστη δομή, η οποία θα είναι επαρκής να αντιπροσωπεύσει τη δομή του ατόμου, θα είναι ένα διάνυσμα του R^n . Αντίστοιχα θα πρέπει να αναπτυχτεί και ο τελεστής διασταύρωσης δυο διανυσμάτων του R^n , έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα έγκυρο νέο διάνυσμα R^n ως απόγονος. Γενικά είναι αδύνατο να σχεδιαστούν καθολικοί τελεστές τροποποίησης που θα λειτουργούν το ίδιο αποτελεσματικά, ανεξάρτητα από το υπό εξέταση πρόβλημα.

Διασταύρωση

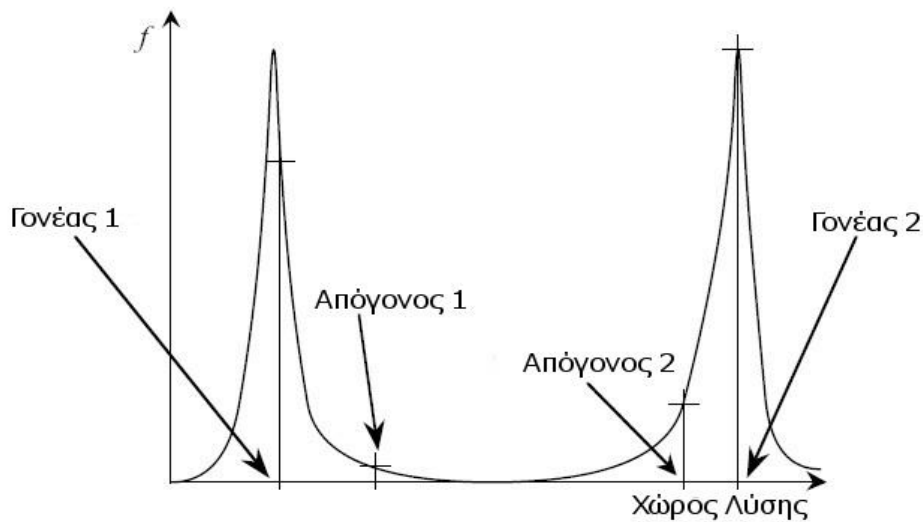
Ο τελεστής διασταύρωσης χρησιμοποιεί δύο γονείς για να παράγει ένα ή δύο απογόνους. Ο τελεστής είναι γενικά στοχαστικός, ως εκ τούτου η επαναλαμβανόμενη διασταύρωση του ίδιου ζεύγους των γονέων δίνει διαφορετικούς απογόνους. Δεδομένου ότι οι διασταυρώσεις των εξελικτικών αλγορίθμων δεν υπόκεινται στους βιολογικούς περιορισμούς, περισσότεροι από δύο γονείς, στην ακραία περίπτωση ο πλήρης πληθυσμός, μπορούν να συμμετέχουν ταυτόχρονα στην αναπαραγωγή και τη δημιουργία απογόνων [76].

Ο τελεστής διασταύρωσης γενικά παρουσιάζει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- ✓ Η διασταύρωση δύο όμοιων γονέων θα παράγει απόγονο ίδιο με τους γονείς.
- ✓ Δυο γονείς που βρίσκονται σχετικά κοντά στον χώρο λύσης θα παράγουν απογόνους επίσης, κοντά σε αυτούς.

Όταν διασταυρώνονται δυο άτομα υψηλής καταλληλότητας που αντιπροσωπεύουν όμως ακρότατα τα οποία απέχουν στο χώρο λύσης δεν αναμένεται να δώσουν καλής ποιότητας απογόνους (βλ. Σχήμα 4-4). Ως «θανατηφόρα» (Lethal) [57] χαρακτηρίζεται μια διασταύρωση που παράγει έναν ή περισσότερους απογόνους που παρουσιάζουν καταλληλότητα κατώτερη των γονιών τους. Μια λύση με ένα πιθανώς υψηλό ποσοστό θανατηφόρων διασταυρώσεων συνίσταται στο ζευγάρι ατόμων που μοιάζουν. Ο απλούστερος τρόπος υλοποίησης αυτής της τεχνικής είναι ο καθορισμός της απόστασης μεταξύ των δυο επιλεχθέντων ατόμων τα οποία θα διασταυρωθούν μόνο εφόσον η απόσταση αυτή είναι χαμηλότερη από ένα ανώτερο όριο r_c το οποίο αποκαλείται συνήθως ακτίνα περιορισμού.

Εάν η ακτίνα περιορισμού είναι μικρή, το ποσοστό θανατηφόρων διασταυρώσεων μειώνεται σημαντικά. Ένας εναλλακτικός τρόπος είναι να επιλεγεί ο πρώτος γονέας από τον τελεστή επιλογής, και στη συνέχεια εάν υπάρχουν άτομα στη γειτονιά του, να επιλεγεί ένα από αυτά ως ο δεύτερος γονέας. Σε όλες τις περιπτώσεις πάντως, εάν το r_c είναι πάρα πολύ μικρό, μειώνεται σημαντικά η ικανότητα του αλγορίθμου να εξερευνήσει το χώρο λύσης με αποτέλεσμα την πρόωρη σύγκλιση. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο στην έναρξη της εξέλιξης όταν η διασταύρωση δύο «απομακρυσμένων» ατόμων είναι απαραίτητη προκειμένου να ερευνηθούν νέοι τομείς του χώρου λύσης που περιέχουν ενδεχομένως κάποια βέλτιστα ακρότατα. Για την ελάττωση της επίδρασης αυτού του φαινομένου προτείνεται συνήθως η χρησιμοποίηση κάποιας τιμής r_c η οποία μειώνεται κατά τη διάρκεια της εξέλιξης.



Σχήμα 4-4 Διασταύρωση ατόμων υψηλής καταλληλότητας.

Μετάλλαξη

Ο τελεστής μετάλλαξης [57] τροποποιεί ένα άτομο με τυχαίο τρόπο για να παράγει ένα καινούριο απόγονο ο οποίος θα αντικαταστήσει στον πληθυσμό το γονέα του. Για τους ΓΑ, η μετάλλαξη θεωρείται ως δευτερεύων τελεστής, που στοχεύει στη διατήρηση μιας ελάχιστης ποικιλομορφίας στον πληθυσμό, και την οποία ο τελεστής της διασταύρωσης δεν μπορεί να εξασφαλίσει. Οι περισσότερες από τις τεχνικές μετάλλαξης τροποποιούν ένα άτομο κατά τέτοιο τρόπο ώστε το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού να δημιουργεί ένα άτομο το οποίο δεν διαφέρει πολύ από τον γονέα του. Κατ' αυτό τον τρόπο, ο τελεστής εκτελεί στην ουσία τυχαία τοπική αναζήτηση στο χώρο λύσης του γονέα που μεταλλάσσει. Η μετάλλαξη μπορεί να βελτιώσει αρκετά την ποιότητα των λύσεων όταν το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού γειτνιάζει γύρω από το βέλτιστο ακρότατο, σε αντίθεση με τον τελεστή της διασταύρωσης που χάνει την ικανότητα εξερεύνησης σε τέτοιες περιπτώσεις. Πράγματι, τα άτομα που βρίσκονται κοντά στο ίδιο ακρότατο συνήθως προέρχονται

από κοινούς γονείς λόγω της εκλεκτικής πίεσης, και περιέχουν συνήθως την ίδια δομή συνεπώς δεν μπορούν να τροποποιηθούν από τον τελεστή διασταύρωσης. Αφ' ετέρου, εάν ανήκουν σε διαφορετικά ακρότατα το αποτέλεσμα της διασταύρωσης δημιουργεί απογόνους χαμηλής καταλληλότητας. Αντίθετα, η τοπική τυχαία αναζήτηση μέσω της εφαρμογής του τελεστή μετάλλαξης προσδίδει κάποια πιθανότητα σε κάθε άτομο να πλησιάσει προς το βέλτιστο ακρότατο. Συμπερασματικά, η εφαρμογή του τελεστή της μετάλλαξης παίζει σημαντικό ρόλο στη συντήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού, αφού είναι χρήσιμος για την αποδοτική εξερεύνηση του χώρου λύσης. Ο τελεστής αυτός μπορεί να αντισταθμίσει τις αρνητικές παρενέργειες μιας ισχυρής πίεσης επιλογής και γενικά όλων των φαινομένων που τείνουν να μειώσουν τη διασπορά των λύσεων ενός πληθυσμού. Εάν το ποσοστό μετάλλαξης είναι υψηλό και, επιπλέον, η εφαρμογή του τελεστή μετάλλαξης είναι εντατική, τότε η εξέλιξη των ατόμων στον πληθυσμό είναι ισοδύναμη με τυχαία αναζήτηση στο χώρο λύσης, και ο εξελικτικός αλγόριθμος θα απαιτήσει υπερβολικό χρόνο μέχρι να συγκλίνει.

4.2.3.2.6 Κριτήρια τερματισμού της προσομοίωσης

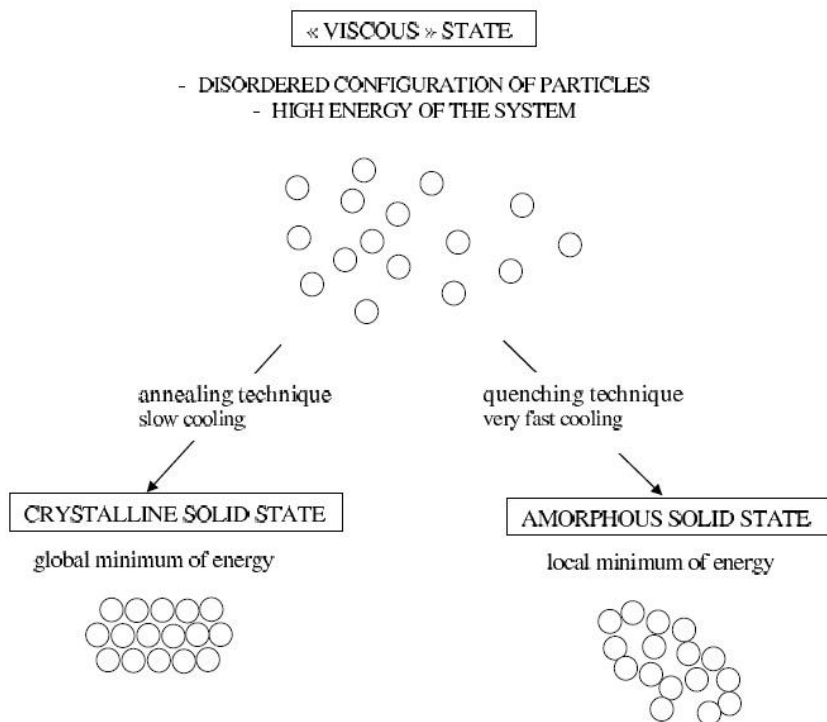
Υπάρχουν διάφορα είδη κριτηρίων τερματισμού προκειμένου η προσομοίωση της εξέλιξης του γενετικού αλγορίθμου να λάβει τέλος. Μερικά από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι τα εξής [57]:

- Μέγιστος αριθμός γενεών εξέλιξης: Η προσομοίωση σταματάει όταν ένας συγκεκριμένος αριθμός γενεών εξελιχθεί.
- Μέγιστος χρόνος εξέλιξης: Η προσομοίωση ολοκληρώνεται μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Εάν ο μέγιστος αριθμός γενεών εξέλιξης έχει επιτευχθεί πριν από το τέλος του μέγιστου χρόνου εξέλιξης η προσομοίωση λαμβάνει τέλος.
- Καμία αλλαγή στην τιμή καταλληλότητας: Η προσομοίωση ολοκληρώνεται εάν δεν υπάρχει μεταβολή στην τιμή καταλληλότητας του ικανότερου ατόμου για έναν ορισμένο αριθμό γενεών. Εάν ο μέγιστος αριθμός γενεών εξέλιξης έχει συμπληρωθεί πριν ξεπεραστεί ο μέγιστος αριθμός γενεών χωρίς αλλαγή στην τιμή καταλληλότητας του ικανότερου ατόμου τότε η προσομοίωση λαμβάνει επίσης τέλος.
- Όριο αδρανούς χρόνου: Η προσομοίωση ολοκληρώνεται εάν δεν υπάρχει βελτίωση σε όρους αντικειμενικής συνάρτησης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το οποίο συνήθως εκφράζεται σε δευτερόλεπτα.

4.2.4 Προσομοιωμένη Ανόπτωση

4.2.4.1 Περιγραφή Προσομοιωμένης Ανόπτωσης

Η μέθοδος της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης [52, 56, 57] προτάθηκε το 1982 από τρεις ερευνητές της IBM (S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi) ως μια νέα επαναληπτική μέθοδος η οποία παρουσιάζει τη δυνατότητα να μην παγιδεύεται σε τοπικά ακρότατα κατά την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Η μέθοδος εμπνεύστηκε από την αναλογία που παρουσιάζουν μερικά φυσικά φαινόμενα με το χώρο λύσης απαιτητικών συνδυαστικών προβλημάτων. Συγκεκριμένα, για την τροποποίηση της φυσικής κατάστασης ενός υλικού, οι επιστήμονες έχουν στη διάθεση τους μια ελεγχόμενη παράμετρο, τη θερμοκρασία. Έτσι, η τεχνική της Ανόπτωσης συνίσταται αρχικά στην θέρμανση ενός υλικού προκειμένου να μεταδοθούν σε αυτό υψηλά ποσά ενέργειας. Κατόπιν, το υλικό ψύχεται σταδιακά όπου σε κάθε στάδιο αφιερώνεται επαρκής χρόνος ψύξης. Εάν η μείωση στη θερμοκρασία είναι πάρα πολύ ταχεία, μπορεί να προκληθούν ατέλειες οι οποίες θα χρειαστούν τοπική θέρμανση εκ νέου προκειμένου να διορθωθούν. Αυτή η στρατηγική της ελεγχόμενης μείωσης της θερμοκρασίας μετασχηματίζει το υλικό σε μορφή κρύσταλλου στερεάς κατάστασης, η οποία αντιστοιχεί στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας. Η αντίθετη στρατηγική είναι αυτή της βαφής (Quenching), η οποία συνίσταται στην ταχεία μείωση της θερμοκρασίας του υλικού και οδηγεί στο μετασχηματισμό του υλικού σε άμορφη δομή, ασταθούς κατάστασης και η οποία αντιστοιχεί σε ένα τοπικό ελάχιστο της ενέργειας.



Σχήμα 4-5 Σχηματική αναπαράσταση φυσικής ανόπτωσης [57].

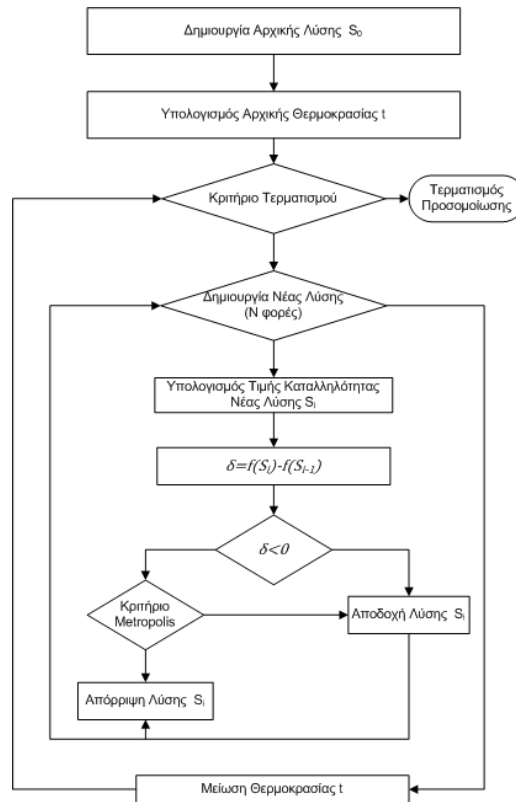
Η ιδέα να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της ανόπτωσης και να εφαρμοστεί σε προβλήματα βελτιστοποίησης οδήγησε στην ανάπτυξη της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (ΠΑ) η οποία συνίσταται σε γενικές γραμμές στην εισαγωγή μιας κατάλληλης παραμέτρου ελέγχου (η οποία και διαδραματίζει το ρόλο της θερμοκρασίας) κατά την διάρκεια της διαδικασίας της βελτιστοποίησης. Η "θερμοκρασία" του συστήματος που βελτιστοποιείται πρέπει να έχει την ίδια επίδραση όπως και η θερμοκρασία του φυσικού συστήματος. Κατά αυτόν τον τρόπο πρέπει να ρυθμίζει τον αριθμό των καταστάσεων-λύσεων που μπορεί να λάβει το πρόβλημα καθώς και να οδηγεί προς το ολικό βέλτιστο, εάν η θερμοκρασία μειώνεται βαθμιαία κατά τρόπο αργό και ελεγχόμενο ή προς ένα τοπικό ελάχιστο εάν η θερμοκρασία ελαττώνεται απότομα (όπως στην τεχνική βαφής). Η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να θωρηθεί ως παραλλαγή της ευρετικής μεθόδου της Τοπικής Αναζήτησης (TA – local search) κατά την οποία εξερευνείται ένα υποσύνολο όλων των εφικτών λύσεων ενός προβλήματος μεταπηδώντας επαναληπτικά από μια εφικτή λύση σε μια γειτονική λύση. Για τα προβλήματα ελαχιστοποίησης η κλασική μορφή του αλγορίθμου της TA αντιστοιχεί στην κατεύθυνση της έρευνας προς λύσεις η οποίες πάντα βελτιώνουν την ποιότητα της λύσης. Ως αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η πρόωμη παγίδευση του αλγορίθμου σε τοπικά βέλτιστα παρά στο ολικό. Παρόλο που έχουν προταθεί τρόποι αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου η μέθοδος της TA παραμένει στενά συνδεδεμένη με την αρχική λύση με την οποία τροφοδοτείται. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου ο αλγόριθμος της ΠΑ αποδέχεται κάθε νέα λύση η οποία καταλήγει σε βελτίωση της ποιότητάς της αλλά μπορεί να αποδεχτεί με κάποια πιθανότητα και μια λύση η οποία καταλήγει σε υποβιβασμό της ποιότητας. Σκοπός αυτής της λειτουργίας είναι να παρασχεθεί η δυνατότητα στον αλγόριθμο να μπορεί να εξέρχεται από τα τοπικά βέλτιστα και να κατευθύνεται η έρευνα προς το ολικό βέλτιστο ανεξάρτητα και από το σημείο/λύση εκκίνησης. Η πιθανότητα αποδοχής μίας νέας λύσης η οποία να υποβιβάζει την ποιότητα της μέχρι τότε βέλτιστης βασίζεται στο θερμοδυναμικό νόμο ο οποίος ορίζει ότι η πιθανότητα σε μια θερμοκρασία t να υπάρξει αύξηση της ενέργειας μεγέθους δE είναι:

$$p(\delta E) = \exp(-\delta E/kt) \quad (4.14)$$

Όπου k είναι η φυσική σταθερά Boltzmann.

4.2.4.2 Γενική δομή Προσομοιωμένης Ανόπτωσης

Η γενική δομή του αλγορίθμου της ΠΑ παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4-6.



Σχήμα 4-6 Διάγραμμα ροής Προσομοιωμένης Ανόπτωσης.

Η βελτιστοποίηση με χρήση της ΠΑ αρχίζει με τη δημιουργία μιας αρχικής λύσης και τον υπολογισμό ή την εισαγωγή από τον χρήστη της αρχικής τιμής της παραμέτρου της θερμοκρασίας. Τα επόμενα στάδια αποτελούνται από δύο εμφωλευμένες δομές επανάληψης. Η εξωτερική δομή επανάληψης χρησιμοποιείται στην ουσία για τον έλεγχο της παραμέτρου της θερμοκρασίας. Η εσωτερική επανάληψη δημιουργεί N διαδοχικές νέες λύσεις σε κάθε τιμή της παραμέτρου της θερμοκρασίας. Κάθε μια από τις νέες λύσεις συγκρίνεται ως προς την προηγούμενη. Εάν η ποιότητα της νέας λύσης είναι καλύτερη από την προηγούμενη τότε η νέα λύση γίνεται αποδεκτή και η παλαιά απορρίπτεται. Εάν η ποιότητα της νέας λύσης είναι χειρότερη από την προηγούμενη τότε δημιουργείται ένας τυχαίος αριθμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στο $(0, 1)$. Αν αυτός ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος από το κριτήριο Metropolis τότε η νέα λύση γίνεται αποδεκτή παρόλο που είναι χειρότερη από την προηγούμενη, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση η νέα λύση τελικά απορρίπτεται. Στην ουσία ο εσωτερικός βρόχος (ο οποίος μπορεί να περιγραφεί ως Μαρκοβιανή αλυσίδα [77]) εκτελεί μια προσομοίωση Metropolis Monte Carlo [78, 79] σε κάθε τιμή της θερμοκρασίας. Η προσομοίωση Metropolis Monte Carlo είναι μια τεχνική τυχαιοποίησης (Randomization Technique) η οποία χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση μιας στοχαστικής διαδικασίας με τυχαία δειγματοληψία του χώρου λύσης.

Κατά την εκκίνηση της βελτιστοποίησης με χρήση της ΠΑ εκτελείται η διαδικασία της προσομοίωσης Metropolis Monte Carlo σε μια αρχική υψηλή θερμοκρασία. Αυτό πρακτικά

σημαίνει ότι ένα σχετικά μεγάλο ποσοστό των τυχαίων βημάτων που οδηγούν σε υποβάθμιση της ποιότητας της λύσης γίνονται αποδεκτά με σχετικά μεγάλη πιθανότητα. Μετά από έναν ικανοποιητικό αριθμό βημάτων Monte Carlo, η παράμετρος της θερμοκρασίας μειώνεται και επαναλαμβάνεται η προσομοίωση Metropolis Monte Carlo στη νέα θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η παράμετρος της θερμοκρασίας λάβει την τελική της τιμή. Όταν η θερμοκρασία τείνει προς το μηδέν, ο αλγόριθμος συγκλίνει προς το απόλυτο ελάχιστο της ενέργειας. Στην πράξη, η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν το σύστημα είναι σε κατάσταση ελάχιστης ενέργειας το οποίο σημαίνει ότι είτε η θερμοκρασία έλαβε την τιμή μηδέν ή δεν έγιναν αποδεκτές άλλες μεταβολές που προκαλούν αύξηση της ενέργειας (δηλ. της συνάρτησης κόστους) κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης Metropolis Monte Carlo.

Κατ' αναλογία με τη φυσική ανόπτηση λοιπόν, η Προσομοιωμένη Ανόπτηση χρησιμοποιεί τις εξής παραμέτρους ελέγχου [56] :

- *Συνάρτηση Κόστους*: Αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος η οποία αξιολογεί την καταλληλότητα μιας λύσης ως βέλτιστης.
- *Τελεστής Κίνησης*: Αποτελεί στην ουσία την γεννήτρια των τυχαίων μεταβολών στη διαμόρφωση της δομής της λύσης ενός προβλήματος προκειμένου να δημιουργούνται νέες λύσεις.
- *Θερμοκρασία*: Αποτελεί παράμετρο ελέγχου ανάλογη με τη θερμοκρασία στη φυσική διαδικασία της ανόπτησης των στερεών. Αυτή η τεχνητή παράμετρος ενεργεί ως πηγή στοχαστικότητας, έτσι ώστε να αποφευχθεί η παγίδευση του αλγόριθμου σε τοπικά βέλτιστα. Αντιπροσωπεύει στην ουσία το όριο αποδοχής μίας λύσης η οποία κρίνεται χειρότερη σε όρους καταλληλότητας σε σχέση με την υπάρχουσα.
- *Πρόγραμμα Ψύξης*: Το πρόγραμμα ψύξης θεωρείται ως η πιο σημαντική λειτουργία της ΠΑ. Το πρόγραμμα ψύξης θα πρέπει να παρέχει την αρχική θερμοκρασία, μαζί με τους κανόνες οι οποίοι ελέγχουν το πόσο και το πότε θα μειωθεί η θερμοκρασία, καθώς και το κριτήριο με το οποίο προσδιορίζονται οι συνθήκες που θα πρέπει να τηρούνται προκειμένου να τερματιστεί η προσομοίωση. Στην ουσία προσδιορίζει την ταχύτητα ψύξης με την οποία επιδιώκεται η τροποποίηση της δομής ενός προβλήματος από μια ασταθή κατάσταση (που αντιπροσωπεύει ακατάλληλες λύσεις) προς μια πιο σταθερή δομή (που αντιπροσωπεύει πιο κατάλληλες λύσεις).

Τα προγράμματα ψύξης μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτή των στατικών προγραμμάτων και αυτή των δυναμικών. Ως στατικά προγράμματα ψύξης θεωρούνται αυτά τα οποία μειώνουν την τιμή της παραμέτρου της θερμοκρασίας κατά τρόπο προαποφασισμένο, αγνοώντας την δυναμική συμπεριφορά πολλών προβλημάτων.

Αντίθετα τα δυναμικά προγράμματα ψύξης χρησιμοποιούν στατιστικές τεχνικές ανάλυσης προκειμένου να ελέγχουν τη μείωση της τιμής της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια αναφέρονται οι πιο συνήθεις συναρτήσεις μείωσης της τιμής της παραμέτρου της θερμοκρασίας που απαντώνται στη βιβλιογραφία.

- Γεωμετρική συνάρτηση μείωσης [77]: Ίσως η συνηθέστερη συνάρτηση μείωσης η οποία απαντάται στις εφαρμογές ΠΑ. Σύμφωνα με αυτή την συνάρτηση η τιμή της θερμοκρασίας για την n -οστή Μαρκοβιανή αλυσίδα (δηλ. την n -οστή εσωτερική δομή επανάληψης) προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της προηγούμενης τιμής της με έναν σταθερό αριθμό α μικρότερο της μονάδας. Το εύρος των τιμών που προτείνονται στη βιβλιογραφία για τον αριθμό α κυμαίνονται μεταξύ 0,8 και 0,99.

$$T_n = \alpha * T_{n-1} \quad \alpha < 1 \quad (4.15)$$

- Συνάρτηση μείωσης των Lundy & Mees [77]: Επίσης, μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες συναρτήσεις μείωσης της θερμοκρασίας είναι η συνάρτηση των Lundy & Mees, η οποία εκτελεί μόνο εσωτερική επανάληψη σε κάθε τιμή της θερμοκρασίας, μειώνοντας την πάρα πολύ αργά. Η τιμή της παραμέτρου β είναι συνήθως πολύ μικρή.

$$T_n = T_{n-1}/(1 + \beta * T_{n-1}) \quad (4.16)$$

- Συνάρτηση μείωσης των Press et al. [80]: Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με το πλήθος των μειώσεων που έχει υποστεί ήδη. Έτσι οι Press et al. προτείνουν την αναδρομική σχέση:

$$T_n = T_0 * (1 - (n - 1)/K)^a \quad (4.17)$$

όπου K ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός μείωσης της θερμοκρασίας και a σταθερά, με τυπικές τιμές 1, 2 ή 4 (μεγάλες τιμές του a απαιτούν περισσότερες επαναλήψεις σε χαμηλές θερμοκρασίες)

- Λογαριθμική συνάρτηση μείωση [77]: Σύμφωνα με αυτή την συνάρτηση η τιμή της θερμοκρασίας για την n -οστή Μαρκοβιανή αλυσίδα προκύπτει ως εξής:

$$T_n = 1/\log(T_{n-1}) \quad (4.18)$$

- Πολυωνυμική συνάρτηση μείωσης Aarts & Van Laarhoven [81, 82]: Το δυναμικό πρόγραμμα ψύξης που προτάθηκε από τους Aarts & Van Laarhoven περιλαμβάνει μια πολυωνυμική συνάρτηση μείωσης της θερμοκρασίας της οποίας η τελική κατανομή προσεγγίζει την κατανομή της στάσιμης κατανομής για κάθε εσωτερική επανάληψη (k) η οποία περιγράφεται ως Μαρκοβιανή αλυσίδα. Για τον υπολογισμό της συνάρτησης μείωσης απαιτείται για κάθε εσωτερική επανάληψη η

διατήρηση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης (C_i) κάθε λύσης που εξετάζεται. Στη συνέχεια υπολογίζονται η μέση τιμή και η διακύμανση ως εξής:

$$\mu_k = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j C_i \quad (4.19)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j C_i^2 - \mu_k^2 \quad (4.20)$$

Η συνάρτηση μείωσης τελικά έχει ως εξής:

$$T_n = \frac{T_{n-1}}{1 + \frac{T_{n-1} * \ln(1 + \delta)}{3\sigma_k}} \quad (4.21)$$

όπου με δ συμβολίζεται η παράμετρος απόστασης η οποία στην ουσία προσδιορίζει την προσπάθεια που θα απαιτηθεί προκειμένου να πλησιάσει ο αλγόριθμος το ολικό βέλτιστο.

- Συνάρτηση μείωσης των Dougherty & Marryot [83]: Η στρατηγική που προτείνουν οι Dougherty & Marryot θεωρεί μεταβαλλόμενο τον ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας, ο οποίος εξαρτάται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά του εφικτού χώρου:

$$T_n = \max\{\exp(-\beta * T_{n-1}/\sigma_{n-1}), 0,5\} \quad (4.22)$$

όπου σ_{n-1} η τυπική απόκλιση του δείγματος λύσεων που έχουν εξεταστεί στην τρέχουσα Μαρκοβιανή αλυσίδα ($n - 1$), και β παράμετρος κλίμακας, εξαρτώμενη από το πεδίο τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης. Η ελάχιστη τιμή 0,5 εξασφαλίζει έναν επαρκώς βραδύ ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας κατά τα αρχικά βήματα.

Η επιλογή της αρχικής θερμοκρασίας είναι εξίσου σημαντική απόφαση για ένα αποδοτικό πρόγραμμα ψύξης. Στα αρχικά στάδια εφαρμογής του αλγορίθμου η παράμετρος της θερμοκρασίας θα πρέπει να έχει αρκετά υψηλή τιμή, έτσι ώστε να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αποδοχής λύσεων χειρότερης ποιότητας. Ωστόσο, αν η τιμή αυτή γίνει υπερβολικά μεγάλη, η μέθοδος της ΠΑ καθίσταται αναποτελεσματική, εξαιτίας τόσο της βραδύτερης σύγκλισης αλλά και επειδή η διαδικασία βελτιστοποίησης μεταπίπτει σε τυχαίο περίπατο (random walk). Αντίθετα, αν η αρχική θερμοκρασία είναι χαμηλή, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εγκλωβισμού σε κάποιο τοπικό ακρότατο. Οι Kirkpatrick et al. [52] πρότειναν έναν απλό τρόπο εύρεσης κατάλληλης αρχικής θερμοκρασίας, βάσει της επιθυμητής πιθανότητας επιλογής μη βέλτιστων λύσεων (P_0). Αρχικά τίθεται μια πολύ υψηλή τιμή θερμοκρασίας και έπειτα από την εκτέλεση ορισμένων προκαταρκτικών βημάτων εκτιμάται η μέση αύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Έτσι η αρχική θερμοκρασία προκύπτει ως εξής:

$$T_0 = \frac{\overline{\Delta f}}{P_0} \quad (4.23)$$

Οι Aarts & Van Laarhoven [82] πρότειναν έναν εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της αρχικής θερμοκρασίας. Ο υπολογισμός της αρχικής θερμοκρασίας απαιτεί την δοκιμαστική δημιουργία ενός προκαθορισμένου αριθμού λύσεων και καταγραφή των τιμών της αντικειμενικής τους συνάρτησης. Η παράμετρος της θερμοκρασίας θα πρέπει να έχει αρκετά υψηλή τιμή, έτσι ώστε να αποδέχεται χειρότερες λύσεις με πιθανότητα x :

$$x = \frac{m_1 + m_2 \exp\left(\frac{-\overline{\Delta C^+}}{T_0}\right)}{m_1 + m_2} \quad (4.24)$$

όπου C_i είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την λύση i , m_1 το πλήθος των λύσεων οι οποίες προκαλούν βελτίωση της ποιότητας, m_2 το πλήθος των λύσεων οι οποίες προκαλούν χειροτέρευση της ποιότητας και ΔC^+ είναι η μέση άνοδος της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε m_2 λύσεις. Δημιουργώντας λοιπόν ένα προκαθορισμένο αριθμό λύσεων και δεχόμενοι και όλες τις λύσεις που υποβιβάζουν την ποιότητα δύναται να υπολογιστεί η αρχική θερμοκρασία για αρχικό ποσοστό αποδοχής x ως εξής:

$$T_0 = \frac{\overline{\Delta C^+}}{\ln\left(\frac{m_2}{m_2x - m_1(1-x)}\right)} \quad (4.25)$$

- *Κριτήριο αποδοχής Metropolis*: Όπως επισημάνθηκε η ΠΑ είναι μέθοδος κατάλληλη για προβλήματα όπου το επιθυμητό ολικό βέλτιστο βρίσκεται ανάμεσα σε πολλά, φτωχότερα (σε όρους καταλληλότητας), τοπικά βέλτιστα. Κατά συνέπεια η μέθοδος πρέπει να είναι ικανή να αποφεύγει την παγίδευσή της στα εκάστοτε τοπικά βέλτιστα. Προκειμένου να επιτευχθεί ο προηγούμενος αναφερθείς στόχος η μέθοδος δεν δέχεται μόνο μεταβολές οι οποίες βελτιώνουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά επιτρέπει και κινήσεις οι οποίες υποβαθμίζουν την τιμή της με πιθανότητα

$$P(\Delta C) = \exp(-\Delta C/T) \quad (4.15)$$

όπου ΔC είναι η διαφορά της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης της υποψήφιας λύσης από την ήδη υπάρχουσα και T είναι η παράμετρος της θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια μια υποψηφία νέα λύση γίνεται αποδεκτή, εάν έχει την ίδια ή μικρότερη αντικειμενική αξία σε σχέση με την ήδη υπάρχουσα. Ακόμα και εάν η νέα λύση προκαλεί αύξηση στο κόστος του συστήματος, κρίνεται για την καταλληλότητά της στοχαστικά σύμφωνα με την πιθανότητα $P(\Delta C)$ και γίνεται αποδεκτή εάν ένας τυχαία παραχθείς αριθμός που ανήκει στο διάστημα $(0,1)$, είναι μικρότερος ή ίσος της πιθανότητας $P(\Delta C)$.

Βελτιστοποίηση Προσανατολισμού Κατασκευής

5.1 Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Το πρόβλημα της εύρεσης του βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής ενός αντικειμένου, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο κατασκευαστικών περιορισμών ή απαιτήσεων, αναφέρεται συνήθως ως το πρόβλημα προσανατολισμού και έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών [84-88]. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος οι οποίες απαντώνται στη βιβλιογραφία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τρία βασικά χαρακτηριστικά:

- i. τα κριτήρια που υιοθετούνται προκειμένου να αξιολογήσουν έναν τυχαίο προσανατολισμό κατασκευής,
- ii. τη μέθοδο που υιοθετείται για τον καθορισμό του χώρου λύσης, δηλαδή, το ποιό και πόσοι προσανατολισμοί θα αξιολογηθούν, και
- iii. τη μέθοδο βελτιστοποίησης που υιοθετείται προκειμένου να αναζητηθεί ο πλέον κατάλληλος/βέλτιστος προσανατολισμός κατασκευής.

Τα κριτήρια που υιοθετούνται στη σχετική βιβλιογραφία, προκειμένου να αποτελέσουν το μέσο αξιολόγησης της καταλληλότητας ενός προσανατολισμού κατασκευής, ποικίλλουν λόγω των διαφορετικών προσεγγίσεων που ακολουθούν πολλοί ερευνητές καθώς επίσης και λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε τεχνολογίας ΣΚ που εξετάζεται. Τα προτεινόμενα κριτήρια μπορούν να ταξινομηθούν κατά προσέγγιση σε δύο ομάδες: α) σε εκείνα που αποτελούν εκτιμήτριες του χρόνου και του κόστους παραγωγής, και β) σε εκείνα που σχετίζονται με την ποιότητα και την ακρίβεια των παραγόμενων αντικειμένων.

Η πιο διαδεδομένη εκτιμήτρια του χρόνου παραγωγής καθώς και του αντίστοιχου κόστους που απαντάται στην βιβλιογραφία αποτελεί ο απαραίτητος αριθμός διατομών (layers)[37, 89-94] από τις οποίες αποτελείται ένα αντικείμενο ή το ισοδύναμο κριτήριο του ύψους του αντικειμένου [94-96], θεωρώντας ότι το πάχος στρώματος είναι σταθερό. Για τις τεχνολογίες ΣΚ οι οποίες απαιτούν τη χρησιμοποίηση δομών υποστήριξης κατά τη διάρκεια της παραγωγής, ο κατ' εκτίμηση υπολογισμός του όγκου των δομών υποστήριξης έχει χρησιμοποιηθεί επίσης ως εκτιμήτρια του χρόνου και του κόστους παραγωγής [84, 94]. Τα προαναφερθέντα κριτήρια είναι απλές εκτιμήτριες του πραγματικού χρόνου και κόστους παραγωγής και ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση άμεσων συγκρίσεων μεταξύ των διαφορετικών υποψηφίων προσανατολισμών, αλλά έχουν μικρή χρησιμότητα όταν υφίστανται περιορισμοί σε όρους χρόνου και δαπανών. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο, σε πολλές μελέτες, υιοθετείται ως κριτήριο αξιολόγησης ο εκτιμώμενος πραγματικός χρόνος κατασκευής και το αντίστοιχο κόστος, με βάση αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης [87, 94, 97-99]. Η εκτίμηση του χρόνου των μετα-παρασκευαστικών εργασιών αποτελεί ακόμα ένα σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει το κόστος παραγωγής και ο οποίος επηρεάζεται άμεσα από την επιλογή προσανατολισμού. Για το λόγο αυτό, έχει και τούτο θεωρηθεί επίσης ως κριτήριο για την επιλογή προσανατολισμού [93]. Τέλος, η έκταση των μετα-παρασκευαστικών εργασιών που απαιτούνται έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες μελέτες μέσω του υπολογισμού του συνολικού εμβαδού των επιφανειών των αντικειμένων που παρουσιάζουν το φαινόμενο της κλίμακας ή/και υπολείμματα της δομής υποστήριξης [91, 94, 95, 100].

Όσον αφορά την ποιότητα και την ακρίβεια των αντικειμένων που παράγονται με τις τεχνολογίες ΣΚ, ο παράγοντας της ποιότητας των επιφανειών αποτελεί το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κριτήριο. Σαν εκτιμήτριες της ποιότητας επιφάνειας ενός αντικειμένου, έχουν προταθεί διάφορα κριτήρια όπως η εκτιμώμενη μέση τραχύτητα [37, 92, 97], η σταθμισμένη μέση τραχύτητα επιφάνειας [98, 99], και το συνολικό εμβαδό των επιφανειών όπου η εκτιμώμενη τραχύτητα αναμένεται να ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή-όριο [101]. Επιπρόσθετα, συχνά απαντώνται

στη βιβλιογραφία διάφορα κριτήρια τα οποία σχετίζονται με γνωστές πηγές διαστασιολογικών σφαλμάτων όπως το ογκομετρικό λάθος [102, 103], ή το φαινόμενο κλίμακας [89, 91, 100], και, ιδιαίτερα για την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας το φαινόμενο του «κλειστού όγκου» (closed volume)[104]. Στην προσπάθεια να βελτιωθεί η ποιότητα της επιφάνειας των αντικειμένων που παράγονται με την χρήση τεχνολογιών ΣΚ και να μειωθούν τα λάθη τα οποία σχετίζονται με την παραγωγική διαδικασία (π.χ., λάθη τεμαχισμού) για δεδομένο προσανατολισμό, έχει προταθεί σε πολλές μελέτες η υιοθέτηση της μεθόδου του προσαρμοστικού τεμαχισμού (Adaptive Slicing) [90, 92, 97, 99]. Ο προσαρμοστικός τεμαχισμός είναι πράγματι πολύ ελκυστικός όταν εξετάζεται υπό το πρίσμα της παραγωγής ενός μόνο αντικειμένου ή παρτίδας ιδίων αντικειμένων. Εντούτοις, θεωρείται αδύνατο ή σχεδόν αδύνατο να εφαρμοστεί στην περίπτωση της εξατομικευμένης παραγωγής διαφορετικών ή όμοιων αντικειμένων, μια πρακτική η οποία παρατηρείται συχνά στις περισσότερες τεχνολογίες ΣΚ και η οποία αποτελεί και το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα. Το πρόβλημα προσανατολισμού μπορεί να συσχετιστεί επίσης με το πρόβλημα στοιβαγμού όπου ο κύριος στόχος είναι η καλύτερη δυνατή χρήση του χώρου της πλατφόρμας κατασκευής της μηχανής ΣΚ. Σε αυτό το πλαίσιο, το ποσοστό του χώρου της πλατφόρμας κατασκευής που καταλαμβάνεται από αντικείμενα προς παραγωγή ή εναλλακτικά ο αριθμός των αντικειμένων που τοποθετούνται στην πλατφόρμα προς κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο κριτήριο για την επιλογή του προσανατολισμού του κάθε αντικειμένου που είναι μέρος της συγκεκριμένης παρτίδας παραγωγής [96, 105]. Άλλα κριτήρια τα οποία προτείνονται στη βιβλιογραφία ως δείκτες της ποιότητας των παραγόμενων αντικειμένων είναι η σταθερότητα της δομής του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της παραγωγής του [90, 91], και η εκτιμώμενη μηχανική αντοχή [106].

Η επιλογή της προσέγγισης βελτιστοποίησης του προσανατολισμού κατασκευής ποικίλλει επίσης σημαντικά ανάλογα με τη μέθοδο καθορισμού των υποψηφίων λύσεων δηλαδή του χώρου λύσης, καθώς επίσης και ανάλογα με την μέθοδο βελτιστοποίησης. Η προσέγγιση που απαντάται συχνότερα στη βιβλιογραφία περιλαμβάνει τον καθορισμό ενός περιορισμένου συνόλου «καλών» υποψηφίων προσανατολισμών χρησιμοποιώντας ως αναφορά για τους υποψηφίους προσανατολισμούς τις επίπεδες επιφάνειες του αντικειμένου ή του αντίστοιχου «Κυρτού Περιβλήματος» (Convex Hull) [37, 95, 98-100]. Κατά τρόπο παρόμοιο, ένα σύνολο υποψηφίων προσανατολισμών μπορεί να καθοριστεί μέσω του βέλτιστου προσανατολισμού των βασικών μορφολογικών χαρακτηριστικών (features) και των επιφανειών του αντικειμένου [87]. Η μέθοδος της βηματικής περιστροφής του αντικειμένου γύρω από καθορισμένους από τον χρήστη άξονες ή γύρω από τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων της μηχανής έχει προταθεί επίσης ως μέθοδος για την δημιουργία υποψηφίων προσανατολισμών [89, 91, 102, 103]. Αυτή η μέθοδος αν και επιτρέπει την εξερεύνηση μεγαλύτερου αριθμού υποψηφίων προσανατολισμών ανάλογα με το

βήμα περιστροφής, καθιστά την εξαντλητική αξιολόγηση όλων των υποψηφίων λύσεων υπολογιστικά ακριβή. Για την αντιμετώπιση αυτής ακριβώς της αδυναμίας και για να ερευνηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του χώρου λύσης σε εύλογο υπολογιστικά χρόνο, προτάθηκε σε διάφορες εργασίες η χρήση των εξελικτικών τεχνικών βελτιστοποίησης [92, 93, 97, 101].

Το πρόβλημα προσανατολισμού είναι, εξ ορισμού, ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικρουόμενους στόχους-κριτήρια. Μια διαισθητική προσέγγιση για την αντιμετώπιση του προβλήματος των αντικρουόμενων στόχων είναι η ταξινόμηση των κριτηρίων σύμφωνα με τη σημασία τους και έπειτα η αξιολόγησή τους σύμφωνα με τη βαρύτητα τους [37]. Για τη βελτιστοποίηση με τη χρήση ενός και μοναδικού κριτηρίου, όπως το ύψος των αντικείμενων προς παραγωγή ή το μέσο ύψος οδόντωσης, έχουν προταθεί μια πληθώρα αλγορίθμων σε προηγούμενες μελέτες [95, 100, 101]. Τέλος, για την ταυτόχρονη αξιολόγηση όλων των αντικρουόμενων παραγόντων, έχουν υιοθετηθεί μεθοδολογίες όπως η σταθμισμένη πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης [87, 90, 93, 97, 98], η μέθοδος TOPSIS [99], καθώς επίσης και η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μέσω μετα-ευρετικών τεχνικών [92].

5.2 Ανάπτυξη Συστήματος Βελτιστοποίησης Προσανατολισμού Κατασκευής

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος επιλογής του βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής ενός αντικειμένου με χρήση τεχνολογιών ΣΚ, καθώς και η ποικιλομορφία των μεθόδων που έχουν προταθεί για την επίλυσή του έχουν οδηγήσει στη δημιουργία διαφορετικών προσεγγίσεων. Οι περισσότερες από αυτές είτε αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά μεμονωμένα τμήματα του προβλήματος είτε στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία του χρήστη-χειριστή. Υπάρχει, επομένως η ανάγκη δημιουργίας ενός ενιαίου πλαισίου το οποίο θα ενσωματώνει όλα τα χαρακτηριστικά τα οποία περιγράφουν την πολυκριτηριακή φύση του προβλήματος [29, 84] και το οποίο θα δύναται να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά από χρήστες με ελάχιστη εμπειρία.

Η παρούσα διατριβή είναι εστιασμένη στην Στερεολιθογραφία σαν μέθοδο ΣΚ. Για την ανάπτυξη του προτεινόμενου πλαισίου εξετάζονται θέματα που αφορούν σε δύο ανεξάρτητες συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα αφορά στον εντοπισμό όλων των παραμέτρων που έχουν επιπτώσεις στο βέλτιστο της λύσης ενός συγκεκριμένου προσανατολισμού κατασκευής προκειμένου να αναπτυχθεί μια αξιόπιστη μέθοδος κρίσης της ποιότητάς του. Η δεύτερη συνιστώσα αφορά στην ανάπτυξη καταλλήλων και αποτελεσματικών μεθόδων εξερεύνησης του χώρου λύσης, οι οποίες δεν απαιτούν την ανάμιξη του χρήστη αλλά και δεν περιορίζουν την εξερεύνηση τους σε ένα μικρό αριθμό υποψηφίων λύσεων, όπως συμβαίνει στις περισσότερες από τις προηγούμενα αναπτυχθείσες μεθόδους και που παρατέθηκαν σύντομα στην προηγούμενη ενότητα. Οι

διαδικασίες αυτές αναλαμβάνουν την ανακάλυψη βέλτιστων προσανατολισμών με διαφανή τρόπο από τον χρήστη, ο οποίος εμπλέκεται μόνο στην φάση της λήψης απόφασης περί του ποια από τις τελικά διαθέσιμες «βέλτιστες λύσεις» θα είναι προτιμητέα. Η συμμετοχή του χρήστη στη διαδικασία λήψης απόφασης πραγματοποιείται είτε στην αρχή της διαδικασίας (a priori προσέγγιση), όπου και καλείται να εκφράσει εκ των προτέρων τις κατασκευαστικές του επιθυμίες προκειμένου η αναζήτηση βέλτιστων λύσεων να συμφωνεί με τις επιθυμίες του, είτε στο τέλος (a posteriori προσέγγιση) όπου καλείται να επιλέξει την τελική λύση ανάμεσα σε ένα σύνολο προτεινόμενων βέλτιστων λύσεων.

Όπως προαναφέρθηκε ως βελτιστοποίηση θεωρείται η διαδικασία εύρεσης μιας ή περισσότερων λύσεων που αντιστοιχούν στην ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση μιας ή και περισσότερων αντικειμενικών συναρτήσεων ικανοποιώντας όλους τους ενδεχόμενους περιορισμούς. Ένα μονοκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει μια μοναδική αντικειμενική συνάρτηση, η οποία οδηγεί συνήθως και στην εύρεση μιας μοναδικής λύσης που αποκαλείται και βέλτιστη λύση. Αφ' ετέρου, ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης εξετάζει ταυτόχρονα, πολλαπλά και συνήθως αντικρουόμενα αντικειμενικά κριτήρια. Συνεπώς, ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης (Multiobjective Optimization Problem) μοντελοποιείται συνήθως ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση } \{f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_k(x)\} \text{ όπου } x \in X \quad (5.1)$$

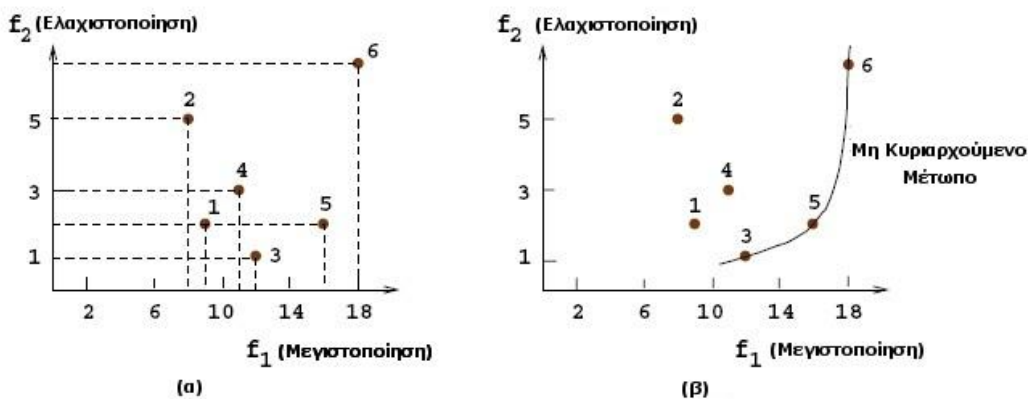
εκφράζοντας το γεγονός ότι θέλουμε, ιδανικά, μια μοναδική λύση x η οποία να ελαχιστοποιεί κάθε μια από τις k αντικειμενικές συναρτήσεις. Αυτές οι συναρτήσεις μπορούν να έχουν αντικρουόμενο χαρακτήρα, υπό την έννοια ότι μια λύση a η οποία βελτιστοποιεί π.χ. την συνάρτηση f_1 , μπορεί να απέχει αρκετά από τα βέλτιστα των υπόλοιπων αντικειμενικών συναρτήσεων. Κάθε λύση $x \in X$ καλείται συχνά «διάνυσμα απόφασης» (ενώ το αντίστοιχο X καλείται χώρος λύσεων), δεδομένου ότι οι τιμές του διανύσματος x περιγράφουν πιθανές αποφάσεις για την επίλυση της προβλήματος. Γνωρίζοντας ότι η ποιότητα μιας λύσης δεν μπορεί πλέον να χαρακτηριστεί από μια διακριτή τιμή, αλλά από το σύνολο των τιμών του διανύσματος της μορφής $\{f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_k(x)\}$ (διάνυσμα αντικειμενικών τιμών) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια νέα μορφή αξιολόγησης της σχέσης μεταξύ δύο υποψηφίων λύσεων. Η σχέση αυτή προέρχεται από τον ορισμό των «μη κυριαρχούμενων λύσεων» (non-dominated solutions) κατά Παρέτο [107, 108, 109]. Στο πλαίσιο αυτό ορίζεται ότι μια λύση x είναι καλύτερη από μια λύση y εάν το διάνυσμα των αντικειμενικών τιμών της x υπερτερεί τουλάχιστον σε ένα κριτήριο σε σχέση με το διάνυσμα των αντικειμενικών τιμών της y και δεν υστερεί σε όλα τα υπόλοιπα κριτήρια. Ήτοι (για πρόβλημα ελαχιστοποίησης):

$$f_i(x) \leq f_i(y) \text{ για κάθε } i = 1, \dots, k - 1 \quad (5.2)$$

$$f_j(x) < f_j(y) \text{ για τουλάχιστον ένα } j \quad (5.3)$$

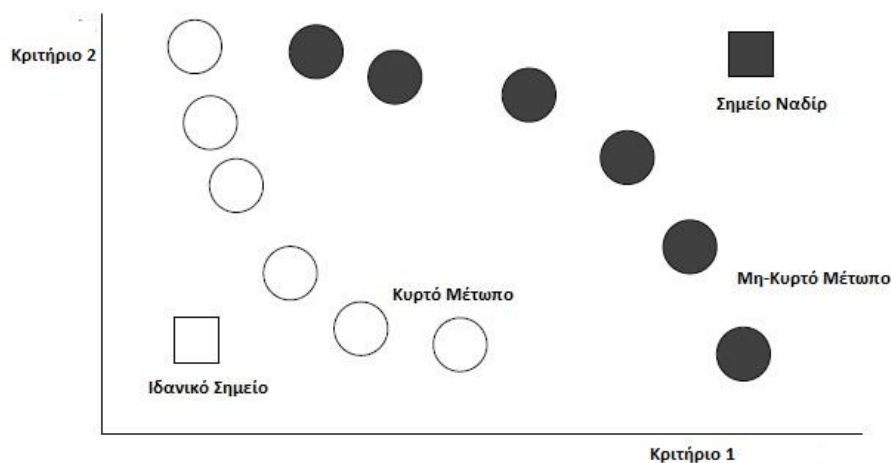
Η σχέση αυτή περιγράφεται και με τον όρο κυριαρχία (dominance), όπου και λέμε ότι η λύση x κυριαρχεί επί της λύσης y . Στην περίπτωση όπου το διάνυσμα των αντικειμενικών τιμών της x υπερτερεί σε κάποια από τα κριτήρια σε σχέση με το διάνυσμα των αντικειμενικών τιμών της y και υστερεί σε κάποια άλλα, τότε οι λύσεις x και y χαρακτηρίζονται ως «μη κυριαρχούμενες» λύσεις.

Έχοντας ένα σύνολο λύσεων για ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα (όπως ο τρέχων πληθυσμός των λύσεων κατά τη διάρκεια ενός μετα-ευρετικού αλγορίθμου), γνωρίζουμε ότι κάποιες από αυτές θα «κυριαρχούνται» από τις υπόλοιπες. Εκείνες οι λύσεις, στο δεδομένο σύνολο, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως «μη κυριαρχούμενες» αποτελούν το σύνολο κατά Παρέτο. Το σύνολο κατά Παρέτο μπορεί να περιλαμβάνει μια μόνο λύση μέχρι και του συνόλου όλων των λύσεων. Το σύνολο κατά Παρέτο όταν εκφράζεται με τη μορφή του διανύσματος των αντικειμενικών τιμών καλείται και μέτωπο κατά Παρέτο (ή μη κυριαρχούμενο μέτωπο) [107]. Συνήθως, η βέλτιστη λύση σε ένα πραγματικό πολυκριτηριακό πρόβλημα από-τελείται από ένα τέτοιο σύνολο, το οποίο περιέχει περισσότερες από μία λύσεις. Οποιοδήποτε μοναδικό σημείο στο μέτωπο κατά Παρέτο καλείται και ως βέλτιστη λύση κατά Παρέτο. Για το σύνολο των έξι λύσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-1 υπάρχουν τρεις μη κυριαρχούμενες λύσεις ή αλλιώς τρεις βέλτιστες λύσεις κατά Παρέτο. Μια βασική ιδιότητα των βέλτιστων λύσεων κατά Παρέτο αποτελεί το γεγονός ότι δεν είναι συνήθως μόνο οι λύσεις που αποτελούν βέλτιστα για κάθε ξεχωριστή αντικειμενική συνάρτηση, δεδομένου ότι συνήθως δεν ελαχιστοποιείται κάθε ένα από τα κριτήρια ξεχωριστά. Εντούτοις, αντιπροσωπεύουν έναν «συμβιβασμό» μεταξύ των αντικειμενικών κριτηρίων, έτσι ώστε κάθε λύση που βελτιώνει ένα κριτήριο να συνοδεύεται και από υποβάθμισή ενός ή περισσότερων άλλων κριτηρίων (βλ. Σχήμα 5-1). Η ιδιότητα του συμβιβασμού οδηγεί στην επιθυμία της εύρεσης όσο το δυνατόν περισσότερων σημείων που ανήκουν στο μέτωπο προκειμένου να καταστεί αντικειμενική η τελική επιλογή μεταξύ τους.



Σχήμα 5-1 Σχηματική αναπαράσταση μη κυριαρχούμενων λύσεων κατά Παρέτο [5.26].

Σαφώς στο μέτωπο κατά Παρέτο περιέχονται και οι λύσεις οι οποίες πραγματικά ελαχιστοποιούν την αντικειμενική τιμή ενός κριτηρίου. Μάλιστα το διάνυσμα που περιέχει τις ελάχιστες αντικειμενικές τιμές όλων των κριτηρίων αποτελεί χρήσιμο σημείο αναφοράς στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, και είναι γνωστό ως το «ιδανικό σημείο». Ομοίως, υπάρχει το αποκαλούμενο «σημείο ναδίρ» το οποίο θεωρητικά αντιπροσωπεύει το διάνυσμα των χειρότερων τιμών για όλα τα κριτήρια [110]. Οι έννοιες αυτές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 5-2 όπου παρουσιάζονται το μέτωπο κατά Παρέτο δυο προβλημάτων ελαχιστοποίησης.



Σχήμα 5-2 Σχηματική αναπαράσταση κυρτού & μη κυρτού μετώπου κατά Παρέτο [5.29].

Οι άσπροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις βέλτιστες λύσεις κατά Παρέτο, για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με δύο κριτήρια. Το άσπρο τετράγωνο περιγράφει το ιδανικό σημείο το οποίο στην ουσία αποτελεί μια λύση που δεν μπορούμε πραγματικά να επιτύχουμε σε αυτό το πρόβλημα, αλλά παρουσιάζει τη θεωρητική καλύτερη λύση για κάθε κριτήριο χωριστά. Παρατηρούμε ότι το μέτωπο τείνει προς το ιδανικό του σημείο, γεγονός το οποίο χαρακτηρίζει ένα μέτωπο ως κυρτό (convex) [108]. Εναλλακτικά, το μέτωπο σε μερικά προβλήματα μπορεί να επιδείξει και ασυνεχή, μη κυρτή συμπεριφορά όπως πχ συμβαίνει με το μέτωπο που αντιπροσωπεύεται από τους μαύρους κύκλους στο Σχήμα 5-2. Τέλος, το μαύρο σημείο αποτελεί το «σημείο ναδίρ» για το κυρτό μέτωπο.

5.2.1 Κατηγοριοποίηση μεθοδολογιών δημιουργίας μετώπου κατά Παρέτο

Όπως γίνεται αντιληπτό στην περίπτωση των πολυκριτηριακών προβλημάτων, δεν υπάρχει συνήθως μια μόνο βέλτιστη λύση, αλλά ένα σύνολο εναλλακτικών καλών ή αλλιώς μη-κυριαρχούμενων λύσεων. Ωστόσο, παρά την ύπαρξη των πολλαπλών βέλτιστων λύσεων κατά Παρέτο, στην πράξη, συνήθως μόνο μια από αυτές τις λύσεις πρόκειται να επιλεγεί. Κατά συνέπεια, σε σχέση με τα μονοκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης, στην πολυκριτηριακή

βελτιστοποίηση, περιλαμβάνονται δύο τουλάχιστον εξίσου σημαντικές διαδικασίες. Η πρώτη διαδικασία αφορά την εύρεση των βέλτιστων λύσεων κατά Παρέτο (συνήθως μέσω μιας υπολογιστικής διαδικασίας) ενώ η δεύτερη αφορά τη διαδικασία της λήψης απόφασης περί του ποια λύση τελικά θα επιλεγεί ως προτιμητέα. Η επιλογή αυτή απαιτεί να παρασχεθούν ως πληροφορία οι προτιμήσεις του ατόμου που είναι επιφορτισμένο με τη λήψη της τελικής απόφασης (Decision Maker).

Παραδοσιακά, στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση έχουν χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά μαθηματικές τεχνικές προγραμματισμού και λήψης αποφάσεων, όπου ο απώτερος ρόλος της βελτιστοποίησης αφορά την εύρεση μιας τελικής λύσης η οποία ικανοποιεί τις προτιμήσεις του ατόμου που αντιμετωπίζει το πρόβλημα. Το εναλλακτικό σενάριο αφορά την δημιουργία μιας διαλογικής διαδικασίας προκειμένου να ευρεθεί μια προτιμώμενη λύση. Τα άτομο που αφορά το πρόβλημα συμμετέχει ενεργά σε αυτήν την διαδικασία, ιδιαίτερα στο στάδιο της λήψης αποφάσεων. Η λήψη απόφασης που αφορά την επιλογή μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων που ανακαλύπτονται από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης απαιτεί τη δημιουργία ενός ρητού μοντέλου προτιμήσεων του ατόμου, προκειμένου να εξαχθεί η τελική προτιμώμενη λύση ή να οδηγηθεί η αναζήτηση του επόμενου σταδίου βελτιστοποίησης προς καλύτερες λύσεις. Πολλές διαλογικές (Interactive) μέθοδοι έχουν προταθεί μέχρι σήμερα, οι οποίες διαφέρουν κυρίως ως προς τον τρόπο που εμπλέκεται το άτομο το οποίο αντιμετωπίζει το πρόβλημα, στην όλη διαδικασία καθώς και στο μοντέλο προτιμήσεων που στηρίζεται στις πληροφορίες προτίμησης του ατόμου.

Σύμφωνα με τους Hwang–Masud [111] και Miettinen [112], οι μέθοδοι πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις οικογένειες σύμφωνα με το ρόλο του ατόμου που είναι επιφορτισμένο με τη λήψη της τελικής απόφασης. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχει κανένα άτομο που θα λάβει την τελική απόφαση και κατά επέκταση δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για τις προτιμήσεις του. Συνεπώς, πρέπει να βρεθεί κάποια ουδέτερη λύση συμβιβασμού χωρίς οποιοσδήποτε πρόσθετες πληροφορίες προτίμησης. Σε όλες τις άλλες κατηγορίες, το άτομο που θα λάβει την τελική απόφαση υποτίθεται ότι συμμετέχει στη διαδικασία λύσης.

Στις εκ των προτέρων (*a priori*) μεθόδους, συγκεντρώνονται εξ αρχής οι πληροφορίες προτίμησης και έπειτα η διαδικασία βελτιστοποίησης προσπαθεί να βρει μια βέλτιστη κατά Παρέτο λύση η οποία να τις ικανοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Αυτό αποτελεί μια απλή προσέγγιση, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι δεν είναι πάντα γνωστές εκ των προτέρων οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του προβλήματος με αποτέλεσμα να υπάρχουν πάρα πολύ αισιόδοξες ή απαισιόδοξες

προσδοκίες. Εναλλακτικά, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι εκ των υστέρων (*a posteriori*) μέθοδοι, όπου πρώτα δημιουργείται το σύνολο των βέλτιστων λύσεων κατά Παρέτο και έπειτα το άτομο που αντιμετωπίζει το πρόβλημα καλείται να αποφασίσει ποια λύση είναι τελικά η προτιμητέα. Αυτή η προσέγγιση δημιουργεί μια οπτική προεπισκόπηση των διαθέσιμων λύσεων από τις οποίες ο λήπτης της απόφασης μπορεί εύκολα να επιλέξει όποια νομίζει ότι ταιριάζει καλύτερα στις προτιμήσεις του. Ωστόσο, η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να καταστήσει δυσχερή τη λήψη της απόφασης όταν υπάρχουν περισσότερα από τρία κριτήρια βελτιστοποίησης, καθώς δεν υπάρχει εύκολα αντιληπτός τρόπος οπτικής αναπαράστασής τους. Επιπλέον, η δημιουργία του μετώπου των βέλτιστων κατά Παρέτο λύσεων είναι συνήθως υπολογιστικά ακριβή.

Η τέταρτη κατηγορία περιλαμβάνει τις διαλογικές προσεγγίσεις οι οποίες αποτελούνται από ένα επαναληπτικό αλγόριθμο. Μετά από κάθε επανάληψη, κάποιες πληροφορίες διοχετεύονται στο λήπτη της απόφασης ο οποίος και καλείται να παρέχει πληροφορίες προτίμησης στη μορφή που η εν λόγω μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιήσει, πχ μέσω απάντησης σε μερικές ερωτήσεις. Αυτό που είναι αξιοσημείωτο στις συγκεκριμένες μεθόδους είναι ότι ο λήπτης της απόφασης μπορεί να διευκρινίσει και να ρυθμίσει τις προτιμήσεις του μεταξύ κάθε επανάληψης και να μάθει συγχρόνως για τις αλληλεξαρτήσεις του προβλήματος.

5.2.2 Μοντελοποίηση προβλήματος Προσανατολισμού

Όπως γίνεται αντιληπτό το πρόβλημα προσανατολισμού προκειμένου να επιλυθεί αποτελεσματικά θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ως πολυκριτηριακό πρόβλημα, δεδομένου ότι πρέπει να αξιολογηθούν ταυτόχρονα τόσο το κόστος όσο και η ποιότητα του τελικά παραγόμενου αντικειμένου για έναν δεδομένο κατασκευαστικό προσανατολισμό. Συνεπώς, το πρόβλημα προσανατολισμού μπορεί γενικά να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση } \{F_{\text{Κόστος}}(x), F_{\text{Κατασκευαστική Απόκλιση}}(x)\} \text{ με } x = (\theta_x, \theta_y, \theta_z) \quad (5.4)$$

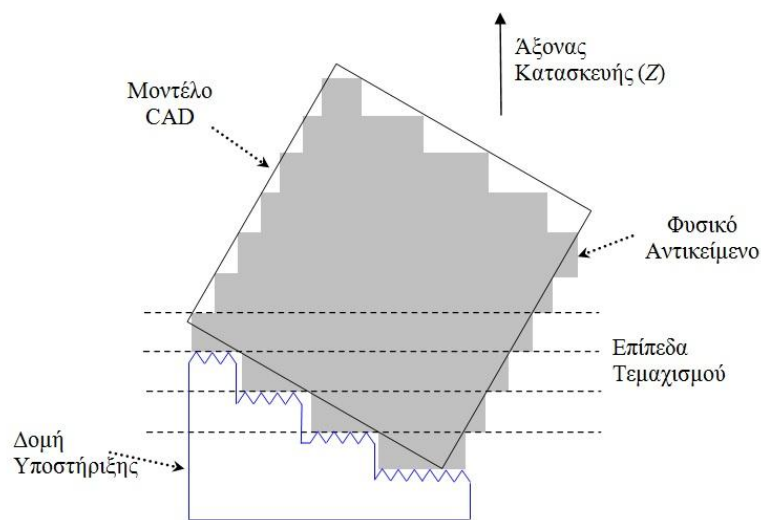
$$0 \leq \theta_i \leq 360 \quad \forall i \quad (5.5)$$

Η συνάρτηση $F_{\text{Κόστος}}$ αφορά το κόστος κατασκευής ενός αντικείμενου δοθέντος ενός προσανατολισμού ο οποίος περιγράφεται από το διάνυσμα απόφασης x με μεταβλητές απόφασης τις γωνίες περιστροφής του αντικείμενου σε σχέση με τον αρχικό του προσανατολισμό. Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση $F_{\text{Κατασκευαστική Απόκλιση}}$ αποτελεί το μέτρο των προκληθέντων κατά την κατασκευαστική φάση σφαλμάτων, στα οποία οφείλεται η απώλεια της ποιότητας των τελικών προϊόντων σε σχέση το αρχικό μοντέλο CAD. Επομένως, η Κατασκευαστική Απόκλιση συνδέεται με την ποιότητα του αντικείμενου κατά αντίθετη φορά, δηλ. όσο χαμηλότερη είναι η Κατασκευαστική

Απόκλιση τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του τελικά παραχθέντος αντικειμένου. Γίνεται αντιληπτό ότι προκειμένου να αξιολογηθούν οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις F , θα πρέπει να προσδιοριστούν οι εξαρτώμενες από τον προσανατολισμό παράμετροι καθώς και να εκτιμηθούν οι αντίστοιχες τιμές τους.

5.2.2.1 Ανάλυση Κατασκευαστικής Απόκλισης

Όπως προαναφέρθηκε μία από τις σημαντικότερες εκτιμήτριες της ποιότητας και της κατασκευαστικής ακρίβειας ενός αντικείμενου που παράγεται με χρήση συστήματος Στερεολιθογραφίας είναι η τραχύτητα των επιφανειών του. Η υπερβολική τραχύτητα που παρουσιάζεται στις επιφάνειες του αντικείμενου οφείλεται συνήθως στην επίδραση του φαινομένου κλίμακας που παρατηρείται σε όλες τις επικλινείς επιφάνειες ενός αντικείμενου, ως αποτέλεσμα της στρωματικής φύσης της κατασκευαστικής διαδικασίας (βλ. Σχήμα 5-3). Η ένταση του φαινομένου κλίμακας εξαρτάται από το πάχος στρώματος και τη γωνία της επιφάνειας σε σχέση με τον άξονα κατασκευής (Z - άξονας στο Σχήμα 5-3) [38] ενώ η τραχύτητα των επιφανειών που χρήζουν υποστήριξης επηρεάζεται επίσης από τα υπολείμματα της δομής υποστήριξης, η οποία αφαιρείται τελικά με το χέρι στη φάση των μεταπαρασκευαστικών εργασιών.



Σχήμα 5-3 Φαινόμενο κλίμακας και δομή υποστήριξης.

Τόσο η ένταση του φαινομένου κλίμακας όσο και το μέγεθος της αύξησης της τραχύτητας εξαιτίας της δομής υποστήριξης εξαρτώνται από τον προσανατολισμό κατασκευής και θα μπορούσαν, επομένως, να μειωθούν με την επιλογή κατάλληλου προσανατολισμού κατασκευής. Δεδομένου ότι ως αντιπροσωπευτικό μέτρο της τραχύτητας ενός αντικείμενου με προκαθορισμένο προσανατολισμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση τραχύτητα R_a που παρατηρείται στο σύνολο

των επιφανειών του, τότε η αντικειμενική συνάρτηση $F_{\text{Κατασκευαστική Απόκλιση}}$ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$F_{\text{Κατασκευαστική Απόκλιση}} = R_a \quad (5.6)$$

Ως εκ τούτου, στην βιβλιογραφία απαντώνται διαφορές προσεγγίσεις στις οποίες η ποιότητα του τελικά παραχθέντος αντικειμένου εκφράζεται μέσω του υπολογισμού της τραχύτητας των επιφανειών του σύμφωνα με κάποιον δεδομένο προσανατολισμό κατασκευής. Οι πιο αντιπροσωπευτικές από αυτές τις προσεγγίσεις αναλύονται κάτωθι.

Όπως προαναφέρθηκε (βλ. Κεφάλαιο 3) οι Reeves και Cobb [38] ήταν από τους πρώτους που παρουσίασαν ένα μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της τραχύτητας των επιφανειών ενός αντικειμένου που κατασκευάστηκε με μεθόδους ΣΚ λαμβάνοντας υπόψιν σημαντικές παραμέτρους της διαδικασίας κατασκευής όπως το πάχος στρώματος, και το γεωμετρικό προφίλ των τελικά παραχθέντων αντικειμένων. Η προσέγγισή τους αν και ήταν επαρκής ως προς το να περιγράψει την κατανομή της τραχύτητας των επιφανειών για την πλήρη σειρά των γωνιών επιφάνειας από 0° σε 360° δεν αποτελεί συνεπή εκτιμήτρια της πραγματικής τραχύτητας των επιφανειών [84]. Τα κυριότερα αίτια αυτού του φαινομένου συνοψίζονται στην ανεπάρκεια του μοντέλου να περιγράψει τις διαφορές στην «μικρο-τοπογραφία» που παρουσιάζονται στις επιφάνειες των αντικειμένων εξαιτίας των διαφορετικών τεχνολογιών ΣΚ καθώς και στο γεγονός ότι δεν συμπεριλαμβάνεται η επίδραση της δομής υποστήριξης στην εμφανιζόμενη τραχύτητα.

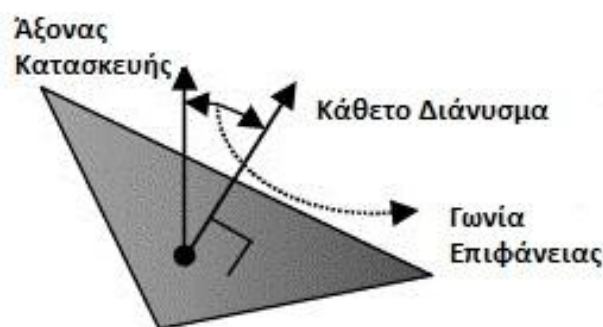
Οι Luis Perez et al. (2001) [113] πρότειναν αντίστοιχα μια γεωμετρική μεθοδολογία ανάλυσης της τραχύτητας των επιφανειών που κατασκευάζονται με τεχνολογίες ΣΚ. Υιοθέτησαν ένα θεωρητικό μοντέλο για να περιγράψουν τη μέση τραχύτητα επιφανειών ενός αντικειμένου και συνέκριναν τα αποτελέσματα με εμπειρικά μετρηθείσες τιμές τραχύτητας προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια του μοντέλου. Μεταξύ των θεωρητικών και των εμπειρικών αποτελεσμάτων έγινε εμφανές ότι υφίστανται αποκλίσεις. Επίσης, το μοντέλο που παρουσίασαν παρουσιάζει δυσκολίες στη συνεχή απεικόνιση της τραχύτητας επειδή οι δοκιμές εκτελέστηκαν για επιφάνειες οι οποίες παρουσίαζαν συγκεκριμένες κλίσεις σε σχέση με τον άξονα κατασκευής.

Οι Chambell et al. (2002) [40] παρουσίασαν μια μέθοδο οπτικής απεικόνισης της τραχύτητας των επιφανειών ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας εμπειρικές τιμές τραχύτητας ως εκτιμήτριες της πραγματικής τραχύτητας. Τα παραδείγματά τους, εντούτοις, παρουσιάζουν ανεπαρκή αποτελέσματα καθώς περιέχουν ασυνεχή συμπεριφορά ως προς την απεικόνιση σε πολλές από τις επιφάνειές τους. Το γεγονός αυτό οφειλόταν στην ένα προς ένα σχέση που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να συνδέσει τα πειραματικά δεδομένα με την απεικόνιση της τραχύτητας μίας

επιφάνειας συγκεκριμένης κλίσης ως προς τον άξονα κατασκευής. Ως αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης απαιτούνται αναρίθμητα πειραματικά δεδομένα μέτρησης τραχύτητας προκειμένου να πραγματοποιείται σωστά η πρόβλεψη της τραχύτητας οποιασδήποτε τυχαίας επιφάνειας.

Στην παρούσα προσέγγιση χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη και αξιολόγηση της μέσης τραχύτητας των επιφανειών ενός αντικειμένου με δεδομένο προσανατολισμό κατάλληλη βάση δεδομένων η οποία περιέχει τις παρατηρούμενες τιμές μέσης τραχύτητας για ένα ευρύ συνδυασμό επιφανειών υπό κλίση και παχών στρώματος. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις από τους Giannatsis et al. [84], οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε ειδικά σχεδιασμένα δοκίμια τα οποία κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της Στερολιθογραφίας και είναι παρόμοιας γεωμετρίας με εκείνα που έχουν προταθεί από τους Reeves και Cobb [38]. Τα δοκίμια αυτά σχεδιάστηκαν κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της τραχύτητας επίπεδων επιφανειών με κλίση 0° - 180° σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο ανά 10° , ενώ κατασκευάστηκαν και μετρήθηκαν τρία είδη δοκιμίων, ένα για κάθε τιμή του πάχους στρώματος (0,10, 0,15 και 0,20 mm) σύμφωνα με τις συνήθειες χρησιμοποιούμενες παραμέτρους σάρωσης.

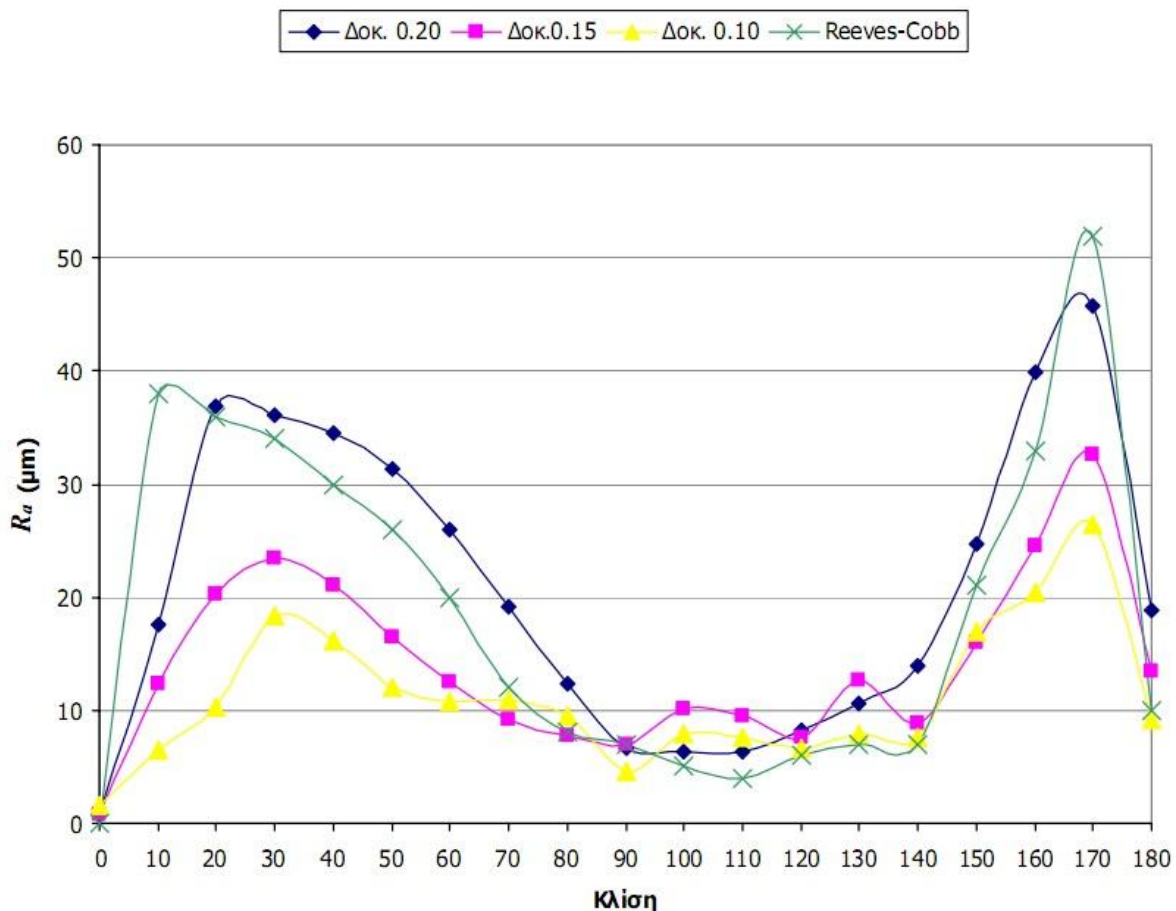
Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις της τραχύτητας των επιφανειών που παρουσίασαν τα παραπάνω δοκίμια δημιουργήθηκαν προφίλ παρατηρούμενης μέσης τραχύτητας για κάθε συνδυασμό πάχους στρώματος και γωνίας επιφάνειας. Ως γωνία επιφάνειας νοείται η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα κατασκευής και το κάθετο διάνυσμα στο σημείο μέτρησης της επιφάνειας, το οποίο έχει φορά προς την εξωτερική πλευρά του αντικείμενου (βλ. Σχήμα 5-4).



Σχήμα 5-4 Σχηματική απεικόνιση γωνίας επιφάνειας.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων καθώς και η σχέση τους με τις προβλέψεις του θεωρητικού μοντέλου των Reeves και Cobb [38] παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 5-5. Παρατηρείται ότι οι προβλέψεις του θεωρητικού μοντέλου όντως διαφέρουν σε σχέση με τις παρατηρούμενες τιμές της τραχύτητας, γεγονός το οποίο οδηγεί στην διαπίστωση ότι η ακριβής

πρόβλεψη της τραχύτητας ενός αντικειμένου θα πρέπει να βασιστεί στην αξιοποίηση των πειραματικών δεδομένων και όχι στη χρήση του θεωρητικού μοντέλου. Για αυτόν τον λόγο η προσέγγιση που υιοθετήθηκε περιλαμβάνει την δημιουργία μια βάσης δεδομένων με τις πειραματικές μετρήσεις και την πρόβλεψη της τραχύτητας μίας επιφάνειας με τη χρήση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής για κάθε πιθανή γωνία επιφάνειας.



Σχήμα 5-5 Σύγκριση πραγματικής μέσης τραχύτητας και μοντέλου Reeves & Cobb [5.1].

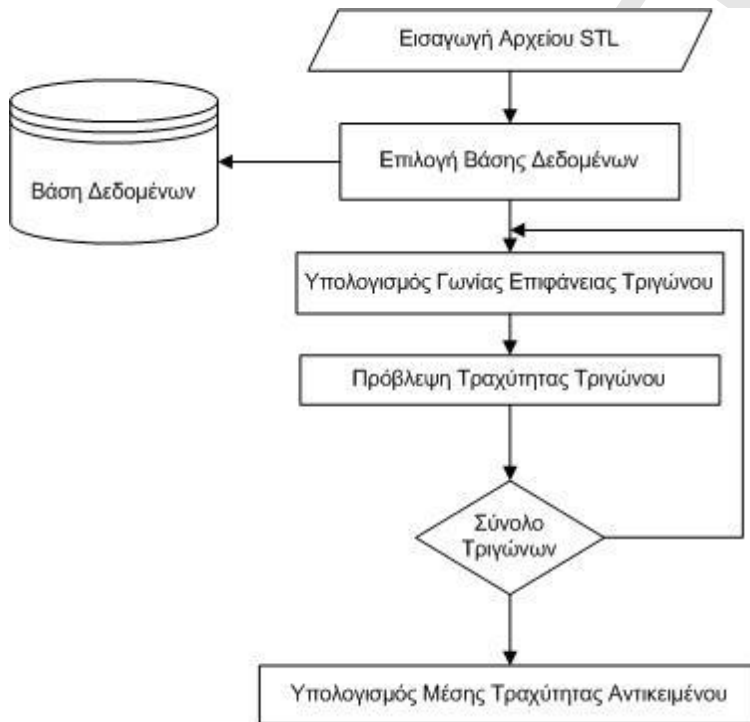
Αλγόριθμος πρόβλεψης R_a

Η διαδικασία υπολογισμού της μέσης τραχύτητας ενός αντικειμένου δέχεται ως είσοδο το αντικείμενο κωδικοποιημένο στην ψηφιακή του μορφή STL. Μετά την εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων από το αρχείο STL πραγματοποιείται ο υπολογισμός της μέσης τραχύτητας του αντικειμένου ακολουθώντας τα βήματα του διαγράμματος ροής τους Σχήματος 5-6. Έτσι επιλέγεται καταρχάς η επιθυμητή βάση δεδομένων σύμφωνα με το επιθυμητό πάχος στρώματος και τις επιθυμητές παραμέτρους σάρωσης. Εν συνεχεία για κάθε τρίγωνο του πολυεδρικού αρχείου STL υπολογίζεται η γωνία επιφάνειας ως η διαφορά μεταξύ του άξονα κατασκευής Z και του κάθετου

διανύσματος του τριγώνου. Έχοντας υπολογίσει και την γωνία επιφάνειας, μπορούμε εύκολα να εκτιμήσουμε την τραχύτητα της επιφάνειας του τριγώνου χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή ήτοι:

$$R(\theta_i) = R(\theta_p) + \frac{R(\theta_n) - R(\theta_p)}{\theta_n - \theta_p} (\theta_i - \theta_p) \quad (5.7)$$

Όπου θ_i είναι η γωνία επιφάνειας του τριγώνου, θ_p είναι η αμέσως μικρότερη γωνία επιφάνειας που βρίσκεται στη βάση δεδομένων, θ_n είναι η αμέσως μεγαλύτερη γωνία επιφάνειας που βρίσκεται στη βάση δεδομένων, $R(\theta_i)$ η προβλεπόμενη τραχύτητα του τριγώνου, $R(\theta_p)$ η τραχύτητα που αντιστοιχεί στην γωνία θ_p και τέλος $R(\theta_n)$ η τραχύτητα που αντιστοιχεί στην γωνία θ_n .



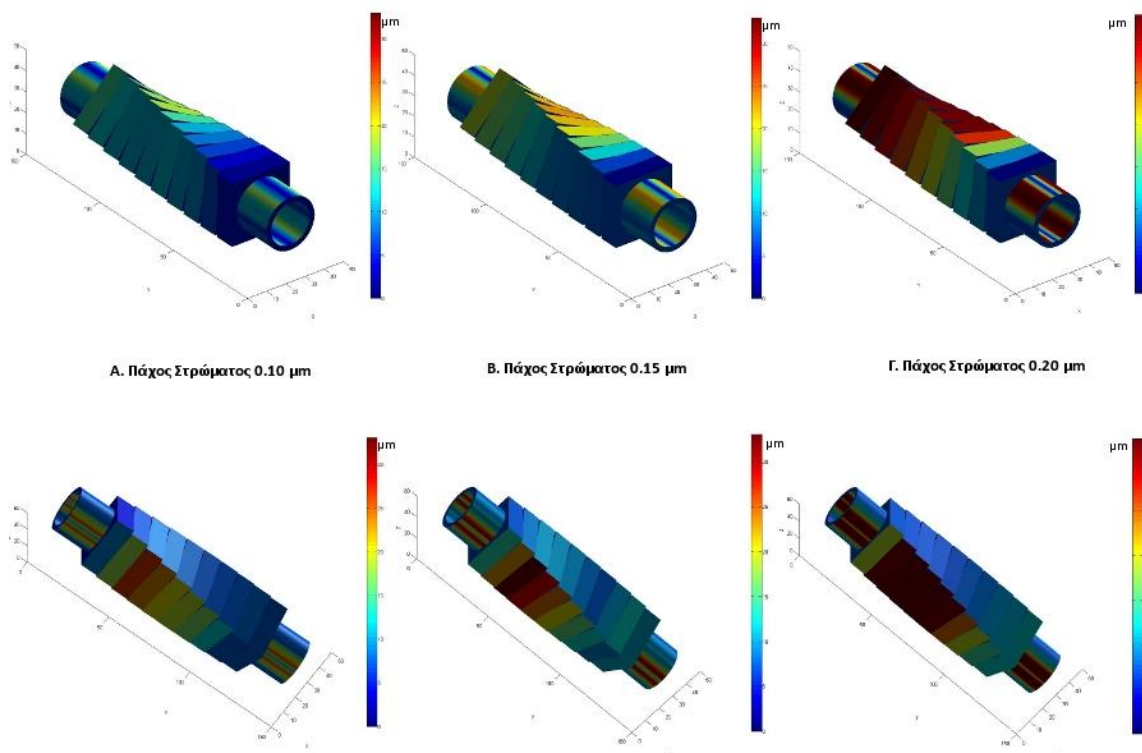
Σχήμα 5-6 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου πρόβλεψης Ra.

Τέλος, αφού υπολογιστεί για κάθε τρίγωνο η τραχύτητα του, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση αναμενόμενη τραχύτητα του αντικειμένου για τον προσανατολισμό D από την εξίσωση:

$$R_a(D) = \frac{\sum_i R(\theta_i) \cdot \alpha_i}{\sum_i \alpha_i} \quad (5.8)$$

Όπου α_i είναι το εμβαδόν του τριγώνου i .

Μετά τον υπολογισμό της τραχύτητας κάθε τριγώνου το λογισμικό επιτρέπει την οπτική απεικόνιση της τραχύτητας όπου κάθε μία τιμή αντιστοιχίζεται σε ένα μέρος μιας χρωματικής κλίμακας. Στο Σχήμα 5-7 παρατηρούμε τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη των Giannatsis et al. [84] καθώς και την χρωματική παρουσίαση της παρατηρούμενης τραχύτητας. Η πρώτη σειρά απεικονίζει το πάνω μέρος των δοκιμών και η δεύτερη το κάτω μέρος, ενώ κάθε στήλη αντιστοιχεί σε διαφορετικό πάχος στρώματος.



Σχήμα 5-7 Πειραματικά δοκίμια υπολογισμού της τραχύτητας της επιφάνειας κομματιού και χρωματική απεικόνιση μέσης τραχύτητας.

5.2.2.2 Υπολογισμός Κόστους Κατασκευής

Σύμφωνα με το μοντέλο κόστους που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, το κόστος κατασκευής ενός αντικειμένου/κομματιού με την τεχνική της Στερεολιθογραφίας είναι συνάρτηση του ποσού των δαπανών που συνδέονται με τις τρεις φάσεις παραγωγής δηλαδή με την προπαρασκευαστική, την μεταπαρασκευαστική και την κατασκευαστική φάση. Κατά τη διάρκεια της προπαρασκευαστικής φάσης, όπου εκτελούνται εργασίες όπως η επιλογή του κατασκευαστικού προσανατολισμού, ο προσδιορισμός της θέσης του αντικειμένου στην πλατφόρμα κατασκευής, ο τεμαχισμός του και η δημιουργία του πλέγματος υποστήριξης, το κόστος μπορεί να συνδεθεί με το κόστος εργασίας του ατόμου που είναι επιφορτισμένο με την εκτέλεση αυτών των εργασιών. Ωστόσο, το κόστος των

προπαρασκευαστικών εργασιών είναι στις περισσότερες περιπτώσεις αρκετά χαμηλό επειδή ούτε η αντίστοιχη ωριαία αποζημίωση είναι ιδιαίτερα υψηλή, ούτε και ο απαραίτητος χρόνος για την ολοκλήρωση των διάφορων εργασιών είναι ιδιαίτερα υψηλός.

Αντίθετα, το κόστος που συνδέεται με τη φάση της κατασκευής του αντικειμένου είναι κατά πολύ υψηλότερο. Υπενθυμίζεται ότι το κόστος κατασκευής αφορά το λειτουργικό κόστος καθώς και το κόστος της χρησιμοποιούμενης ρητίνης-πρώτης ύλης (βλ. Κεφ.2 παρ. 2.1). Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος του κόστους της χρησιμοποιούμενης ρητίνης εξαρτάται κυρίως από τον όγκο του αντικειμένου, μέγεθος το οποίο παραμένει σταθερό σε οποιοδήποτε κατασκευαστικό προσανατολισμό και επομένως δεν είναι δυνατό να βελτιστοποιηθεί. Αντίθετα το ποσοστό του κόστους της χρησιμοποιηθείσας ρητίνης που συνδέεται με το μέγεθος της δομής υποστήριξης, αποτελεί παράμετρο που εξαρτάται απόλυτα από τον προσανατολισμό κατασκευής. Το λειτουργικό κόστος, το οποίο ορίζεται ως το γινόμενο του χρόνου χρήσης της μηχανής της Στερεολιθογραφίας (χρόνος κατασκευής) με το ωριαίο κόστος χρησιμοποίησης της μηχανής, αντιπροσωπεύει συνήθως το μεγαλύτερο μέρος του κόστους παραγωγής. Ο επιλεγόμενος προσανατολισμός κατασκευής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τελικό χρόνο κατασκευής ενός αντικειμένου σύμφωνα με το μοντέλο πρόβλεψης του χρόνου κατασκευής ενός αντικειμένου με Στερεολιθογραφία (βλ. Κεφ.2 παρ. 2.2). Επομένως ο χρόνος κατασκευής αποτελεί βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση της βελτιστότητας ενός προσανατολισμού κατασκευής.

Το κόστος των μεταπαρασκευαστικών εργασιών συνδέεται κυρίως με την αντίστοιχη χειρωνακτική εργασία και εξαρτάται, επομένως, από το συνολικό χρόνο που διαρκούν οι μεταπαρασκευαστικές εργασίες. Προκειμένου να υπολογιστεί ο συνολικός χρόνος που διαρκεί η μεταπαρασκευαστική φάση θα πρέπει να προσδιοριστούν οι χρόνοι των επιμέρους εργασιών από τις οποίες αποτελείται. Θα πρέπει δηλαδή να αναλυθούν ο χρόνος καθαρισμού του αντικείμενου από υπολείμματα ρητίνης, ο χρόνος αφαίρεσης της δομής υποστήριξης καθώς και ο χρόνος φινιρίσματος - λείανσης. Ο χρόνος καθαρισμού του αντικείμενου από υπολείμματα ρητίνης είναι συνήθως σταθερός και αδιάφορος της γεωμετρίας και του μεγέθους του αντικείμενου και κατά συνέπεια του προσανατολισμού κατασκευής. Αφ' ετέρου, ο χρόνος αφαίρεσης της δομής υποστήριξης σχετίζεται άμεσα με το συνολικό εμβαδόν των επιφανειών του αντικείμενου που βρίσκονται σε επαφή με τη δομή υποστήριξης, και κατά συνέπεια αποτελεί παράμετρο η οποία εξαρτάται από τον προσανατολισμό κατασκευής. Το γεγονός αυτό καθιστά τον χρόνο αφαίρεσης της δομής υποστήριξης επίσης κριτήριο για την αξιολόγηση της βελτιστότητας ενός προσανατολισμού κατασκευής. Επιπλέον, ο χρόνος λείανσης συσχετίζεται άμεσα τόσο με τη συνολική επιφάνεια που παρουσιάζει το φαινόμενο της κλίμακας όσο και με μέγεθος της τραχύτητας που πρέπει να

αφαιρεθεί. Υιοθετώντας, ωστόσο τον χρόνο λείανσης ως επιπλέον κριτήριο βελτιστότητας, δεδομένου ότι η τραχύτητα των επιφανειών θεωρείται ήδη ως βασικός ποιοτικός παράγοντας, μπορεί να υπερτονίσει τη σημασία της τραχύτητας στην αντικειμενική συνάρτηση παραμορφώνοντας τα αποτελέσματα. Ως εκ τούτου στην παρούσα προσέγγιση ο χρόνος λείανσης δεν χρησιμοποιείται άμεσα ως κριτήριο για την αξιολόγηση της βελτιστότητας ενός προσανατολισμού κατασκευής.

Βάσει της ανωτέρω ανάλυσης προσδιορίζονται δύο κρίσιμοι παράγοντες κόστους οι οποίοι εξαρτώνται άμεσα από τον προσανατολισμό κατασκευής και οι οποίοι είναι οι εξής:

1. Ο χρόνος κατασκευής (*BuidTime*)
2. Ο χρόνος αφαίρεσης της δομής υποστήριξης (*SupportTime*)

Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση $F_{Κόστος}$ μπορεί να γράφει ως εξής:

$$F_{Κόστος} = FabTime \quad (5.9)$$

Όπου ως *FabTime* ορίζεται μια ενιαία μεταβλητή η οποία αποτελείται από το άθροισμα του χρόνου κατασκευής και του χρόνου αφαίρεσης της δομής υποστήριξης.

Για τον υπολογισμό του χρόνου κατασκευής (*BuidTime*) στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται το αναλυτικό μοντέλο πρόβλεψης που έχει προταθεί από τους Giannatsis et al. [29], και το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.2 του Κεφαλαίου 2. Το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης περιλαμβάνει αναλυτικές εξισώσεις για την εκτίμηση του χρόνου κατασκευής με Στερεολιθογραφία, οι οποίες χρησιμοποιούν τον όγκο και το ύψος του αντικειμένου (που υπολογίζονται από το πολυεδρικό αρχείο STL για δεδομένο προσανατολισμό) καθώς επίσης και το πάχος στρώματος. Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη και τις παραμέτρους που αφορούν τις διαδικασίες της επίστρωσης και της σάρωσης, προκειμένου να υπολογιστούν οι συνολικοί (για όλα τα στρώματα) χρόνοι επίστρωσης και σάρωσης της Στερεολιθογραφίας

Παρόμοια μεθοδολογία ακολουθείται για την πρόβλεψη του χρόνου αφαίρεσης της δομής υποστήριξης βασιζόμενη στον εκτιμώμενο όγκο της δομής υποστήριξης, ο οποίος πραγματοποιείται από τον υπολογισμό του πρισματικού όγκου που δημιουργείται όταν προβάλλονται οι πολυεδρικές επιφάνειες του αρχείου STL που απαιτούν υποστήριξη (δηλ. όλα τα τρίγωνα του αρχείου STL που παρουσιάζουν γωνία με το οριζόντιο επίπεδο $\leq 30^\circ$) στην πλατφόρμα κατασκευής.

Ο χρόνος αφαίρεσης της δομής υποστήριξης (*SupportTime*), δηλ. ο χρόνος που απαιτείται για να αφαιρεθεί μια μονάδα της δομής υποστήριξης, εκτιμάται προσεγγιστικά σύμφωνα με την ακόλουθη έκφραση:

$$SupportTime = \sum_{i=1}^n (a_i t_{unit_removal} Q_i) \quad (5.10)$$

όπου a_i είναι το εμβαδόν του τριγώνου i , Q_i είναι ένας δείκτης ο οποίος παίρνει την τιμή 1 εάν το τρίγωνο i πρέπει να υποστηριχθεί και την τιμή 0 εάν δεν πρέπει, $t_{unit_removal}$ είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αποκολληθεί μια μονάδα της δομής υποστήριξης από την επιφάνεια ενός αντικειμένου και n είναι ο συνολικός αριθμός τριγώνων από τα οποία αποτελείται το πολυεδρικό αρχείο STL. Ο χρόνος που απαιτείται για την αποκόλληση μιας μονάδας της δομής υποστήριξης εξαρτάται από παράγοντες οι οποίοι δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν εύκολα, όπως η ικανότητα και η εμπειρία του χειριστή καθώς και τα διαθέσιμα εργαλεία και υλικά. Ιδιαίτερα δυσχερής καθίσταται επίσης η ποσοτικοποίηση της πληροφορίας που περιγράφει τη γεωμετρική πολυπλοκότητα του αντικειμένου και συνεπώς και της ευκολίας αφαίρεσης της δομής υποστήριξης. Ως εκ τούτου, το $t_{unit_removal}$ αποτελεί απλή εκτιμήτρια του πραγματικού χρόνου που ένας εργαζόμενος θα χρειαστεί για την αφαίρεση της δομής υποστήριξης. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση χρησιμοποιηθήκαν ως εκτιμήτριες της $t_{unit_removal}$ οι τιμές 0,005, 0,0035, 0,002 sec/mm² για αντικείμενα υψηλής, μέσης και χαμηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Οι τιμές αυτές αποτελούν μέσες τιμές μετρήσεων που πάρθηκαν κατά την κατασκευή πρωτοτύπων/κομματιών χρησιμοποιώντας Στερεολιθογραφία στο Εργαστήριο Συγχρόνων Τεχνολογιών Παραγωγής & Ελέγχου του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς και δείχνουν να συμφωνούν με τις αντίστοιχες των Kim και Lee [93]

Βάσει της παραπάνω ανάλυσης η αρχική μοντελοποίηση του προβλήματος Προσανατολισμού μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής:

$$Ελαχιστοποίηση \{FabTime(x), R_a(x)\} \quad με \quad x = (\theta_x, \theta_y, \theta_z) \quad (5.11)$$

$$0 \leq \theta_i \leq 360 \quad \forall i \quad (5.12)$$

Όπου ως *FabTime* ορίζεται η ενιαία μεταβλητή η οποία αποτελείται από το άθροισμα του χρόνου κατασκευής (*BuildTime*) και του χρόνου αφαίρεσης (*SupportTime*) της δομής υποστήριξης και ως R_a ορίζεται η μέση τραχύτητα των επιφανειών του αντικειμένου, για τον προσανατολισμό x .

Οποιαδήποτε περιστροφή ενός συγκεκριμένου αντικείμενου περί το X και Y άξονα, δηλαδή των δύο αξόνων που ορίζουν το επίπεδο της πλατφόρμας κατασκευής της μηχανής της

Στερεολιθογραφίας, σε σχέση με έναν τυχαίο αρχικό προσανατολισμό κατασκευής οδηγούν προφανώς σε αλλαγές των τιμών των μεταβλητών απόφασης $FabTime$ και R_a . Αντίθετα οι περιστροφές περί τον άξονα Z , δηλ. γύρω από την κατεύθυνση κατασκευής, δεν προκαλούν μεταβολές σε καμία από της μεταβλητές απόφασης. Κατά συνέπεια, ο χώρος λύσης του προβλήματος προσανατολισμού περιλαμβάνει όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς που μπορούν να παραχθούν από περιστροφές του αντικειμένου κατά τους X και Y άξονες σε σχέση με τον αρχικό προσανατολισμό. Συνεπώς, οι εξισώσεις 5-11 και 5-12 τροποποιούνται ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση } \{FabTime(x), R_a(x)\} \quad \text{με } x = (\theta_x, \theta_y) \quad (5.13)$$

$$0 \leq \theta_i \leq 360 \quad \forall i \quad (5.14)$$

5.2.3 Μέθοδοι βελτιστοποίησης προβλήματος προσανατολισμού

5.2.3.1 Μέθοδος της Σταθμισμένης Αντικειμενικής Συνάρτησης (Weighted Sum)

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη βελτιστοποίηση προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων είναι η μέθοδος της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης (Weighted Sum) [107]. Στη συγκεκριμένη μέθοδο το πρόβλημα βελτιστοποίησης τροποποιείται κατάλληλα ώστε οποιαδήποτε λύση να μπορεί να αξιολογηθεί από μία μόνο αντικειμενική συνάρτηση. Η νέα αντικειμενική συνάρτηση είναι της μορφής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση } \sum_{i=1}^n W_i F_i(x) \quad \text{όπου } x \in S \quad (5.15)$$

όπου $W_i \geq 0$ για κάθε $i = 1, \dots, n$ και $\sum_{i=1}^n W_i = 1$. Οι συντελεστές W_i εκφράζουν στην ουσία τη βαρύτητα που αποδίδει ο χρήστης σε κάθε κριτήριο προκειμένου να κάνει την τελική του επιλογή. Η λύση της συνάρτησης (5.15) μπορεί να αποδειχτεί ότι είναι βέλτιστη κατά Παρέτο εφόσον ισχύει $W_i > 0$ για κάθε $i = 1, \dots, n$ ή όταν η βέλτιστη λύση είναι μοναδική [112]. Η μέθοδος της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως a posteriori μέθοδος όπου μέσω της δημιουργίας εναλλακτικών συνδυασμών για τις μεταβλητές W_i δημιουργείται το μέτριο βέλτιστων λύσεων κατά Παρέτο, είτε ως a priori μέθοδος όπου ο χρήστης καλείται να εκφράσει εξ αρχής τις προτιμήσεις του μέσω της δημιουργίας ενός μόνο διανύσματος βαρών προτίμησης και στη συνέχεια επιλέγονται λύσεις οι οποίες συνδυάζονται καλύτερα με το συγκεκριμένο διάνυσμα βαρών. Η παρούσα προσέγγιση χρησιμοποιεί τη μέθοδο της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης ως a priori μέθοδο απαιτώντας από τον χρήστη να εκφράσει τις προτιμήσεις του εξ αρχής.

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους το πρόβλημα της εύρεσης του βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής επηρεάζει τόσο το κόστος παραγωγής όσο και τις εμφανιζόμενες κατασκευαστικές αποκλίσεις. Συνεπώς, το πρόβλημα της εύρεσης του βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής μπορεί να εκφραστεί μέσω της μεθόδου της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση } F = W_1 F_{\text{Κόστος}}(x) + W_2 F_{\text{Κατασκευαστική Απόκλιση}}(x) \quad (5.16)$$

$$x = (\theta_x, \theta_y) \quad (5.17)$$

$$0 \leq \theta_i \leq 360 \quad \forall i \quad (5.18)$$

ή αντικαθιστώντας τις συναρτήσεις $F_{\text{Κόστος}}$ και $F_{\text{Κατασκευαστική Απόκλιση}}$ με τις αντίστοιχες εκτιμήτριές τους:

$$\text{Ελαχιστοποίηση } F = W_1 FabTime(x) + W_2 R_a(x) \quad (5.19)$$

$$x = (\theta_x, \theta_y) \quad (5.20)$$

$$0 \leq \theta_i \leq 360 \quad \forall i \quad (5.21)$$

Οι μεταβλητές απόφασης $FabTime$ και R_a της αντικειμενικής συνάρτησης (5.19) διαφέρουν όχι μόνο ως προς τις μονάδες μέτρησης αλλά και ως προς την τάξη μεγέθους. Συνεπώς, η άμεση χρησιμοποίησή τους στην αντικειμενική συνάρτηση δεν είναι επιθυμητή. Για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητο να κανονικοποιηθούν (normalized) εκφράζοντας κατάλληλα κάθε πιθανό υποψήφιο προσανατολισμό κατασκευής συναρτήσει του καλύτερου και χειρότερου προσανατολισμού κατασκευής (όσον αφορά κάθε κριτήριο ξεχωριστά). Δημιουργείται κατά αυτό τον τρόπο μια κανονικοποιημένη αντικειμενική τιμή για κάθε υποψήφιο προσανατολισμό κατασκευής η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του ως τελική επιθυμητή λύση. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η κανονικοποιημένη βαθμολογία R_{a_norm} του υποψηφίου προσανατολισμού j όσον αφορά το κριτήριο της τραχύτητας επιφανειών ισούται με:

$$R_{a_norm}(j) = \frac{R_a(j) - R_{a_min}}{R_{a_max} - R_{a_min}} \quad (5.22)$$

όπου $R_a(j)$ είναι η μέση τραχύτητα επιφάνειας του αντικειμένου του οποίου ο προσανατολισμός βρίσκεται υπό εξέταση και R_{a_max} , R_{a_min} είναι εκτιμήσεις της μέγιστης (ο χειρότερος προσανατολισμός) και της ελάχιστης (ο καλύτερος προσανατολισμός) μέσης πιθανής τραχύτητας επιφανειών. Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να δημιουργήσουμε το κανονικοποιημένο αποτελέσματα για τη μεταβλητή απόφασης $FabTime$. Εισάγοντας τις αντίστοιχες

κανονικοποιημένες μεταβλητές στην αντικειμενική συνάρτηση F , μπορούμε να δημιουργήσουμε την κανονικοποιημένη έκδοση της F_{norm} . Συνεπώς, ο καλύτερος προσανατολισμός κατασκευής είναι αυτός που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση F_{norm} :

$$F_{norm} = W_1 FabTime_{norm} + W_2 R_{a_{norm}} \quad (5.23)$$

Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές για καθεμία από τις μεταβλητές απόφασης, μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται και για την σχέση 5.23 αποδίδοντας απόλυτη ή μηδενική βαρύτητα, δηλ 1 ή 0, στον αντίστοιχο συντελεστή W_i . Έτσι για τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανής τραχύτητας $R_{a_{max}}$ καθώς και της ελάχιστης $R_{a_{min}}$ απαιτείται η εύρεση των προσανατολισμών που μεγιστοποιούν και ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση F_R , η οποία παράγεται από την F_{norm} θέτοντας $W_1 = 0$ και $W_2 = 1$ οπότε και προκύπτει ουσιαστικά ότι:

$$F_R = R_a \quad (5.24)$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται ο μέγιστος και ελάχιστος χρόνος κατασκευής $FabTime_{max}$ και $FabTime_{min}$ μέσω της μεγιστοποίησης και της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης F_{norm} θέτοντας $W_1 = 1$ και $W_2 = 0$, η αλλιώς της συνάρτησης F_t όπου:

$$F_t = FabTime \quad (5.25)$$

Σύμφωνα με τη διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης F_{norm} θα πρέπει να υπολογιστούν πρώτα οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές των F_R και F_t προκειμένου να προχωρήσουμε στη συνέχεια με τη βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση) της. Αξιολογώντας όλους τους πιθανούς προσανατολισμούς προκειμένου να βρεθούν τα ακρότατα $R_{a_{max}}$, $R_{a_{min}}$, $FabTime_{max}$ και $FabTime_{min}$ καθίσταται προφανώς υπολογιστικά ακριβό και χρονοβόρο, ειδικά όσο η γεωμετρική πολυπλοκότητα ενός αντικειμένου αυξάνεται. Για τη διαχείριση μιας τόσο εντατικής υπολογιστικά αναζήτησης υιοθετείται στην παρούσα μελέτη ένας γενετικός αλγόριθμος αναζήτησης, ο οποίος μπορεί να μειώσει σημαντικά το μέγεθος του χώρου λύσης.

Γενετικός Αλγόριθμος

Όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 ένας Γενετικός Αλγόριθμος [114] επιτρέπει σε έναν πληθυσμό που αποτελείται από πολλά άτομα να εξελίσσεται σύμφωνα με κατάλληλα καθορισμένους κανόνες επιλογής, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η καταλληλότητα των ατόμων που τον αποτελούν, δηλαδή να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση που περιγράφει την ικανότητα κάθε ατόμου να αποτελέσει λύση για το υφιστάμενο πρόβλημα. Η βελτιστοποίηση

εφαρμόζεται ως διαδικασία προσομοίωσης στην οποία ένας πληθυσμός από αφαιρετικές απεικονίσεις (abstract representations) των υποψηφίων λύσεων που αποκαλούμε και ως χρωμοσώματα ή γενότυποι εξελίσσεται προς πληθυσμούς που περιέχουν καλύτερα άτομα-λύσεις. Η εξέλιξη αρχίζει συνήθως από έναν πληθυσμό τυχαία παραγόμενων ατόμων και εξελίσσεται σε γενεές. Σε κάθε γενεά, η καταλληλότητα κάθε ατόμου του πληθυσμού να αποτελέσει την τελική λύση του υφιστάμενου προβλήματος αξιολογείται. Στη συνέχεια μερικά άτομα επιλέγονται στοχαστικά από τον τρέχοντα πληθυσμό (βάσει της καταλληλότητας τους) και τροποποιούνται για να διαμορφώσουν το νέο πληθυσμό της επόμενης γενεάς. Ο νέος πληθυσμός χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει την επομένη επανάληψη του αλγόριθμου. Τα νέα χρωμοσώματα δημιουργούνται μέσω της διαδικασίας της αναπαραγωγής, όπου το γενετικό υλικό των περισσότερα υποσχόμενων ατόμων περνά από το ένα χρωμόσωμα στο άλλο. Η αναπαραγωγή μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων (πιθανές λύσεις) πραγματοποιείται μέσω των δύο τελεστών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Ο τελεστής διασταύρωσης παίρνει τα χρωμοσώματα δύο γονέων και μεταφέρει γενετικό υλικό από τους γονείς προκειμένου να δημιουργήσει δύο νέα παιδιά (χρωμοσώματα). Ο τελεστής μετάλλαξης αφετέρου εφαρμόζεται σε ένα μόνο χρωμόσωμα και χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού με στόχο την αποφυγή της πρώιμης σύγκλισης του πληθυσμού σε μια τοπικά βέλτιστη λύση. Για τη λήξη της προσομοίωσης της εξελικτικής διαδικασίας πρέπει να διαμορφωθεί ένα κατάλληλο κριτήριο τερματισμού του αλγόριθμου. Συνήθη κριτήρια τερματισμού είναι ένας προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων ή όταν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του καλύτερου ατόμου σε έναν πληθυσμό γίνει ίση με κάποια προκαθορισμένη τιμή στόχο.

Δομή Δεδομένων

Ιδιαίτερα σημαντική για την εφαρμογή του Γενετικού Αλγόριθμου είναι η χρησιμοποιηθείσα δομή δεδομένων με την οποία κωδικοποιείται ένα χρωμόσωμα (γενέτυπος). Η δυαδική απεικόνιση (binary representation) και η απεικόνιση τιμών (real value representation) αποτελούν τις δύο βασικές μεθόδους κωδικοποίησης ενός χρωμοσώματος. Στη δυαδική απεικόνιση ένα χρωμόσωμα κωδικοποιείται σε μία δυαδική συμβολοσειρά, η οποία μπορεί στη συνέχεια να αποκωδικοποιηθεί σε μια πραγματική αριθμητική τιμή και αντίστροφα. Στην απεικόνιση τιμών ένα χρωμόσωμα αντιπροσωπεύεται από έναν αριθμό κινητής υποδιαστολής. Η απεικόνιση τιμών θεωρείται καλύτερη από άποψη ταχύτητας επειδή καμία αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων δεν απαιτείται για την αξιολόγηση της αντικειμενικής συνάρτησης [115]. Επίσης, το απαιτούμενο μέγεθος μνήμης είναι σχετικά μικρότερο στην απεικόνιση τιμών αφού η τιμή μιας μεταβλητής απεικονίζεται από ένα αριθμό κινητής υποδιαστολής έναντι του δυαδικού τρόπου απεικόνισης όπου απαιτούνται n-bit ψηφία. Βάσει των παραπάνω στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε ως δομή

δεδομένων η απεικόνιση τιμών. Τα διαφορετικά χρωμοσώματα, δηλαδή οι πιθανοί προσανατολισμοί, δημιουργούνται μέσω περιστροφών σε σχέση με τον αρχικό προσανατολισμό και περιγράφονται από τις δυο γωνίες περιστροφής:

- θ_x – περιστροφή σε σχέση με τον Άξονα X της πλατφόρμας κατασκευής
- θ_y – περιστροφή σε σχέση με τον Άξονα Y της πλατφόρμας κατασκευής

Τα χρωμοσώματα με αυτόν τον τρόπο αποτελούνται από δύο γονίδια που αντιπροσωπεύουν το αντίστοιχο διάνυσμα περιστροφής (θ_x, θ_y) .

Διαδικασίες Επιλογής

Η προσομοίωση της διαδικασίας της εξέλιξης, ξεκινά με τη δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού τυχαία επιλεγμένων ατόμων (δηλ. προσανατολισμών). Από τον αρχικό πληθυσμό μόνο μερικά από τα χρωμοσώματα θα θεωρηθούν αρκετά «ικανά» (fit) να επιζήσουν και να αναπαραχθούν δημιουργώντας ενδεχομένως απογόνους. Συνεπώς, το πρώτο βήμα που πρέπει να πραγματοποιηθεί είναι να υπολογιστεί για κάθε χρωμοσώμα στον πληθυσμό η ικανότητά του. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής η ικανότητα συνδέεται με την τιμή της συνάρτησης F_{norm} . Από την εξίσωση (5.23) γίνεται φανερό ότι η αξία F_{norm} για ένα ορισμένο χρωμοσώμα-προσανατολισμό εξαρτάται από τις τιμές των ακρότατων $R_{a,max}$, $R_{a,min}$, $FabTime_{max}$ και $FabTime_{min}$, τα οποία πρέπει να έχουν προϋπολογιστεί υιοθετώντας την ίδια μεθοδολογία βελτιστοποίησης. Εντούτοις, όπως σε οποιαδήποτε ευρετική τεχνική αναζήτησης έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι αυτές οι κατ' εκτίμηση ακραίες τιμές είναι και τα ολικά βέλτιστα. Επομένως μπορεί να προκύψει πρόβλημα, όταν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης ανακαλύπτεται ένας προσανατολισμός K ο οποίος παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με κάποιες από τις κατ' εκτίμηση ακραίες τιμές για ένα ή περισσότερα κριτήρια (π.χ. $R_a(k) < R_{a,min}$ ή $FabTime(k) > FabTime_{max}$). Σε αυτή την περίπτωση η αντίστοιχη τιμή της F_{norm} θα παρείχε παραπλανητικές πληροφορίες για την ικανότητα του προσανατολισμού k . Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, ο αλγόριθμος παρέχει στον χρήστη δυο επιλογές. Με χρήση της πρώτης επιλογής ο αλγόριθμος προγραμματίζεται να σταματήσει την προσομοίωση της εξέλιξης εάν προκύψει μια τέτοια περίπτωση, να τροποποιήσει κατάλληλα τα προβληματικά ακρότατα και να επανεκκινήσει τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά την χειροκίνητη παράκαμψη εξαρχής των τιμών των ακρότατων που έχουν υπολογιστεί από το λογισμικό και την αντικατάστασή τους με άλλα τα οποία συνήθως προκύπτουν από το γινόμενο των τιμών που έχουν ήδη ανακαλυφθεί με κάποιο συντελεστή ασφάλειας.

Μετά την αξιολόγηση την τιμής καταλληλότητας των ατόμων του πληθυσμού, πρέπει να εφαρμοστούν οι κατάλληλες διαδικασίες επιλογής προκειμένου να επιλεχτούν εκείνα τα χρωμοσώματα που θεωρούνται περισσότερο ικανά να παράγουν καλούς απογόνους με την διαδικασία της αναπαραγωγής και να δημιουργηθεί η επόμενη γενεά. Κατά αυτό τον τρόπο θα πρέπει να καθοριστούν ποιοι τελεστές επιλογής θα χρησιμοποιηθούν για τις διαδικασίες της επιλογής προς αναπαραγωγή και προς αντικατάσταση του πληθυσμού.

Όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 4 έχουν προταθεί πολυάριθμες μέθοδοι επιλογής προκειμένου να πραγματοποιείται η διαδικασία επιλογής προς αναπαραγωγή όπως η αναλογική επιλογή, η επιλογή μέσω πρωταθλημάτων ή κατάταξης κ.λπ. κάθε μια από τις οποίες παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα [116, 117]. Το πρόβλημα προσανατολισμού έτσι όπως περιγράφεται από την αντικειμενική του συνάρτηση F_{norm} είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Επομένως, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος επιλογής η οποία θα αποδίδει σε ένα χρωμόσωμα πιθανότητα αναπαραγωγής αντιστρόφως ανάλογη της τιμής της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης. Με αυτό τον τρόπο το χρωμόσωμα με τη μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης έχει τη μέγιστη πιθανότητα να αναπαραχθεί.

Στην παρούσα διατριβή η στρατηγική για τις διαδικασίες επιλογής που υιοθετείται, περιλαμβάνει τη διαδικασία επιλογής προς αντικατάσταση $(\mu + \lambda) - ES$ (βλ. Κεφ.4 παρ.4.2.3.2.3) καθώς και τη διαδικασία επιλογής ατόμων προς αναπαραγωγή με τη μέθοδο της εξαναγκασμένης ρουλέτας (Roulette Wheel Selection) [74] η οποία έχει αποδειχτεί αποτελεσματική σε αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία επιλογής ατόμων προς αναπαραγωγή ξεκινά μετά τον υπολογισμό της τιμής καταλληλότητας κάθε ατόμου στον πληθυσμό. Βάσει αυτών των τιμών ο πληθυσμός ιεραρχείται από τα καταλληλότερα προς τα λιγότερα κατάλληλα άτομα. Στη συνέχεια εφαρμόζεται στην τιμή καταλληλότητας κάθε ατόμου ο γραμμικός μετασχηματισμός που προτείνεται από τον Haupt [115]. Ο μετασχηματισμός αυτός κρίνεται απαραίτητος προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί η αναλογική επιλογή (προϋποθέτει πρόβλημα μεγιστοποίησης) μέσω της διαδικασίας της εξαναγκασμένης ρουλέτας στα προβλήματα ελαχιστοποίησης που αντιμετωπίζουμε (δηλ στην εύρεση των ελάχιστων τιμών των συναρτήσεων F_{norm}, F_R, F_t) καθώς και στη διατήρηση της πίεσης επιλογής σε μεγέθη άνω της μονάδας. Ο μετασχηματισμός αυτός πραγματοποιείται με την αφαίρεση από την τιμή καταλληλότητας κάθε ατόμου της τιμής καταλληλότητας του «χειρότερου» ατόμου του πληθυσμού.

$$Df_i = f_i - f_{worst} \quad (5.26)$$

Όπου Df_i είναι η τιμή καταλληλότητας του ατόμου i μετά τον γραμμικό μετασχηματισμό, f_i η τιμή καταλληλότητας του ατόμου i πριν τον γραμμικό μετασχηματισμό και f_{worst} η τιμή καταλληλότητας του «χειρότερου» ατόμου.

Κατόπιν η πιθανότητα αναπαραγωγής P_n του χρωμοσώματος n υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_n = \left| \frac{Df_n}{\sum_{i=1}^m Df_i} \right| \quad (5.27)$$

Όπου Df_n είναι η τιμή καταλληλότητας του χρωμοσώματος n και m είναι ο συνολικός αριθμός των χρωμοσωμάτων του πληθυσμού. Στη συνέχεια το διάστημα $I = [0, 1)$ χωρίζεται σε m υποδιαστήματα τα οποία αντιστοιχίζονται ένα προς ένα με τα διαθέσιμα χρωμοσώματα. Έτσι κάθε ένα χρωμόσωμα $A_i(P_i)$ και το αντίστοιχο υποδιάστημα περιγράφονται ως εξής:

$$A_1(P_1) \leftrightarrow I_1 = [0, P_1)$$

$$A_2(P_2) \leftrightarrow I_2 = [P_1, P_1+P_2)$$

$$A_n(P_n) \leftrightarrow I_n = [P_1 + \dots + P_{n-1}, P_1 + \dots + P_n)$$

$$A_m(P_m) \leftrightarrow I_m = [1 - P_m, 1) \quad (5.28)$$

Μετά από την αντιστοίχιση κάθε μεμονωμένου χρωμοσώματος με το αντίστοιχο υποδιάστημα, παράγονται i τυχαίοι αριθμοί $\alpha_i \in [0,1)$. Οι τυχαίοι αυτοί αριθμοί, καθορίζουν τα χρωμοσώματα που πρόκειται να ζευγαρώσουν ανάλογα με το υποδιάστημα I_i στο οποίο ανήκουν βάσει της προηγηθείσας αντιστοίχισης. Εάν δυο τυχαίοι αριθμοί, που αντιστοιχούν σε ένα υποψήφιο ζευγάρι περιέχονται στο ίδιο υποδιάστημα, τότε παράγονται επιπλέον τυχαίοι αριθμοί μέχρι να προκύψει ζεύγος από διαφορετικά υποδιαστήματα και κατ' επέκταση άτομα.

Από τη διαδικασία της αναπαραγωγής μπορούν να αποκλειστούν, σύμφωνα με τις κατασκευαστικές επιθυμίες του χρήστη, και όλοι οι προσανατολισμοί που δεν ικανοποιούν συγκεκριμένους ποιοτικούς περιορισμούς. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάθεση ενός, για παράδειγμα, άνω ορίου αποδεκτής τραχύτητας. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να εφαρμοστεί είτε αυστηρά, δηλαδή ο αλγόριθμος να θεωρεί έγκυρο έναν προσανατολισμό όταν καμία από τις επιφάνειές του δεν ξεπερνά σε όρους τραχύτητας την τιμή φράγμα, είτε πιο ευέλικτα, δηλαδή ο αλγόριθμος να θεωρεί έγκυρο έναν προσανατολισμό όταν ένα προκαθορισμένο από τον χρήστη ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του αντικειμένου δεν ξεπερνά σε όρους τραχύτητας την τιμή φράγμα.

Με το πέρας της διαδικασίας επιλογής ατόμων προς αναπαραγωγή και θεωρώντας ότι έχει πραγματοποιηθεί και η διαδικασία της αναπαραγωγής έχουμε στη διάθεση μας τα μ άτομα του πληθυσμού καθώς και τους λ απογόνους. Προφανώς δεν μπορούν να αποτελέσουν όλα τα άτομα τον πληθυσμό της νέας γενεάς. Έτσι χρησιμοποιείται η διαδικασία επιλογής προς αντικατάσταση $(\mu + \lambda) - ES$ όπου τη νέα γενεά την αποτελούν τα μ καταλληλότερα άτομα από το σύνολο των $\mu + \lambda$ διαθέσιμων ατόμων.

Αναπαραγωγή

Κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής δημιουργούνται νέα χρωμοσώματα με την ελπίδα ότι καλό γενετικό υλικό θα μεταβιβαστεί από το ένα χρωμόσωμα σε άλλο, και κατ' επέκταση από τη μια γενεά στην επόμενη. Από κάθε ζεύγος χρωμοσωμάτων-γονέων παράγονται δύο νέα χρωμοσώματα τα οποία αποκαλούνται απόγονοι. Ο αριθμός των χρωμοσωμάτων-απογόνων που παράγονται μέσω της διαδικασίας της αναπαραγωγής ποικίλει ανάλογα και με την επιλεγείσα διαδικασία επιλογής προς αντικατάσταση. Συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία απαντώνται δυο οικογένειες Γενετικών Αλγορίθμων ανάλογα με τον αριθμό των απογόνων που παράγονται σε κάθε γενεά. Έτσι έχουμε τους σταθερής καταστάσεως (Steady State) Γενετικούς όπου σε κάθε γενεά παράγεται ένας απόγονος και τους Αλγόριθμους Γενεών (Generational) όπου ο αριθμός των απογόνων διαφοροποιείται ανάλογα με την επιλεγείσα διαδικασία επιλογής προς αντικατάσταση. Η προσέγγιση που υιοθετείται στην παρούσα μελέτη περιλαμβάνει τη δημιουργία μ απογόνων από μ γονείς δηλαδή $\lambda = \mu$.

Η διαδικασία της Αναπαραγωγής μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων πραγματοποιείται μέσω δύο τελεστών, του τελεστή της διασταύρωσης και του τελεστή της μετάλλαξης. Δεδομένου ότι ο γενέτυπος των πιθανών λύσεων στο υφιστάμενο πρόβλημα χρησιμοποιεί την Απεικόνιση Τιμών, απαιτείται η χρησιμοποίηση τελεστών ικανών να χειριστούν αυτού του είδους την κωδικοποίηση.

Τελεστής Διασταύρωσης

Σε ότι αφορά τον τελεστή διασταύρωσης, απαντώνται στη βιβλιογραφία διάφορες προσεγγίσεις, με εκτενείς αναφορές και συγκρίσεις τις οποίες μπορεί να βρει ο αναγνώστης στα [115, 57]. Σε γενικές γραμμές οι απλούστερες μέθοδοι διασταύρωσης επιλέγουν ένα ή περισσότερα σημεία στο χρωμόσωμα των γονέων για να προσδιοριστούν τα σημεία τομής. Κατόπιν τα γονίδια που περιέχονται ανάμεσα σε αυτά τα σημεία ανταλλάσσονται μεταξύ των δύο επιλεγθέντων γονέων. Το πρόβλημα με αυτού του είδους τους τελεστές είναι ότι καμία νέα πληροφορία δεν εισάγεται στους απογόνους. Κάθε πραγματική τιμή που εισήχθη τυχαία στον αρχικό πληθυσμό διαδίδεται στην επόμενη γενεά, με τη μόνη διαφορά ότι ανήκει σε διαφορετικούς συνδυασμούς. Αν και αυτή

η στρατηγική λειτουργεί άριστα για τη δυαδική απεικόνιση όπου το λεξιλόγιο περιέχει δυο μόνο πιθανές καταστάσεις, υπάρχει μεγάλη δυσκολία όταν εφαρμόζεται στην απεικόνιση τιμών καθώς επαφίεται μόνο στον τελεστή της μετάλλαξης η εισαγωγή νέου γενετικού υλικού. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων εισήχθησαν οι μέθοδοι διασταύρωσης μέσω συνδυασμού οι οποίες συνδυάζουν τις τιμές των γονιδίων των δυο γονέων δημιουργώντας νέες τιμές για τα γονίδια των απογόνων [64, 118]. Αυτή η οικογένεια τελεστών συνδυάζει αποτελεσματικά τις γενετικές πληροφορίες από τους δύο γονείς και δημιουργούν απογόνους των οποίων οι ακρότατες τιμές των γονιδίων τους καθορίζονται από τα αντίστοιχα γονίδια των γονέων τους. Το γεγονός αυτό επιτρέπει μόνο την εισαγωγή νέων ατόμων στον πληθυσμό, οι τιμές των γονιδίων των οποίων δεν ξεπερνούν αυτές που κληρονομούν από τους γονείς τους. Το αποτέλεσμα αυτής της τακτικής μπορεί να είναι η παγίδευση του αλγόριθμου σε συγκεκριμένους υποχώρους του χώρου λύσης του προβλήματος οι οποίοι μπορεί να μην περιέχουν τα ολικά βέλτιστα του προβλήματος. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου αναπτύχθηκαν τελεστές διασταύρωσης οι οποίοι επιτρέπουν στα γονίδια των απογόνων να πάρουν τιμές περά από αυτές των γονέων τους [64, 119, 120].

Στην παρούσα διατριβή υιοθετείται τροποποιημένη η προσέγγιση του Haupt [115] η οποία περιλαμβάνει έναν τελεστή ο οποίος έχει την δυνατότητα να μην παγιδεύεται στο διάστημα τιμών που υπαγορεύουν οι τιμές των γονιδίων των γονέων ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη. Ο τελεστής ξεκινά με την παραγωγή ενός τυχαίου ακέραιου αριθμού στο διάστημα $[1, n+1]$ όπου n ο αριθμός των γονιδίων ενός χρωμοσώματος. Ο τυχαίος αυτός αριθμός ορίζει τον τόπο (locus) στον οποίο θα εφαρμοστεί η διασταύρωση, στην ουσία δηλαδή καθορίζει το γονίδιο, ή το σύνολο των γονιδίων στην περίπτωση που ο τυχαίος αριθμός είναι ίσος με $n+1$, στο-α οποίο-α θα εφαρμοστεί η διαδικασία της διασταύρωσης. Έτσι στο υφιστάμενο γενότυπο του προβλήματος που αποτελείται από δυο γονίδια, η διαδικασία της διασταύρωσης θα εφαρμοστεί είτε σε ένα από τα δύο γονίδια των γονέων (θx ή θy), είτε και στα δύο ανάλογα με την τιμή του τυχαίου αριθμού. Εάν π.χ. επιλεγθεί ως σημείο διασταύρωσης το γονίδιο θx , τότε παράγονται δυο νέοι απόγονοι $child1$ και $child2$ των οποίων τα γονίδια θx δημιουργούνται μέσω του συνδυασμού των αντίστοιχων γονιδίων των δύο γονέων, $par1$ και $par2$, ως εξής:

$$\theta x[child1] = \theta x[par1] - \beta (\theta x[par1] - \theta x[par2]) \quad (5.29)$$

$$\theta x[child2] = \theta x[par2] + \beta (\theta x[par2] - \theta x[par1]) \quad (5.30)$$

όπου το β είναι ένας μοναδικός τυχαίος αριθμός μεταξύ 0 και 1. Η ίδια διαδικασία ισχύει και στην περίπτωση που η διαδικασία διασταύρωσης εφαρμοστεί στο γονίδιο θy . Είναι προφανές ότι εάν το β είναι μηδέν το $child1$ είναι ένας κλώνος του $par1$ και το $child2$ είναι κλώνος του $par2$. Τα

γονίδια μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας την ίδια τιμή β για κάθε νέο γονίδιο ή με την επιλογή διαφορετικών τιμών.

Ο ανωτέρω τελεστής διασταύρωσης συνδυάζει αποτελεσματικά τις πληροφορίες (γενετικά χαρακτηριστικά) από τους δύο γονείς, προκειμένου να δημιουργηθούν απόγονοι των οποίων οι τιμές των γονιδίων θα ανήκουν στο διάστημα τιμών, που καθορίζεται από τα αντίστοιχα γονίδια των γονέων τους. Δεδομένου ότι αυτό το γεγονός μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη σύγκλιση του αλγορίθμου σε κάποιο πιθανό τοπικό βέλτιστο, ο χρήστης δύναται να επιτρέψει στον τελεστή τη δημιουργία γονιδίων με τις τιμές πέρα από τα όρια των γονιδίων των γονέων. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή τιμών μεγαλύτερων της μονάδας για τον συντελεστή β . Με την υιοθέτηση μιας τιμής μεγαλύτερης της μονάδας ο Γενετικός Αλγόριθμος εξερευνεί μεγαλύτερο μέρος του χώρου λύσης, γεγονός το οποίο δύναται να οδηγήσει σε καλύτερα τελικά αποτελέσματα ειδικά όταν υπάρχουν πολλά τοπικά βέλτιστα. Ωστόσο, η καλύτερη εξερεύνηση του χώρου λύσης οδηγεί και σε αύξηση του υπολογιστικού κόστους.

Κλείνοντας, τυπική παράμετρο κάθε τελεστή διασταύρωσης αποτελεί το ποσοστό διασταύρωσης, μέσω του οποίου ελέγχεται το ποσοστό των απογόνων στους οποίους εφαρμόζεται ο τελεστής διασταύρωσης. Εάν το ποσοστό είναι 100% τότε κάθε απόγονος έχει προκύψει μέσω του τελεστή διασταύρωσης. Εάν το ποσοστό είναι 0% τότε όλοι οι απόγονοι είναι κλώνοι των γονέων τους. Στην παρούσα μελέτη το επιλεχθέν ποσοστό διασταύρωσης ισούται με 100% παρέχοντας την ευκαιρία στους γονείς, μέσω της επιλεχθείσας διαδικασίας επιλογής προς αντικατάσταση να επιβιώσουν, κάτι το οποίο θεωρείται γενικά ωφέλιμο.

Τελεστής μετάλλαξης

Ο τελεστής μετάλλαξης είναι ο δεύτερος τύπος τελεστή η χρησιμοποίηση του οποίου αποσκοπεί αποκλειστικά στη μείωση της πιθανότητας να συγκλίνει πρώιμα ο αλγόριθμος σε μια τοπικά βέλτιστη λύση. Ο τελεστής μετάλλαξης αναλαμβάνει τον ρόλο της διατήρησης της ποικιλομορφίας του πληθυσμού μέσω της εισαγωγής νέων τιμών για τα γονίδια του πληθυσμού. Επιπλέον, βοηθάει τον γενετικό αλγόριθμο να αποφύγει την πρόωμη σύγκλιση πριν εξερευνηθεί ένα ικανό μέρος του χώρου λύσης, καθώς και από την πρόωμη σύγκλιση σε λύση που αποτελεί τοπικό ακρότατο αλλά δεν βρίσκεται κοντά στο ολικό βέλτιστο.

Η λειτουργία του τελεστή της μετάλλαξης εξαρτάται από το ποσοστό μετάλλαξης, το οποίο καθορίζει το ποσοστό των γονιδίων του πληθυσμού που μεταλλάσσονται. Το ποσοστό μετάλλαξης καθορίζεται από τον χρήστη του αλγορίθμου και δύναται να παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου ή να αυξομειούται (adaptive mutation). Όσο μεγαλύτερο το

ποσοστό μετάλλαξης τόσο μεγαλύτερη η ελευθερία του αλγορίθμου να ψάξει από την περιοχή που οριοθετούν οι τιμές των γονιδίων του υφιστάμενου πληθυσμού. Η μετάλλαξη ενός τυχαία επιλεγθέντος γονιδίου πραγματοποιείται με την αντικατάσταση της τιμής του από κάποια άλλη τυχαία τιμή ομοιόμορφα κατανεμημένη στο πεδίο τιμών. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου πραγματοποιηθούν όλες οι μεταλλάξεις σύμφωνα με το ποσοστό μετάλλαξης. Δεδομένου ότι η επιλογή ενός γονιδίου για την εκτέλεση της διαδικασίας της μετάλλαξης, καθώς και η ίδια η διαδικασία, είναι βασισμένη στην παραγωγή τυχαίων αριθμών δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι το άτομο που θα επιλεγθεί δεν είναι ένα ικανότατο άτομο, ούτε καθώς επίσης ότι η μετάλλαξη θα βελτιώσει την ικανότητα του ατόμου του οποίου τα γονίδια αλλοιώνει. Το γεγονός αυτό μπορεί να μην επιτρέψει στο αλγόριθμο να αξιοποιήσει ικανότατες λύσεις ή ακόμα και να μην μπορέσει να συγκλίνει προς το βέλτιστο. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου στην παρούσα διατριβή ακολουθήθηκε μια «ελιτίστικη» στρατηγική η οποία αποκλείει κάποιες από τις καλύτερες λύσεις κάθε πληθυσμού (λύσεις ελίτ) από την εφαρμογή του τελεστή της μετάλλαξης. Ο αριθμός των αποκλειόμενων λύσεων ορίζεται από τον χρήστη, ενώ κοινή πρακτική είναι ο αποκλεισμός της καλύτερης λύσης του πληθυσμού.

Λήξη της προσομοίωσης του Γενετικού Αλγορίθμου

Η διαδικασία που περιγράφεται άνωθεν επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού. Στις περισσότερες από τις εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων η εξέλιξη τελειώνει όταν επιτυγχάνεται μια αποδεκτή λύση ή όταν ολοκληρώνεται ένας προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων. Στην παρούσα διατριβή η εξέλιξη σταματά είτε όταν ο πληθυσμός καταστεί ομογενής, δηλαδή όταν τα άτομα του πληθυσμού καθώς και οι αντίστοιχες τιμές καταλληλότητας είναι όμοια είτε όταν για ένα καθορισμένο από τον χρήστη αριθμό γενεών δεν παρουσιαστεί βελτίωση ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του καλύτερου στον πληθυσμό ατόμου. Τα δύο αυτό κριτήρια εξετάζονται ταυτοχρόνως και όταν κάποιο από τα δυο ικανοποιηθεί τότε η προσομοίωση της εξέλιξης του πληθυσμού λαμβάνει τέλος.

5.2.3.2 Μέθοδος NSGA II

Μεταξύ των ετών 1993–1995, προτάθηκαν διάφοροι εξελικτικοί αλγόριθμοι προκειμένου να εφαρμοστούν στα πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης. Από αυτές τις πρώιμες προσπάθειες ξεχώρισαν κυρίως οι αλγόριθμοι MOGA των Fonseca και Fleming [121], NSGA των Srinivas και Deb [122], και NPGA του Horn et al. [123]. Αυτοί οι αλγόριθμοι ήταν οι πρώτοι οι οποίοι δημιούργησαν τους απαραίτητους πρόσθετους τελεστές για τη μετατροπή ενός απλού εξελικτικού αλγόριθμου σε πολυκριτηριακό εξελικτικό αλγόριθμο (MOEA-Multiobjective Evolutionary

Algorithm). Δύο κοινά χαρακτηριστικά γνωρίσματα απαντώνται και στους τρεις τελεστές που δημιουργήθηκαν. Αυτά είναι ακόλουθα:

- Η ανάθεση της τιμής καταλληλότητας στα μέλη των πληθυσμών πραγματοποιείται με κατάλληλη ταξινόμηση η οποία βασίζεται στην έννοια των μη κυριαρχούμενων λύσεων.
- Είναι απαραίτητη η διατήρηση της ποικιλομορφίας (διασπορά των λύσεων) μεταξύ των λύσεων που ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο μέτωπο.

Αν και αυτές οι μεθοδολογίες αποδείχτηκαν ότι ήταν ικανές να δημιουργούν τα μέτωπα κατά Παρέτο σε αρκετά προβλήματα, γρήγορα κατέστη φανερή η ανάγκη δημιουργίας πιο ικανών τελεστών προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι μεθοδολογίες επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων. Συγκεκριμένα, το ερευνητικό ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην εισαγωγή της αρχής του ελιτισμού προκειμένου να ενισχυθούν οι ιδιότητες σύγκλισης ενός ΜΟΕΑ, καθώς αυτή αποδείχτηκε [107] ότι βοηθάει στην επίτευξη καλύτερης σύγκλισης προς το πραγματικό μέτωπο κατά Παρέτο². Οι κυριότερες μέθοδοι οι οποίες ενσωματώνουν ελιτιστική συμπεριφορά και απαντώνται συχνότερα στις διάφορες εφαρμογές είναι οι εξής:

- Strong Pareto Evolutionary Algorithm – SPEA (Zitzler και Thiele) [124].
- Pareto Archived Evolutionary Strategies - PAES (Knowles και Corne) [125].
- Elitist GA (Rudolph) [126].
- Non-dominated Sorting GA - NSAGA II (Deb et al.) [127].

Η προσέγγιση SPEA των Zitzler και Thiele [124] αποτελεί μια ελιτιστική πολυκριτηριακή προσέγγιση η οποία περιλαμβάνει την έννοια των μη κυριαρχούμενων λύσεων. Ο αλγόριθμος διατηρεί έναν εξωτερικό πληθυσμό στον οποίο σε κάθε γενεά ενσωματώνονται όλες οι μη κυριαρχούμενες λύσεις οι οποίες έχουν ανακαλυφθεί. Αυτός ο εξωτερικός πληθυσμός συμμετέχει σε όλες τις γενετικές διαδικασίες. Σε κάθε γενεά, κατασκευάζεται αρχικά ένας συνδυασμένος πληθυσμός από τον εξωτερικό και τον τρέχοντα πληθυσμό. Σε κάθε μη κυριαρχούμενη λύση του συνδυασμένου πληθυσμού ανατίθεται μια τιμή καταλληλότητας ανάλογη με τον αριθμό των λύσεων τις οποίες κυριαρχεί. Επιπλέον, στις κυριαρχούμενες λύσεις ανατίθενται τιμές καταλληλότητας μικρότερες από την αντίστοιχη τιμή της χειρότερης μη κυριαρχούμενης λύσης. Αυτός ο τρόπος ανάθεσης εξασφαλίζει ότι η έρευνα θα κατευθυνθεί προς τις μη κυριαρχούμενες λύσεις. Η πολυπλοκότητα της υλοποίησης αυτού του αλγόριθμου είναι της τάξης $O(MN^3)$ αλλά με εφαρμογή διαφόρων

² Υπενθυμίζεται ότι το τελικό μέτωπο κατά Παρέτο που προκύπτει από τους εξελικτικούς αλγόριθμους αποτελεί προσέγγιση του πραγματικού μετώπου και ότι δεν υπάρχει εγγύηση ότι τα δυο μέτωπα συμπίπτουν.

τεχνικών μπορεί να μειωθεί σε $O(MN^2)$, όπου N αντιστοιχεί στο μέγεθος του πληθυσμού και M στον αριθμό των μεταβλητών απόφασης.

Ο αλγόριθμος PAES των Knowles και Corne [125] είναι ένας απλός εξελικτικός αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιεί μόνο έναν γονέα και έναν απόγονο, γεγονός το οποίο προσομοιάζει μια στρατηγική εξέλιξης "(1,1)-EA". Ο αλγόριθμος επίσης χρησιμοποιεί δυαδικές συμβολοσειρές ως κωδικοποίηση για τα άτομα, ενώ ο μοναδικός χρησιμοποιούμενος τελεστής αναπαραγωγής είναι αυτός της μετάλλαξης. Στην συγκεκριμένη προσέγγιση ο απόγονος συγκρίνεται σε σχέση με τον γονέα. Εάν ο απόγονος κυριαρχεί επί του γονέα, τότε γίνεται αποδεκτός ως ο επόμενος γονέας και η επανάληψη συνεχίζεται. Αντίθετα, εάν ο γονέας κυριαρχεί επί του απόγονου, ο απόγονος απορρίπτεται και δημιουργείται μέσω του τελεστή της μετάλλαξης ένας νέος απόγονος. Στην περίπτωση που ο απόγονος και ο γονέας αποτελούν μη κυριαρχούμενες λύσεις, η επιλογή μεταξύ του απόγονου ή του γονέα βασίζεται στη σύγκριση με ένα αρχείο που περιλαμβάνει τις καλύτερες λύσεις μέχρι στιγμής. Συγκεκριμένα, ο απόγονος συγκρίνεται με το αρχείο προκειμένου να διαπιστωθεί εάν κυριαρχεί οποιοδήποτε μέλος του. Εάν ο απόγονος κυριαρχεί επί κάποιων λύσεων τότε γίνεται αποδεκτός ως ο νέος γονέας και όλες οι κυριαρχούμενες λύσεις διαγράφονται από το αρχείο. Εάν ο απόγονος δεν κυριαρχεί επί κάποιου μέλους του αρχείου, τότε και ο γονέας και ο απόγονος ελέγχονται για την εγγύτητά τους προς τις λύσεις που διατηρούνται στο αρχείο. Εάν ο απόγονος δεν ανήκει σε μια «συνωστισμένη» περιοχή του χώρου λύσης σε σχέση με τα υπόλοιπα μέλη του αρχείου, τότε γίνεται αποδεκτός ως γονέας και ένα αντίγραφο του προστίθεται στο αρχείο. Ο παράγοντας του «συνωστισμού» υλοποιείται από τον διαχωρισμό του χώρου λύσης σε d^n υποδιαστήματα, όπου με d συμβολίζεται η παράμετρος του βάθους ενώ με n είναι ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης. Η πολυπλοκότητα της υλοποίησης αυτού του αλγόριθμου φαίνεται να είναι της τάξης $O(MN^2)$.

Η προσέγγιση του Rudolph [126] περιλαμβάνει ένα απλό ελιτιστικό εξελικτικό αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται στη συστηματική σύγκριση ατόμων από τους πληθυσμούς των γονέων και των απογόνων. Οι μη κυριαρχούμενες λύσεις από τον πληθυσμό των απογόνων συγκρίνονται με αυτές των γονέων προκειμένου να διαμορφωθεί ένα ενιαίο σύνολο μη κυριαρχούμενων λύσεων, το οποίο στη συνέχεια θα αποτελέσει τον πληθυσμό της επόμενης γενεάς. Εάν το μέγεθος αυτού του συνόλου δεν είναι μεγαλύτερο από το επιθυμητό μέγεθος πληθυσμού, τότε εισάγονται στο νέο πληθυσμό και άτομα από τον πληθυσμό των απογόνων. Με αυτήν τη στρατηγική, αποδείχθη ότι ο προτεινόμενος πληθυσμός συγκλίνει προς το πραγματικό βέλτιστο μέτωπο κατά Παρέτο. Εντούτοις, ο αλγόριθμος στερείται καταλλήλων μηχανισμών διατήρησης της ποικιλομορφίας (διασποράς) των βέλτιστων λύσεων κατά Παρέτο. Η πολυπλοκότητα της υλοποίησης αυτού του

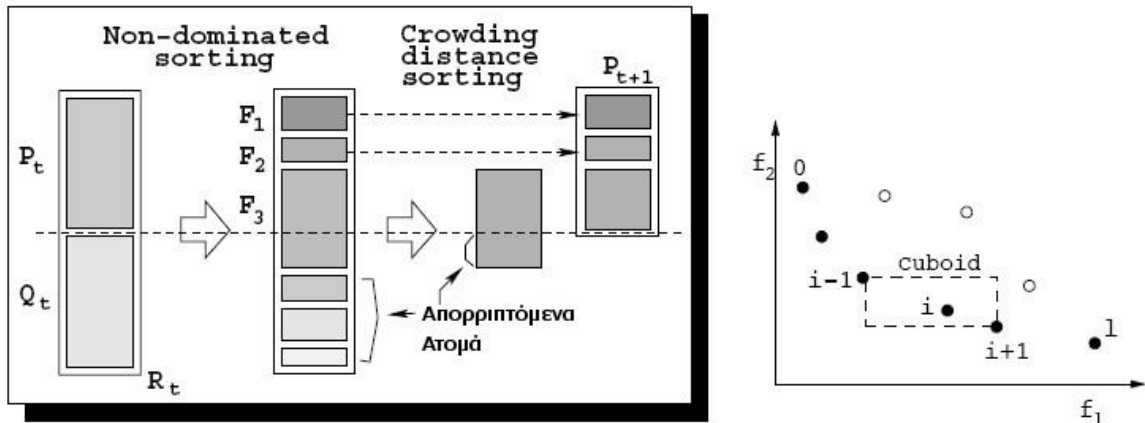
αλγόριθμου θεωρείται να είναι της τάξης $O(MN^2)$.

5.2.3.2.1 Βασική περιγραφή αλγορίθμου NSGA II

Ο αλγόριθμος NSGA II [127] (βλ. Σχήμα 5-8) αρχικοποιείται δημιουργώντας έναν τυχαίο πληθυσμό γονέων P_0 μεγέθους N . Ο πληθυσμός αυτός στη συνέχεια ταξινομείται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία ταξινόμησης (Fast NonDominated Sorting) η οποία βασίζεται στην έννοια των μη κυριαρχούμενων λύσεων η οποία χωρίζει αρχικά τον πληθυσμό σε υποπληθυσμούς. Σε κάθε άτομο του πληθυσμού ανατίθεται και η απαραίτητη τιμή καταλληλότητας η οποία ισούται με το επίπεδο κυριαρχίας του εντός του υποπληθυσμού στον οποίο ανήκει. Κατά αυτόν τον τρόπο τα άτομα που ανήκουν στο καλύτερο επίπεδο παίρνουν την τιμή ένα, τα άτομα που ανήκουν στο δεύτερο καλύτερο επίπεδο παίρνουν την τιμή δυο και ούτε καθεξής. Η ιεράρχηση αυτή προϋποθέτει ότι το υφιστάμενο πρόβλημα είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Στη συνέχεια εφαρμόζονται κατάλληλοι τελεστές επιλογής και αναπαραγωγής προκειμένου να δημιουργηθεί ο πληθυσμός των απογόνων Q_0 μεγέθους N ολοκληρώνοντας τη φάση της αρχικοποίησης του αλγορίθμου.

Ο αλγόριθμος ξεκινά την κυρία λειτουργία του δημιουργώντας έναν συνδυασμένο πληθυσμό από τους πληθυσμούς των γονέων και των απογόνων. Ο συνδυασμένος πληθυσμός είναι μεγέθους $2N$. Κατόπιν, ο πληθυσμός ταξινομείται σύμφωνα με την διαδικασία ταξινόμησης Fast NonDominated Sorting. Δεδομένου ότι όλα τα άτομα, γονείς και απόγονοι, συμπεριλαμβάνονται στην ταξινόμηση, εξασφαλίζεται ότι τηρείται η αρχή του ελιτισμού. Οι λύσεις που ανήκουν στον καλύτερο υποπληθυσμό μη-κυριαρχούμενων λύσεων F_1 αποτελούν τις καλύτερες λύσεις καθώς και τα πιο ελπιδοφόρα άτομα του συνδυασμένου πληθυσμού. Εάν το μέγεθος του προαναφερθέντος πληθυσμού F_1 είναι μικρότερο από N τότε πρέπει να επιλεγθούν και άλλα άτομα από τον συνδυασμένο πληθυσμό προκειμένου να αποτελέσουν μέλη του πληθυσμού της επόμενης γενεάς P_{t+1} . Έτσι τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού επιλέγονται από τον επόμενο την τάξη υποπληθυσμό βάσει της ταξινόμησής τους. Κατά συνέπεια, εάν χρειαστεί επιλέγονται άτομα από τον υποπληθυσμό F_2 , στην συνέχεια από τον υποπληθυσμό F_3 και ούτω καθεξής. Ας υποθέσουμε ότι ο τελευταίος υποπληθυσμός που επιλέγεται είναι ο F_k . Ενδεχομένως, ο υποπληθυσμός F_k μπορεί να περιέχει περισσότερα άτομα από αυτά που χρειαζόμαστε προκειμένου να συμπληρωθεί ο πληθυσμός σταθερού μεγέθους N . Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου εφαρμόζεται μια ειδική διαδικασία η οποία ταξινομεί τα μέλη του υποπληθυσμού F_k σε φθίνουσα σειρά βάσει ενός εξειδικευμένου τελεστή σύγκρισης (Crowded Comparison Operator) ο οποίος αναλύεται διεξοδικά σε αντίστοιχη παράγραφο. Αφού ταξινομηθούν τα συγκεκριμένα άτομα επιλέγονται τα καλύτερα τα οποία και συμπληρώνουν τον νέο πληθυσμό. Τέλος, ο νέος πληθυσμός P_{t+1} μεγέθους N

χρησιμοποιείται για να επαναληφθεί ο προαναφερθείς κύκλος και να δημιουργηθεί η επομένη $t+2$ γενεά.



Σχήμα 5-8 Σχηματική αναπαράσταση αλγόριθμου NSGA II [5.51].

5.2.3.2.2 Τελεστές Υλοποίησης Αλγόριθμου NSGA II

Ταξινόμηση Fast Non Dominated

Η χρησιμοποιηθείσα ταξινόμηση *Fast Non Dominated* απαιτεί για κάθε άτομο p τον υπολογισμό:

1. του δείκτη επικυριαρχίας n_p , ο οποίος αντιστοιχεί στον αριθμό των ατόμων που κυριαρχούν επί του ατόμου/λύσης p και
2. του συνόλου S_p , το οποίο περιλαμβάνει όλα τα άτομα επί των οποίων κυριαρχεί το άτομο p .

Ο υπολογισμός των δύο αυτών παραμέτρων απαιτεί $O(MN^2)$ συγκρίσεις, όπου M ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης. Σε όλες τις λύσεις οι οποίες ανήκουν στον πρώτο μη κυριαρχούμενο μέτωπο (και άρα δημιουργούν τον πρώτο υποπληθυσμό) ο δείκτης επικυριαρχίας ισούται με το μηδέν. Στην συνέχεια για κάθε λύση p με $n_p=0$, επισκεπτόμαστε κάθε μέλος q του συνόλου της S_p και μειώνουμε τον δείκτη επικυριαρχίας του κατά μία μονάδα. Με αυτό τον τρόπο, εάν για οποιοδήποτε μέλος ο δείκτης επικυριαρχίας γίνει ίσος με το μηδέν, το βάζουμε σε έναν χωριστό υποπληθυσμό Q . Αυτά τα μέλη ανήκουν στο δεύτερο μη κυριαρχούμενο μέτωπο. Η ανωτέρω διαδικασία συνεχίζεται έως ότου προσδιοριστούν όλα τα δυνατά μέτωπα μη κυριαρχούμενων λύσεων.

Για κάθε λύση p που ανήκει στο δεύτερο ή σε πιο υψηλό μέτωπο, ο δείκτης επικυριαρχίας μπορεί να λάβει τιμές με άνω φράγμα την τιμή $N-1$. Κατά συνέπεια, κάθε λύση θα προσπελαστεί το πολύ $N-1$ φορές προτού ο δείκτης επικυριαρχίας να πάρει την τιμή μηδέν. Όταν μια λύση ανατίθεται σε

ένα συγκεκριμένο μέτωπο δεν εξετάζεται ποτέ ξανά. Δεδομένου ότι υπάρχουν το πολύ $N-1$ τέτοιες λύσεις, η συνολική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου της ταξινόμησης είναι της τάξης $O(MN^2)$ όπου M είναι ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης.

Τελεστής Συνωστισμού (*Crowded Comparison*)

Ο τελεστής συνωστισμού (*Crowded Comparison*) καθοδηγεί τη διαδικασία επιλογής στα διάφορα στάδια του αλγορίθμου προωθώντας τη δημιουργία ενός ομοιόμορφα διασπαρμένου μετώπου κατά Παρέτο. Για την εφαρμογή του τελεστή γίνεται η υπόθεση ότι κάθε άτομο στον πληθυσμό χαρακτηρίζεται από δύο ιδιότητες:

1. Την τάξη επικυριαρχίας (i_{rank})
2. Την απόσταση πυκνότητας ($i_{distance}$)

Χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο ιδιότητες μπορεί να οριστεί η σχέση δυο ατόμων/λύσεων ως έξης:

$$i < j \text{ εάν } (i_{rank} < j_{rank}) \text{ ή } ((i_{rank} = j_{rank}) \text{ και } (i_{distance} > j_{distance})) \quad (5.31)$$

Δηλαδή μεταξύ δύο λύσεων οι οποίες ανήκουν σε διαφορετικές τάξεις επικυριαρχίας ή αλλιώς σε διαφορετικά μέτωπα μη κυριαρχούμενων λύσεων, προτιμάμε τη λύση που ανήκει στη μικρότερη (καλύτερη) τάξη. Διαφορετικά, εάν και οι δύο λύσεις ανήκουν στο ίδιο μέτωπο, προτιμάμε τη λύση που βρίσκεται σε μια περιοχή του χώρου λύσης στον οποίο δεν συνωστίζονται πολλές παρεμφερείς λύσεις.

Συνεπώς, για την εφαρμογή του τελεστή χρειάζεται να πάρουμε μια εκτίμηση της πυκνότητας των λύσεων που περιβάλλουν μια συγκεκριμένη λύση στον πληθυσμό. Για την εκτίμηση αυτή υπολογίζουμε τη μέση απόσταση δύο σημείων από κάθε πλευρά της λύσης που μας ενδιαφέρει για κάθε μεταβλητή απόφασης. Η μέση αυτή απόσταση χρησιμεύει ως εκτιμήτρια της περιμέτρου του κυβοειδούς (cuboid) που διαμορφώνεται με τη χρησιμοποίηση των κοντινότερων γειτόνων ως ακμών και αποκαλείται απόσταση πυκνότητας. Στο Σχήμα 5-8 η απόσταση πυκνότητας της i -οστής λύσης στο σχηματιζόμενο μέτωπό είναι το μέσο μήκος των καθέτων και οριζόντιων ακμών του παραλληλογράμμου που εμφανίζεται με διακεκομμένες γραμμές.

Ο υπολογισμός της απόστασης πυκνότητας για κάθε λύση ενός συνόλου λύσεων απαιτεί την ταξινόμηση του συνόλου σε αύξουσα σειρά με βάση τις τιμές κάθε μεταβλητής απόφασης. Στη συνέχεια για κάθε μεταβλητή απόφασης υπολογίζεται η απόλυτη κανονικοποιημένη διάφορα μεταξύ των τιμών δυο κοντινών λύσεων. Όταν ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιηθεί για όλες τις μεταβλητές απόφασης, υπολογίζεται και η απόσταση πυκνότητας ως το άθροισμά τους.

Τελεστές Επιλογής & Αναπαραγωγής

Στην παρούσα υλοποίηση του Γενετικού Αλγόριθμου NSGA II επιλέχθηκε η απεικόνιση τιμών προκειμένου να κωδικοποιηθεί κάθε άτομο του πληθυσμού. Η επιλογή σε κάθε φάση του αλγόριθμου πραγματοποιείται μέσω διεξαγωγής πρωταθλημάτων (*Tournament Selection*). Το μέγεθος των πρωταθλημάτων καθορίζεται από τον χρήστη, ενώ η προκαθορισμένη επιλογή αφορά την διεξαγωγή των πρωταθλημάτων με δύο άτομα. Για την αναπαραγωγή η συγκεκριμένη υλοποίηση αξιοποιεί τον τελεστή διασταύρωσης και μετάλλαξης που προτείνει ο Hautp [115] και οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν και στην *a priori* μέθοδο (βλ. παρ. 5.2.3.1). Στη συγκεκριμένη προσέγγιση το ποσοστό διασταύρωσης χρησιμοποιείται με τον τρόπο που προτείνει ο Kalyanmoy [127] και καθορίζει στην ουσία το ποσοστό των νέων ατόμων που θα δημιουργηθούν με τον τελεστή της διασταύρωσης. Έτσι αν το ποσοστό είναι 85% τότε το 85% των νέων ατόμων θα δημιουργηθούν μέσω δια-σταύρωσης και το υπόλοιπο 15% με χρήση του τελεστή μετάλλαξης.

Πολυπλοκότητα Αλγόριθμου NSGA II

Εξετάζοντας την πολυπλοκότητα μιας επανάληψης του αλγορίθμου NSGA II παρατηρούμε ότι οι βασικές διαδικασίες από τις οποίες απαρτίζεται καθώς και η πολυπλοκότητα κάθε διαδικασίας θεωρώντας την χειρότερη περίπτωση είναι:

1. η ταξινόμηση Fast NonDominated πολυπλοκότητας $O((2N)^2)$
2. η εκτέλεση της σύγκρισης συνωστισμού (*Crowded Comparison*) πολυπλοκότητας $O(M(2N)\log(2N))$
3. η ταξινόμηση βάσει της σχέσης δυο ατόμων –λύσεων πολυπλοκότητας $O(2N\log(2N))$

Η γενική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου NSGA II εξαρτάται κυρίως από την ταξινόμηση Fast NonDominated. Εάν υλοποιηθεί προσεκτικά, δεν χρειάζεται να ταξινομηθεί ο συνολικός πληθυσμός μεγέθους $2N$ σύμφωνα με την έννοια των μη κυριαρχούμενων λύσεων. Μόλις η διαδικασία της ταξινόμησης δημιουργήσει επαρκή αριθμό μετώπων προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες του πληθυσμού για N νέα άτομα, δεν υπάρχει κανένας λόγος να συνεχιστεί η διαδικασία. Η ποικιλομορφία-διασπορά μεταξύ των λύσεων διατηρείται μέσω της εξέτασης της απόστασης πυκνότητας, η οποία χρησιμοποιείται στην επιλογή βάσει πρωταθλημάτων και κατά τη διάρκεια της φάσης μείωσης των ενοποιημένων πληθυσμών.

5.3 Μελέτη Περιπτώσεων

Τόσο η *a priori* προσέγγιση (μέθοδος της Σταθμισμένης Αντικειμενικής Συνάρτησης – ΣΑΣ) όσο και η *a posteriori* (NSGA II) οι οποίες περιγράφηκαν άνωθεν υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το περιβάλλον ανάπτυξης Matlab. Στη συνέχεια οι δύο προσεγγίσεις προκειμένου να ερευνηθεί η απόδοσή τους, καθώς και να ελεγχθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους, χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση του προσανατολισμού κατασκευής τεσσάρων αντικειμένων διαφορετικής γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Επιπλέον, ειδικά για την μέθοδο της ΣΑΣ χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά διανύσματα συντελεστών βαρύτητας προκειμένου να γίνει έκδηλος ο τρόπος με τον οποίο ο αναπτυχθείς αλγόριθμος προσαρμόζεται στις εκάστοτε κατασκευαστικές προτιμήσεις του χρήστη.

Οι παράμετροι εισαγωγής που ελέγχονται από τον τελικό χρήστη του άρθρωματος λογισμικού που υλοποιεί την μέθοδο της ΣΑΣ περιλαμβάνουν το πάχος στρώματος, το μέγεθος του πληθυσμού του Γενετικού Αλγόριθμου, το ποσοστό μετάλλαξης, το ποσοστό διασταυρώσεων, καθώς και τον αριθμό των γενεών, ο οποίος καθορίζει το κριτήριο τερματισμού. Σε όλες τις προσομοιώσεις του Γενετικού Αλγόριθμου για όλα τα αντικείμενα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές για τις παραμέτρους:

- πάχος στρώματος 0,15mm
- μέγεθος πληθυσμού 30 χρωμοσωμάτων
- ποσοστό διασταυρώσεων 100%
- ποσοστό μετάλλαξης 20%
- τερματισμός της διαδικασίας προσομοίωσης όταν δεν παρατηρείται καμία βελτίωση (μείωση) της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που αφορά το ικανότερο άτομο για δέκα διαδοχικές γενεές ή όταν ο πληθυσμός καταστεί πλήρως ομογενής.

Αντίστοιχα για τον αλγόριθμο NSGA II σε όλες τις προσομοιώσεις και για όλα τα αντικείμενα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές για τις παραμέτρους:

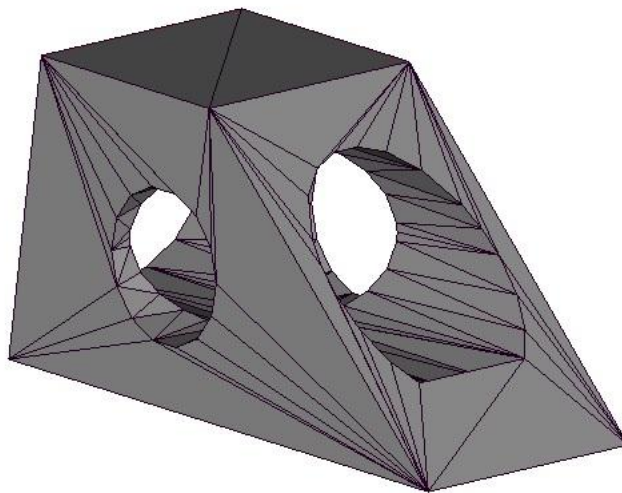
- πάχος στρώματος 0,15mm
- μέγεθος πληθυσμού 30 χρωμοσωμάτων
- ποσοστό διασταυρώσεων 80%
- ποσοστό μετάλλαξης 20%
- τερματισμός της διαδικασίας προσομοίωσης μετά από 200 διαδοχικές γενεές ή εάν η διαφοροποίηση της μέσης τιμής της ισοσταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης για

εκατό διαδοχικές γενεές βρίσκεται κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο ανοχής ($1e-4$ για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις)

Όλες οι προσομοιώσεις που αναφέρονται στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν σε ένα Η/Υ εξοπλισμένο με επεξεργαστή Pentium 4 χρονισμένο στα 3.4 GHz και μνήμη RAM 2 GB.

5.3.1 Περίπτωση απλού γεωμετρικά αντικειμένου

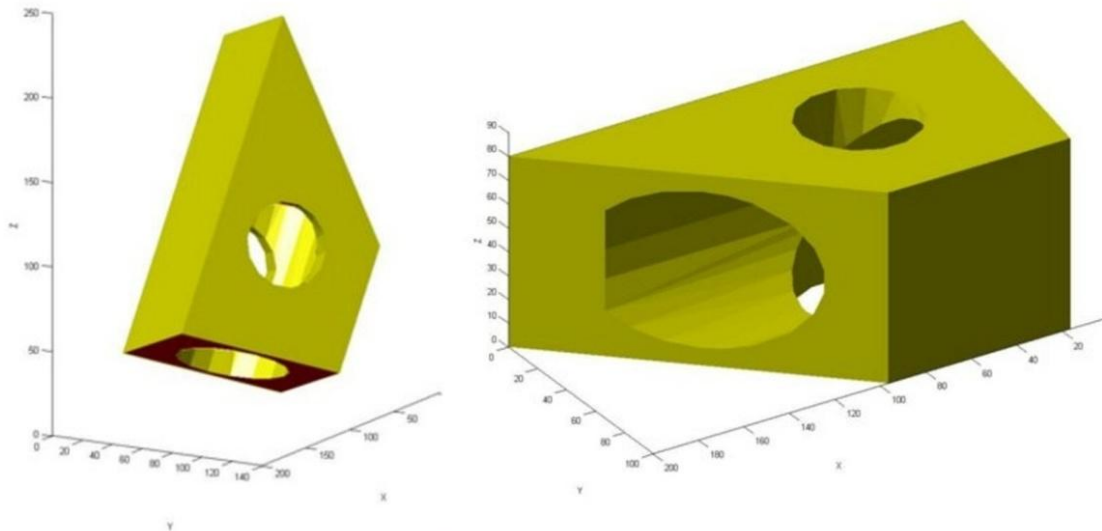
Το πρώτο αντικείμενο στο οποίο εφαρμόστηκαν οι προσεγγίσεις βελτιστοποίησης του κατασκευαστικού προσανατολισμού είναι ένα απλό γεωμετρικό σχήμα το οποίο έχει υποδειχθεί από τους Cheng et al. [37] (βλ. Σχήμα 5-9). Η γεωμετρία αυτού του αντικειμένου είναι αρκετά απλή και αποτελείται από έξι επίπεδες επιφάνειες και δύο κυλινδρικά μορφολογικά χαρακτηριστικά. Οι διαστάσεις του αντικειμένου όσο αφορά στο πλάτος του είναι 200X80 mm ενώ το ύψος του ανέρχεται στα 100 mm. Το πολυεδρικό αρχείο STL που περιγράφει το αντικείμενο αποτελείται από 246 τρίγωνα.



Σχήμα 5-9 STL απεικόνιση απλού γεωμετρικά αντικειμένου.

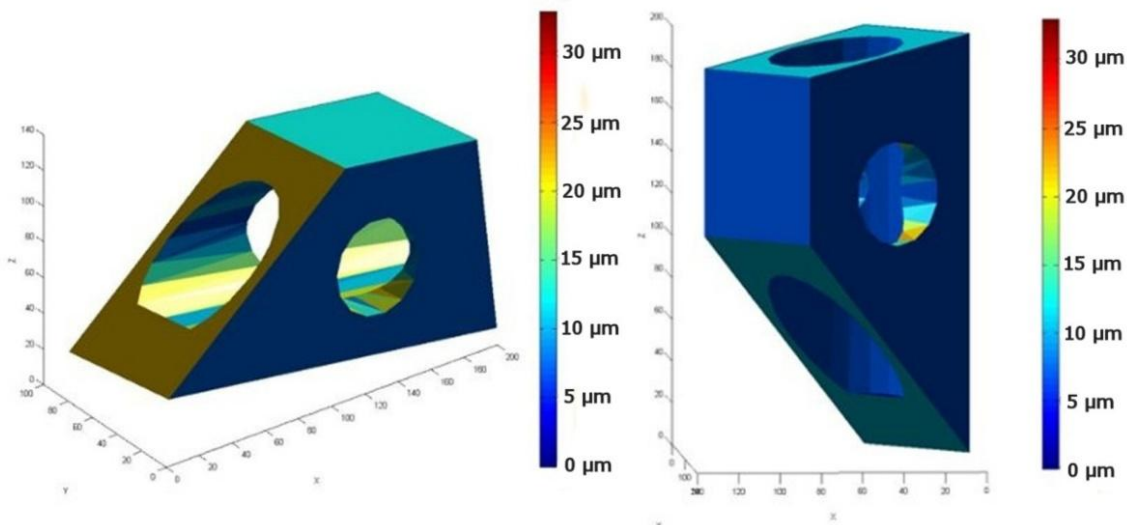
Για τη βελτιστοποίηση του κατασκευαστικού προσανατολισμού του απλού αντικειμένου με χρήση της μεθόδου της ΣΑΣ πραγματοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας πέντε διαφορετικά διανύσματα συντελεστών βαρύτητας. Οι τέσσερις από τις πέντε προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να αξιολογηθούν οι χειρότεροι και καλύτεροι κατασκευαστικοί προσανατολισμοί από άποψη του χρόνου κατασκευής/κόστους και της τραχύτητας των επιφανειών. Οι ισομετρικές όψεις των τεσσάρων αυτών προσανατολισμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-10 ενώ οι αντίστοιχοι υπολογιστικοί χρόνοι καθώς και οι τιμές του χρόνου κατασκευής και της τραχύτητας των επιφανειών κάθε προσανατολισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1.

Προκειμένου να επιτρέπεται στον χειριστή του συστήματος της Στερεολιθογραφίας να αξιολογεί οπτικά και γρήγορα τους διαφορετικούς κατασκευαστικούς προσανατολισμούς που προτείνονται από το λογισμικό, δημιουργήθηκαν δύο επιπλέον γραφικά εργαλεία.



(α) Χείριστος Προσανατολισμός / Κριτήριο: Κόστος

(β) Βέλτιστος Προσανατολισμός / Κριτήριο: Κόστος



(γ) Χείριστος Προσανατολισμός / Κριτήριο: Ποιότητα

(δ) Βέλτιστος Προσανατολισμός / Κριτήριο: Ποιότητα

Σχήμα 5-10 Βέλτιστοι και χείριστοι προσανατολισμοί του απλού αντικείμενου.

Το πρώτο γραφικό εργαλείο απεικονίζει οπτικά την παρατηρούμενη τραχύτητα κάθε επιφάνειας του αντικείμενου. Συγκεκριμένα, σε καθένα από τα τρίγωνα που αποτελούν το αρχείο STL του αντικείμενου αποδίδεται ένα συγκεκριμένο χρώμα ανάλογα με την παρατηρούμενη μέση τραχύτητά του και το καθορισμένο πρότυπο κωδικοποίησης χρώματος (βλ. Σχήμα 5-10 γ&δ).

Προσομοίωση	Χρόνος CPU (sec)	Τιμές Κριτηρίων Βελτιστοποίησης
1 ^η Μεγιστοποίηση FabTime	38	1.257,8 min
2 ^η Ελαχιστοποίηση FabTime	7	764,3 min
3 ^η Μεγιστοποίηση R a	25	17,27 μm
4 ^η Ελαχιστοποίηση Ra	27	7,84 μm
FabTime (0,5) / Ra (0,5)	33	764,3 min / 8,9 μm

Πίνακας 5-1 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης απλού αντικειμένου.

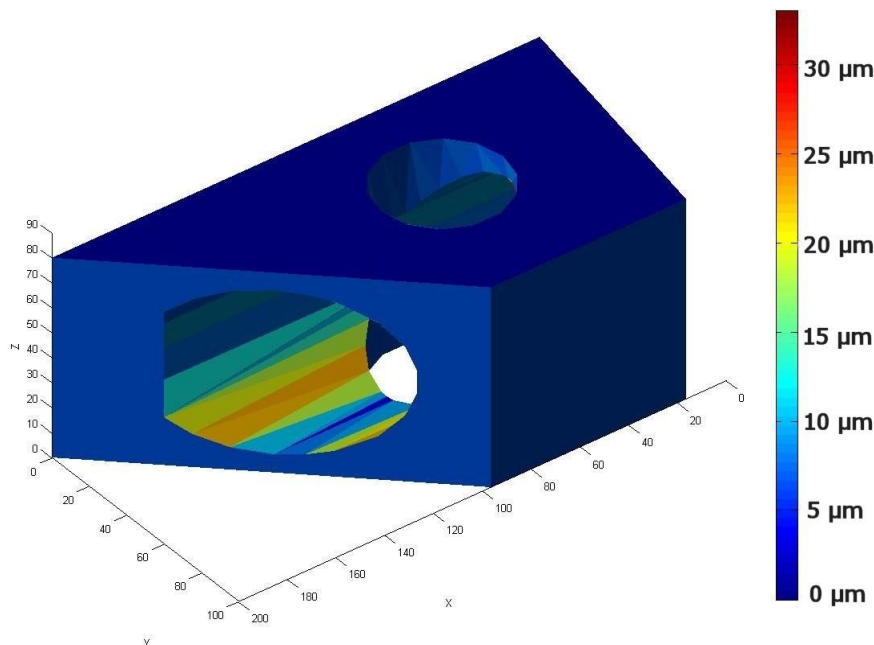
Το δεύτερο γραφικό εργαλείο επισημαίνει με κόκκινο χρώμα όλα τα τρίγωνα του αρχείου STL τα οποία χρήζουν υποστήριξης παρέχοντας έτσι μια γραφική απεικόνιση της έκτασης της δομής υποστήριξης που απαιτεί ο συγκεκριμένος προσανατολισμός (βλ. Σχήμα 5-10, α&β). Κατά συνέπεια, ο χειριστής μπορεί να αξιολογήσει οπτικά την τιμή της τραχύτητας των επιφανειών που κρίνονται χρήσιμοι και να εκτιμήσει την έκταση των μεταπαρασκευαστικών εργασιών που θα απαιτηθούν καθώς και τον βαθμό δυσκολία τους, και τελικά να αποφασίσει εάν ο προτεινόμενος προσανατολισμός γίνεται αποδεκτός ή πρέπει να αναθεωρηθεί.

Παρατηρώντας τις όψεις α&β στο Σχήμα 5-10, οι οποίες αφορούν τον χειρότερο και καλύτερο προσανατολισμό, σε σχέση με το κριτήριο του χρόνου επεξεργασίας, καθίσταται εμφανές ότι ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται σύμφωνα με τα αναμενόμενα. Συγκεκριμένα, για τη χειρότερη περίπτωση, ο αλγόριθμος καταλήγει σε έναν προσανατολισμό ο οποίος συνεπάγεται μεγάλο ύψος κατασκευής (σχετικά μεγάλος αριθμός στρωμάτων) και δημιουργεί εκτεταμένη ανάγκη για δομή υποστήριξης. Αντίθετα ο κατασκευαστικός προσανατολισμός ελάχιστου κόστους είναι αυτός κατά τον οποίο ελαχιστοποιείται το ύψος και απαιτείται ελάχιστη δομή υποστήριξης. Ο επιλεγθείς προσανατολισμός ελάχιστου χρόνου κατασκευής βρίσκεται σε συμφωνία με τα ευρήματα στα [37] και [97].

Οι κατασκευαστικοί προσανατολισμοί οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-10 γ&δ, και για τον υπολογισμό των οποίων λήφθηκε υπόψη μόνο το κριτήριο της τραχύτητας των επιφανειών, συμφωνούν επίσης με τα προσδοκώμενα. Συγκεκριμένα, ο προσανατολισμός ο οποίος παρουσιάζεται στον Σχήμα 5-10 γ εκτιμάται ως ο χειρότερος δυνατός από άποψη τραχύτητας επιφανειών. Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος κατέληξε σε έναν προσανατολισμό κατά τον οποίο οι περισσότερες επίπεδες επιφάνειες του αντικειμένου έχουν κλίση μεταξύ 20°–50° ή 150°–180° σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η επιλογή αυτού του προσανατολισμού οφείλεται πιθανότατα στο γεγονός ότι οι επιφάνειες με αυτές τις κλίσεις παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές τραχύτητας (βλ. Σχήμα 5-5). Αντίθετα, στον προσανατολισμό ο οποίος ελαχιστοποιεί την εκτιμώμενη τραχύτητα, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης τοποθετεί το αντικείμενο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι περισσότερες

από τις επιφάνειές της να είναι κάθετες ή παράλληλες στην πλατφόρμα κατασκευής. Η επιλογή αυτή πιθανότατα οφείλεται στο ότι οι επιφάνειες με κλίση 0° και 90° παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές τιμές τραχύτητας (βλ. Σχήμα 5-5). Παρατηρώντας τον κατασκευαστικό προσανατολισμό του Σχήματος 5-10 δ βλέπουμε ότι τέσσερις από τις έξι επίπεδες επιφάνειες, καθώς επίσης και η πιο επιμήκης κυλινδρική επιφάνεια, βρίσκονται τοποθετημένες κάθετα σε σχέση με την πλατφόρμα κατασκευής. Ο επιλεγθείς προσανατολισμός συμφωνεί επίσης με τον βέλτιστο, από άποψη κατασκευαστικής ακρίβειας προσανατολισμό, ο οποίος προτείνεται στο [86].

Κατά τη διάρκεια της πέμπτης προσομοίωσης ελήφθησαν ταυτόχρονα ως κριτήρια βελτιστοποίησης τόσο η ποιότητα των επιφανειών όσο και ο χρόνος κατασκευής με συντελεστές βαρύτητας ίσους με την τιμή 0,5. Ο προτεινόμενος βέλτιστος προσανατολισμός παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-11 ενώ οι αντίστοιχες τιμές των κριτηρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1. Παρατηρούμε ότι σύμφωνα με τον επιλεγθέντα προσανατολισμό όλες οι επίπεδες επιφάνειες του αντικείμενου είναι είτε παράλληλες είτε κάθετες σε σχέση με την πλατφόρμα κατασκευής, ενώ ο άξονας του μικρού κυλινδρικού μορφολογικού χαρακτηριστικού προσανατολίζεται παράλληλα με τον άξονα κατασκευής Z.

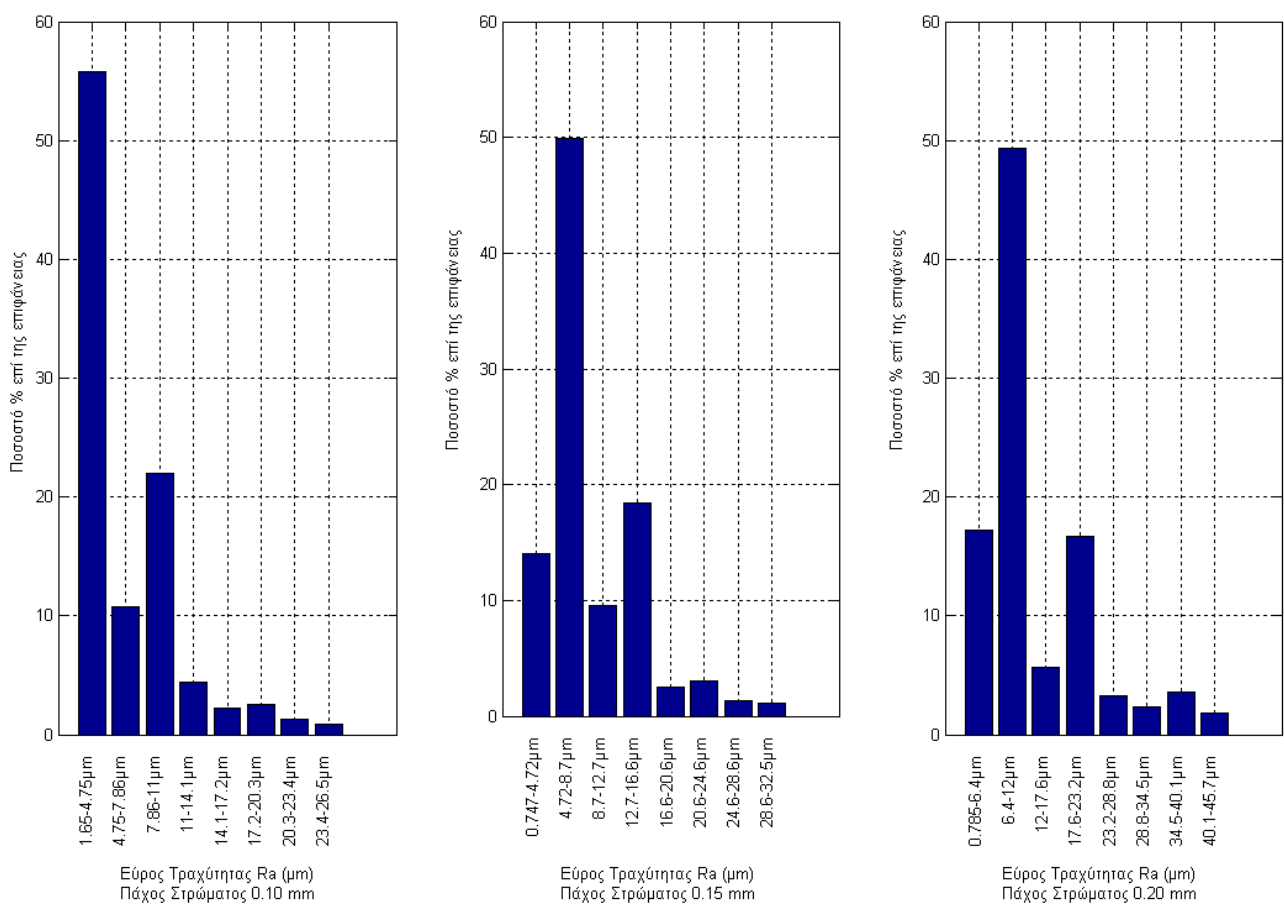


Σχήμα 5-11 Βέλτιστος προσανατολισμός απλού αντικείμενου (0.5 κρτ. Χρόνου/ 0.5 κρτ.Ra).

Ο συγκεκριμένος προσανατολισμός παρουσιάζει συνεπώς αποδεκτή ποιότητα όσον αφορά τις επιφάνειές του, δεδομένου ότι δεν αναμένεται να παρουσιαστεί το φαινόμενο της κλίμακας λόγω κλίσης σε αυτές τις επιφάνειες, ενώ επιπρόσθετα η αντίστοιχη αναμενόμενη τραχύτητα είναι σχετικά χαμηλή (βλ. Σχήμα 5-11). Επιπλέον, αυτός ο προσανατολισμός είναι ακριβώς ο ίδιος με το

καλύτερο προσανατολισμό που λάβαμε όταν το κριτήριο ήταν η βελτιστοποίηση του χρόνου/κόστους κατασκευής, (βλ. Σχήμα 5-10 β), γεγονός το οποίο εξηγεί την επίδραση του στην τελική απόφαση. Τέλος, ο προτεινόμενος προσανατολισμός συμφωνεί επίσης με τους αντίστοιχους που προτείνονται στα [37] και [97].

Μετά την επιλογή του βέλτιστου προσανατολισμού σύμφωνα με το προεπιλεγθέν διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας, το λογισμικό δύναται να δημιουργήσει το προφίλ της κατανομής της παρατηρούμενης τραχύτητας ως ποσοστό επί της επιφάνειας του αντικείμενου τόσο για το υπό εξέταση πάχος στρώματος (δηλ. 0,15mm) όσο και για τα υπόλοιπα πάχη στρώματος (δηλ. 0,10mm και 0,20mm) προκειμένου να παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα. Στο Σχήμα 5-12 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα κατανομής της εκτιμώμενης τραχύτητας ως ποσοστού της συνολικής επιφάνειας για τις τρεις τιμές του πάχους στρώματος.

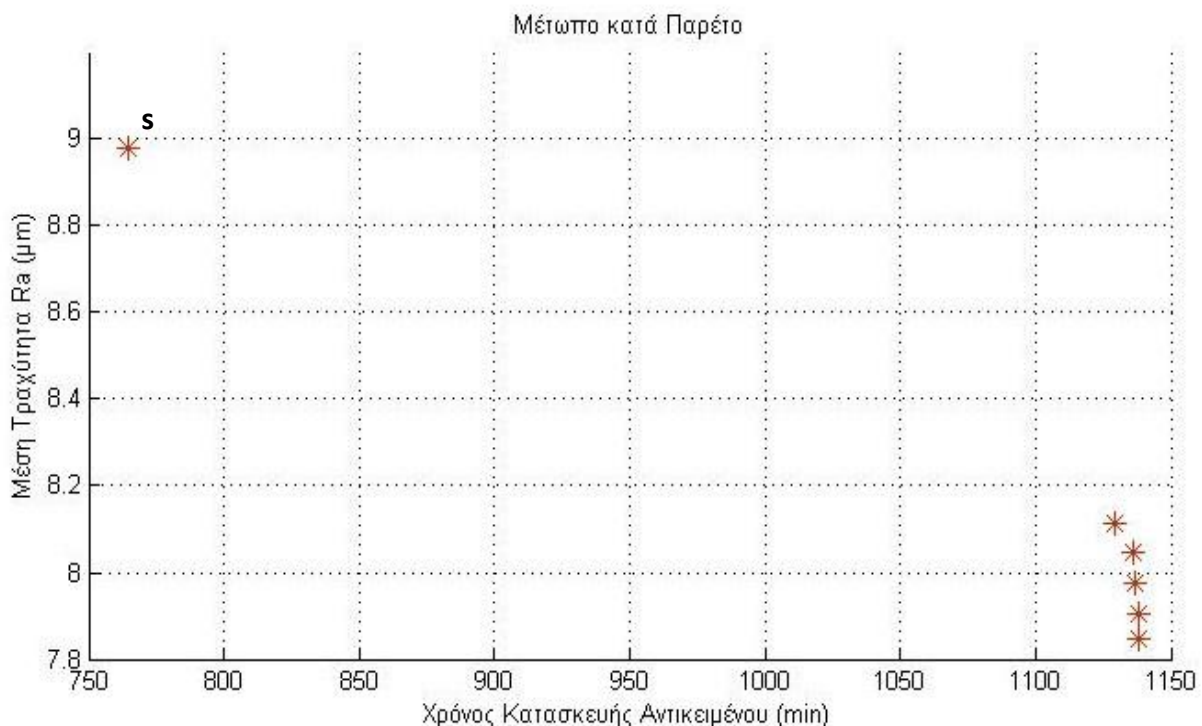


Σχήμα 5-12 Ιστογράμματα κατανομής μέσης τραχύτητας απλού αντικείμενου (0,5 κрт. Χρόνου/ 0,5 κрт.Ra).

Στο ιστογράμματα για πάχος στρώματος 0,15mm παρατηρείται ότι περίπου το 63% της επιφάνειας παρουσιάζει τιμές τραχύτητας μεταξύ 0,8-8,5 μm. Οι τιμές αυτές παρατηρώντας το Σχήμα 5-5 βλέπουμε ότι αντιστοιχούν σε επιφάνειες οι οποίες είναι είτε παράλληλες είτε κάθετες προς την

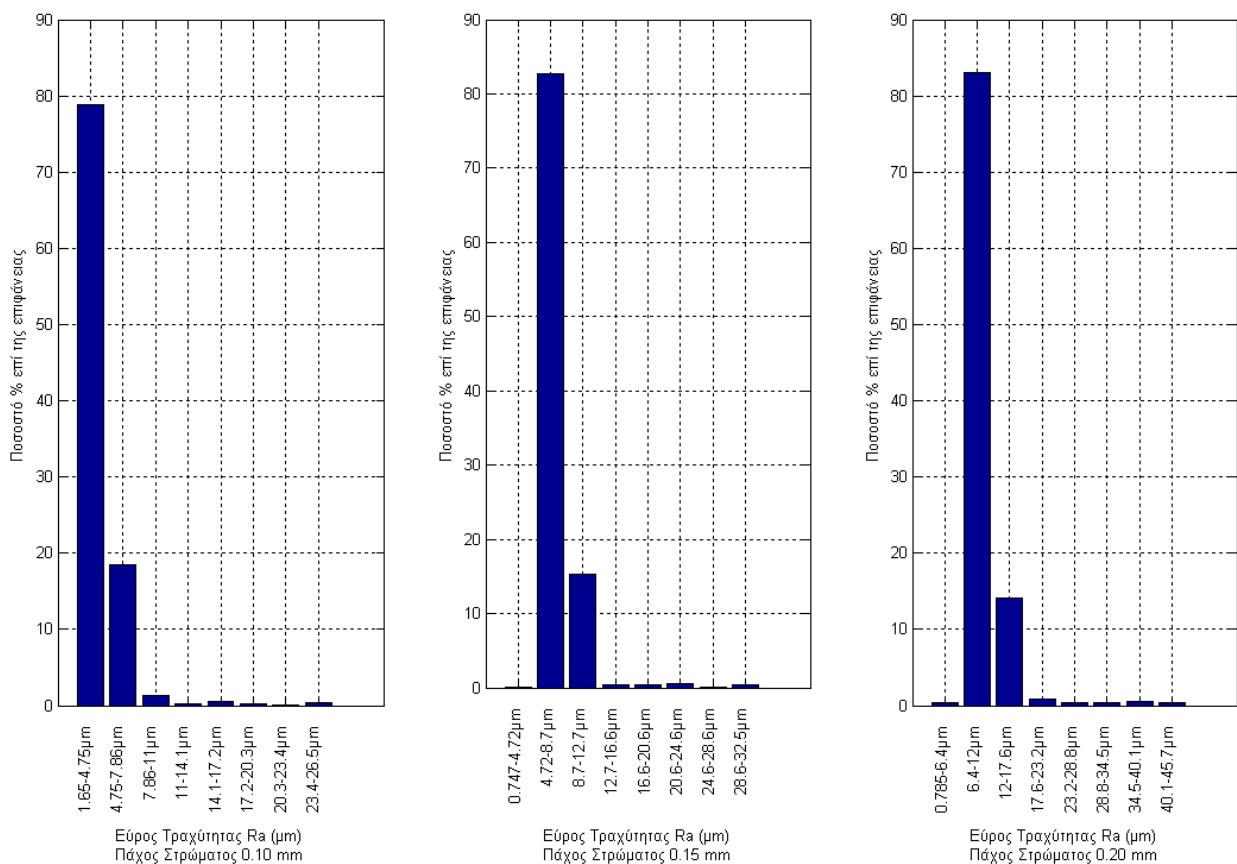
πλατφόρμα κατασκευής. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι όταν οι περισσότερες επιφάνειες του αντικειμένου είναι μεταξύ τους κάθετες, τότε ο βέλτιστος προσανατολισμός του αντικειμένου προκύπτει όταν προσανατολιστούν οι περισσότερες από αυτές τις επιφάνειες οριζόντια ως προς την πλατφόρμα κατασκευής και κατά συνέπεια οι υπόλοιπες κάθετες σε αυτήν.

Στο Σχήμα 5-13 παρουσιάζεται το μέτωπο κατά Παρέτο το οποίο δημιουργήθηκε με χρήση του αρθρώματος λογισμικού το οποίο υλοποιεί τον αλγόριθμο NSGA II. Το μέτωπο αποτελείται από ένα μικρό αριθμό μη κυριαρχούμενων λύσεων γεγονός το οποίο οφείλεται πιθανότατα στην γεωμετρική απλότητα του υπό εξέταση αντικειμένου. Παρατηρείται επίσης ότι η γεωμετρική μορφή του μετώπου είναι μη κυρτής μορφής. Στο γεγονός αυτό οφείλεται μάλλον και η επιλογή του συγκεκριμένου βέλτιστου προσανατολισμού (764.3min/8.9μm) με την μέθοδο της ΣΑΣ. Συγκεκριμένα, η μέθοδος της ΣΑΣ παρουσιάζει την ιδιομορφία [107] να μην ευνοεί την εξερεύνηση βέλτιστων κατά Παρέτο λύσεων οι οποίες ανήκουν στις μη κυρτές περιοχές του μετώπου ανεξαρτήτως των επιλεγθέντων διανυσμάτων συντελεστών βαρύτητας. Έτσι και στην συγκεκριμένη περίπτωση προκρίθηκε η λύση S (764.3 min/8.9μm) η οποία δεν ανήκει καθαρά στο μη κυρτό μέρος του μετώπου.



Σχήμα 5-13 Μέτωπο κατά Παρέτο απλού αντικείμενου.

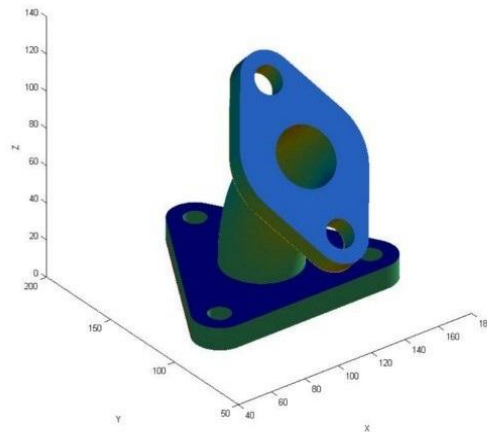
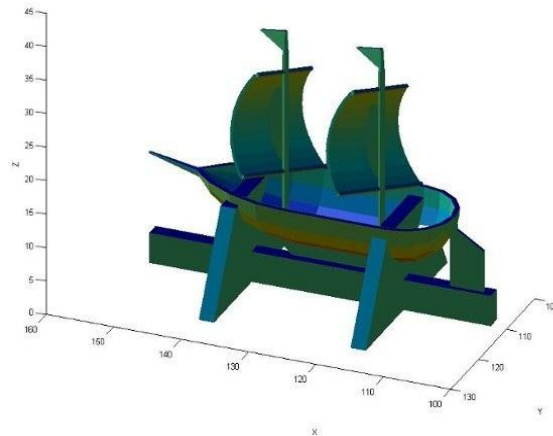
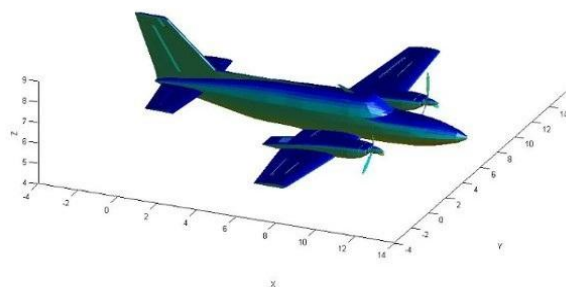
Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι το συγκεκριμένο μέτωπο χωρίζεται σε δύο ομάδες λύσεων. Στην πρώτη ομάδα περιέχονται συγκεντρωμένες οι λύσεις εκείνες που ευνοούν περισσότερο την κατασκευαστική ποιότητα και οι οποίες διαφοροποιούνται ελάχιστα μεταξύ τους καθώς βρίσκονται συγκεντρωμένες σε μια μικρή περιοχή. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται μόνο από μια λύση η οποία παρουσιάζει τον ελάχιστο δυνατό κατασκευαστικό χρόνο χωρίς ιδιαίτερη αύξηση της μέσης τραχύτητας, λύση η οποία προκρίθηκε ως βέλτιστη και με τη μέθοδο της ΣΑΣ. Η αύξηση της τιμής της μέσης τραχύτητας κατά μία μονάδα μπορεί να φαίνεται εξαιρετικά μικρή, ωστόσο συγκρίνοντας την κατανομή της τραχύτητας (βλ. Σχήμα 5-14) μιας εκ των λύσεων της πρώτης ομάδας (πχ 1140min/7,8μm) παρατηρείται ότι η μείωση αυτή έχει προκύψει από τη συγκέντρωση του μεγαλύτερου ποσοστού των επιφανειών σε δυο μεγάλα υποδιαστήματα της τραχύτητας ενώ στην βέλτιστη λύση οι τιμές είναι περισσότερο διασπαρμένες (βλ. Σχήμα 5-12). Η συγκέντρωση αυτή οφείλεται στον προσανατολισμό του μεγάλου κυλινδρικού μορφολογικού χαρακτηριστικού παράλληλα με τον άξονα κατασκευής. Συνεπώς, ο χρήστης θα πρέπει να πάρει την τελική απόφαση επιλέγοντας είτε ταχύτερο χρόνο κατασκευής είτε λιγότερη κατασκευαστική απόκλιση για το μεγάλο κυλινδρικό χαρακτηριστικό.



Σχήμα 5-14 Ιστόγραμμα κατανομής μέσης τραχύτητας απλού αντικείμενου από μέτωπο Παρέτο.

Περιπτώσεις αντικειμένων αυξημένης γεωμετρικής πολυπλοκότητας.

Εκτός από το απλό γεωμετρικά αντικείμενο της προηγούμενης περίπτωσης οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δοκιμάστηκαν και σε τρία άλλα αντικείμενα αυξημένης γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Το αντικείμενα αυτά είναι ένας καμπύλος αγωγός 45° (με τριγωνική και ρομβοειδή φλάντζα) (βλ. Σχήμα 5-15 α), ένα μοντέλο πλοίου (βλ. Σχήμα 5-15 β) και ένα μοντέλο ελικοφόρου αεροσκάφους (βλ. Σχήμα 5-15 γ).

**(α) Φλάτζα****(β) Μοντέλο Πλοίου****(γ) Μοντέλο Αεροσκάφους****Σχήμα 5-15 Πολυεδρική απεικόνιση αντικειμένων υπό μελέτη.**

Η γεωμετρία τους είναι αρκετά πιο περίπλοκη έναντι του αντικειμένου της αρχικής μελέτης περίπτωσης, διαθέτοντας επίπεδες επιφάνειες, μικρές οπές, έναν κοίλο καμπύλο αγωγό καθώς και επιφάνειες ελεύθερης μορφής (freeform). Οι διαστάσεις του καμπύλου αγωγού είναι 118X139X123 mm ενώ η αντίστοιχη πολυεδρική του απεικόνιση STL αποτελείται από 4.624 τρίγωνα. Αντίστοιχα, οι διαστάσεις του μοντέλου του πλοίου είναι 51,14X29,2X37,8 mm και η πολυεδρική του απεικόνιση STL αποτελείται από 828 τρίγωνα, ενώ το μοντέλο του αεροσκάφους έχει διαστάσεις 86,5X93X21,5 mm και η πολυεδρική του απεικόνιση STL αποτελείται από 7.446 τρίγωνα. Επισημαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος του μοντέλου του αεροσκάφους αποτελείται από επιφάνειες ελεύθερης μορφής. Το συγκεκριμένο αντικείμενο παρουσιάζει συνεπώς μεγάλο ενδιαφέρον καθώς δεν υπάρχουν σαφείς εμπειρικοί κανόνες οι οποίοι να βελτιστοποιούν τον προσανατολισμό κατασκευής του.

Όπως και στην περίπτωση του απλού γεωμετρικού αντικειμένου έτσι και για τα τρία υπό εξέταση αντικείμενα εξετάστηκε τόσο η μέθοδος της ΣΑΣ όσο και η διαδικασία εύρεσης των αντίστοιχων μετώπων κατά Παρέτο. Για κάθε ένα από τα υπό εξέταση αντικείμενα πραγματοποιήθηκαν αρχικά τέσσερις προσομοιώσεις προκειμένου να ευρεθούν οι "ακραίοι" προσανατολισμοί, οι οποίοι αντιστοιχούν στους προσανατολισμούς που μεγιστοποιούν και ελαχιστοποιούν τον χρόνο και την ποιότητα τους κατασκευής. Για τις περιπτώσεις του καμπύλου αγωγού και του μοντέλου του πλοίου, ορίστηκε ένας επιπλέον κατασκευαστικός περιορισμός, σύμφωνα με τον οποίο απορρίπτονταν προσανατολισμοί για τους οποίους περισσότερο από το 5% της επιφάνειας του αντικειμένου παρουσίαζαν μέση τραχύτητα άνω των 25 μm .

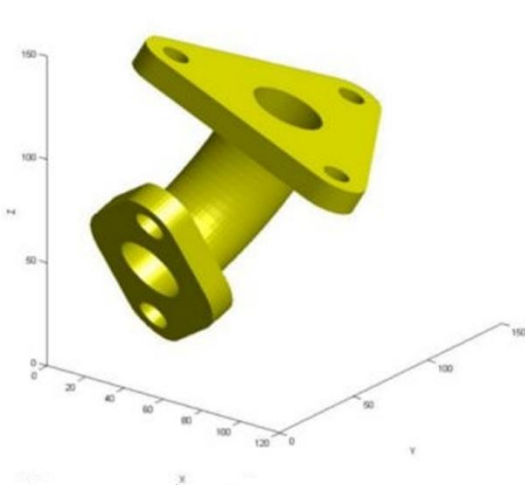
Τα αποτελέσματα των τεσσάρων προσομοιώσεων για την εξεύρεση των χειρότερων και καλύτερων κατασκευαστικών προσανατολισμών από άποψη του χρόνου κατασκευής και της τραχύτητας των επιφανειών του καμπύλου αγωγού παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-16. Οι αντίστοιχοι υπολογιστικοί χρόνοι καθώς και οι τιμές του χρόνου κατασκευής και της τραχύτητας των επιφανειών κάθε προσανατολισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το μοντέλο του πλοίου καθώς και οι ισομετρικές όψεις των επιλεχθέντων βέλτιστων προσανατολισμών παρουσιάζονται στο Πίνακα 5-3 και στον Σχήμα 5-17.

Προσομοίωση	Χρόνος CPU (sec)	Τιμές Κριτηρίων Βελτιστοποίησης
1 ^η Μεγιστοποίηση FabTime	600	686,8 min
2 ^η Ελαχιστοποίηση FabTime	388	514,3 min
3 ^η Μεγιστοποίηση Ra	456	14,05 μm
4 ^η Ελαχιστοποίηση Ra	586	9,10 μm
FabTime (0,5) / Ra (0,5)	558	582,3 min / 9,35 μm

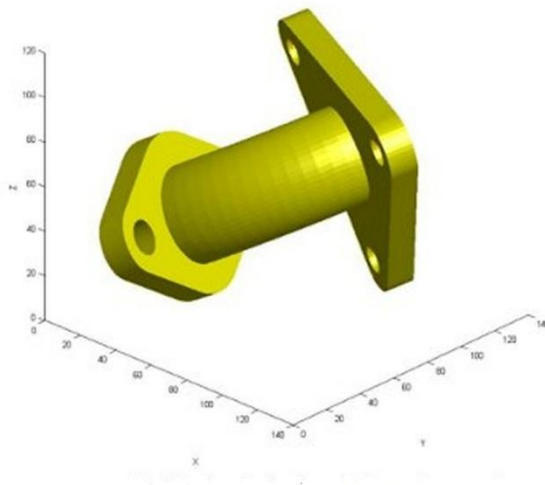
Πίνακας 5-2 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης καμπύλου αγωγού.

Προσομοίωση	Χρόνος CPU (sec)	Τιμές Κριτηρίων Βελτιστοποίησης
1 ^η Μεγιστοποίηση FabTime	198	199,7 min
2 ^η Ελαχιστοποίηση FabTime	133	105,4 min
3 ^η Μεγιστοποίηση Ra	73	14,49 μm
4 ^η Ελαχιστοποίηση Ra	33,43	9,70 μm
FabTime (0,2) / Ra (0,8)	83,33	110 min / 10,3 μm
FabTime (0,5) / Ra (0,5)	83,33	110 min / 10,3 μm
FabTime (0,8) / Ra (0,2)	90	138 min / 9,8 μm

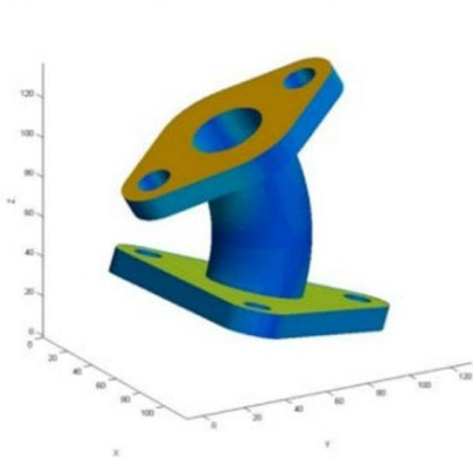
Πίνακας 5-3 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης μοντέλου πλοίου.



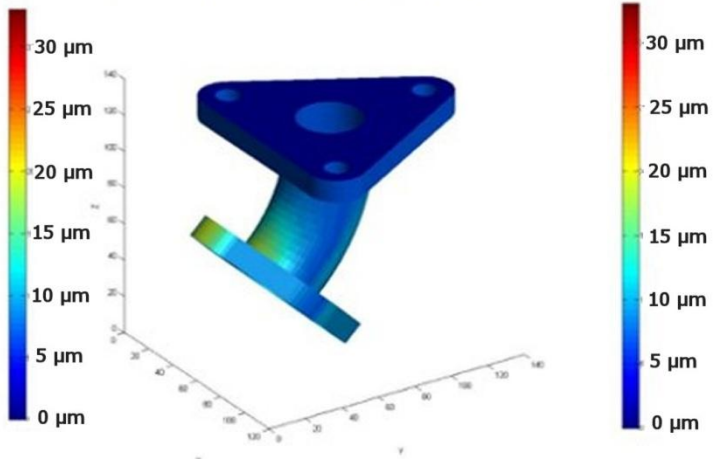
(α) Χείριστος προσανατολισμός / Κριτήριο: Κόστος



(β) Βέλτιστος προσανατολισμός / Κριτήριο: Κόστος

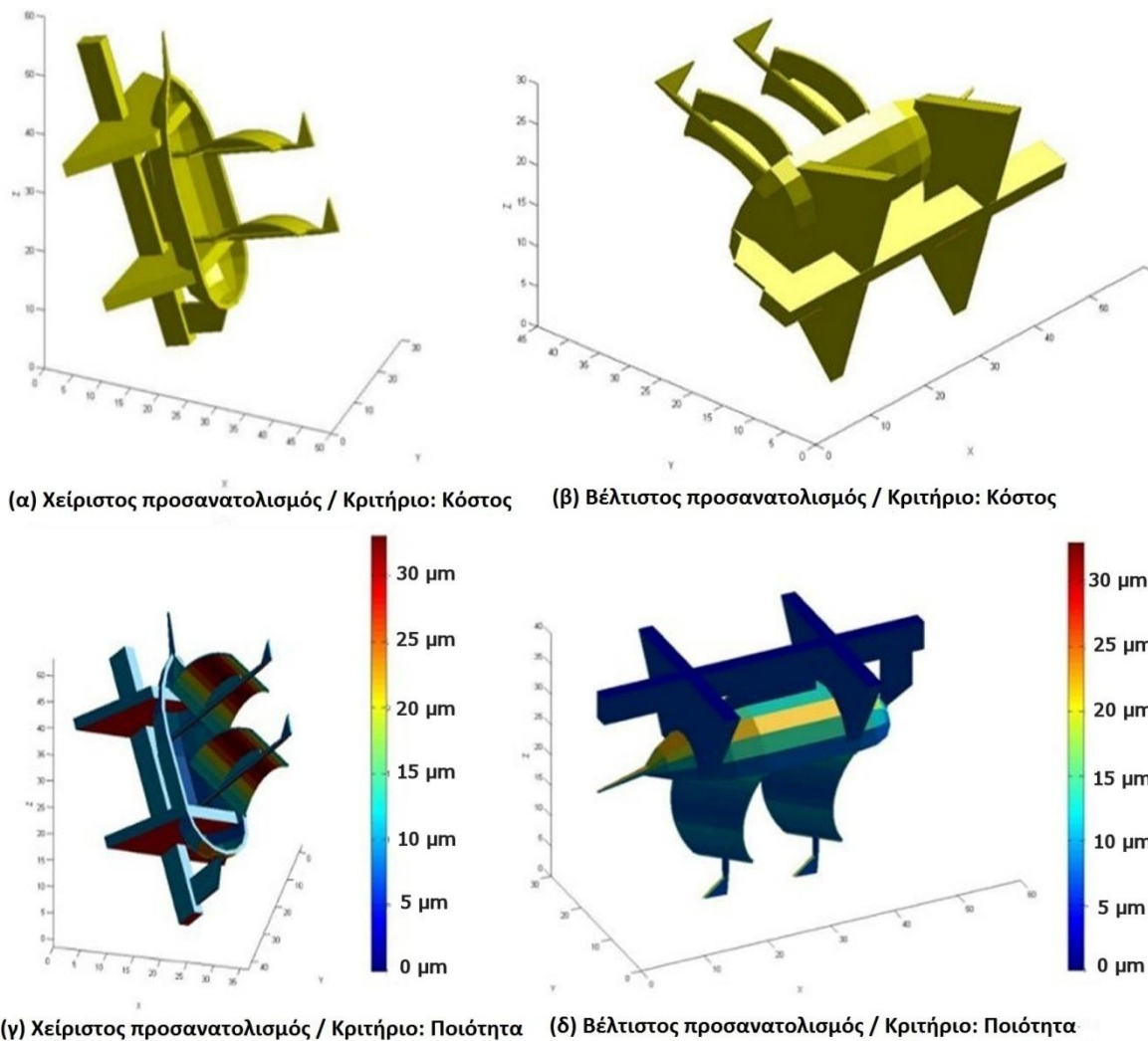


(γ) Χείριστος προσανατολισμός / Κριτήριο: Ποιότητα



(δ) Βέλτιστος προσανατολισμός / Κριτήριο: Ποιότητα

Σχήμα 5-16 Βέλτιστοι και χείριστοι προσανατολισμοί καμπύλου αγωγού.



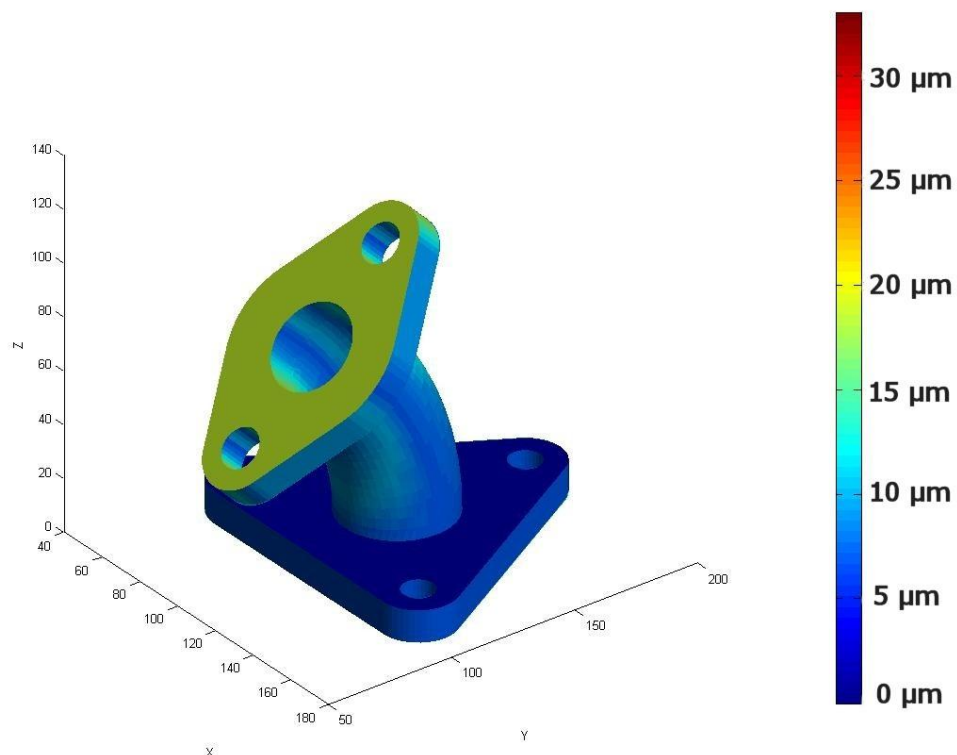
Σχήμα 5-17 Βέλτιστοι και χείριστοι προσανατολισμοί μοντέλου πλοίου.

Εξετάζοντας τους προσανατολισμούς μέγιστου χρόνου των δύο αυτών αντικειμένων παρατηρείται ότι η μέθοδος της ΣΑΣ οδηγεί σε προσανατολισμούς οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένο ύψος κατασκευής, καθώς και αυξημένη ανάγκη υποστήριξης. Αντίθετα όταν στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου του χρόνου τότε επιλέγονται προσανατολισμοί οι οποίοι ελαχιστοποιούν την έκταση της απαραίτητης δομής υποστήριξης καθώς και το ύψος του αντικειμένου προς κατασκευή και, συνεπώς, τον αριθμό των απαραίτητων στρωμάτων. Έτσι ενώ το 13,26% της επιφάνειας του καμπύλου αγωγού και το 17,50% της επιφάνειας του μοντέλου του πλοίου χρήζουν στήριξης όταν επιλέγεται προσανατολισμός ο οποίος μεγιστοποιεί το χρόνο κατασκευής, μόνο το 5,18% και 11,5% της συνολικής επιφάνειας του αγωγού και του μοντέλου αντίστοιχα, πρέπει να υποστηριχθούν στην περίπτωση της ελαχιστοποίησης.

Αντίθετα, όταν η ποιότητα των επιφανειών είναι το κύριο κριτήριο της βελτιστοποίησης, η μέθοδος της ΣΑΣ τείνει να τοποθετήσει τα αντικείμενα σε τέτοιο προσανατολισμό έτσι ώστε οι περισσότερες

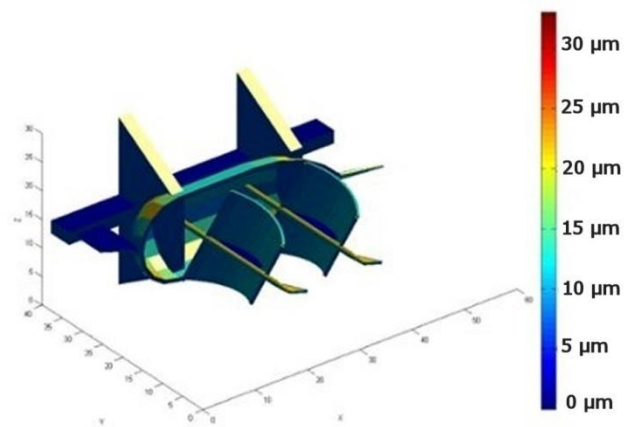
από τις επιφάνειες από τις οποίες αποτελούνται να έχουν κλίση η οποία να αντιστοιχεί σε σχετικά μικρές τιμές μέσης τραχύτητας, δηλαδή, είτε σχεδόν κάθετα είτε παράλληλα προς την πλατφόρμα κατασκευής. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί επίσης στο συμπέρασμα ότι οι επίπεδες επιφάνειες είναι αυτές που καθορίζουν την επιλογή του βέλτιστου προσανατολισμού, καθώς οι επιφάνειες ελεύθερης μορφής παρουσιάζουν ούτως ή άλλως αυξημένες τιμές μέσης τραχύτητας, ανεξάρτητα από τον επιλεγμένο προσανατολισμό του αντικειμένου.

Έχοντας υπολογίσει τους τέσσερις ακραίους προσανατολισμούς για τα δύο υπό εξέταση αντικείμενα, πραγματοποιήθηκε η τελική προσομοίωση λαμβάνοντας υπόψη τόσο το κριτήριο της ποιότητας των επιφανειών όσο και το κριτήριο του κατασκευαστικού χρόνου. Για την περίπτωση του καμπύλου αγωγού χρησιμοποιήθηκε ένα ισοβαρές διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας. Ο βελτιστοποιημένος προσανατολισμός για αυτό το διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-19, ενώ οι αντίστοιχοι υπολογιστικοί χρόνοι και οι τιμές των κριτηρίων της βέλτιστης λύσης δίνονται στον Πίνακα 5-2. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ύψος (διάσταση κατά τον άξονα Z) του προσανατολισμού που ελαχιστοποιεί τη μέση τραχύτητα των επιφανειών (βλ. Σχήμα 5-16 δ) είναι μόνο κατά 15 χιλιοστά υψηλότερο από το ύψος του προσανατολισμού που αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση του χρόνου κατασκευής (βλ. Σχήμα 5-16 β), αναμένεται η βελτιστοποίηση του προσανατολισμού ως προς τα δυο κριτήρια να οδηγήσει στην εύρεση ενός παρόμοιου προσανατολισμού. Πράγματι, ο βέλτιστος προσανατολισμός που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-18 διαθέτει σχεδόν την ίδια ποιότητα επιφάνειας (9,35 μm) με αυτό του Σχήματος 5-16 δ και ελαφρώς υψηλότερο χρόνο κατασκευής (582,3 min) σε σχέση με το Σχήμα 5-16 β.

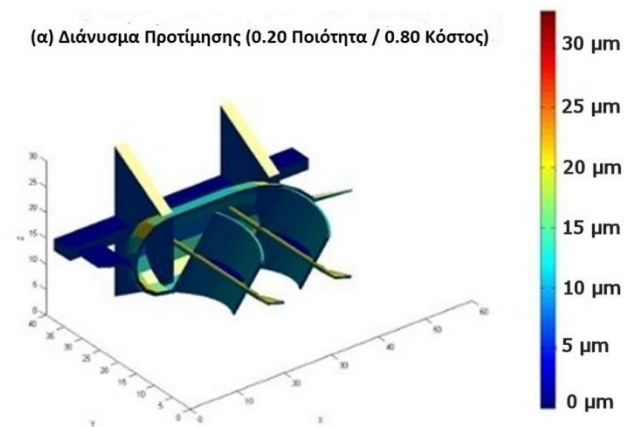


Σχήμα 5-18 Βέλτιστος προσανατολισμός καμπύλου αγωγού (0,5 κρτ. Χρόνου/ 0,5 κρτ.Ra).

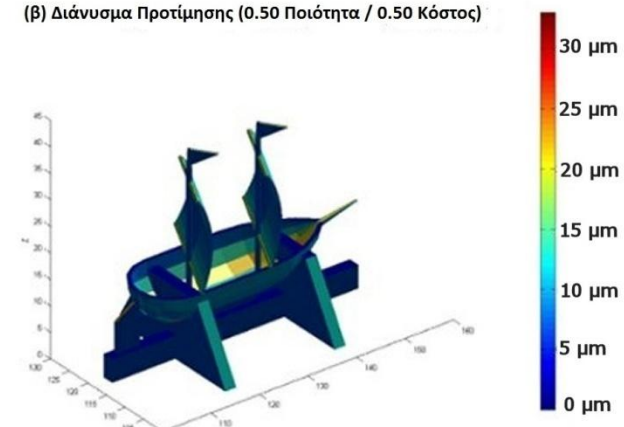
Στην περίπτωση του μοντέλου του πλοίου η βελτιστοποίηση του προσανατολισμού κατασκευής πραγματοποιήθηκε για τρία διαφορετικά διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας. Οι βελτιστοποιημένοι προσανατολισμοί για κάθε ξεχωριστό διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-19, ενώ οι αντίστοιχοι υπολογιστικοί χρόνοι και οι τιμές των κριτηρίων των βέλτιστων λύσεων ανά διάνυσμα δίνονται στον Πίνακα 5-3. Στο πρώτο διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας, αποδίδεται μεγαλύτερη βαρύτητα στο κριτήριο του χρόνου κατασκευής το οποίο διαθέτει συντελεστή βαρύτητας 0,8 ενώ στο κριτήριο της ποιότητας αποδίδεται συντελεστής 0,2.



(α) Διάνυσμα Προτίμησης (0.20 Ποιότητα / 0.80 Κόστος)



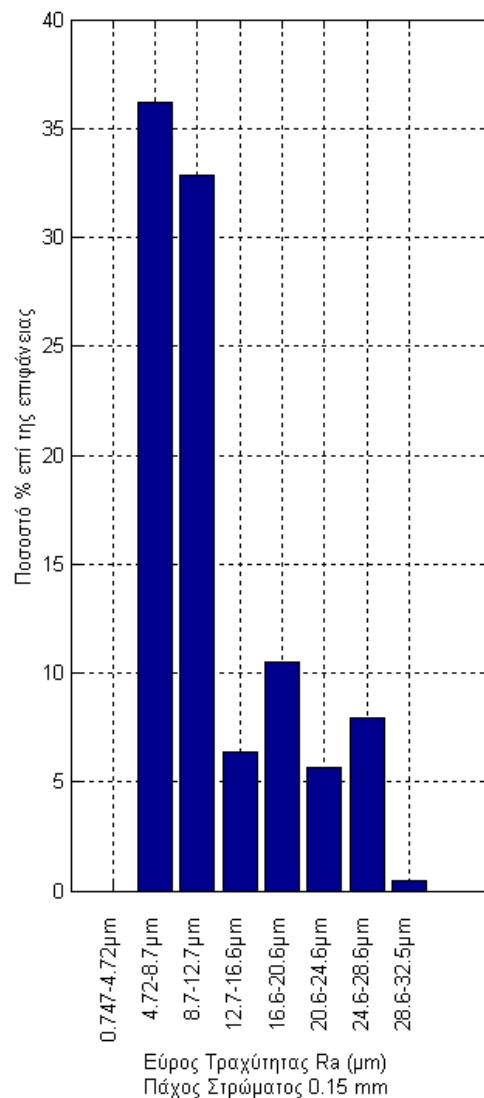
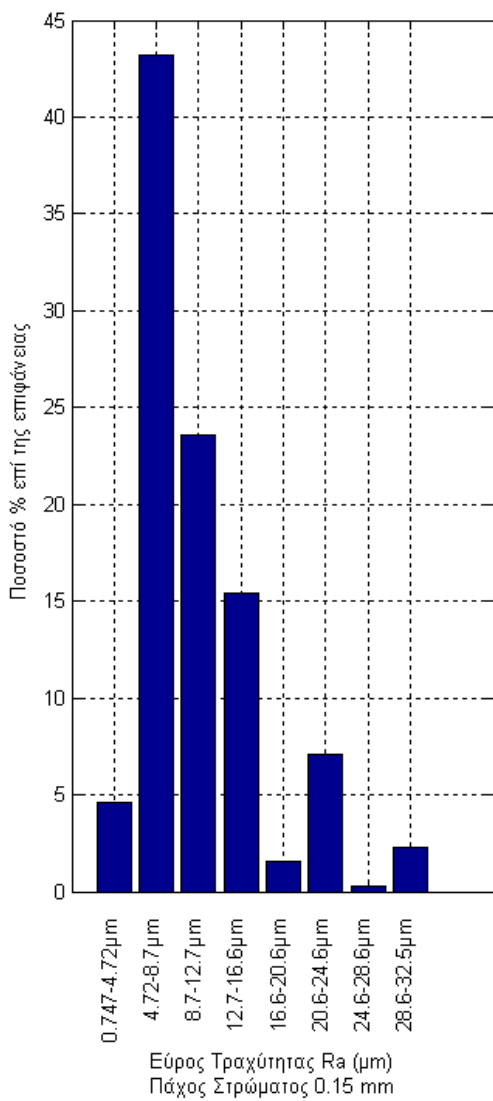
(β) Διάνυσμα Προτίμησης (0.50 Ποιότητα / 0.50 Κόστος)



(γ) Διάνυσμα Προτίμησης (0.80 Ποιότητα / 0.20 Κόστος)

Σχήμα 5-19 Βέλτιστοι προσανατολισμοί μοντέλου πλοίου.

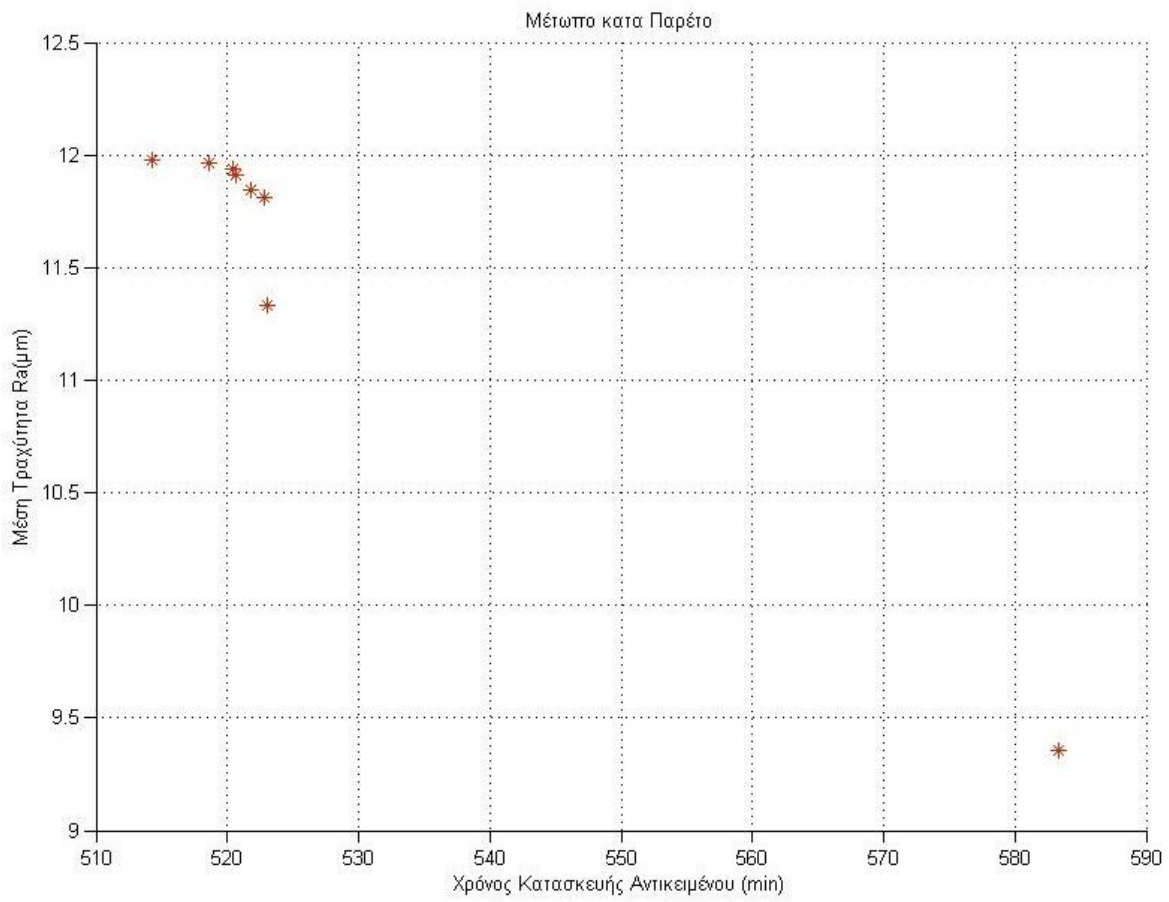
Ο σχετικός βέλτιστος προσανατολισμός είναι αρκετά παρόμοιος με τον "ακραίο" προσανατολισμό που αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής. Ωστόσο, αν και σε όρους κατασκευαστικού χρόνου η διαφορά των δυο προσανατολισμών είναι αμελητέα, η εξέταση των κατανομών της τραχύτητας για τους δύο προσανατολισμούς (βλ. Σχήμα 5-20) δείχνει ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Η βασικότερη όλων είναι ότι περίπου το 9% της επιφάνειας του προσανατολισμού που ελαχιστοποιεί τον κατασκευαστικό χρόνο ξεπερνά το όριο της τραχύτητας των 25 μm . Συνεπώς, ο αλγόριθμος σωστά προκρίνει τον προσανατολισμό του Σχήματος 5-19 α καθώς ικανοποιεί το κατασκευαστικό περιορισμό για το ποσοστό επιφανειών υψηλής τραχύτητας (των 25 μm) ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα και τον κατασκευαστικό χρόνο.



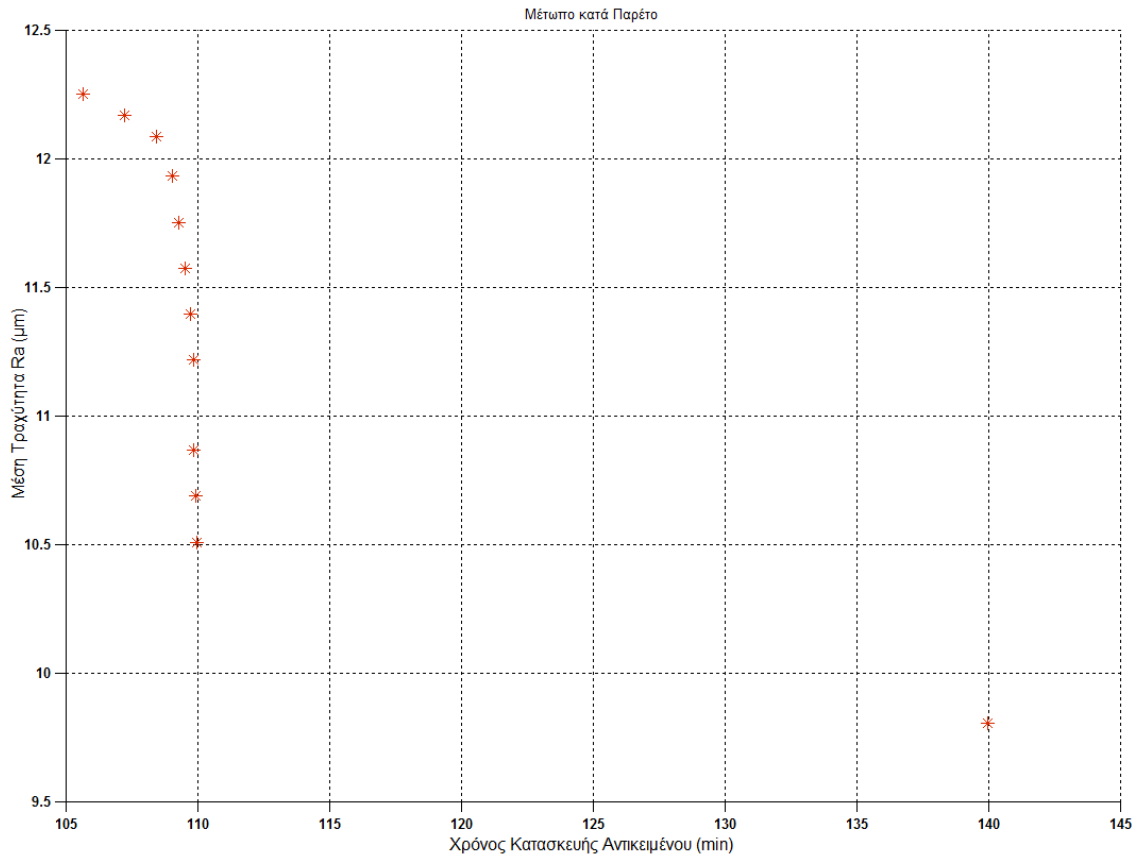
Σχήμα 5-20 Ιστογράμματα κατανομής μέσης τραχύτητας για το μοντέλο πλοίου.

Ο ίδιος προσανατολισμός φαίνεται να ικανοποιεί και το ισοβαρές διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας (ο συντελεστής βαρύτητας τέθηκε 0,5 και για τα δύο κριτήρια) παρέχοντας ικανοποιητικό χρόνο κατασκευής (110 min) και ποιότητα επιφανειών της τάξης των 10.30 μm (βλ. Σχήμα 5-19 β). Αντίθετα, όταν το διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας αποδίδει μεγαλύτερη σημασία προς το κριτήριο της ποιότητας των επιφανειών θέτοντας στον αντίστοιχο συντελεστή την τιμή 0,8, ο αλγόριθμος επέλεξε ως βέλτιστο έναν προσανατολισμό ο οποίος παρουσιάζει σχετικά χαμηλή τραχύτητα (9,8 μm), η οποία είναι πολύ κοντά στον ακραίο προσανατολισμό ελαχιστοποίησης της τραχύτητας, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζοντας και μεγαλύτερο χρόνο κατασκευής.

Στα Σχήματα 5-21 και 5-22 παρουσιάζονται τα μέτωπα κατά Παρέτο για τον καμπύλο αγωγό και το μοντέλο πλοίου αντίστοιχα, τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγόριθμου NSGA II. Και στις δυο περιπτώσεις παρατηρούμε ότι τα μέτωπα δεν είναι κυρτά, όπως ακριβώς συνέβη και με το μέτωπο του απλού γεωμετρικά αντικειμένου. Μάλιστα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όλοι οι βέλτιστοι προσανατολισμοί οι οποίοι προτάθηκαν από την μέθοδο της ΣΑΣ δεν ανήκουν στις κυρτές περιοχές των μετώπων. Τα μέτωπα επίσης παρατηρούμε ότι περιέχουν μεγαλύτερο αριθμό μη κυριαρχούμενων λύσεων γεγονός το οποίο πιθανότατα οφείλεται στην αυξημένη γεωμετρική πολυπλοκότητα των αντικειμένων. Ένα βασικό μειονέκτημα όλων των μετα-ευρετικών μεθοδολογιών δημιουργίας μετώπων κατά Παρέτο αποτελεί ο εκτεταμένος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται μέχρι να συγκλίνει ο πληθυσμός σε ένα μέτωπο, το οποίο να προσεγγίζει ικανοποιητικά το πραγματικό μέτωπο Παρέτο. Το συγκεκριμένο μειονέκτημα ενισχύεται όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι επίσης υπολογιστικά ακριβή, γεγονός το οποίο στο υφιστάμενο πρόβλημα εξαρτάται κυρίως από το πλήθος των τριγώνων από το οποίο αποτελείται το πολυεδρικό αρχείο STL, καθώς ο αριθμός τους καθορίζει και το πλήθος των υπολογισμών που απαιτούνται από την αντικειμενική συνάρτηση. Έτσι ενώ για το μοντέλο του πλοίου το οποίο αποτελείται μόνο από 828 τρίγωνα απαιτούνται περίπου 450 δευτερόλεπτα για να δημιουργηθεί το μέτωπο εκτελώντας την προσομοίωση για εκατό γενεές για τον καμπύλο αγωγό που αποτελείται από 7.446 τρίγωνα απαιτούνται κατά μέσο όρο 2688 δευτερόλεπτα.

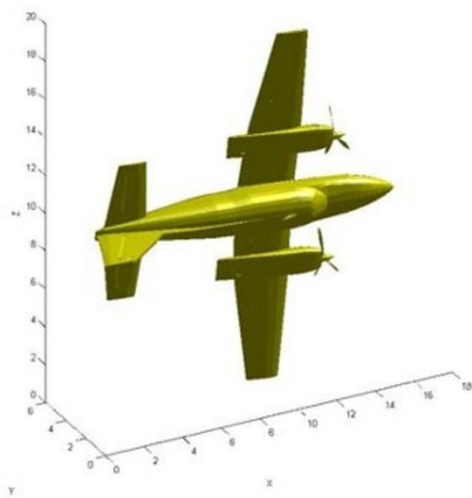


Σχήμα 5-21 Μέτωπο κατά Παρέτο καμπύλου αγωγού.

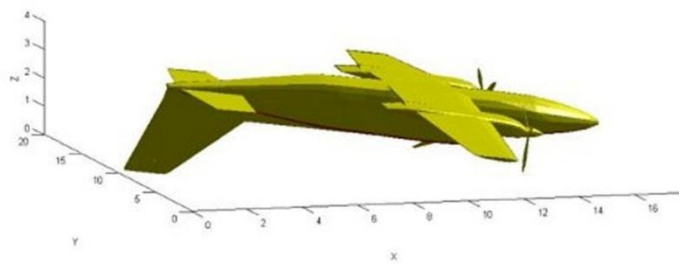


Σχήμα 5-22 Μέτωπο κατά Παρέτο μοντέλου πλοίου.

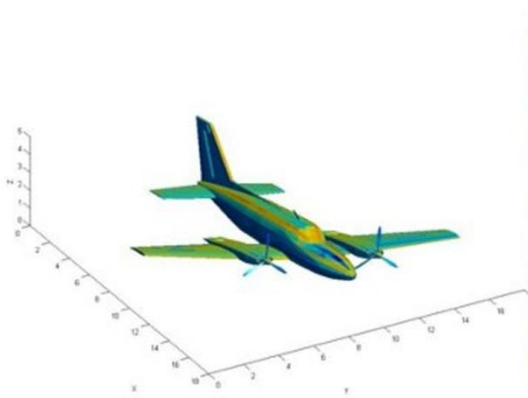
Όταν οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης εφαρμόστηκαν στο μοντέλο ελικοφόρου αεροσκάφους συμπεριφέρθηκαν με τρόπο παρόμοιο με αυτό των προηγούμενων δοκιμών. Έτσι, όταν εφαρμόστηκε η μέθοδος της ΣΑΣ για την ελαχιστοποίηση του χρόνου επεξεργασίας, επιλέχθηκε ο προσανατολισμός του Σχήματος 5-23 β, ο οποίος ελαχιστοποιεί το ύψος του αντικειμένου. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος προσανατολισμός απαιτεί εκτεταμένη δομή υποστήριξης, δεδομένου ότι περίπου το 15% της συνολικής επιφάνειας του αντικειμένου χρήζει υποστήριξης. Αντίθετα, όταν η ποιότητα των επιφανειών του αντικειμένου είναι το μοναδικό κριτήριο βελτιστοποίησης, η μέθοδος παρουσίασε την τάση να τοποθετήσει την άτρακτο του αεροσκάφους παράλληλα προς τον άξονα κατασκευής Z (βλ. Σχήμα 5-23 δ).



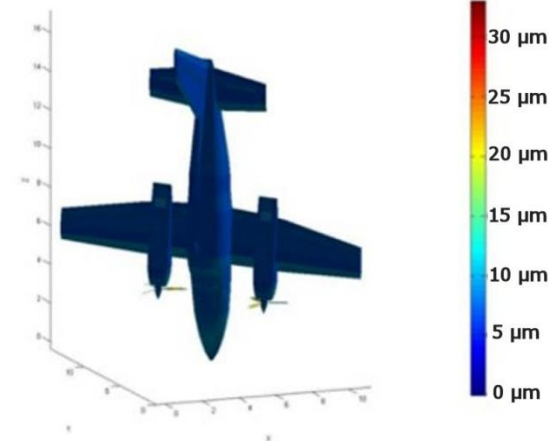
(α) Χείριστος προσανατολισμός / Κριτήριο: Κόστος



(β) Βέλτιστος προσανατολισμός / Κριτήριο: Κόστος



(γ) Χείριστος προσανατολισμός / Κριτήριο: Ποιότητα



(δ) Βέλτιστος προσανατολισμός / Κριτήριο: Ποιότητα

Σχήμα 5-23 Βέλτιστοι και χείριστοι προσανατολισμοί μοντέλου αεροσκάφους.

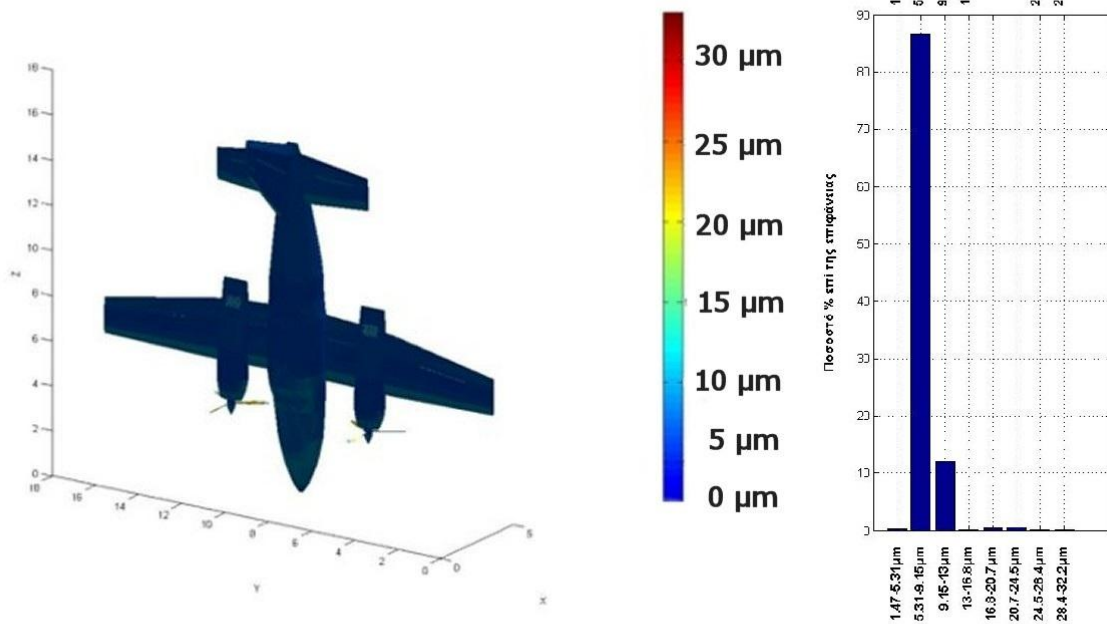
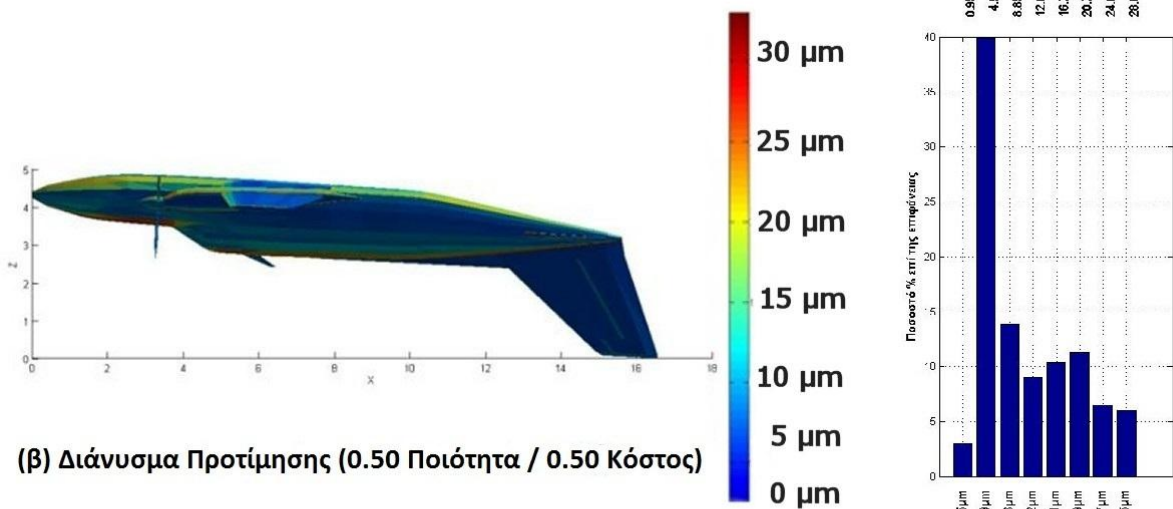
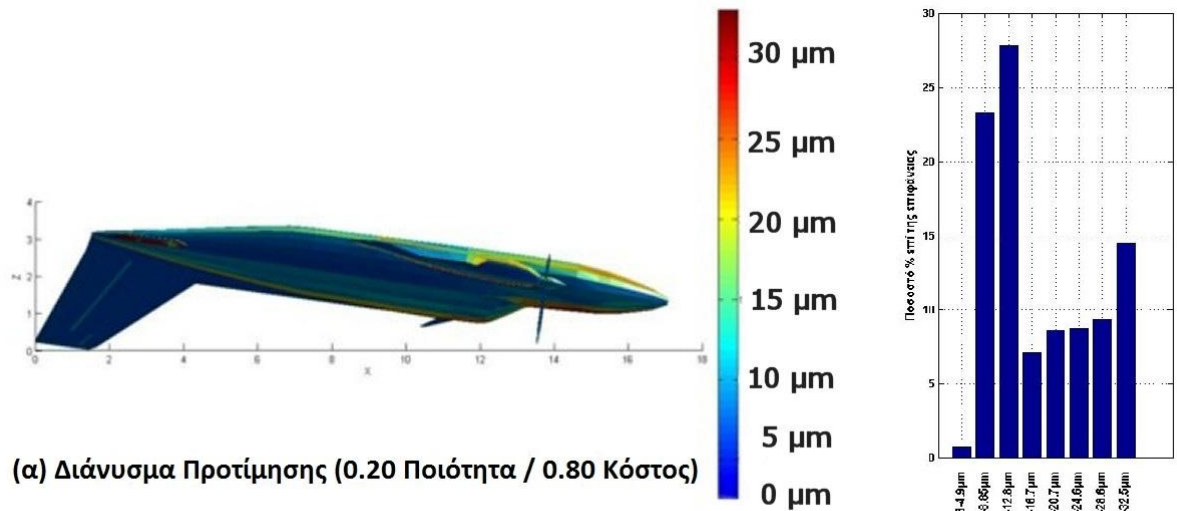
Οι υπολογιστικοί χρόνοι και οι βέλτιστες τιμές των κριτηρίων για τους τέσσερις ακραίους προσανατολισμούς του μοντέλου αεροσκάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4.

Προσομοίωση	Χρόνος CPU (sec)	Τιμές Κριτηρίων Βελτιστοποίησης
1 ^η Μεγιστοποίηση FabTime	1.000	365,97min
2 ^η Ελαχιστοποίηση FabTime	1.300	79,35 min
3 ^η Μεγιστοποίηση Ra	1.271	18,69 μm
4 ^η Ελαχιστοποίηση Ra	851	7,87 μm
FabTime (0,2) / Ra (0,8)	1.380	73,5 min / 16,5 μm
FabTime (0,5) / Ra (0,5)	1.016	105,1 min / 14,0 μm
FabTime (0,8) / Ra (0,2)	609	316,5 min / 7,87 μm

Πίνακας 5-4 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης μοντέλου αεροσκάφους.

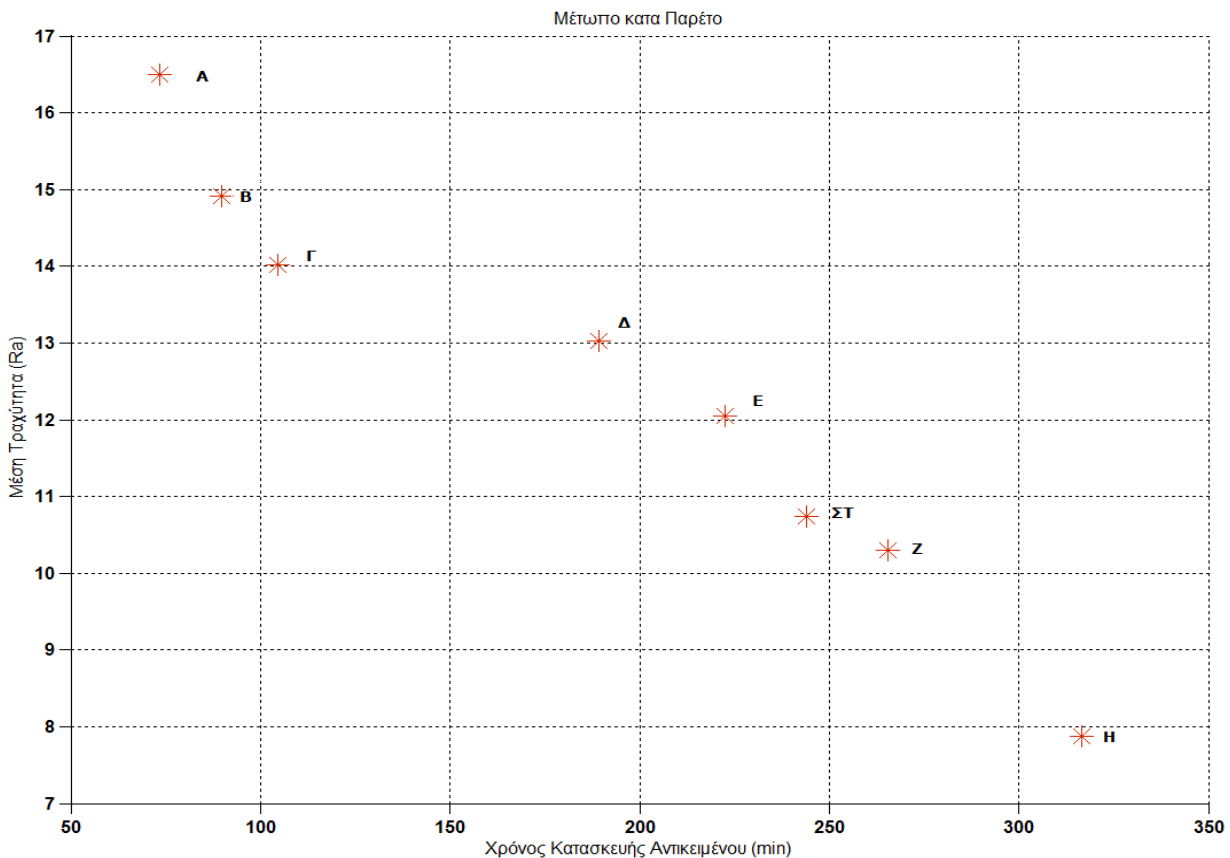
Όπως και στην περίπτωση του μοντέλου του πλοίου έτσι και σε αυτήν την περίπτωση η βελτιστοποίηση του προσανατολισμού κατασκευής πραγματοποιήθηκε για τρία διαφορετικά διανύσματα συντελεστών βαρύτητας. Οι βέλτιστοι προσανατολισμοί για κάθε ξεχωριστό διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-24, ενώ οι αντίστοιχοι υπολογιστικοί χρόνοι και οι τιμές των κριτηρίων των βέλτιστων λύσεων ανά διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας δίνονται στον Πίνακα 5-4. Έτσι στο πρώτο διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας, ο συντελεστής βαρύτητας για το κριτήριο του χρόνου τέθηκε στο 0,8 ενώ για το κριτήριο της ποιότητας στο 0,2. Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης του για αυτό το διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας είναι η τοποθέτηση του αντικειμένου έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό ύψος του αντικειμένου (βλ. Σχήμα 5-24 α).

Σε αυτόν τον προσανατολισμό η μέση τραχύτητα των επιφανειών του αντικειμένου υπολογίζεται σε 16,5 μm, ενώ ο αντίστοιχος χρόνος κατασκευής ανέρχεται στα 73,5 min. Στην περίπτωση του ισοβαρούς διανύσματος συντελεστών βαρύτητας, η μέθοδος οδηγήθηκε στη σύγκλιση προς τον προσανατολισμό του Σχήματος 5-24 β. Έναντι του προσανατολισμού του Σχήματος 5-24 α, αυτός ο προσανατολισμός παρουσιάζεται βελτιωμένος όσο αφορά στην ποιότητα των επιφανειών του, καθώς η μέση τραχύτητα ανέρχεται πλέον στα 14 μm. Ωστόσο, αυτή η βελτίωση οδηγεί και σε αύξηση του χρόνου κατασκευής ο οποίος υπολογίζεται τώρα στα 105,1 min. Τέλος, όταν το διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας αποδίδει μεγαλύτερη προτίμηση προς το κριτήριο της ποιότητας των επιφανειών θέτοντας στον αντίστοιχα συντελεστή την τιμή 0.8 ο προσανατολισμός που επιλέγεται είναι παρόμοιος με τον προσανατολισμό που αντιστοιχεί στην περίπτωση της ελαχιστοποίησης της τραχύτητας (βλ. Σχήμα 5-23 δ). Ο συγκεκριμένος προσανατολισμός παρουσιάζει μέση τραχύτητα της τάξης των 7,87 μm ενώ συνοδεύεται και από αύξηση του χρόνου κατασκευής στα 316,5 min.



Έυρος Τραχύτητας Ra Πάχος Στρώματος 0.15 μm

Σχήμα 5-24 Βέλτιστοι προσανατολισμοί και ιστογράμματα μέσης τραχύτητας για το μοντέλο αεροσκάφους.

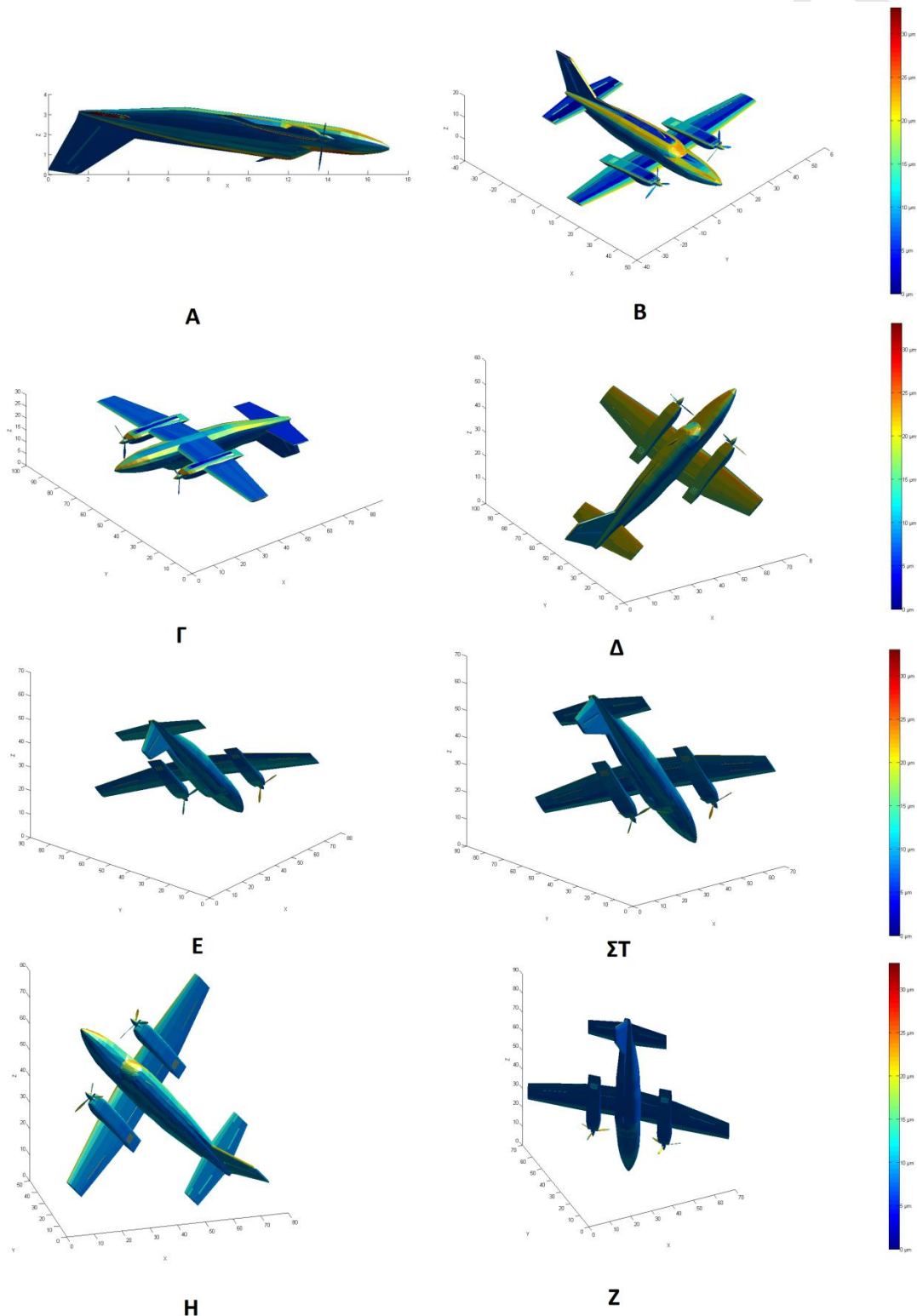


Σχήμα 5-25 Μέτωπο κατά Παρέτο μοντέλου αεροσκάφους.

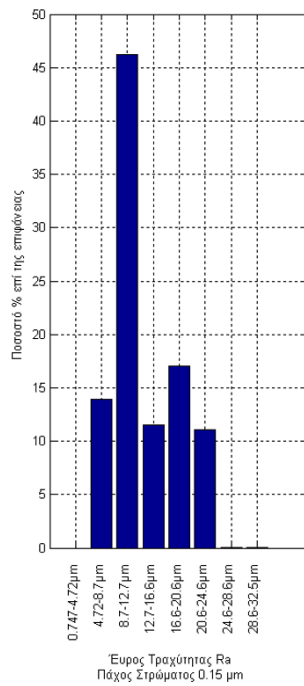
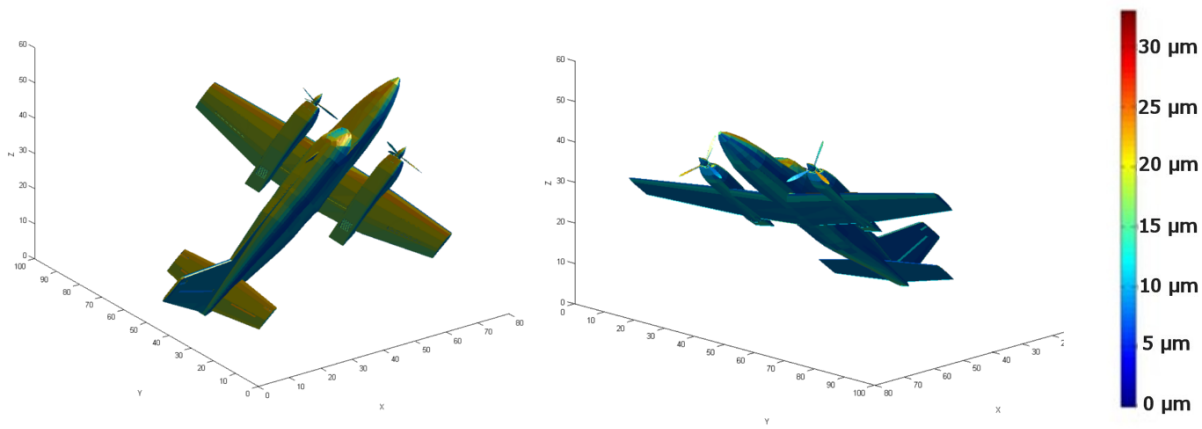
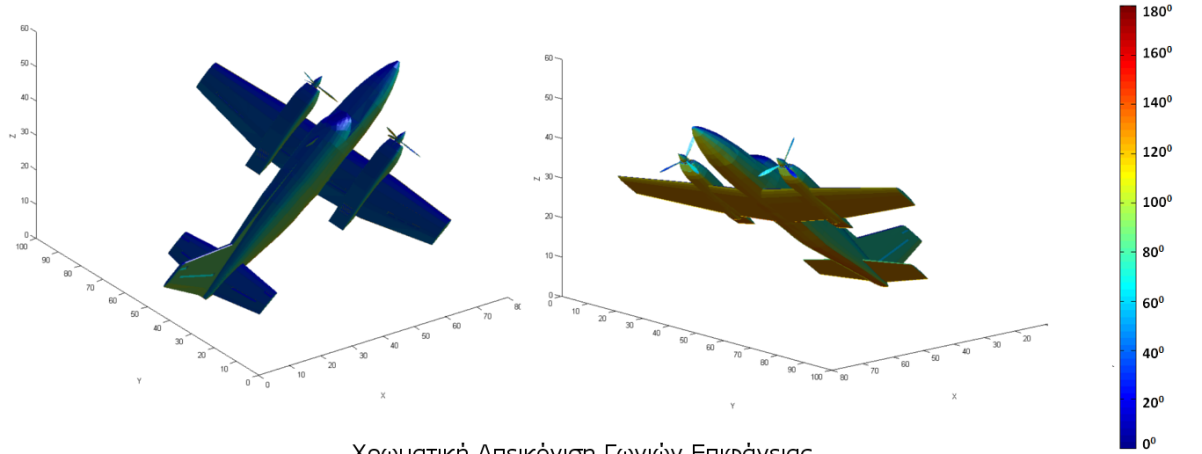
Τέλος το μέτωπο κατά Παρέτο που υπολογίστηκε για την περίπτωση αυτή καθώς και όλοι οι δυνατοί προσανατολισμοί για το αεροσκάφος που προκύπτουν από το μέτωπο παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-26 και 5-27 αντίστοιχα. Στο συγκριμένο μέτωπο παρατηρείται ότι υπάρχουν και οι τρεις προσανατολισμοί οι οποίοι υπολογίστηκαν από τη μέθοδο της ΣΑΣ ως βέλτιστοι (A, Γ, Η) για τα τρία διανύσματα προτίμησης. Μάλιστα στην περίπτωση του ισοβαρούς διανύσματος προτίμησης παρατηρούμε ότι η μέθοδος της ΣΑΣ σωστά διακρίνει τη λύση Γ ως προτιμητέα μεταξύ των ετέρων γειτονικών λύσεων, καθώς αυτή παρουσιάζει μειωμένο χρόνο κατασκευής κατά 85 min (με ταυτόχρονη αύξηση της μέσης τραχύτητας κατά $\sim 1 \mu\text{m}$) σε σχέση με την λύση Δ και μειωμένη μέση τραχύτητα κατά $\sim 1 \mu\text{m}$ (με ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου κατασκευής κατά 15 min) σε σχέση με τη λύση Β.

Εξετάζοντας τους προσανατολισμούς Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ και Η γίνεται αντιληπτό ότι αποτελούν ενδιάμεσους «συμβιβασμούς» μεταξύ των ακραίων προσανατολισμών του μετώπου οι οποίοι αντιστοιχούν στον ελάχιστο χρόνο κατασκευής (προσανατολισμός Α) και στην ελάχιστη μέση τραχύτητα (προσανατολισμός Η). Εξετάζοντας την κατανομή της τραχύτητας καθώς και των γωνιών επιφάνειας για κάθε έναν από αυτούς τους προσανατολισμούς παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος προσπαθεί να διατάξει τις επιφάνειες του αεροσκάφους ώστε το μεγαλύτερο ποσοστό να ανήκει στο εύρος των γωνιών που παρουσιάζουν σχετικά μικρές τιμές τραχύτητας. Ενδεικτικά στο Σχήμα 5-28 παρουσιάζεται χρωματικά η κατανομή τόσο των γωνιών επιφάνειας όσο και η κατανομή της

τραχύτητας του προσανατολισμού Δ. Εξετάζοντας τη χρωματική απεικόνιση των γωνιών επιφάνειας διαπιστώνεται ότι αυτές ανήκουν ως προς το πλείστον στα διαστήματα 0° - 20° , 80° - 90° (άνω και πλάγιες επιφάνειες) ή 130° - 140° (κάτω επιφάνειες), τα οποία και αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές τραχύτητας. Επίσης ο επιλεγθείς προσανατολισμός δεν χρήζει εκτεταμένης δομής υποστήριξης καθώς μόνο το 3.6% της επιφάνειας του χρειάζεται στηρίγματα.



Σχήμα 5-26 Προσανατολισμοί σύμφωνα με το μέτωπο κατά Παρέτο.



Ιστόγραμμα Κατανομής Τραχύτητας

Σχήμα 5-27 Χρωματική απεικόνιση τραχύτητας/γωνιών επιφάνειας και ιστόγραμμα κατανομής τραχύτητας.



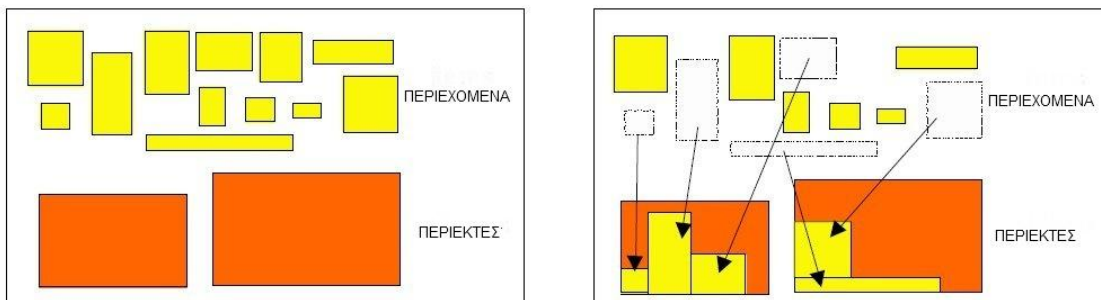
Βελτιστοποίηση Παρτίδας Παραγωγής

6.1 Το πρόβλημα αποτελεσματικής αξιοποίησης του χώρου κατασκευής

Η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου της πλατφόρμας κατασκευής μιας μηχανής ΣΚ κατά τη δημιουργία μιας παρτίδας παραγωγής χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη διαδικασία η οποία συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην αποδοτική εκμετάλλευση των τεχνολογιών ΣΚ. Το πρόβλημα της αποτελεσματικής αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου της πλατφόρμας κατασκευής μιας μηχανής ΣΚ μπορεί να θεωρηθεί και ως Πρόβλημα Στοιβαγμού [128] καθώς αφορά τον στοιβαγμό όσο το δυνατόν περισσότερων αντικείμενων στην πλατφόρμα κατασκευής υπό τη πρίσμα γεωμετρικών και κατασκευαστικών περιορισμών. Τα προβλήματα στοιβαγμού αποτελούν προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης τα οποία αφορούν τη βελτιστοποίηση της γεωμετρικής αλληλεπίδρασης ενός συνόλου περιεκτών και ενός συνόλου περιεχομένων, έτσι ώστε να μην παραβιάζεται ένα σύνολο γεωμετρικών περιορισμών. Συνεπώς, η δομή των προβλημάτων στοιβαγμού καθορίζεται από δυο βασικές συνιστώσες:

- το σύνολο των περιεκτών (objects), οι οποίοι και χαρακτηρίζονται ως οι εισροές του προβλήματος, και

- το σύνολο των περιεχομένων (elements), τα οποία χαρακτηρίζονται ως οι εκροές του προβλήματος.



Σχήμα 6-1 Σχηματική δομή προβλημάτων στοιβαγμού.

Τόσο οι περιέκτες όσο και τα περιεχόμενα ορίζονται συνήθως από μία έως τρεις γεωμετρικές διαστάσεις, αλλά αναλόγως του προβλήματος μπορούν να ορισθούν και περισσότερες διαστάσεις. Απώτερο στόχο κατά την επίλυση των προβλημάτων στοιβαγμού αποτελεί η επιλογή μερικών ή όλων των περιεχομένων, η ομαδοποίηση τους σε ένα ή περισσότερα υποσύνολα και η αντιστοίχιση κάθε ενός από τα προκύπτοντα υποσύνολα σε έναν περιέκτη (βλ. Σχήμα 6-1), έτσι ώστε να τηρούνται συγκεκριμένοι γεωμετρικοί περιορισμοί. Οι γεωμετρικοί αυτοί περιορισμοί επιβάλλουν τα περιεχόμενα κάθε υποσυνόλου να καταχωρηθούν στο αντίστοιχο κατάλληλο περιέκτη ως εξής:

- όλα τα περιεχόμενα που ανήκουν σε ένα υποσύνολο θα πρέπει να βρίσκονται εξ ολοκλήρου μέσα στον περιέκτη τους,
- τα περιεχόμενα δεν θα πρέπει να επικαλύπτονται, και
- μέσω της επιλεχθείσας λύσης να βελτιστοποιείται μια προκαθορισμένη (μονοδιάστατη ή πολυδιάστατη) αντικειμενική συνάρτηση.

Σημειώνεται ότι μια λύση του προβλήματος μπορεί να περιλαμβάνει όλους τους διαθέσιμους περιέκτες ή ένα υποσύνολο τους, όπως και όλα ή μέρος των διαθέσιμων περιεχομένων.

Τυπικά, μπορούν να διακριθούν πέντε υποπροβλήματα, τα οποία πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ένα πρόβλημα στοιβαγμού:

- το πρόβλημα επιλογής των περιεκτών,
- το πρόβλημα επιλογής των περιεχομένων,
- το πρόβλημα ομαδοποίησης των επιλεγμένων περιεχομένων,
- το πρόβλημα κατανομής των περιεχομένων σε επιμέρους υποσύνολα και στους αντίστοιχους περιέκτες, και

- το πρόβλημα γεωμετρικής τοποθέτησης των περιεχομένων στους περιέκτες τηρώντας γεωμετρικούς περιορισμούς.

Τα ειδικά προβλήματα στοιβαγμού χαρακτηρίζονται από πρόσθετες ιδιότητες υπό την έννοια ότι εκφυλίζονται μη περιλαμβάνοντας όλα τα προαναφερθέντα υποπροβλήματα.

6.2 Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων Στοιβαγμού κατά Dycckhoff

Τα προβλήματα στοιβαγμού είναι ευρέως διαδεδομένα καθώς απαντώνται σε πολλούς τομείς της επιστημονικής έρευνας και δεν συναντώνται μόνο στους τομείς της παραγωγής αλλά και σε τομείς όπως οι μεταφορές, οι τεχνοοικονομικές έρευνες, η επιχειρησιακή έρευνα κ.α. Το γεγονός αυτό συνέβαλε στη διάδοση του ίδιου βασικού προβλήματος κάτω από μια πανσπερμία ονομάτων. Μια από τις σημαντικότερες προσπάθειες κατηγοριοποίησης των επιμέρους προβλημάτων κατεβλήθη από τον Dycckhoff [128], ο οποίος χρησιμοποιώντας κοινά χαρακτηριστικά και ιδιότητες προσπάθησε να ταξινομήσει τα προβλήματα που ακολουθούσαν τις ίδιες βασικές αρχές αλλά εξετάζονταν σε διαφορετικές εφαρμογές.

Ο Dycckhoff [128] χρησιμοποιεί τέσσερα βασικά κριτήρια (χαρακτηριστικά) σύμφωνα με τα οποία μπορούμε να ταξινομήσουμε τα προβλήματα στοιβαγμού. Το πρώτο κριτήριο, αφορά τον ελάχιστο αριθμό γεωμετρικών διαστάσεων (1 έως n), που είναι απαραίτητες για να περιγράψουν την χωρική τοποθέτηση των περιεχομένων στους αντίστοιχούς περιέκτες τους. Προβλήματα που περιγράφονται από περισσότερες των τριών διαστάσεις, επεκτείνονται σε μη ευκλείδειους χώρους περιλαμβάνοντας διαστάσεις όπως βάρος, χρόνο και οικονομικά μεγέθη.

Το δεύτερο κριτήριο αφορά στη μέθοδο αντιστοίχισης των περιεχομένων στους περιέκτες, όπου και διακρίνονται δύο περιπτώσεις, οι «B» και «V». Η μέθοδος «B» προκύπτει από τον Γερμανικό όρο "Beladeproblem", ο οποίος υπονοεί ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν όλοι οι διαθέσιμοι περιέκτες. Αντίστοιχα η μέθοδος «V» η οποία αντιστοιχεί στο Γερμανικό όρο "Verladeproblem" χαρακτηρίζει την κατάσταση στην οποία όλα τα περιεχόμενα πρέπει να αντιστοιχηθούν στοιβαχθούν σε κατάλληλο υποσύνολο των διαθέσιμων περιεκτών.

Το τρίτο κριτήριο αφορά στο σύνολο των περιεκτών. Έτσι τα προβλήματα κλάσης O αντιστοιχούν στις περιπτώσεις όπου υπάρχει μόνο ένας μεγάλος περιέκτης. Τα προβλήματα κλάσης I αντιστοιχούν στις περιπτώσεις όπου υπάρχει μια συγκεκριμένη ποσότητα όμοιων περιεκτών, ενώ τα προβλήματα κλάσης D αντιστοιχούν στις περιπτώσεις που έχουμε πολλούς και διαφορετικούς περιέκτες.

Τέλος, το τέταρτο κριτήριο αφορά στα χαρακτηριστικά του συνόλου των περιεχομένων. Έτσι ο Dycckhoff [128] διακρίνει μεταξύ των περιπτώσεων που αποτελούνται από λίγα ανομοιόμορφα στοιχεία (F), από πολλά στοιχεία διαφορετικής μορφής (M), από πολλά στοιχεία σχετικά λίγων διαφορετικών μορφών (R), και από ομοιόμορφα στοιχεία (C).

6.3 Βελτιωμένη Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων Στοιβαγμού

Η κατηγοριοποίηση των προβλημάτων στοιβαγμού κατά Dycckhoff [128] αποτέλεσε ένα εξαιρετικό εργαλείο για μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο βοήθησε στην οργάνωση της βιβλιογραφίας και στην κατανόηση των συγκεκριμένων προβλημάτων. Ωστόσο, με το πέρασμα του χρόνου διαπιστώθηκαν συγκεκριμένες αδυναμίες στην προτεινόμενη κατηγοριοποίηση, ειδικά στην κατηγοριοποίηση νεότερων μελετών στο χώρο των προβλημάτων στοιβαγμού. Το γεγονός αυτό ώθησε τους ερευνητές Wäscher et al. [129] να εμπλουτίσουν την ήδη υπάρχουσα κατηγοριοποίηση έτσι ώστε να καταστεί σύγχρονη.

Η κατηγοριοποίηση των Wäscher et al. [129] βασίζεται σε πέντε βασικά κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο, όπως και στην περίπτωση της κατηγοριοποίησης κατά Dycckhoff [128], αφορά στον ελάχιστο αριθμό γεωμετρικών διαστάσεων που είναι απαραίτητες για να περιγράψουν την χωρική τοποθέτηση των περιεχομένων μέσα στους περιέκτες. Έτσι, οι ερευνητές κατατάσσουν τα προβλήματα στοιβαγμού σε μονοδιάστατα, διδιάστατα καθώς και τριδιάστατα, ενώ θεωρούν τα προβλήματα που αφορούν σε μεγαλύτερες διαστάσεις ($n > 3$) και τα οποία απαντώνται στην βιβλιογραφία περιστασιακά (π.χ., Lins et al. [130]), ως παραλλαγές των βασικών.

Ως δεύτερο κριτήριο εισάγεται ο στόχος του προβλήματος στοιβαγμού, δηλαδή εάν επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της αξίας της «εκροής» ή η ελαχιστοποίηση της αξίας της «εισορής» αντίστοιχα. Στην περίπτωση της μεγιστοποίησης της αξίας της «εκροής», απώτερο στόχο αποτελεί η αντιστοίχιση ενός υποσυνόλου των διαθέσιμων περιεχομένων σε ένα δεδομένο σύνολο περιεκτών. Βασική παραδοχή της συγκεκριμένης περίπτωσης θεωρείται ότι το σύνολο των περιεκτών δεν επαρκεί για να αντιστοιχηθεί σε αυτά ολόκληρο το σύνολο των περιεχομένων. Έτσι χρησιμοποιούνται όλοι οι περιέκτες και επιδιώκεται να σχηματιστεί το κατάλληλο υποσύνολο από τα διαθέσιμα περιεχόμενα, το οποίο μεγιστοποιεί το συνολικό άθροισμα των επιμέρους αξιών που έχουν αποδοθεί σε κάθε ένα στοιχείο των περιεχομένων. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υφίσταται το πρόβλημα επιλογής των περιεκτών. Αντίστοιχα στην περίπτωση της ελαχιστοποίησης της αξίας της «εισορής», ένα δεδομένο σύνολο περιεχομένων πρόκειται να αντιστοιχηθεί σε ένα σύνολο περιεκτών. Αντίθετα όμως με την προηγούμενη περίπτωση, το σύνολο των περιεκτών είναι επαρκές για να αντιστοιχηθούν όλα τα περιεχόμενα. Έτσι το πρόβλημα

σε αυτή την περίπτωση αφορά στην επιλογή του κατάλληλου υποσυνόλου περιεκτών στο οποίο μπορεί να αντιστοιχηθεί το σύνολο των περιεχομένων έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό άθροισμα των επιμέρους αξιών που έχουν αποδοθεί σε κάθε ένα ξεχωριστό περιέκτη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εν κατακλείδι δεν υφίσταται το πρόβλημα επιλογής περιεχομένων.

Στη συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση οι έννοιες της μεγιστοποίησης της αξίας της «εκροής» ή της ελαχιστοποίησης της αξίας της «εισορής» αντίστοιχα χρησιμοποιούνται κατά τρόπο γενικό. Ωστόσο, κατά την αντιμετώπιση πραγματικών προβλημάτων στοιβαγμού θα πρέπει να καθοριστεί με ακρίβεια η αξία κάθε περιέκτη και περιεχόμενου. Συνήθως η αξία ενός περιέκτη ή περιεχόμενου αντιπροσωπεύεται από μεγέθη όπως η χρηματική δαπάνη ή η αναλωθείσα ποσότητα πρώτης ύλης. Συνήθης επίσης παραδοχή αποτελεί ότι η αξία είναι ευθέως ανάλογη του γεωμετρικού μεγέθους του περιέκτη ή του περιεχόμενου αντίστοιχα. Βάσει αυτού η αξιολόγηση μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης έγκειται στον υπολογισμό του μήκους (μονοδιάστατα προβλήματα), του εμβαδού (διδιάστατα προβλήματα), ή του όγκου (τριδιάστατα προβλήματα). Για την περιγραφή προβλημάτων αυτού του τύπου, απαντάται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία και ο όρος «Ελαχιστοποίηση Αποβλήτων» (waste minimization), που υπονοεί την ελαχιστοποίηση του συνολικού μεγέθους των αχρησιμοποίητων μερών των επιλεγμένων περιεκτών.

Οι ερευνητές τονίζουν επίσης ότι τα προβλήματα, που αντιμετωπίζονται στην πράξη ή/και απαντώνται στη βιβλιογραφία, μπορούν να χαρακτηριστούν από το γεγονός ότι συνδυάζουν τόσο το πρόβλημα επιλογής περιεκτών, όσο και το πρόβλημα επιλογής περιεχομένων. Αυτό απαιτεί την χρησιμοποίηση μιας τροποποιημένης αντικειμενικής συνάρτησης η οποία συνδυάζει τόσο τις «εισορές» όσο και τις «εκροές» με αποτέλεσμα τελική επιδίωξη να αποτελεί η «μεγιστοποίηση του κέρδους». Επίσης, υποστηρίζουν ότι τυχών καταστάσεις στις οποίες εξετάζονται περισσότερες από μια αντικειμενικές συναρτήσεις μπορεί να θεωρηθούν ως παραλλαγές των βασικών προβλημάτων.

Το τρίτο κριτήριο κατάταξης αφορά στο είδος των περιεχομένων τα οποία διατίθενται προς στοίβαξη όπου και διακρίνονται τρεις δυνατές περιπτώσεις:

- *Σύνολο ομοίων μικρών στοιχείων* : Στη συγκεκριμένη περίπτωση όλα τα επιμέρους στοιχεία των περιεχομένων είναι της ίδιας μορφής και μεγέθους. Στην περίπτωση της μεγιστοποίησης της «εκροής», γίνεται η υπόθεση ότι ο (ενιαίος) τύπος στοιχείων διαθέτει απεριόριστη ζήτηση.
- *Σύνολο ελαφρώς ετερογενών στοιχείων*: Τα επιμέρους στοιχεία των περιεχομένων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε σχετικά λίγες κατηγορίες, σε σχέση με το συνολικό αριθμό

τους. Σε κάθε ξεχωριστή κατηγορία τα επιμέρους στοιχεία είναι ίδια όσον αφορά τη μορφή και το μέγεθός τους. Εξ ορισμού, στοιχεία ίδιας μορφής και μεγέθους τα οποία όμως επιτρέπουν διαφορετικούς προσανατολισμούς τοποθέτησης στους αντίστοιχους περιέκτες αντιμετωπίζονται ως διαφορετικά είδη στοιχείων. Η ζήτηση κάθε τύπου στοιχείων είναι σχετικά μεγάλη, και πιθανώς μπορεί να είναι άνω φραγμένη.

- *Σύνολο έντονα ετερογενών στοιχείων:* Το σύνολο των επιμέρους στοιχείων των περιεχομένων χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι ελάχιστα στοιχεία είναι της ίδιας μορφής και μεγέθους. Παρά την πιθανή μικρή ομοιότητα, τα στοιχεία αντιμετωπίζονται ως μεμονωμένα στοιχεία. Συνεπώς, η ζήτηση κάθε στοιχείου ισούται με τη μονάδα.

Το τέταρτο κριτήριο κατάταξης αφορά στο είδος των περιεκτών, στα οποία και επιχειρείται να στοιβαχθούν τα περιεχόμενα, όπου και διακρίνονται δυο κύριες περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση αφορά την χρησιμοποίηση ενός μόνο περιέκτη ο οποίος δύναται να διαθέτει προκαθορισμένες, σταθερές ή μεταβλητές, γεωμετρικές διαστάσεις. Η δεύτερη περίπτωση αφορά στη χρησιμοποίηση διάφορων περιεκτών. Εξετάζοντας τα είδη των προβλημάτων που απαντώνται στην βιβλιογραφία οι δημιουργοί της κατηγοριοποίησης δεν έκριναν απαραίτητο να διακρίνουν μεταξύ σταθερών και μεταβλητών διαστάσεων για τους περιέκτες καθώς απαντώνται μόνο αντικείμενα σταθερών διαστάσεων. Ωστόσο, και στην περίπτωση αυτή οι περιέκτες δύνανται να ταξινομηθούν σε κατηγορίες αντίστοιχες αυτών που εισήχθησαν για την κατάταξη των περιεχομένων. Σύμφωνα με αυτή την ταξινόμηση οι περιέκτες κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, αυτή των όμοιων, αυτή των ελαφρώς ετερογενών και αυτή των έντονα ετερογενών περιεκτών.

Το πέμπτο κριτήριο κατάταξης αφορά στη γεωμετρία των περιεχομένων. Έτσι για τα διδιάστατα και τριδιάστατα προβλήματα στοιβαγμού διακρίνουμε μεταξύ των κανονικών (Regular) περιεχομένων (δηλ. ορθογώνια, κύκλοι, κύλινδροι, σφαίρες, κλπ.) και των μη-κανονικών (Irregular). Οι ερευνητές σε αυτό το σημείο υιοθετούν την παραδοχή ότι τα περιεχόμενα ορθογωνίας διατομής πρέπει να στοιβαχθούν επίσης κατά ορθογωνικό προσανατολισμό. Επιπλέον, υιοθετείται η παραδοχή ότι το σύνολο των περιεχομένων αποτελείται είτε μόνο από κανονικά είτε μόνο από μη-κανονικά στοιχεία. Τέλος, τα προβλήματα που επιτρέπουν το στοιβαγμό μη ορθογωνικού προσανατολισμού ή την συνύπαρξη κανονικών και μη-κανονικών περιεχομένων θα πρέπει να θεωρούνται ως παραλλαγές των βασικών προβλημάτων.

6.3.1 Βασικοί τύποι προβλημάτων στοιβαγμού.

Οι βασικοί τύποι προβλημάτων στοιβαγμού δημιουργούνται από τον συνδυασμό του δεύτερου και του τρίτου κριτηρίου κατάταξης, βάσει των οποίων διακρίνονται οι εξής δύο βασικοί τύποι προβλημάτων στοιβαγμού.

6.3.1.1 Προβλήματα μεγιστοποίησης της εκροής

Τα προβλήματα του τύπου μεγιστοποίησης της εκροής παρουσιάζουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι οι περιέκτες που διατίθενται για στοιβαγμό, παρέχονται μόνο σε περιορισμένες ποσότητες οι οποίες δεν επιτρέπουν τον στοιβαγμό όλων των περιεχομένων. Έτσι θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλο υποσύνολο από τα περιεχόμενα το οποίο μεγιστοποιεί το άθροισμα των αξιών τους, ενώ αντίθετα από τη μεριά των περιεκτών θα χρησιμοποιηθούν όλοι. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη οικογένεια προβλημάτων παρατηρείται το πρόβλημα επιλογής περιεχομένων, αλλά όχι το αντίστοιχο επιλογής περιεκτών. Περαιτέρω διακρίνονται οι ακόλουθες υποκατηγορίες προβλημάτων:

- *Πρόβλημα στοιβαγμού όμοιων περιεχομένων (Identical item packing problem)*: Αυτή η υποκατηγορία προβλημάτων έχει ως στόχο την ανάθεση του μεγαλύτερου δυνατού αριθμού όμοιων περιεχομένων σε ένα δεδομένο και περιορισμένο σύνολο περιεκτών. Εφ' όσον όλα τα περιεχόμενα είναι όμοια, δεν υφίσταται σχετικό πρόβλημα επιλογής ή δημιουργίας ομαδοποιήσεων σε επίπεδο περιεχομένων. Με άλλα λόγια, η γενική δομή των προβλημάτων αυτής της υποκατηγορίας περιορίζεται στον στοιβαγμό των (ίδιων) περιεχομένων σε κάθε ένα από τους διαθέσιμους περιέκτες τηρώντας πιθανούς γεωμετρικούς περιορισμούς.
- *Πρόβλημα τοποθέτησης (placement problem)*: Στη βιβλιογραφία, τα προβλήματα αυτής της υποκατηγορίας είναι γνωστά με πολλά διαφορετικά ονόματα. Προκειμένου να αποφευχθεί η σύγχυση, οι ερευνητές εισήγαγαν τον κάπως πιο ουδέτερο όρο «Πρόβλημα Τοποθέτησης». Ο συγκεκριμένος όρος περιγράφει μια υποκατηγορία προβλημάτων στην οποία ένα σύνολο ελαφρώς ετερογενών περιεχομένων πρέπει να αντιστοιχηθούν σε ένα δεδομένο και περιορισμένο σύνολο περιεκτών, έτσι ώστε το συνολικό άθροισμα των αξιών ή του μεγέθους των περιεχομένων να μεγιστοποιηθεί. Εναλλακτικά, αντικειμενικό στόχο αποτελεί η ελαχιστοποίηση του μη χρησιμοποιούμενου διαθέσιμου χώρου των περιεκτών.
- *Πρόβλημα γυλιού (knapsack problem)*: Η υποκατηγορία των προβλημάτων γυλιού αντιπροσωπεύει μια οικογένεια προβλημάτων που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη έντονα ετερογενών περιεχομένων τα οποία πρέπει να στοιβαχθούν σε ένα δεδομένο σύνολο

περιεκτών. Γίνεται η υπόθεση ότι η διαθεσιμότητα των περιεκτών είναι περιορισμένη έτσι ώστε να μην είναι δυνατός ο στοιβαγμός όλων των περιεχομένων. Τελικό στόχο αποτελεί και εδώ η μεγιστοποίηση της συνολικής αξίας των τελικά στοιβαγμένων περιεχομένων.

6.3.1.2 Προβλήματα ελαχιστοποίησης της εισροής

Ο συγκεκριμένος τύπος προβλημάτων χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η διατιθέμενη προσφορά των περιεκτών είναι αρκετά μεγάλη και έτσι δύναται να στοιβαχθούν όλα τα περιεχόμενα, συνεπώς δεν υφίσταται το πρόβλημα επιλογής περιεχομένων. Στόχο των συγκεκριμένων προβλημάτων αποτελεί η ελαχιστοποίηση της συνολικής αξίας των τελικά χρησιμοποιηθέντων περιεκτών. Περαιτέρω διακρίνονται οι ακόλουθες υποκατηγορίες προβλημάτων:

- *Προβλήματα ανοικτών διαστάσεων (open dimension problem):* Στη συγκεκριμένη υποκατηγορία προβλημάτων, το σύνολο των περιεχομένων πρέπει να στοιβαχθεί σε έναν ή περισσότερους περιέκτες. Οι περιέκτες δεν διαθέτουν προκαθορισμένες διαστάσεις αλλά τουλάχιστον μία διάστασή τους μπορεί να θεωρηθεί ως μεταβλητή. Συνεπώς, η συγκεκριμένη υποκατηγορία προβλημάτων στοχεύει στην βελτιστοποίηση των μεταβλητών διαστάσεων του/των περιέκτη/-εκτών που τελικά θα απαιτηθούν για το στοιβαγμό όλων των περιεχομένων. Έτσι, ως εισροή θεωρείται η τιμή των μεταβλητών (π.χ. μήκος, εμβαδόν κ.λπ.) που περιγράφουν τις μη προκαθορισμένες διαστάσεις των περιεκτών και η οποία πρέπει τελικά να ελαχιστοποιηθεί. Στη συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση υιοθετείται η υπόθεση ότι οι περιέκτες πριν και μετά από τον καθορισμό των μεταβλητών διαστάσεών τους παραμένουν ορθογωνικής (διδιάστατα προβλήματα) ή κυβοειδούς γεωμετρίας (τριδιάστατα προβλήματα). Με βάση αυτήν την υπόθεση εξαιρούνται της συγκεκριμένης κατηγοριοποίησης οι περιπτώσεις στις οποίες όλα τα περιεχόμενα πρέπει να στοιβαχθούν σε μη-ορθογωνικής διατομής περιέκτες, όπως όταν πρέπει να στοιβαχθούν κύκλοι μέσα σε έναν μεγαλύτερο κύκλο ελάχιστης ακτίνας (Birgin et al. [131]) ή προβλήματα στα οποία πρέπει να μεγιστοποιηθεί η πυκνότητα της συσκευασίας, όπως λ.χ. στην περίπτωση της διδιάστατης συσκευασίας δικτυωτού πλέγματος (Stoyan και Patsuk [132]).
- *Πρόβλημα Βέλτιστου Τεμαχισμού (Cutting Stock):* Τα προβλήματα αυτής της κατηγορίας ορίζουν ότι ένα σύνολο ελαφρώς ετερογενών περιεχομένων διατίθενται προς στοιβαγμό σε ένα σύνολο περιεκτών προκειμένου να ελαχιστοποιείται το συνολικό απαιτούμενο μέγεθος ή ποσότητα των περιεκτών. Όλες οι διαστάσεις κάθε περιέκτη θεωρούνται

σταθερές. Τονίζεται το γεγονός ότι δεν γίνεται καμία υπόθεση σχετικά με τη γεωμετρική μορφή των περιεκτών. Έτσι οι περιέκτες μπορούν να είναι ίδιοι, ισχυρώς ή μη ετερογενείς.

- *Πρόβλημα Πακεταρίσματος/Στοιβαξης σε δοχείο (Bin Packing):* Σε αντίθεση με την προηγούμενη υποκατηγορία προβλημάτων, η συγκεκριμένη χαρακτηρίζεται από την έντονα ετερογενή φύση των περιεχομένων. Και στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία πρέπει να στοιβαχθούν σε ένα σύνολο όμοιων ή ετερογενών περιεκτών, έτσι ώστε το συνολικό μέγεθος ή η ποσότητα των απαραίτητων περιεκτών να ελαχιστοποιείται.

6.4 Αντιμετώπιση του προβλήματος αποτελεσματικής αξιοποίησης του χώρου κατασκευής ως πρόβλημα στοιβαγμού

Όπως προαναφέρθηκε, η επίτευξη της στοιβαξης όσο το δυνατόν περισσότερων αντικειμένων/κομματιών στην πλατφόρμα κατασκευής μιας μηχανής Στερεολιθογραφίας αποτελεί κρίσιμη δραστηριότητα του προγραμματισμού παραγωγής. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου της Στερεολιθογραφίας συνεπάγεται κάποιους ειδικούς κατασκευαστικούς περιορισμούς από τους οποίους προέρχονται και οι πρώτες παραδοχές. Συγκεκριμένα, η μέθοδος της Στερεολιθογραφίας απαιτεί την δημιουργία υποστηριγμάτων για τη στήριξη των ευαίσθητων τμημάτων των υπό κατασκευή αντικειμένων. Το γεγονός αυτό καθιστά την κατασκευή πολλαπλών αντικειμένων κατά την έννοια του άξονα κατασκευής Z (το ένα δηλαδή κομμάτι άνω του άλλου) προβληματική και πρακτικά ανεφάρμοστη, αφού η συγκεκριμένη πρακτική θα οδηγούσε στην κατασκευή αντικειμένων με σχετικά υψηλές τιμές τραχύτητας καθώς και πιθανώς υψηλές κατασκευαστικές αποκλίσεις και αστοχίες. Έτσι προκύπτει ο πρώτος περιορισμός ο οποίος καθορίζει ότι κατά την έννοια του άξονα κατασκευής (Z) μπορούμε να τοποθετήσουμε προς κατασκευή μόνο ένα αντικείμενο. Ο περιορισμός αυτός απλοποιεί το πρόβλημα καθώς καθίσταται δυνατή η ανάγωγή του από τριδιάστατο πρόβλημα στοιβαγμού σε διδιάστατο (Z άξονας=0) ενώ η γεωμετρική αλληλεπίδραση των αντικειμένων περιορίζεται μόνο στους άξονες X και Y. Συνεπώς, το υφιστάμενο πρόβλημα χαρακτηρίζεται συμφώνα με το πρώτο κριτήριο της κατηγοριοποίησης κατά Wäscher [129] ως *διδιάστατο πρόβλημα στοιβαγμού*. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα περισσότερα προβλήματα στοιβαγμού που απαντώνται στη βιβλιογραφία και στα οποία υφίστανται περιορισμοί¹ σχετικά με την ελευθερία περιστροφής τους περί τον άξονα Z, στο υπό εξέταση πρόβλημα δεν υπάρχει κανένας αντίστοιχος περιορισμός καθώς ο συγκεκριμένος παράγοντας δεν επηρεάζει το κόστος ή την ποιότητα κατασκευής.

¹ Συνήθως περιορίζονται σε βηματικές περιστροφές κατά 90° εξαιτίας φυσικών περιορισμών όπως π.χ. εξαιτίας της φοράς των ινών σε προβλήματα στοιβαγμού της βιομηχανίας ενδυμάτων.

Ο βασικός στόχος που επιδιώκεται με την προσπάθεια στοιβαγμού όσο το δυνατόν περισσότερων αντικειμένων στην πλατφόρμα κατασκευής είναι η μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου της πλατφόρμας. Επομένως, το συγκεκριμένο πρόβλημα στοιβαγμού μπορεί να χαρακτηριστεί ως πρόβλημα μεγιστοποίησης της αξίας της εκροής. Τα αντικείμενα που πρόκειται να στοιβαχθούν στην πλατφόρμα κατασκευής δύνανται να χαρακτηρισθούν ως έντονα ετερογενή, καθώς ελάχιστα αντικείμενα μοιάζουν μεταξύ τους ως προς το σχήμα και τη μορφή τους. Εξάλλου, η ποικιλομορφία των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν με τη μέθοδο της Στερεολιθογραφίας αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά κατασκευαστικά πλεονεκτήματα της μεθόδου. Επιπρόσθετα, το σχήμα των προς τοποθέτηση αντικείμενων/κομματιών στην πλειονότητα των περιπτώσεων, δύναται να χαρακτηριστεί ως μη-κανονικό καθώς είναι σπάνιες οι περιπτώσεις όπου κατασκευάζονται αντικείμενα απλής γεωμετρίας. Τέλος, με βάση τον περιέκτη στον οποίο θα πραγματοποιηθεί ο στοιβαγμός, δηλαδή την πλατφόρμα κατασκευής, το πρόβλημα υπάγεται στην περίπτωση χρησιμοποίησης ενός μόνο αντικείμενου με σταθερές διαστάσεις ορθογωνικής μάλιστα γεωμετρίας.

Συνοψίζοντας και με βάση την ανάλυση των κριτηρίων κατηγοριοποίησης κατά Wäscher [129], το υπό εξέταση πρόβλημα στοιβαγμού χαρακτηρίζεται ως διδιάστατο, στο οποίο επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της αξίας της εκροής, μέσω της τοποθέτησης όσο το δυνατόν περισσότερων έντονα ετερογενών μη-κανονικού σχήματος αντικειμένων εντός της σταθερών διαστάσεων και ορθογωνικής γεωμετρίας πλατφόρμας κατασκευής. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, η οικογένεια προβλημάτων, έτσι όπως αυτές κατηγοριοποιήθηκαν κατά Wäscher [129], η οποία προσομοιάζει περισσότερο την φύση του υφιστάμενου προβλήματος είναι εκείνη του προβλήματος του γυλιού.

6.5 Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Σύμφωνα με τους Fowler et al. [133], το πρόβλημα στοιβαγμού που αφορά ορθογωνικής φύσης αντικείμενα είναι NP-Complete. Βασιζόμενοι σε αυτήν την παραδοχή καθώς και στο γεγονός ότι τα προβλήματα που αφορούν τον στοιβαγμό μη κανονικών σχημάτων είναι περισσότερο πολύπλοκα από την φύση τους, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα προβλήματα στοιβαγμού μη κανονικών σχημάτων είναι επίσης NP-Complete. Η ένταξη των προβλημάτων στοιβαγμού στην κλάση NP-Complete υπονοεί ότι όλοι οι αναλυτικοί αλγόριθμοι υπολογισμού του ολικού βέλτιστου απαιτούν έναν αριθμό υπολογιστικών βημάτων ο οποίος αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με το μέγεθος του προβλήματος, αντί πολυωνυμικά. Η διαπίστωση καθιστά πρακτικά ατελέσφορη την επιδίωξη δημιουργίας ενός ντετερμινιστικού αλγόριθμου εύρεσης του ολικού βέλτιστου, αντί της

υιοθέτησης εναλλακτικών προσεγγίσεων οι οποίες θα κατάφερναν με λογική υπολογιστική προσπάθεια να ανακαλύψουν λύσεις κοντά στο βέλτιστο. Η λογική αυτή αντικατοπτρίζεται στο σύνολο των βιβλιογραφικών προσεγγίσεων οι οποίες υιοθετούν κυρίως ευρετικούς και μετα-ερευνητικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με κάποια στρατηγική τοποθέτησης. Οι ευρετικές και μετά-ευρετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ως μέσο δημιουργίας νέων υποψήφιας λύσεων προσπαθώντας να χαρτογραφήσουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος από το χώρο λύσης του προβλήματος. Ωστόσο, κάθε νέα λύση θα πρέπει να μπορεί να μεταφραστεί και στην αντίστοιχη φυσική διαδικασία του στοιβαγμού. Τη λειτουργία αυτή καθορίζει η εκάστοτε λογική τοποθέτησης η οποία αναλαμβάνει, σύμφωνα με κάποιους προκαθορισμένους κανόνες, να μετατρέψει την αφηρημένη αναπαράσταση μιας υποψήφιας λύσης των μεθόδων βελτιστοποίησης στο φυσικό γεωμετρικό στοιβαγμό των αντικειμένων και κατόπιν να αξιολογήσει την ποιότητα της παραγόμενης διάταξης.

Η βιβλιογραφία η οποία απαντάται στην κατηγορία του διδιάστατου προβλήματος στοιβαγμού μη-κανονικών σχημάτων μπορεί να χωριστεί σε δυο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία, αντιμετωπίζει την γεωμετρική πολυπλοκότητα των μη-κανονικών σχημάτων έμμεσα είτε μετασχηματίζοντάς τα σε απλούστερες γεωμετρικές μορφές, είτε στοιβάζοντάς τα αρχικά σε κανονικής γεωμετρίας σχήματα (όπως ορθογώνια παραλληλόγραμμα, πολύγωνα, κύκλους κ.λπ.) και χρησιμοποιώντας στη συνέχεια τα κανονικά αυτά σχήματα στην διαδικασία στοιβαγμού. Η δεύτερη κατηγορία αντιμετωπίζει άμεσα την γεωμετρική πολυπλοκότητα των μη κανονικών σχημάτων χρησιμοποιώντας τα ως έχουν στην εκάστοτε λογική τοποθέτησης. Οι εκάστοτε προσεγγίσεις οι οποίες ανήκουν στις δυο παραπάνω κατηγορίες περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

6.5.1 Προσεγγίσεις Έμμεσης Αντιμετώπισης

Η πλειοψηφία των ερευνητικών προσπαθειών στον χώρο του προβλήματος στοιβαγμού μη-κανονικών σχημάτων πριν από το 1980 επικεντρώθηκε στον στοιβαγμό εντός ορθογώνιων παραλληλόγραμμων και στη χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του Haims [134, 135] η προσέγγιση του οποίου περιλαμβάνει την χρησιμοποίηση του ελάχιστου ορθογώνιου παραλληλόγραμμου που μπορεί να περικλείει ένα μη κανονικό σχήμα σε συνδυασμό με τεχνικές δυναμικού προγραμματισμού.

Οι Qi και Sanders πρότειναν δύο πιθανές μεθόδους μετασχηματισμού των μη κανονικών σχημάτων καθώς και μια λογική τοποθέτησης γνωστή και ως Bottom Left [136]. Η πρώτη μέθοδος μετασχηματισμού περιελάμβανε την χρησιμοποίηση ορθογώνιων δομικών μονάδων προκειμένου

να δημιουργηθεί μια ορθογωνική προσέγγιση του περιγράμματος των μη κανονικών σχημάτων. Παρόλο που η απεικόνιση αυτή αυξάνει τη γεωμετρική ανακρίβεια της λύσης, οι ερευνητές πρότειναν τη χρησιμοποίηση μικρού μεγέθους δομικών στοιχείων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το αντίστοιχο σφάλμα. Η δεύτερη μέθοδος περιελάμβανε τη χρησιμοποίηση του ελάχιστου ορθογώνιου παραλληλόγραμμου που μπορεί να περικλείει ένα μη κανονικό σχήμα. Η λογική τοποθέτησης Bottom Left ορίζει ότι κάθε αντικείμενο θα πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε να μην είναι δυνατή η περαιτέρω μετακίνηση του προς τα κάτω ή προς τα αριστερά σε σχέση με τον διαθέσιμο χώρο στοίβαξης και χωρίς προφανώς να δημιουργούνται επικαλύψεις. Όταν ικανοποιείται αυτή η συνθήκη θεωρείται ότι το αντικείμενο έχει στοιβαχθεί.

Ο Jakobs [137] ανέπτυξε την δική του προσέγγιση βασιζόμενος στη μεθοδολογία στοιβαγμού ορθογωνίων παραλληλόγραμμων των Baker et al. [138] υιοθετώντας ταυτόχρονα ως μέθοδο βελτιστοποίησης ένα Γενετικό Αλγόριθμο έτσι ώστε να βελτιωθούν τα αποτελέσματα, και επεκτείνοντάς την προκειμένου να εφαρμοστεί και σε μη κανονικά σχήματα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησε αρχικά τα ελάχιστα ορθογώνια παραλληλόγραμμα που περιέκλειαν τα μη κανονικά πολύγωνα του προβλήματος και στη συνέχεια εφάρμοσε τη μεθοδολογία ορθογώνιου στοιβαγμού των Baker et al. [138]. Τέλος, για να βελτιωθεί η πυκνότητα της παραγόμενης διάταξης εφαρμόστηκε μια νέα μέθοδος συμπύκνωσης η οποία έγκειται στη βηματική μεταφορά κάθε αντικειμένου όσο το δυνατόν πιο κάτω και αριστερά σε σχέση με τον διαθέσιμο χώρο στοίβαξης χωρίς να δημιουργούνται επικαλύψεις. Στην συγκεκριμένη εργασία προτείνεται επίσης η δημιουργία μετα-αντικειμένων με συσσωμάτωση μερικών αντικειμένων και η χρησιμοποίησή τους στην παραπάνω μεθοδολογία.

Αντί για την χρησιμοποίηση ορθογώνιων παραλληλογράμμων προς αντικατάσταση των αρχικών μη-κανονικών σχημάτων οι Dori & Ben-Bassat εξέτασαν την χρησιμοποίηση του κυρτού περιγράμματος (Convex Hull) [139]. Έτσι το πρώτο στάδιο του προτεινόμενου αλγορίθμου ήταν ο υπολογισμός του κυρτού περιγράμματος κάθε μη-κανονικού σχήματος το οποίο αποτελεί στην ουσία την ελάχιστη κυρτή μορφή που εσωκλείει το σχήμα. Το κυρτό περίγραμμα των πολυγώνων χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την κατάλληλη τοποθέτηση του αρχικού αντικειμένου στο διαθέσιμο χώρο στοιβαγμού.

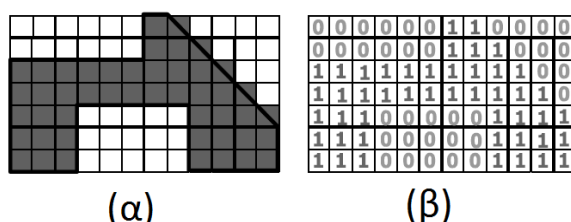
Οι Dighe & Jakiela [140] επέκτειναν την εργασία του Smith [141] με την προσθήκη γεωμετρικών επεκτάσεων προκειμένου να καταστεί εφικτή η εφαρμογή τους σε μη κανονικά σχήματα. Η χρήση ενός περίπλοκου χρωμοσώματος, στα πλαίσια του χρησιμοποιούμενου γενετικού αλγορίθμου, το οποίο είναι σε θέση να αποφύγει την παραγωγή λύσεων που παρουσιάζουν επικαλύψεις βελτίωσαν σημαντικά την απόδοση της προτεινόμενης μεθόδου. Η δύο επιπέδων προσέγγισή τους

παράγει συστοιχίες αντικειμένων οι οποίες είναι πυκνά στοιβαγμένες και οι οποίες στην συνέχεια βελτιστοποιούνται συνολικά από ένα Γενετικό Αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Οι Adamowicz και Albano [142] επίσης υιοθέτησαν τη χρησιμοποίηση του ελάχιστου ορθογώνιου παραλληλόγραμμου που περικλείει ένα μη κανονικό σχήμα. Ωστόσο, υπήρξαν από τους πρώτους που υιοθέτησαν τη μέθοδο του πολυγώνου No-Fit το οποίο σε γενικές γραμμές οριοθετεί τις θέσεις στις οποίες όταν τοποθετούνται δύο πολύγωνα ακουμπούν αλλά δεν επικαλύπτονται. Προτάθηκε πρωταρχικά από τον Art το 1966 [143] και περιγράφεται αναλυτικά σε επομένη παράγραφο της παρούσας διατριβής. Σύμφωνα με την προτεινόμενη προσέγγιση υπολογίζεται αρχικά το ελάχιστο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο που περικλείει ένα μη κανονικό σχήμα και εάν δημιουργούνται μεγάλα κενά επιχειρείται, μέσω της αξιοποίησης του πολυγώνου No-Fit, ο στοιβαγμός μέσα στο πολύγωνο και άλλων πολυγώνων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα δημιουργούμενα κενά. Στη συνέχεια τα ορθογώνια παραλληλόγραμμο που δημιουργούνται στοιβάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές δυναμικού προγραμματισμού. Ο Albano σε μετέπειτα εργασία εκτίμησε ότι οι απώλειες που δημιουργούνται δεν μπορούν να ανακτηθούν κατά τη διάρκεια της φάσης του στοιβαγμού [144] εκτός εάν το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο γεμίσει πλήρως από αντικείμενα. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, η διάταξη που παρήχθη με τις μεθόδους δυναμικού προγραμματισμού παρουσιάζεται στον χρήστη ο οποίος και μπορεί να την τροποποιήσει.

Οι Marques et al. χρησιμοποίησαν μια διαφορετική μέθοδο προκειμένου να μειώσουν την πολυπλοκότητα τοποθέτησης των αντικειμένων στον διαθέσιμο χώρο στοιβαγμού. Συγκεκριμένα, υιοθέτησαν την περιγραφή μέσω πλέγματος του χώρου στοιβαξης έτσι ώστε να απλοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται για την μετακίνηση των αντικειμένων χωρίς επικαλύψεις [145]. Η προτεινόμενη προσέγγιση περιελάμβανε τη χρήση της μεθόδου της Προσομοιωμένης Ανόπτησης, ωστόσο είναι δύσκολο να εξαχθούν συμπεράσματα για την καταλληλότητα της μεθόδου καθώς δεν έχουν δοθεί αριθμητικά αποτελέσματα.

Οι Oliveira και Ferreira υιοθέτησαν δύο διαφορετικές τεχνικές επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος, οι οποίες στηρίζονται επίσης σε έναν αλγόριθμο Προσομοιωμένης Ανόπτησης [146]. Η πρώτη τεχνική έγκειται στη μετατροπή των μη-κανονικών σχημάτων σε απεικόνιση πλέγματος (raster) (βλ. Σχήμα 6-2).



Σχήμα 6-2 Σχηματική απεικόνιση πλέγματος πολυγώνου.

Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη γρήγορη παραγωγή λύσεων αλλά υστερεί στον τομέα της γεωμετρικής ακρίβειας, εξαιτίας του γεγονότος ότι η απεικόνιση πλέγματος αποτελεί προσέγγιση του αρχικού σχήματος. Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιεί τη μέθοδο των συναρτήσεων D (D-Functions) οι οποίες προτάθηκαν από τον Konoopasek [147] και χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν και να επιλύσουν επικαλύψεις μεταξύ δύο αντικειμένων. Και οι δύο μέθοδοι επιτρέπουν τη μερική επικάλυψη των σχημάτων που στοιβάζονται επιβάλλοντας όμως στις περιπτώσεις αυτές κάποιες τιμές ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση, έτσι ώστε στην τελικά επιλεγείσα λύση να μην υφίστανται επικαλύψεις μεταξύ των αντικειμένων/κομματιών. Η δεύτερη τεχνική παράγει μόνο εφικτές λύσεις χωρίς επικαλύψεις, αλλά είναι πέντε φορές πιο δαπανηρή υπολογιστικά σε σχέση με την πρώτη τεχνική.

Οι Fujita et al. παρουσίασαν μια προσέγγιση η οποία αποτελείται από δύο συστατικά μέρη, αυτό της συνδυαστικής αναζήτησης μέσω Γενετικού Αλγόριθμου και αυτό της τοπικής βελτιστοποίησης της θέσης των προς στοιβαγμό αντικειμένων [148]. Ο Γενετικός Αλγόριθμος διαχειρίζεται ζεύγη σχημάτων τα οποία διατηρούν πληροφορίες για τη σχέση των θέσεών τους. Ένας υβριδικός τελεστής διασταυρώσεων παράγει τα χρωμοσώματα των απογόνων, τα οποία στην συνέχεια χρησιμοποιούνται προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη θέση μεταξύ τους μέσω της διαδικασίας της τοπικής ελαχιστοποίησης. Η μέθοδος προσπαθεί στη συνέχεια να τοποθετήσει αυτά τα ζευγάρια όσο το δυνατόν πιο κάτω και αριστερά σε σχέση με τον διαθέσιμο χώρο στοιβαγμού. Επικαλύψεις μεταξύ των σχημάτων δεν επιτρέπονται, αλλά η προεξοχή κάποιου αντικειμένου από το διαθέσιμο μήκος του χώρου στοιβαγμού είναι αποδεκτή, αν και τιμωρείται στη αντικειμενική συνάρτηση. Τέλος, προκειμένου να μειωθεί η απαιτούμενη πολυπλοκότητα εύρεσης των τομών μεταξύ των αντικειμένων χρησιμοποιείται μόνο το κυρτό περίγραμμα των αντικειμένων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση υλοποιήθηκε και από τους Bounsaythip & Maouche [149] χρησιμοποιώντας έναν εξελικτικό αλγόριθμο ο οποίος βελτίωσε τα αποτελέσματα των Fujita et al.

Οι Ratanapan & Dagli [150] περιέγραψαν μια βελτιωμένη προσεγγιστική μέθοδο, παρόμοια με την τεχνική anti-aliasing που χρησιμοποιείται στα γραφικά των Η/Υ (Foley et al., [151], με στόχο την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την εύρεση της λύσης.

Τέλος, οι Babu & Babu προσέγγισαν το πρόβλημα του στοιβαγμού μη κανονικών σχημάτων σε μη κανονικό χώρο στοιβαγμού μέσω της χρήσης μιας νέας μορφής περιγραφής του σχήματος κάθε αντικείμενου. Έτσι κάθε αντικείμενο περιγράφεται ως ένα δυαδικό αρχείο εικόνας στο οποίο αποθηκεύονται πληροφορίες σχετικά με την οριζόντια απόσταση κάθε δυαδικού ψηφίου σε σχέση με το αντίστοιχο δεξιότερο δυαδικό ψηφίο [152]. Έτσι καθίσταται αποτελεσματικότερη η εύρεση

τυχόν επικαλύψεων. Η παραπάνω προσέγγιση υλοποιείται με την χρήση γενετικών και ευρετικών αλγορίθμων.

6.5.2 Προσεγγίσεις Άμεσης Αντιμετώπισης

Οι Albano & Saruppo [153] υπήρξαν από τους πρωτοπόρους στην άμεση αντιμετώπιση της γεωμετρικής πολυπλοκότητας των προβλημάτων στοιβαγμού. Συγκεκριμένα, η προσέγγισή τους υπήρξε η πρώτη η οποία δεν απαιτούσε τον αρχικό στοιβάγμο των μη κανονικών σχημάτων σε κάποιο κανονικό σχήμα, όπως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Αντίθετα ο στοιβαγμός των αντικείμενων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την έννοια του πολυγώνου No-Fit. Η προτεινόμενη μέθοδος αναλύει τα ήδη στοιβαγμένα αντικείμενα δημιουργώντας στη δεξιά πλευρά της διάταξης μια καμπύλη-όριο η οποία περικλείει τα ήδη στοιβαγμένα αντικείμενα. Στη συνέχεια για το επόμενο προς στοιβαγμό αντικείμενο υπολογίζονται όλες οι δυνατές θέσεις στις οποίες μπορεί να στοιβαχτεί σε σχέση με την καμπύλη-όριο αξιοποιώντας το δημιουργηθέν πολύγωνο No-Fit. Τελικά, από όλες τις δυνατές θέσεις που προκύπτουν επιλέγεται αυτή που στοιβάζει το αντικείμενο όσο το δυνατόν πιο κάτω και αριστερά. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται ότι δεν θεωρεί ενεργό τον διαθέσιμο κενό χώρο στοιβαξης στα αριστερά της καμπύλης-ορίου καθώς και ότι δεν αξιοποιεί τον πιθανώς διαθέσιμο λόγω οπών χώρο στα σχήματα.

Οι Blazewicz et al. [154] επέκτειναν την προσέγγιση των Albano & Saruppo [153] εφαρμόζοντας την λογική τοποθέτησης Bottom-Left-Fill σε συνδυασμό με την μεθοδολογία βελτιστοποίησης Tabu Search, η οποία απέδωσε καλά στις μελέτες περίπτωσης που εξέτασαν. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμός τους ενσωματώνει μια λειτουργία πλήρωσης των κενών που δημιουργούνται κατά τον στοιβαγμό των αντικειμένων στα αριστερά της καμπύλης-ορίου προτού στοιβαχθεί ένα νέο αντικείμενο.

Οι Li & Milenković διερεύνησαν τη δυνατότητα εφαρμογής μεθόδων «συμπίεσης και διαχωρισμού» προκειμένου να παράγονται λύσεις των οποίων η δομή να παρουσιάζει περισσότερη συνοχή και λιγότερες απώλειες [155]. Ως συμπίεση ορίζεται η προσομοίωση μιας διαδικασίας εφαρμογής δυνάμεων επάνω στα προς στοιβαγμό αντικείμενα προκειμένου να αναπτυχθεί ένα μοντέλο βελτιστοποίησης βασισμένο στους νόμους της φυσικής. Αντίθετα, η διαδικασία του διαχωρισμού βοηθά στην αποτελεσματική απομάκρυνση σχημάτων τα οποία παρουσιάζουν επικαλύψεις. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο διαδικασίες μπορούν να δημιουργηθούν διατάξεις στοιβαγμένων αντικειμένων παρόμοιες με αυτές που θα δημιουργούσε ένας άνθρωπος. Βασικό ρόλο στις δύο διαδικασίες διαδραματίζει πάλι η έννοια του πολυγώνου

No-Fit, προκειμένου να δημιουργούνται κινήσεις χωρίς επικαλύψεις. Επίσης, αναπτύχθηκε από τους ίδιους και μια εναλλακτική μέθοδος βασιζόμενη στον γραμμικό προγραμματισμό, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερα βελτιωμένες επιδόσεις σε όρους χρόνου εξεύρεσης μιας ικανής λύσης. Η προαναφερθείσα μέθοδος χρησιμοποιήθηκε και επεκτάθηκε και σε άλλες περιπτώσεις προβλημάτων στοιβαγμού [156, 157].

Ο Dowsland et al. πρότειναν μια νέα μέθοδο, την οποία εμπνεύστηκαν από τη διάταξη που δημιουργείται σε προϊόντα υπό μορφή κόκκων όταν το δοχείο που τα περιέχει δονηθεί επανειλημμένως [158]. Ο αλγόριθμος αρχίζει με την τοποθέτηση όλων των αντικειμένων μέσα στον χώρο στοιβαγμού χρησιμοποιώντας τη λογική τοποθέτησης bottom left. Μόλις τοποθετηθούν όλα τα αντικείμενα, δημιουργείται μια νέα διάταξη κατά φθίνουσα αρίθμηση των δεξιών συντεταγμένων X των αντικειμένων, τα οποία στοιβάζονται εκ νέου χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά όμως την λογική τοποθέτησης Right-Bottom. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για έναν σταθερό αριθμό επαναλήψεων, ενώ για τον υπολογισμό των επιμέρους θέσεων χρησιμοποιήθηκαν τόσο κλασσικοί τριγωνομετρικοί υπολογισμοί όσο και η μέθοδος του No-Fit πολυγώνου.

Οι Grinde & Daniels [159] στηρίζουν την προσέγγισή τους στην παρατήρηση ότι σε μια ιδανική κατάσταση τα μεγαλύτερα αντικείμενα τοποθετούνται πρώτα στο χώρο στοιβαγμού και στην συνέχεια τοποθετούνται τα μικρότερα κομμάτια έτσι ώστε να καλυφθούν τα κενά που δημιουργούνται. Βάσει αυτής της στρατηγικής παρουσίασαν έναν ευρετικό αλγόριθμο ο οποίος φροντίζει για την κάλυψη των κενών που δημιουργούνται από τα σχετικά μεγαλύτερα αντικείμενα/κομμάτια.

Οι Anand et al. [160] πρότειναν μια τεχνική επίλυσης βασισμένη σε γενετικό αλγόριθμο η οποία αποσκοπεί στην επίλυση προβλημάτων στοιβαγμού που αντιμετωπίζουν οι βιομηχανίες ενδυμάτων, αν και τονίζεται ότι μπορεί επίσης να προσαρμοστεί στις ειδικές απαιτήσεις και άλλων εφαρμογών. Τόσο τα προς στοιβαγμό αντικείμενα όσο και ο διαθέσιμος χώρος στοιβαγμού μπορούν να είναι μη κανονικής γεωμετρίας. Ωστόσο, εξαιτίας της προσεγγιστικής απεικόνισης των καμπύλων από πολύγωνα (polygonisation) τονίζεται ότι παρατηρούνται γεωμετρικές ανακρίβειες.

Η προσέγγιση των Oliveira et al. [161] στο πρόβλημα του στοιβαγμού μη κανονικών σχημάτων βασίζεται επίσης στην χρησιμοποίηση του πολυγώνου No-Fit. Η μεθοδολογία τους περιλαμβάνει τη δημιουργία του μη-κυρτού περιγράμματος όλων των αντικειμένων τα οποία έχουν στοιβαχθεί ήδη. Αυτό το περίγραμμα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό του No-Fit πολυγώνου με το επόμενο προς στοιβαγμό αντικείμενο. Ο αλγόριθμος προκρίνει εκείνες τις θέσεις στοιβαγμού για τις οποίες ελαχιστοποιείται είτε το μήκος της διάταξης είτε ο όγκος της. Η προαναφερθείσα

προσέγγιση βελτιώθηκε κατόπιν από τους Gomes & Oliveira [162, 163] με την εισαγωγή της έννοιας του Inner-Fit πολύγωνου το οποίο στην ουσία αποτελεί το εσωτερικό No-Fit πολύγωνο του αντικειμένου προς στοιβαγμό και του διαθέσιμου χώρου στοιβαγμού. Οι ακμές και τα σημεία τομής του Inner-Fit πολύγωνου καθώς και όλων των No-Fit πολυγώνων μεταξύ των ήδη στοιβαχθέντων αντικειμένων και του αντικειμένου προς στοιβαγή δημιουργούν όλες τις δυνατές θέσεις στοιβαγμού για τις οποίες δεν θα δημιουργηθούν επικαλύψεις. Η συγκεκριμένη προσέγγιση βελτιώθηκε ακόμα περισσότερο μέσω της ενσωμάτωσης μιας διαδικασίας τοπικής βελτιστοποίησης της διάταξης των ήδη στοιβαχθέντων αντικειμένων, η οποία βασίζεται σε τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού, παρόμοιες με τις μεθόδους «συμπίεσης και διαχωρισμού» των Li & Milenkovic [155].

Οι πρώτες προσεγγίσεις των Dowsland & Dowsland [164] περιελάμβαναν την περιγραφή απλών γεωμετρικών τεχνικών για τον προσδιορισμό των επικαλύψεων σε μία διάταξη στοιβαγμένων αντικειμένων καθώς και διάφορους νέους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνικές. Ένας εξ αυτών είναι ο αλγόριθμος Jostle, ο οποίος σύμφωνα με τις αναφερθείσες δοκιμές παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται για τη βελτίωση μια τυχαίας διάταξης στοιβαγμένων αντικειμένων. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή μετατοπίζονται διαδοχικά όλα τα στοιβαχθέντα αντικείμενα από το αριστερό στο δεξιό άκρο του χώρου στοιβαγμού έτσι ώστε να καλυφθούν τα κενά της διάταξης. Σε επόμενη εργασία τους οι Dowsland et al. [165] παρουσίασαν μία νέα προσέγγιση χρησιμοποιώντας την έννοια του No-Fit πολυγώνου καθώς και την Bottom Left λογική τοποθέτησης. Ειδικότερα το No-Fit πολύγωνο χρησιμοποιήθηκε τόσο για την αποφυγή τυχών επικαλύψεων όσο και για το στοιβαγμό σύμφωνα με την λογική τοποθέτησης Bottom-Left. Υιοθετήθηκε επίσης η παραδοχή ότι τα αντικείμενα προς στοιβαγμό έχουν προκαθορισμένη φορά γεγονός το οποίο απέκλειε τις περιστροφές καθώς δεν περιέχονται μεθοδολογίες επιτάχυνσης της διαδικασίας εύρεσης της τελικής λύσης. Τέλος, η συγκεκριμένη προσέγγιση δε συνδυαζόταν με κάποιον ευρετικό αλγόριθμο αλλά περιοριζόταν στην βελτιστοποίηση μιας προ-διατεταγμένης διάταξης στοιβαγμού.

Αντίθετα με τις προηγούμενες προσεγγίσεις οι Bennell & Dowsland χρησιμοποίησαν έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης Tabu-Thresholding σύμφωνα με τον οποίο επιτρέπονται μεν, τιμωρούνται δε οι επικαλύψεις. Για τον υπολογισμό της οριζόντιας επικάλυψης δύο αντικειμένων προτάθηκε μία προσεγγιστική μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί περιγεγραμμένα οριζόντια παραλληλόγραμμα [166]. Το 2001, οι ερευνητές βελτίωσαν τη συγκεκριμένη μεθοδολογία με την υβριδοποίηση του αλγόριθμου Tabu με μια νέα διαδικασία βελτιστοποίησης [167].

Η Horper ήταν η πρώτη ερευνήτρια η οποία συγκέντρωσε και συνέκρινε τις περισσότερες μελέτες περίπτωσης στο χώρο του στοιβαγμού συμπεριλαμβανομένης της δικής της προσέγγισης [168]. Η εργασία της περιλαμβάνει τη σύγκριση πολλών ευρετικών και μετα-ευρετικών μεθοδολογιών βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με μια λογική τοποθέτησης Bottom-Left βασιζόμενη σε κλασσικούς τριγωνομετρικούς υπολογισμούς.

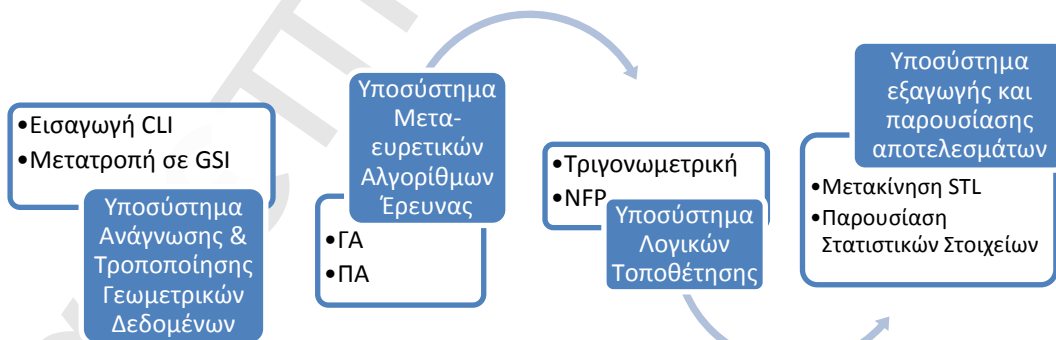
Ο Whitwel [169, 170] ακριβώς όπως και η Hooper συνέκρινε μια ποικιλία ευρετικών και μετα-ευρετικών μεθοδολογιών βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με μια βελτιωμένη Bottom-Left λογική τοποθέτησης η οποία αξιοποιεί επίσης την έννοια του No-Fit πολύγωνου. Είναι επίσης η πρώτη έρευνα στην οποία οι καμπύλες των μη κανονικών σχημάτων δεν αποτελούνται από ευθύγραμμα τμήματα αλλά από τόξα. Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα για όλα τα προβλήματα στοιβαγμού που απαντώνται γενικά στη βιβλιογραφία, τα περισσότερα από τα οποία ξεπερνούν τα μέχρι τότε γνωστά βέλτιστα αποτελέσματα θέτοντας νέα όρια.

6.6 Δομή αναπτυχθέντος λογισμικού για τον στοιβαγμό αντικειμένων

Το λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε για τον στοιβαγμό αντικειμένων στην πλατφόρμα κατασκευής μίας μηχανής Στερεολιθογραφίας υλοποιήθηκε στο περιβάλλον ανάπτυξης Matlab 2007a και αποτελείται από τέσσερα βασικά υποσυστήματα:

- το υποσύστημα ανάγνωσης και τροποποίησης των γεωμετρικών δεδομένων
- το υποσύστημα των κανόνων τοποθέτησης (Placement Rules)
- το υποσύστημα μετα-ευρετικών αλγορίθμων έρευνας και
- το υποσύστημα εξαγωγής και παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

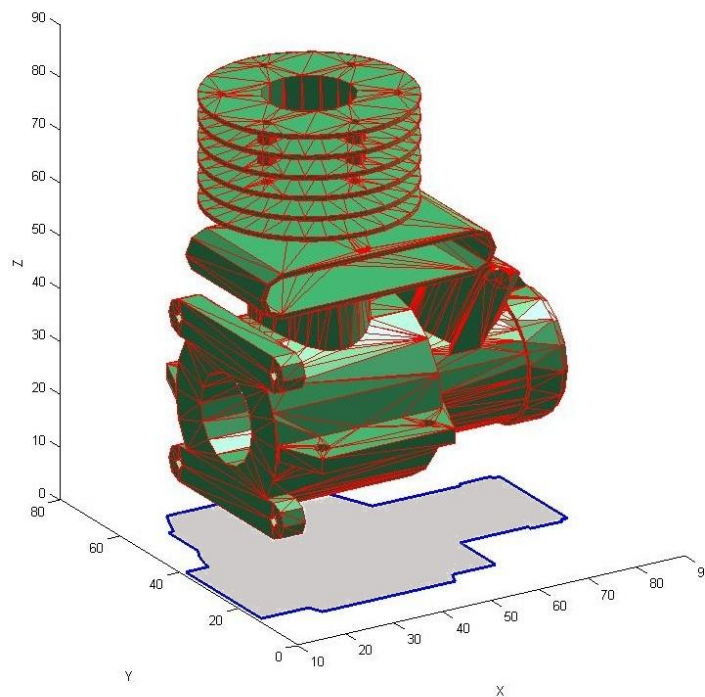
Στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζεται η δομή του αναπτυχθέντος λογισμικού καθώς και οι βασικές λειτουργίες που υλοποιούνται από κάθε υποσύστημα.



Σχήμα 6-3 Δομή λογισμικού στοιβαγμού αντικειμένων.

6.6.1 Περιγραφή υποσυστήματος ανάγνωσης και τροποποίησης των γεωμετρικών δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε το πρόβλημα στοιβαγμού αντικειμένων πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής της μηχανής της Στερεολιθογραφίας μπορεί να αναχθεί από τριδιάστατο πρόβλημα στοιβαγμού σε διδιάστατο πρόβλημα καθώς κατά την έννοια του Z άξονα της μηχανής στοιβάζεται πάντα ένα μόνο αντικείμενο. Συνεπώς, στη διαδικασία του στοιβαγμού αντί να χρησιμοποιείται άμεσα το αντικείμενο (δηλ. η πολυεδρική STL απεικόνισή του) δύναται να χρησιμοποιηθεί η προβολή του στο επίπεδο της πλατφόρμας κατασκευής (επίπεδο $X-Y$, βλ. Σχήμα 6-4).

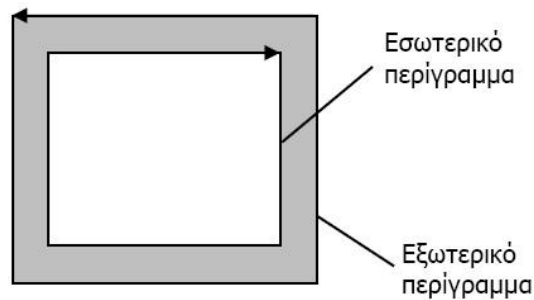


Σχήμα 6-4 Πολυεδρική απεικόνιση STL αντικειμένου τοποθετημένο πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής της μηχανής Στερεολιθογραφίας.

Επιπλέον, για όλα τα αντικείμενα τα οποία πρέπει να στοιβαχθούν στην πλατφόρμα κατασκευής θεωρείται ότι έχει ήδη βελτιστοποιηθεί ο προσανατολισμός κατασκευής τους. Συνεπώς, δεν επιτρέπεται πλέον οποιαδήποτε περιστροφή των αντικειμένων περί των αξόνων X και Y , οι οποίοι ορίζονται από το μήκος και πλάτος της πλατφόρμας. Για τον υπολογισμό της προβολής χρησιμοποιείται το αρχείο τομών του αντικειμένου, το οποίο αποτελεί μια ιεραρχική στίβα διδιάστατων διατομών και απαιτείται ούτως ή άλλως για την κατασκευή του.

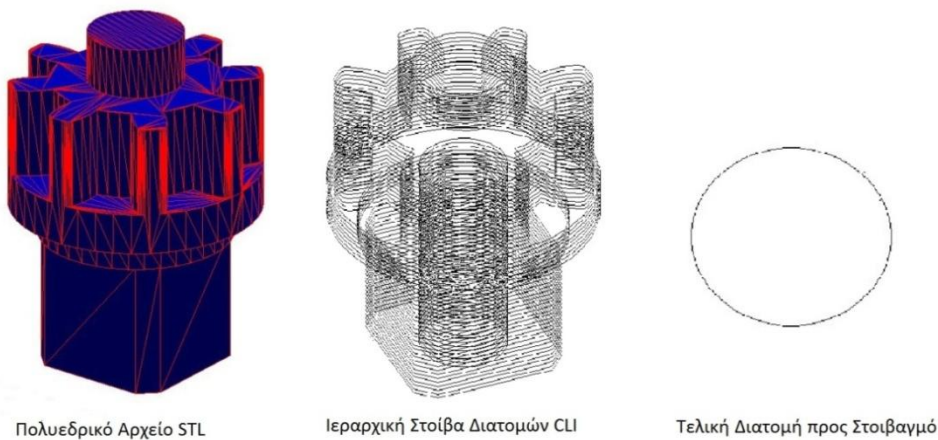
Ένα από τα πλέον κοινά πρότυπα περιγραφής της γεωμετρίας διαδοχικών παράλληλων τόμων για την κατασκευή ενός αντικειμένου με οποιαδήποτε τεχνολογία ΣΚ είναι το πρότυπο CLI. Αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος “BRITE/EURAM-Rapid Prototyping

Techniques” [171] ως μέσο μεταφοράς των δεδομένων μαγνητικής ή αξονικής τομογραφίας προς τα συστήματα ΣΚ για την κατασκευή ιατρικών μοντέλων. Οι τομές είναι ταξινομημένες από κάτω προς τα πάνω (κατά τη κατεύθυνση κατασκευής) και για κάθε τομή καταγράφεται το ύψος της και τα απαραίτητα κλειστά πολύγωνα που την περικλείουν. Η γεωμετρία κάθε πολυγώνου περιγράφεται με τη διαδοχική παράθεση των κορυφών του πολυγώνου με φορά αντίθετη της φοράς των δεικτών του ρολογιού εάν πρόκειται για εξωτερικό περίγραμμα και σύμφωνα με τη φορά των δεικτών για εσωτερικό περίγραμμα (βλ. Σχήμα 6-5).



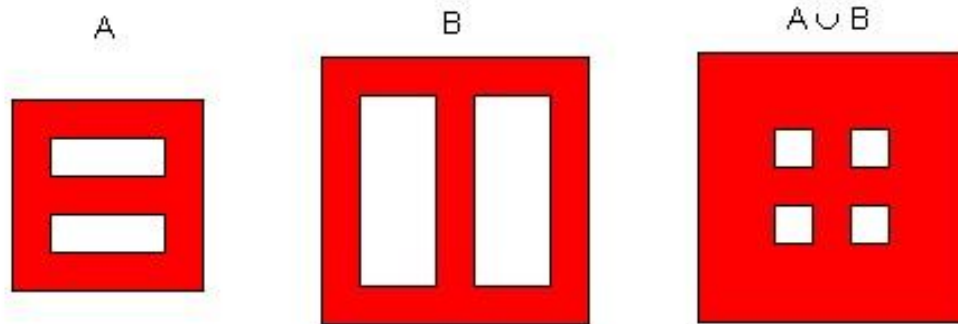
Σχήμα 6-5 Σχηματική απεικόνιση αρχείου CLI.

Έτσι, ως είσοδος της διαδικασίας που υλοποιεί τον στοιβαγμό επιλέχθηκε να είναι η ιεραρχική στοίβα τομών κωδικοποιημένη κατά το πρότυπο CLI με βάση την οποία υπολογίζεται η προβολή του αντικειμένου στο επίπεδο της πλατφόρμας κατασκευής. Ο υπολογισμός της προβολής επιτυγχάνεται μέσω της ένωσης (Boolean Union) των διαδοχικών διατομών της στοίβας (βλ. Σχήμα 6-6) με φορά από το τελευταίο στρώμα προς το πρώτο στρώμα.



Σχήμα 6-6 Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας εύρεσης προβολής αντικειμένου.

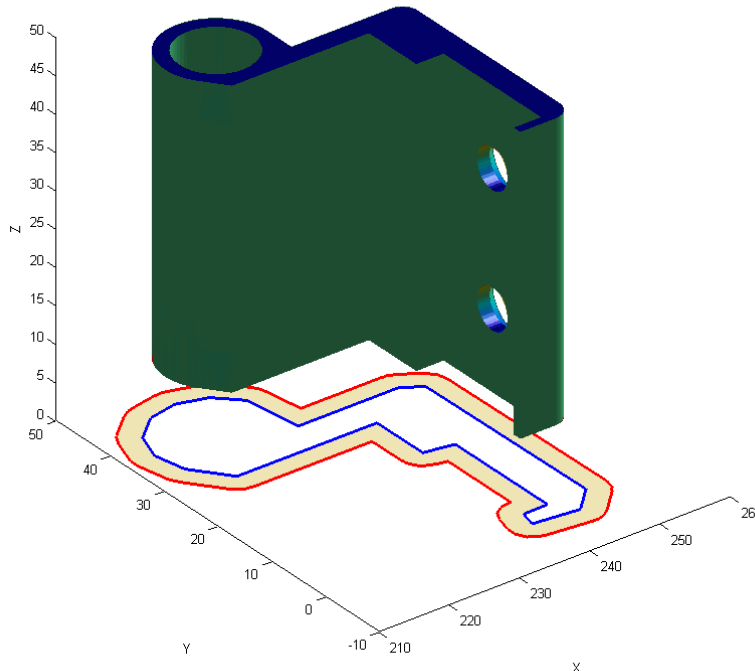
Για την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιείται η ειδική συνάρτηση “PolyBool” του MatLab. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία για κάθε αντικείμενο της προβολής του, η οποία περιγράφεται ως ένα σύνολο πολυγώνων τα οποία ορίζουν το εξωτερικό της περίγραμμα, καθώς και τα εσωτερικά περιγράμματα πιθανών οπών όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-7.



Σχήμα 6-7 Σχηματική απεικόνιση ένωσης δυο διατομών.

Γίνεται αντιληπτό ότι οι διατομές του αρχείου CLI, λόγω της προέλευσής τους από τον τεμαχισμό του πολυεδρικού μοντέλου (STL) το οποίο για λόγους πιστότητας προς το αρχικό μοντέλο CAD αποτελείται από μεγάλο αριθμό τριγώνων, θα αποτελούνται επίσης από μεγάλο αριθμό ευθύγραμμων τμημάτων. Συνεπώς, και η τελική προβολή, η οποία είναι η ένωση όλων των διατομών του αρχείου CLI, θα αποτελείται επίσης από μεγάλο αριθμό ευθύγραμμων τμημάτων γεγονός το οποίο, όπως θα αναλυθεί σε επόμενες ενότητες, αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές πηγές επιβάρυνσης του υπολογιστικού φόρτου της διαδικασίας της στοιβαξης και συνεπώς πηγή καθυστέρησης. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου επιτρέπεται η τροποποίηση της τελικής διατομής/προβολής που περιγράφει το αντικείμενο προς στοιβαγμό με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνονται τα σημεία που κρίνονται απαραίτητα για την ακριβή γεωμετρική απεικόνιση της. Η διαδικασία για την τροποποίηση (απλοποίηση) της διατομής αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αποσκοπεί στη δημιουργία μίας όμοιας διατομής με την αρχική, αντισταθμισμένη ωστόσο κατά μια συγκεκριμένη ανοχή d (βλ. Σχήμα 6-8). Ο σκοπός αυτού του σταδίου είναι διττός. Καταρχάς στοχεύει στη δημιουργία μια ζώνης περιμετρικά του αντικείμενου προς στοιβαγμό ώστε να αποφευχθούν κατασκευαστικές αστοχίες λόγω της επαφής των αντικειμένων κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Κατά δεύτερον, η αντιστάθμιση του αντικείμενου σκοπεύει στο να δημιουργήσει μια νέα όμοια μεγαλύτερη διατομή, η οποία ακόμα και όταν υποστεί και τη δεύτερη φάση της μείωσης των ευθύγραμμων τμημάτων από τα οποία αποτελείται να εμπεριέχει πλήρως την αρχική διατομή προς στοιβαγμό. Έτσι εξαλείφεται η περίπτωση κατά την οποία ένα αντικείμενο αν και έχει θεωρηθεί ότι μπορεί να στοιβαχθεί επιτυχώς στην πραγματικότητα αυτό είναι αδύνατο. Στο

Σχήμα παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου το περίγραμμα με την μπλε γραμμή είναι η αρχική διατομή ενώ το αντίστοιχο με την κόκκινη είναι το αντισταθμισμένο περίγραμμα με ανοχή d της τάξης των 3mm.



Σχήμα 6-8 Σχηματική απεικόνιση αρχικής και αντισταθμισμένης διατομής.

Για την δημιουργία της αντισταθμισμένης διατομής χρησιμοποιείται επαναληπτικά η τεχνική της αντιστάθμισης ευθύγραμμου τμήματος καθώς το πρότυπο CLI κωδικοποιεί κάθε είδους γεωμετρία μόνο μέσω ευθύγραμμων τμημάτων. Έστω λοιπόν τα δυο ευθύγραμμα τμήματα E_1 και E_2 του Σχήματος 6-9 τα οποία πρέπει να αντισταθμιστούν με ανοχή d . Η ανοχή d μεταφράζεται αρχικά στην δημιουργία ενός νέου ευθυγράμμου τμήματος ίδιου μήκους, παράλληλα και σε απόσταση d από το αρχικό. Η δημιουργία κάθε νέου αντισταθμισμένου ευθύγραμμου τμήματος γίνεται διαδοχικά δηλαδή πρώτα θα δημιουργηθεί για το τμήμα E_1 και στη συνέχεια για το E_2 . Για τη δημιουργία του αντισταθμισμένου τμήματος E'_1 απαιτείται αρχικά ο υπολογισμός των εξής ποσοτήτων (βλ. Σχήμα 6-9 β):

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (6.1)$$

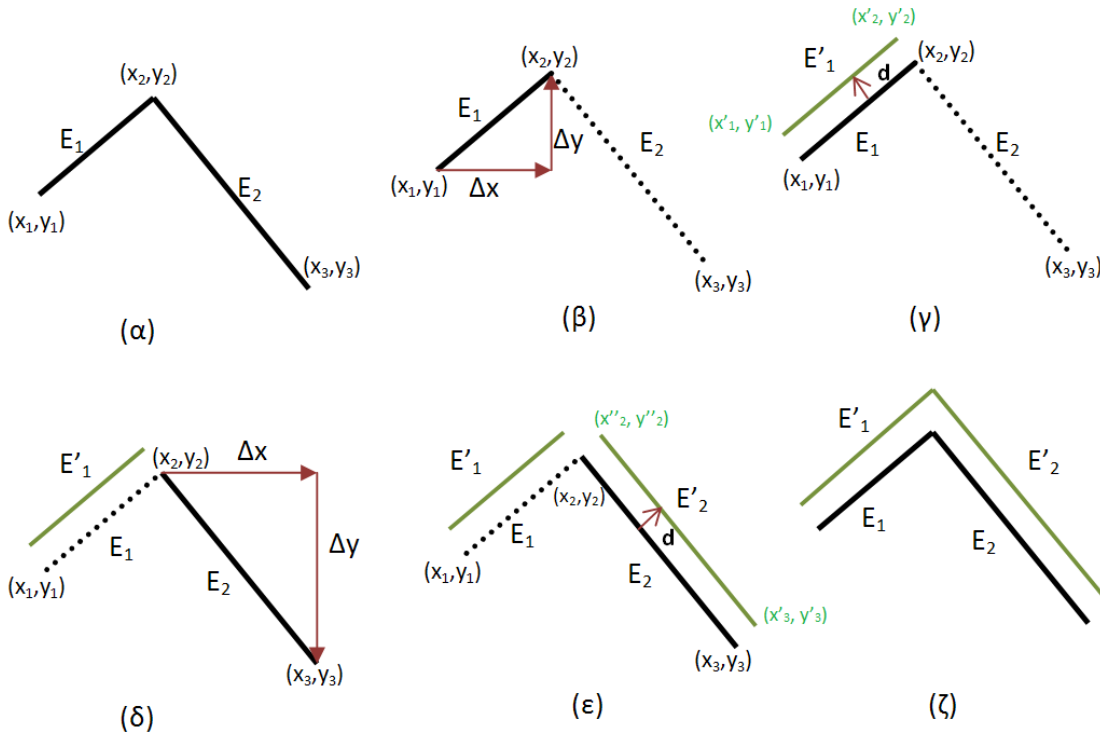
$$\Delta y = y_2 - y_1 \quad (6.2)$$

Στη συνέχεια οι κορυφές του αντισταθμισμένου ευθυγράμμου τμήματος E'_1 υπολογίζονται ως εξής:

$$X'_n = X_n - d * \sin\left(\tan^{-1}\frac{\Delta x}{\Delta y}\right) \quad n = 1,2 \quad (6.3)$$

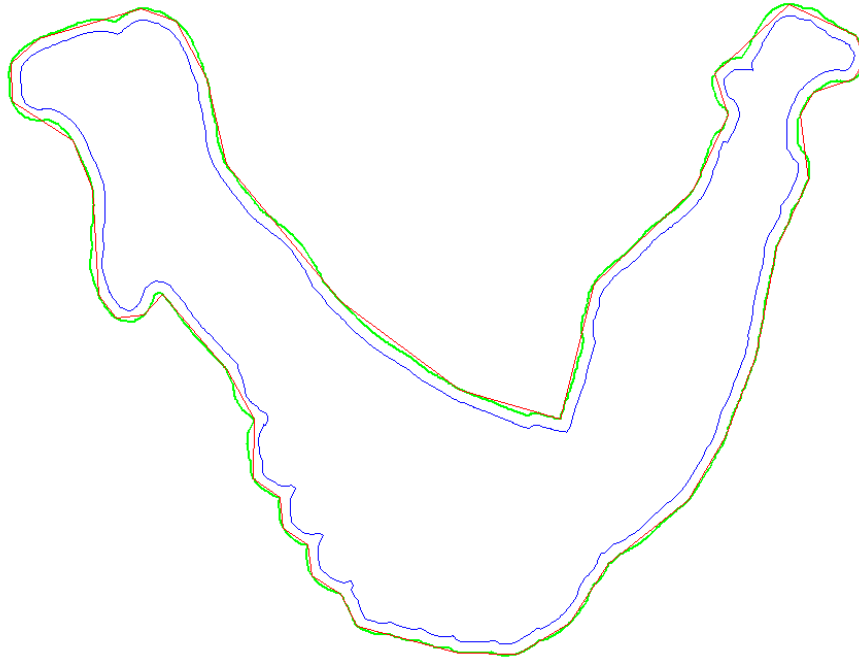
$$Y'_n = Y_n + d * \cos\left(\tan^{-1}\frac{\Delta x}{\Delta y}\right) \quad n = 1,2 \quad (6.4)$$

Ομοίως επαναλαμβάνονται τα βήματα και για το ευθύγραμμο τμήμα E_2 (βλ. Σχήμα 6-9 δ&ε). Αφού δημιουργηθούν και τα δυο τμήματα E'_1 και E'_2 τότε, υλοποιώντας ένα απλό τεστ τομής ευθύγραμμων τμημάτων, επεκτείνονται ώστε να ενωθούν (βλ. Σχήμα 6-9 ζ).



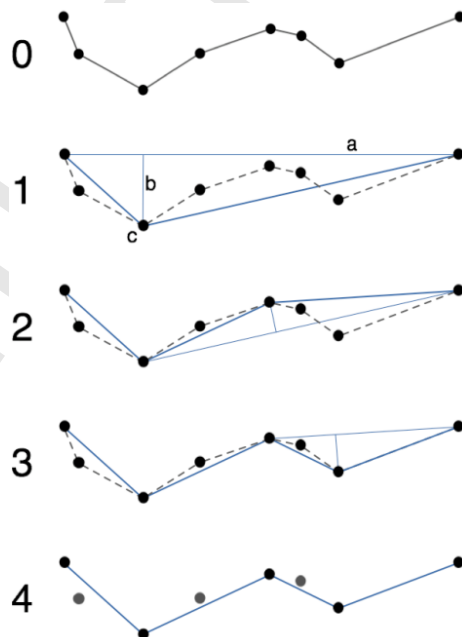
Σχήμα 6-9 Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας αντιστάθμισης δύο ευθυγραμμών τμημάτων.

Το δεύτερο στάδιο της τροποποίησης της διατομής προς στοιβαγμό αφορά στην μείωση των απαραίτητων ευθυγράμμων τμημάτων που χρειάζονται για να την περιγράψουν. Η μείωση αυτή θα πραγματοποιηθεί επί της αντισταθμισμένης διατομής φροντίζοντας πάντα η διατομή που θα δημιουργηθεί να μπορεί να περιέχει την αρχική διατομή. Στο Σχήμα 6-10 παρουσιάζονται σχηματικά η αρχική διατομή με μπλε χρώμα, η αντισταθμισμένη διατομή με πράσινο χρώμα και τελικά η αντισταθμισμένη/απλοποιημένη διατομή αφού έχει υποστεί μείωση η οποία και παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα. Τόσο η αρχική όσο και η αντισταθμισμένη διατομή αποτελείται από 998 σημεία ενώ η τελική διατομή μετά τη μείωση αποτελείται μόνο από 30 σημεία. Η μείωση πραγματοποιείται με χρήση του αλγόριθμου των Douglas–Peucker [172] ο οποίος αφορά τη μείωση των σημείων από τα οποία περιγράφεται μια καμπύλη. Για την κατανόηση του ως θεωρηθεί το παράδειγμα της καμπύλης του Σχήματος 6-11 0. Ο αλγόριθμος ξεκινά ενώνοντας τα δυο άκρα της αρχικής γραμμής με μια νέα γραμμή a που ονομάζεται γραμμή βάσης (βλ. Σχήμα 6-11 2).



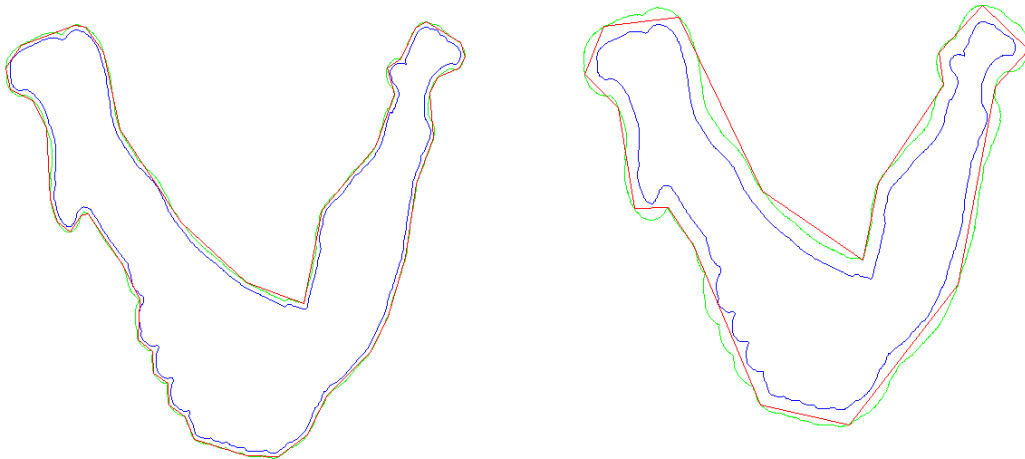
Σχήμα 6-10 Σχηματική απεικόνιση αρχικής, αντισταθμισμένης και απλοποιημένης διατομής.

Εάν οι κάθετες αποστάσεις από όλα τα ενδιάμεσα σημεία ως τη γραμμή βάσης είναι μικρότερα από μια ανοχή ϵ τότε η αρχική καμπύλη μπορεί να αναπαρασταθεί μόνο από τη γραμμή βάσης. Στη συνέχεια ευρίσκεται το σημείο (c) το οποίο απέχει περισσότερο από τη γραμμή βάσης και αν η απόσταση αυτή b (βλ. Σχήμα 6-11 1) είναι μεγαλύτερη από την ανοχή ϵ τότε το σημείο c δεν μπορεί να απαλειφθεί με αποτέλεσμα η καμπύλη τώρα να αποτελείται από δυο ευθύγραμμα τμήματα. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται τώρα για τα νέα ευθύγραμμα τμήματα που προκύπτουν μέχρι να καταλήξουμε στην καμπύλη 4' η οποία είναι και η τελική.



Σχήμα 6-11 Σχηματική απεικόνιση απλοποίησης καμπύλης.

Τροποποιώντας κατάλληλα τις ανοχές τόσο της διαδικασίας αντιστάθμισης όσο και της μείωσης μπορούμε να απεικονίσουμε περισσότερα αφαιρετικά ή όχι την διατομή προς στοιβαγμό, ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη ανάμεσα στην ταχύτητα της διαδικασίας στοιβαγμού ή στην καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου. Έτσι στο Σχήμα 6-12 μπορούμε να δούμε μια διατομή με απεικόνιση 30 σημείων που ακολουθεί πιο πιστά την γεωμετρία της αρχικής διατομής και μια πιο αφαιρετική απεικόνιση των 18 σημείων.



Σχήμα 6-12 Σχηματική απεικόνιση απλοποιημένης διατομής με εναλλακτικό επίπεδο λεπτομέρειας.

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της τροποποίησης, η γεωμετρία της προβολής αποθηκεύεται σε ένα αρχείο το οποίο βασίζεται στην δομή κατάλληλου πρότυπου *GSI - Geometry Solid Interface*, το οποίο αναπτύχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Το συγκεκριμένο πρότυπο ορίζει για κάθε αντικείμενο, το οποίο θα συμμετέχει στη μετέπειτα διαδικασία στοιβαγμού, ένα μοναδικό αριθμό αναγνώρισης, καθώς και τις συντεταγμένες των κορυφών των πολυγώνων του (τόσο των εξωτερικών όσο και εσωτερικών περιγραμμάτων) και το όνομα του αρχείου STL από το οποίο προέρχεται (βλ. Σχήμα 6-13).

```

solid Όνομα αρχείου προέλευσης STL
polygon Αριθμός Αναγνώρισης
external
  Vertex1 Συντ. X Συντ. Y
  ...
  Vertexn Συντ. X Συντ. Y
internal
  Vertex1 Συντ. X Συντ. Y
  ...
  Vertexn Συντ. X Συντ. Y
close_solid
  
```

Σχήμα 6-13 Δομή αρχείου GSI.

6.6.2 Περιγραφή υποσυστημάτων μεταερευνητικής έρευνας και κανόνων τοποθέτησης

Η πολυπλοκότητα των γεωμετρικών ιδιοτήτων των αντικειμένων προς στοιβαγμό επηρεάζει τόσο το μέγεθος του προβλήματος όσο και την επιλογή της προσέγγισης για την επίλυσή του. Μία από τις απλούστερες σχετικά περιπτώσεις αφορά την αναζήτηση του βέλτιστου στοιβαγμού αντικειμένων των οποίων η προβολή στην πλατφόρμα κατασκευής είναι της μορφής ορθογώνιου παραλληλόγραμμου. Ωστόσο, τέτοιου είδους στοιβαγμοί είναι μάλλον περιορισμένοι στο υφιστάμενο πρόβλημα, εξαιτίας της φύσης των αντικειμένων που κατασκευάζονται με τις τεχνολογίες ΣΚ. Έτσι, αντιμετωπίζοντας κυρίως μη κανονικές μορφές πολυγώνων στη διαδικασία του στοιβαγμού, ο χώρος αναζήτησης πιθανών βέλτιστων λύσεων που προκύπτει είναι σχετικά μεγάλος και σύνθετος.

Μελετώντας την βιβλιογραφία σε παρόμοιας υφής προβλήματα, απαντώνται αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις για την επίλυσή του. Ωστόσο, φαίνεται να υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές για την αναπαράσταση και την εξερεύνηση του χώρου λύσης. Η πρώτη προσέγγιση αφορά την κωδικοποίηση μιας πιθανής λύσης ως διατεταγμένη λίστα και στη συνέχεια την κατασκευή της φυσικής διάταξης του στοιβαγμού των αντικειμένων μέσω σειριακών κανόνων τοποθέτησης (Babu & Babu [152], Gomes & Oliveira [162] Burke et al. [170]). Η δεύτερη προσέγγιση δημιουργεί εξ αρχής την φυσική διάταξη του στοιβαγμού των αντικειμένων και στη συνέχεια οποιαδήποτε αλλαγή πραγματοποιείται με μετακίνηση κάποιου αντικειμένου σε σχέση με την υπόλοιπη διάταξη (Bennell & Dowsland [166], Gomes & Oliveira [173], Egeblad et al. [174]).

Η επιτυχία της πρώτης στρατηγικής εξαρτάται από δύο κρίσιμα χαρακτηριστικά του αλγορίθμου, ήτοι από τους κανόνες με τους οποίους πραγματοποιείται ο στοιβαγμός και από τη σειρά με την οποία στοιβάζονται τα αντικείμενα. Αν και έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία (Dowsland et al. [165]) εφαρμογές οι οποίες υιοθετούν μια σταθερή ακολουθία στοιβαγμού, οι καλύτερες λύσεις λαμβάνονται με την πραγματοποίηση επαναλαμβανόμενων αλλαγών στην ακολουθία στοιβαξης των αντικειμένων και στην αντίστοιχη φυσική διάταξη (Burke et al. [170]). Πλεονέκτημα της πρώτης στρατηγικής θεωρείται το γεγονός ότι η μετάφραση της ακολουθίας στοιβαγμού στην αντίστοιχη φυσική διάταξη πραγματοποιείται με προκαθορισμένους κανόνες που εγγυώνται την εφικτότητά της. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο χώρος λύσης σε ένα διακριτό αλλά ακόμα πολύ μεγάλο σύνολο λύσεων. Εντούτοις, αυτό μπορεί επίσης να αποτελεί μειονέκτημα καθώς με την αφαίρεση λύσεων από το χώρο λύσης ίσως να μειώνεται η δυνατότητα εύρεσης του ολικού βέλτιστου ή άλλων τοπικά βέλτιστων λύσεων.

Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την εξερεύνηση του χώρου λύσης μπορούν με τη σειρά τους να διαιρεθούν σε δύο βασικές ομάδες, ήτοι στις ντετερμινιστικές και στις ευρετικές μεθόδους. Οι ντετερμινιστικές μέθοδοι εγγυώνται εξ'ορισμού την εύρεση της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος. Συνήθως βασίζονται σε τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού ή σε απαριθμητικές τεχνικές, όπως ο δυναμικός προγραμματισμός (Sedgewick, [175]). Ωστόσο, για προβλήματα υψηλότερης πολυπλοκότητας αυτές οι τεχνικές καθίστανται συνήθως ανεπαρκείς εξαιτίας του τεράστιου αριθμού πιθανών λύσεων οι οποίες θα πρέπει να αξιολογηθούν. Δεδομένου λοιπόν ότι οι συμβατικές μέθοδοι συνήθως αποτυγχάνουν να ανακαλύψουν την βέλτιστη λύση σε λογικό υπολογιστικό χρόνο, υιοθετούνται κυρίως ευρετικές μέθοδοι εξερεύνησης του χώρου λύσης. Αντίθετα από τις ντετερμινιστικές μεθόδους οι ευρετικές τεχνικές δεν εγγυώνται την εύρεση της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος θεωρούνται όμως ικανές να προσεγγίζουν λύσεις οι οποίες βρίσκονται συνήθως κοντά στο βέλτιστο με λογικό υπολογιστικό κόστος. Ο συνδυασμός των ευρετικών τεχνικών εξερεύνησης του χώρου λύσης και συγκεκριμένων κανόνων φυσικού στοιβαγμού των αντικειμένων δύναται να βελτιώσει την απόδοση του αλγόριθμου όπως αυτή εκφράζεται από τον λόγο υπολογιστικού κόστους προς ποιότητα λύσης. Ωστόσο, η ποιότητα της παραγόμενης λύσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους κανόνες στοιβαγμού που υιοθετούνται καθώς συνηθίζεται να είναι στοχευμένοι σε συγκεκριμένες υποκατηγορίες του προβλήματος στοιβαγμού.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, εξετάστηκε μια σειρά διαφορετικών προσεγγίσεων σχετικά με την εξερεύνηση του χώρου λύσης και την τοποθέτηση των προς στοιβαγμό αντικειμένων στην πλατφόρμα κατασκευής. Έτσι η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στην μελέτη εναλλακτικών συνδυασμών των κυριότερων μετα-ευρετικών τεχνικών έρευνας και κανόνων τοποθέτησης, με σκοπό την εύρεση του συνδυασμού εκείνου που αποδίδει καλύτερα στο υπό εξέταση πρόβλημα.

6.6.2.1 Περιγραφή Κανόνων Τοποθέτησης

Τα προβλήματα στοιβαγμού είναι γνωστά για την εντατική χρήση υπολογιστικά ακριβών γεωμετρικών αλγόριθμων. Ιδιαίτερα έντονη χρήση υπολογιστικά ακριβών γεωμετρικών αλγόριθμων παρατηρείται κυρίως στις περιπτώσεις όπου οι προς στοιβαγμό προβολές είναι μη κανονικής μορφής σε αντίθεση με την περίπτωση στοιβαγμού προβολών υπό μορφή ορθογώνιου παραλληλόγραμμου όπου και απαιτείται απλή σύγκριση συντεταγμένων. Οι γεωμετρικοί αυτοί αλγόριθμοι απαντώνται κυρίως στη φάση κατά την οποία η ακολουθία στοιβαγμού μετατρέπεται στη φυσική διάταξη του στοιβαγμού εφαρμόζοντας ένα σύνολο προκαθορισμένων κανόνων τοποθέτησης. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι για τη δημιουργία μιας αποτελεσματικής προσέγγισης

στοιβαγμού απαιτείται μεν η χρήση εύρωστων γεωμετρικών αλγορίθμων προκειμένου η ποιότητα της λύσης να βρίσκεται σε αποδεκτά επίπεδα, επιβάλλεται όμως και ο περιορισμός της χρήσης τους στο ελάχιστο δυνατό προκειμένου να μην επιβαρύνεται υπερβολικά ο αλγόριθμος όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος.

Ο χώρος λύσης των προβλημάτων στοιβαγμού και δη για τα προβλήματα τα οποία αφορούν στον στοιβαγμό περίπλοκων μορφολογικά αντικείμενων είναι μεγάλος. Συνυπολογίζοντας δε ότι στο υφιστάμενο πρόβλημα στοιβαγμού αντικείμενων πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής υπάρχει ελευθερία περιστροφής των αντικείμενων ως προς τον άξονα κατασκευής Z γίνεται αντιληπτό ότι ο χώρος λύσης διευρύνεται ακόμα περισσότερο. Η αυξημένη αυτή πολυπλοκότητα αντιμετωπίζεται στην διεθνή βιβλιογραφία έμμεσα αλλά και άμεσα. Η έμμεση αντιμετώπιση η οποία αποτελεί και την συνηθέστερη πρακτική επιτυγχάνεται είτε με τον περιορισμό του εύρους των γωνιών περιστροφής ενός αντικείμενου, είτε με την δυναμική επιλογή ενός τελικού προσανατολισμού του αντικείμενου, σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένα κριτήρια όπως η επιλογή του προσανατολισμού που ελαχιστοποιεί το μήκος της προβολής κατά ένα συγκεκριμένο άξονα.

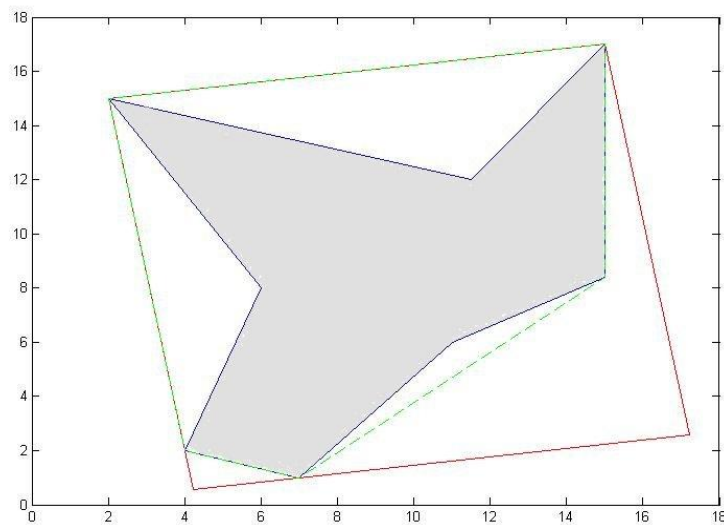
Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός των δυο προσεγγίσεων που αναφέρθηκαν προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα η οποία απορρέει από την ελευθερία περιστροφής των αντικείμενων προς στοιβαγμό περί του άξονα Z . Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η έννοια του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου ελάχιστου εμβαδού (Minimum Bounding Rectangle-MBR) το οποίο περικλείει ένα αντικείμενο, η οποία αξιοποιείται για τον περιορισμό του αριθμού των προσανατολισμών με τους οποίους μπορεί να στοιβαχθεί ένα αντικείμενο στην πλατφόρμα, ενώ στην συνέχεια επιχειρείται η δυναμική επιλογή του τελικού επιθυμητού προσανατολισμού βάσει ενός συνόλου προκαθορισμένων κανόνων. Το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού ενός αντικείμενου είναι εκείνο το παραλληλόγραμμο το οποίο περικλείει όλο το αντικείμενο και ταυτόχρονα παρουσιάζει το ελάχιστο εμβαδό σε σχέση με όλα τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα τα οποία δύνανται να περικλείουν επίσης το αντικείμενο.

Για τον υπολογισμό του ορθογώνιου παραλληλογράμμου ελάχιστου εμβαδού ενός αντικείμενου χρησιμοποιούνται τα δυο βασικά θεωρήματα τα οποία διατυπώθηκαν από τους Freeman & Shapira [176]:

- **Θεώρημα 1:** το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού ενός κυρτού αντικείμενου διαθέτει τουλάχιστον μία πλευρά η οποία είναι συνευθειακή με μία από τις πλευρές του κυρτού αντικείμενου.

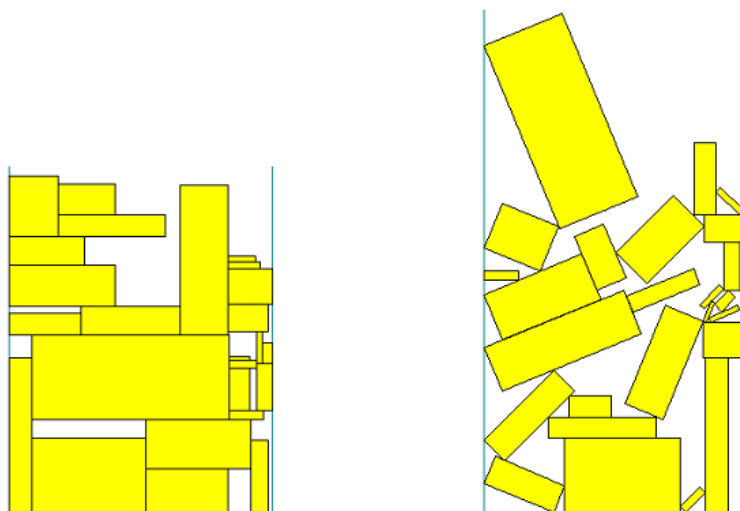
- **Θεώρημα 2:** το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού του κυρτού περιβλήματος (Convex Hull) ενός μη κυρτού (Non Convex) αντικειμένου ταυτίζεται με το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού του μη κυρτού αντικειμένου.

Συνεπώς, για τον υπολογισμό του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου ελάχιστου εμβαδού ενός μη κυρτού αντικειμένου απαιτείται αρχικά ο υπολογισμός του κυρτού περιβλήματος του αντικείμενου. Για τον υπολογισμό του κυρτού περιβλήματος χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη λογισμικού QHull η οποία υλοποιεί μια από τις πιο γνώστες τεχνικές εύρεσης του κυρτού περιβλήματος ενός συνόλου σημείων και συγκεκριμένα την Quick Hull των Preparata & Shamos [177]. Στην συνέχεια δημιουργούνται τόσα ορθογώνια παραλληλόγραμμα όσες και οι πλευρές του κυρτού περιβλήματος. Κάθε ένα από αυτά τα παραλληλόγραμμα διαθέτει τουλάχιστον μία πλευρά η οποία είναι συνευθειακή με μία πλευρά του κυρτού περιβλήματος. Τελικά επιλέγεται το παραλληλόγραμμο το οποίο διαθέτει το ελάχιστο εμβαδό. Στο Σχήμα 6-6 παρουσιάζεται ένα τυχαίο μη κυρτό αντικείμενο, το κυρτό περίβλημά του (σημειώνεται με πράσινη διακεκομμένη γραμμή) καθώς και το αντίστοιχο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού.



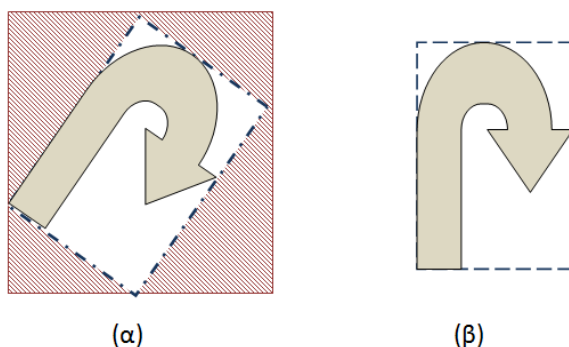
Σχήμα 6-14 Κυρτό περίβλημα και MBR μη κυρτού αντικειμένου.

Στη συνέχεια το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού (MBR) περιστρέφεται κατά τέτοια γωνία έτσι ώστε οι πλευρές του να ευθυγραμμιστούν με τους άξονες της πλατφόρμας κατασκευής. Η περιστροφή αυτή απαιτείται για την επίτευξη της βέλτιστης διάταξης στοιβαγμού των ορθογωνίων παραλληλογράμμων (Σχήμα 6-15), καθώς μέσω της ευθυγράμμισης των πλευρών με τους άξονες ελαχιστοποιείται το ορθογώνιο αποτύπωμα τους στην πλατφόρμα κατασκευής.



Σχήμα 6-15 Ορθογωνικός στοιβαγμός.

Το γεγονός αυτό μεταφράζεται αυτόματα στην αύξηση του ενεργού χώρου στον οποίο δύναται να στοιβαχθούν και άλλα αντικείμενα. Στο Σχήμα 6-16 παρατηρούμε το ίδιο αντικείμενο το οποίο στην μεν περίπτωση (α) είναι περιστραμμένο κατά μια τυχαία γωνία ενώ στη περίπτωση (β) έχει περιστραφεί ώστε οι πλευρές του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου ελάχιστου εμβαδού να είναι ευθυγραμμισμένες με τους άξονες X και Y . Με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή αποτυπώνεται το ορθογώνιο αποτύπωμα του αντικειμένου στην πλατφόρμα. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση (α) το ορθογώνιο αποτύπωμα διαφέρει από το ορθογώνιο ελάχιστου εμβαδού με αποτέλεσμα οι παγιδευμένοι χώροι που δημιουργούνται (σημειώνονται με διαγώνια διαγράμμιση) ίσως να είναι δυσκολότερο να αξιοποιηθούν αργότερα για περαιτέρω στοιβαγμό αντικειμένων σε σχέση με την περίπτωση (β) όπου το ορθογώνιο αποτύπωμα ταυτίζεται με το ορθογώνιο ελάχιστου εμβαδού.



Σχήμα 6-16 Εναλλακτικοί προσανατολισμοί στοιβαγμού.

Από τη στιγμή που θα περιστραφεί το αντικείμενο με τον τρόπο που περιγράφηκε άνωθεν δημιουργούνται και άλλοι τρεις προσανατολισμοί, οι οποίοι επίσης ελαχιστοποιούν το αντίστοιχο ορθογώνιο αποτύπωμα στην πλατφόρμα κατασκευής. Οι προσανατολισμοί αυτοί προκύπτουν με

διαδοχικές βηματικές περιστροφές κατά 90° σε σχέση με την αρχική. Η επιλογή του τελικού προσανατολισμού που θα χρησιμοποιηθεί στον στοιβαγμό θα πραγματοποιηθεί ανάμεσα στους τέσσερις αυτούς προσανατολισμούς.

Έχοντας υπολογίσει για κάθε αντικείμενο τους πιθανούς προσανατολισμούς στοίβαξης ακολουθεί η εφαρμογή συγκεκριμένων κανόνων τοποθέτησης των αντικειμένων στην πλατφόρμα κατασκευής. Οι κανόνες τοποθέτησης αποτελούν στην ουσία τον μηχανισμό μετατροπής της ακολουθίας στοιβαγμού στην αντίστοιχη φυσική διάταξη βάσει της οποίας προσδιορίζεται η φυσική θέση κάθε αντικειμένου πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Στην παρούσα διατριβή εξετάζονται δυο διαφορετικά, από άποψη λογικής, σύνολα κανόνων τοποθέτησης, τα οποία συνδυάζονται με τις δύο κύριες τεχνικές προσδιορισμού της σχετικής θέσης δυο αντικειμένων στο χώρο, όπως αυτές απαντώνται στη βιβλιογραφία [168, 169].

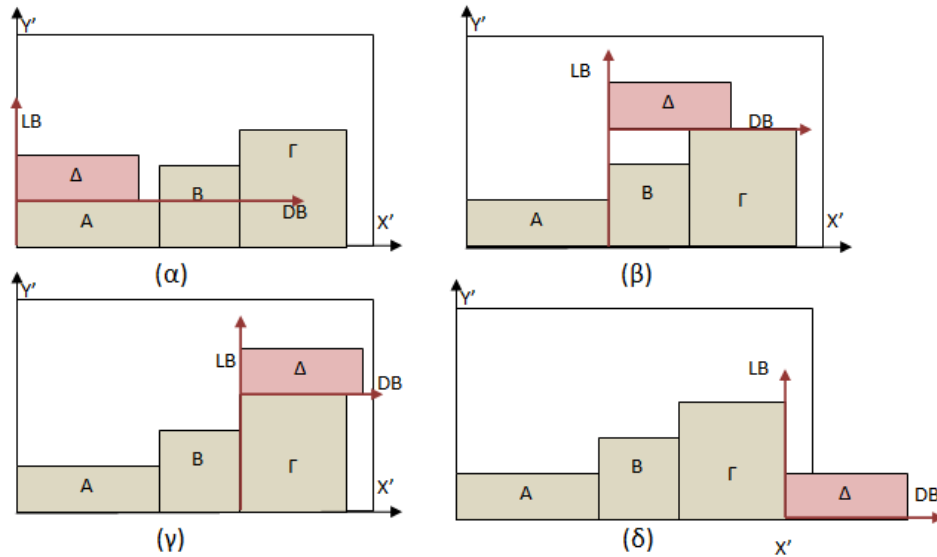
6.6.2.1.1 Κανόνες τοποθέτησης LBDB

Το πρώτο σύνολο κανόνων τοποθέτησης ακολουθεί μια διαδικασία δύο σταδίων έτσι ώστε ένα αντικείμενο να στοιβαχθεί στην πλατφόρμα κατασκευής χωρίς να επικαλύπτει κάποια από τα ήδη υπάρχοντα και να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερος από τον διαθέσιμο ελεύθερο χώρο. Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας επιλέγεται δυναμικά η αρχική θέση στοίβαξης του αντικείμενου και η οποία βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχή των αξόνων X και Y της πλατφόρμας κατασκευής (κάτω αριστερή γωνία). Το δεύτερο στάδιο αποσκοπεί στην αύξηση της πυκνότητας του στοιβαγμού μέσω περαιτέρω μετακίνησης του προς στοιβαγμό αντικείμενου όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς τα ήδη στοιβαγμένα αντικείμενα εκμεταλλευόμενοι μορφολογικά χαρακτηριστικά της μη κυρτής γεωμετρίας των αντικειμένων. Για την καλύτερη κατανόηση των φάσεων της διαδικασίας στοιβαγμού LBDB θα παρουσιαστούν δύο παραδείγματα. Το πρώτο παράδειγμα αποσκοπεί στην διευκρίνιση της πρώτης φάσης του στοιβαγμού και για αυτόν τον λόγο αφορά τον στοιβαγμό ορθογωνίων παραλληλογράμμων αφού η επιλογή της αρχικής θέσεως στοιβαγμού βασίζεται στην έννοια του MBR του αντικείμενου. Το δεύτερο παράδειγμα αποσκοπεί στην διευκρίνιση της δεύτερης φάσης στοιβαγμού και αφορά σε μη κυρτά αντικείμενα προκειμένου να παρουσιαστεί η επιρροή των μορφολογικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων στην επιλογή της τελικής θέσης στοιβαγμού.

Πριν ξεκινήσει η περιγραφή των παραδειγμάτων κρίνεται απαραίτητη η επεξήγηση ορισμένων βασικών εννοιών. Ως σημείο εισαγωγής ενός συγκεκριμένου αντικείμενου ορίζεται το σημείο τοποθέτησης της κάτω αριστεράς κορυφής του αντίστοιχου MBR, για το οποίο δεν υφίσταται καμία επικάλυψη με τα υπόλοιπα MBR των ήδη στοιβαχθέντων αντικειμένων. Το σημείο εισαγωγής

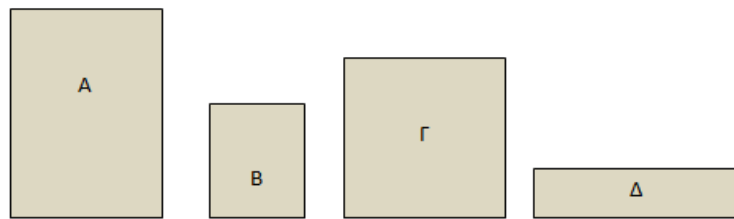
αποτελεί το σημείο τομής της οριζόντιας και της κάθετης γραμμής εισαγωγής. Ως κάθετη γραμμή εισαγωγής (LB) ορίζεται κάθε κάθετη (στον άξονα X της πλατφόρμας κατασκευής) γραμμή η οποία ταυτίζεται με τον άξονα Y της πλατφόρμας ή με την δεξιά πλευρά κάθε MBR ενός ήδη στοιβαχθέντος αντικειμένου. Ως οριζόντια γραμμή εισαγωγής (DB) ορίζεται η γραμμή η οποία βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο χαμηλά προς τη βάση της πλατφόρμας (δηλ. πλησιέστερα του άξονα X) και η οποία αποτελεί το κάτω φράγμα στοίβαξης του εισερχόμενου MBR. Η αναγνώριση των σημείων εισαγωγής ενός αντικειμένου με την χρήση του MBR επιτρέπει τον γρήγορο προσδιορισμό όλων των δυνατών σημείων στοίβαγμού του χωρίς να παρουσιάζονται επικαλύψεις με τα ήδη στοιβαχθέντα.

Προκειμένου να γίνουν περισσότερο κατανοητοί οι παραπάνω ορισμοί ας θεωρήσουμε την περίπτωση των ήδη στοιβαγμένων αντικειμένων A, B και Γ του Σχήματος 6-17 και ας υποθέσουμε ότι εισέρχεται προς στοίβαξη το αντικείμενο Δ, κατά έναν τυχαίο προσανατολισμό. Σύμφωνα με την προϋπάρχουσα διάταξη των αντικειμένων ορίζονται τέσσερις πιθανές κάθετες γραμμές εισαγωγής (LB). Η πρώτη πιθανή κάθετη γραμμή εισαγωγής συμπίπτει με τον άξονα Y' της πλατφόρμας κατασκευής (Σχήμα 6-17 α). Εάν επιχειρήσουμε να στοιβάξουμε το αντικείμενο Δ σύμφωνα με αυτήν την κάθετη γραμμή εισαγωγής τότε η οριζόντια γραμμή εισαγωγής (DB) συμπίπτει με την άνω πλευρά του αντικειμένου A. Η οριζόντια αυτή γραμμή αποτελεί το ελάχιστο ύψος τοποθέτησης του Δ χωρίς επικάλυψη κάποιου άλλου παραλληλογράμμου. Συνεπώς, το σημείο εισαγωγής που προκύπτει είναι το σημείο τομής της οριζόντιας και της κάθετης γραμμής εισαγωγής, το οποίο και σημειώνεται με μια μαύρη τέλεια στο Σχήμα 6-17 α. Η δεύτερη πιθανή κάθετη γραμμή εισαγωγής ταυτίζεται με την δεξιά πλευρά του αντικειμένου A (Σχήμα 6-17 β). Σε αυτήν την περίπτωση το αντικείμενο Δ αλληλεπιδρά τόσο με το αντικείμενο B όσο και με το αντικείμενο Γ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η οριζόντια γραμμή εισαγωγής (DB) να βρίσκεται στο ύψος της άνω πλευράς του αντικειμένου Γ ώστε να αποφευχθούν επικαλύψεις. Ομοίως για την τρίτη κάθετη γραμμή εισαγωγής όπου η αλληλεπίδραση του αντικειμένου Δ περιορίζεται μόνο στο αντικείμενο Γ (Σχήμα 6-17 γ), η οριζόντια γραμμή εισαγωγής (DB) βρίσκεται πάλι στο ύψος της άνω πλευράς του αντικειμένου Γ. Τέλος, όταν η κάθετη γραμμή εισαγωγής συμπίπτει με την δεξιά πλευρά του αντικειμένου Γ παρατηρείται ότι ο στοίβαγμός που προκύπτει είναι μη έγκυρος, καθώς το αντικείμενο Δ εξέχει της πλατφόρμας κατασκευής (Σχήμα 6-17 δ).



Σχήμα 6-17 Σχηματική απεικόνιση εναλλακτικών σημείων εισαγωγής.

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι έχουμε να στοιβάσουμε στην πλατφόρμα κατασκευής 4 αντικείμενα των οποίων τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα ελάχιστου εμβαδού (MBR) παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-18.

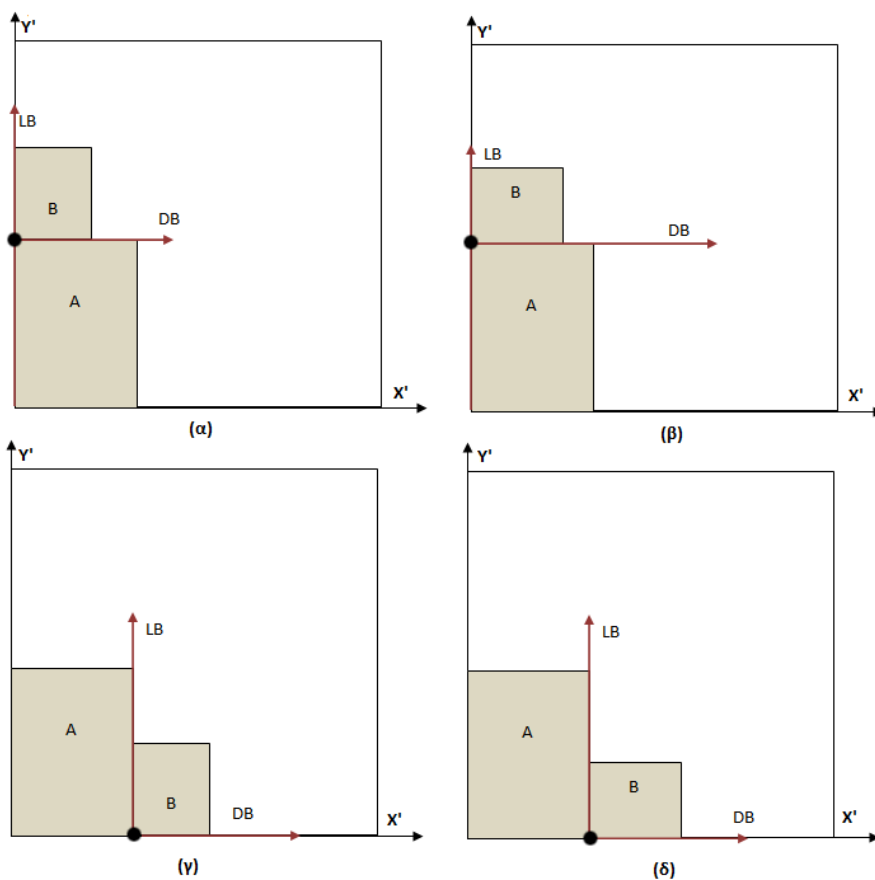


Σχήμα 6-18 Αντικείμενα προς στοιβαγμό.

Η ακολουθία στοιβαγμού είναι η (A,B,Γ,Δ) που σημαίνει ότι πρώτα θα στοιβαχτεί το MBR_A στην θέση που θα υποδείξουν οι κανόνες στοιβαγμού, μετά το MBR_B , το $MBR_Γ$ και τέλος το $MBR_Δ$. Καθώς το MBR_A είναι το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας στοιβαγμού θα τοποθετηθεί έτσι ώστε η κάτω αριστερά κορυφή του να ταυτίζεται με την αρχή των αξόνων X και Y . Εν συνεχεία έπεται ο στοιβαγμός του αντικειμένου MBR_B το οποίο κατά την πρώτη φάση της διαδικασίας στοιβαγμού πρέπει επίσης να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχή των αξόνων. Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί προσανατολισμοί του MBR_B οι οποίοι ελαχιστοποιούν το αντίστοιχο ορθογώνιο αποτύπωμα στην πλατφόρμα κατασκευής. Συγκεκριμένα, οι προσανατολισμοί αυτοί προκύπτουν από την περιστροφή του MBR_B κατά 0° , 90° , 180° και 270° αντίστοιχα. Ωστόσο, επειδή στην πρώτη φάση στοιβαγμού διαχειριζόμαστε μόνο το ορθογώνιο

παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού η επιλογή σε αυτό το στάδιο περιορίζεται μεταξύ ενός εκ των ζευγών προσανατολισμού $(0^{\circ}, 180^{\circ})$ και $(90^{\circ}, 270^{\circ})$. Η τελική επιλογή μεταξύ των 0° και 180° ή αντίστοιχα μεταξύ των 90° και 270° θα προκύψει στην δεύτερη φάση στοιβαγμού. Στα Σχήματα 6-19 (α) και (γ) παρουσιάζονται οι θέσεις εισαγωγής του MBR_B με προσανατολισμό $(0^{\circ}, 180^{\circ})$ για τις δυο διαφορετικές κάθετες γραμμές εισαγωγής.

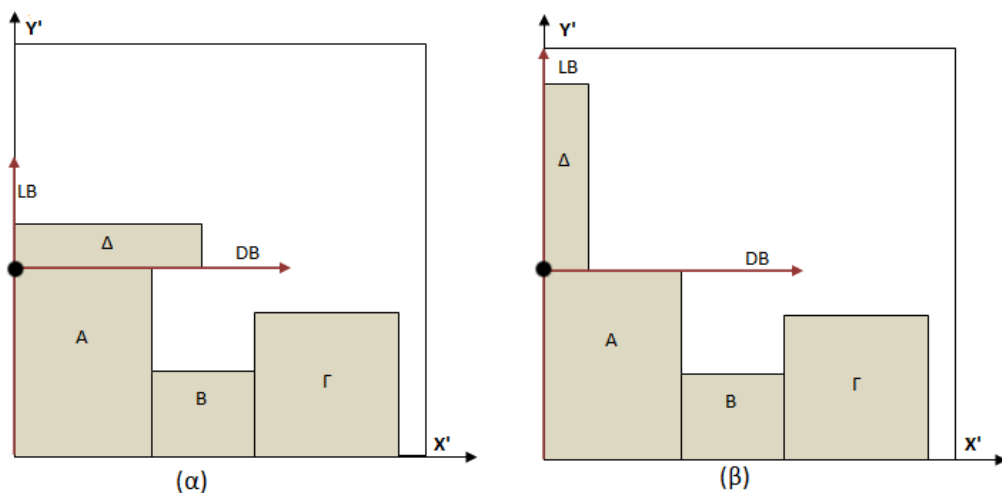
Αντίστοιχα στα Σχήματα 6-19 (β) και (δ) παρουσιάζονται οι θέσεις εισαγωγής του MBR_B με προσανατολισμό $(90^{\circ}, 270^{\circ})$ για τις αντίστοιχες δυο διαφορετικές κάθετες γραμμές εισαγωγής. Από τα δύο πιθανά σημεία εισαγωγής αυτό που βρίσκεται πιο κάτω και αριστερά (δηλ. πιο κοντά στην αρχή των αξόνων) προκύπτει όταν η κάθετη γραμμή εισαγωγής συμπίπτει με την δεξιά πλευρά του αντικειμένου A (Σχήμα 6-19 (γ) και (δ)). Επειδή σε κάθε σημείο υπάρχουν δυο πιθανοί προσανατολισμοί η διαδικασία στοιβαγμού έχει προγραμματιστεί να προκρίνει εκείνον που παρουσιάζει το μικρότερο ύψος κατά τον άξονα Y' . Έτσι τελικά επιλέγεται να στοιβαχθεί το MBR_B όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-19 (δ), ήτοι περιστραμμένο κατά 90° σε σχέση με τον αρχικό προσανατολισμό του.



Σχήμα 6-19 Σχηματική απεικόνιση θέσεων εισαγωγής MBR_B .

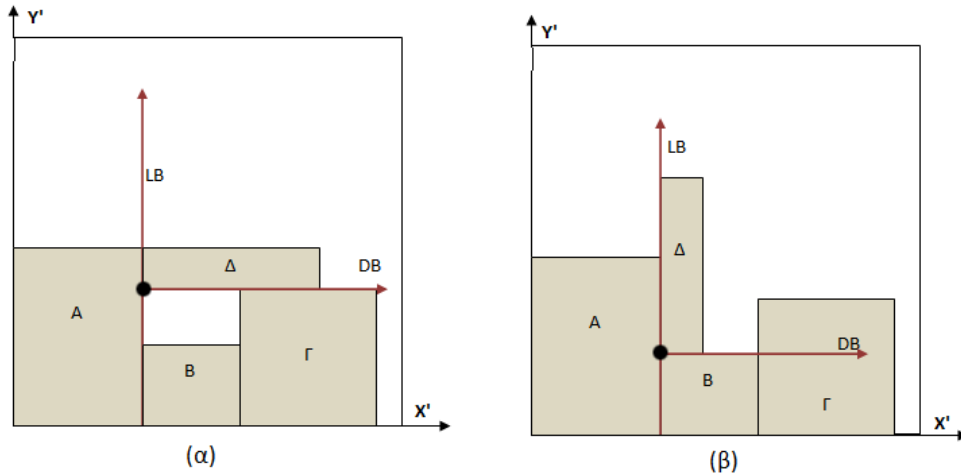
Το αντικείμενο MBR_{Γ} , το οποίο είναι το επόμενο στην ακολουθία έχει τετραγωνική μορφή και έτσι δεν τίθεται θέμα επιλογής προσανατολισμού του σε σχέση με τους άξονες X' και Y' . Η θέση την οποία επιλέγει η διαδικασία στοιβαγμού για το MBR_{Γ} ορίζεται από την πιο δεξιά πλευρά του ήδη στοιβαχθέντος MBR_B (κάθετη γραμμή εισαγωγής) και από τον άξονα X' της πλατφόρμας κατασκευής (οριζόντια γραμμή εισαγωγής) (βλ. Σχήμα 6-20).

Το αντικείμενο MBR_{Δ} παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς οι θέσεις στις οποίες μπορεί να στοιβαχθεί είναι περισσότερες από ότι στα προηγούμενα αντικείμενα. Η πρώτη κάθετη γραμμή εισαγωγής ταυτίζεται με τον άξονα Y' της πλατφόρμας. Σε αυτήν την περίπτωση γραμμής εισαγωγής παρατηρούμε ότι η αλληλεπίδραση του MBR_{Δ} περιορίζεται μόνο σε αυτήν με το MBR_A είτε βρίσκεται στον αρχικό του προσανατολισμό ($0^{\circ}, 180^{\circ}$) (βλ. Σχήμα 6-20 α) είτε περιστραμμένο κατά ορθή γωνία ($90^{\circ}, 270^{\circ}$) (βλ. Σχήμα 6-20 β). Συνεπώς, η οριζόντια γραμμή εισαγωγής ταυτίζεται με την άνω πλευρά του MBR_A .



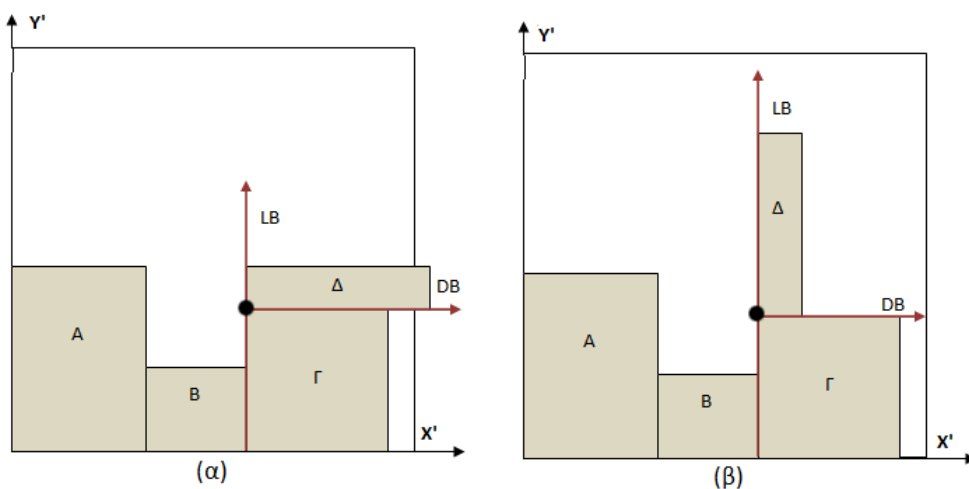
Σχήμα 6-20 Σχηματική απεικόνιση πρώτου σημείου εισαγωγής MBR_{Δ} .

Όταν αντίθετα η κάθετη γραμμή εισαγωγής καταστεί συνευθειακή με τη δεξιά πλευρά του αντικειμένου A παρατηρούμε στο Σχήμα 6-21 ότι προκύπτουν δυο διαφορετικές οριζόντιες γραμμές εισαγωγής. Έτσι, όταν το MBR_{Δ} βρίσκεται στον αρχικό προσανατολισμό ($0^{\circ}, 180^{\circ}$) βλέπουμε ότι εξαιτίας του μήκους του η θέση στην οποία μπορεί να στοιβαχθεί χωρίς να δημιουργηθούν επικαλύψεις ταυτίζεται με την άνω πλευρά του αντικειμένου Γ. Αντίθετα όταν εξετάζεται η πιθανή θέση εισαγωγής του αντικειμένου για τους κάθετους προσανατολισμούς ($90^{\circ}, 270^{\circ}$) παρατηρούμε ότι το MBR_{Δ} αλληλεπιδρά μόνο με το σχήμα B. Συνεπώς, η οριζόντια γραμμή εισαγωγής βρίσκεται χαμηλότερα και συγκεκριμένα συμπίπτει με την άνω πλευρά του αντικειμένου B.

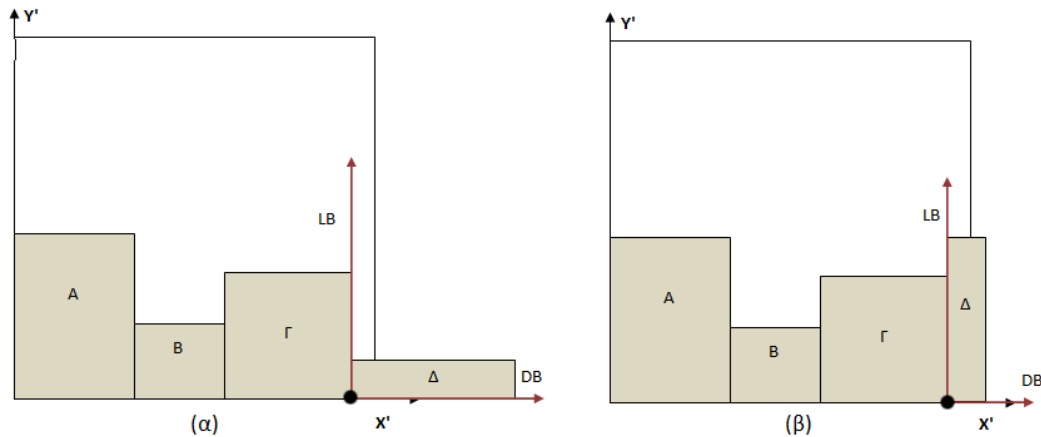


Σχήμα 6-21 Σχηματική απεικόνιση δεύτερου σημείου εισαγωγής MBR_{Δ} .

Εάν αντίστοιχα η κάθετη γραμμή εισαγωγής μετακινηθεί στην δεξιά πλευρά του αντικειμένου B (βλ. Σχήμα 6-22) τότε το μόνο αντικείμενο το οποίο επηρεάζει την θέση στοιβαγμού είναι το αντικείμενο Γ και έτσι το σημείο εισαγωγής είναι δεδομένο. Εξετάζοντας τους πιθανούς προσανατολισμούς παρατηρούμε ότι το ζευγάρι $(0^{\circ}, 180^{\circ})$ οδηγεί σε μη έγκυρη τοποθέτηση καθώς το MBR_{Δ} εξέρχεται της πλατφόρμας κατασκευής. Αντίθετα όταν επιλεγθεί να στοιβαχθεί το MBR_{Δ} σύμφωνα με τους προσανατολισμούς $(90^{\circ}, 270^{\circ})$ καταλήγουμε σε έγκυρη τοποθέτηση. Σε μη έγκυρη τοποθέτηση (βλ. Σχήμα 6-23) καταλήγουμε και όταν επιλεγθεί ως κάθετη γραμμή εισαγωγής η δεξιά πλευρά του αντικειμένου Γ ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό που θα επιλεγθεί.



Σχήμα 6-22 Σχηματική απεικόνιση τρίτου σημείου εισαγωγής MBR_{Δ} .

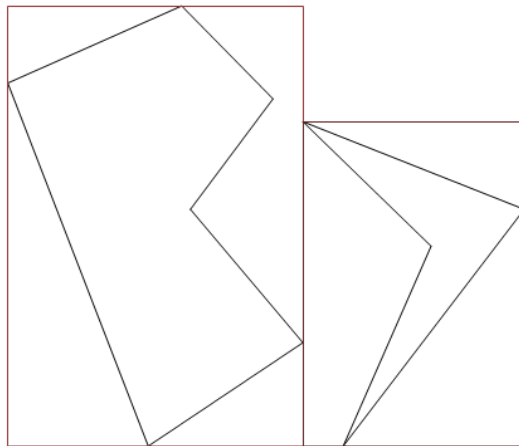


Σχήμα 6-23 Σχηματική απεικόνιση τέταρτου σημείου εισαγωγής MBR_{Δ} .

Παρατηρείται ότι η βέλτιστη τοποθέτηση του αντικειμένου MBR_{Δ} ανεξαρτήτως προσανατολισμού, είναι αυτή η οποία παρουσιάζεται στα δύο στιγμιότυπα του Σχήματος 6-21. Συγκεκριμένα, για το ζεύγος προσανατολισμών $(0^{\circ}, 180^{\circ})$ η θέση εισαγωγής η οποία είναι, σε σχέση με όλες τις εναλλακτικές για αυτό το ζεύγος, η πλησιέστερη δυνατή στην αρχή των αξόνων της πλατφόρμας (με φορά προς τα κάτω και μετά αριστερά) είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-21 α. Η αντίστοιχη για το ζεύγος $(90^{\circ}, 270^{\circ})$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-21 β. Ωστόσο, επειδή πρέπει να προταθεί τελικά μόνο μια θέση εισαγωγής και ένας προσανατολισμός η διαδικασία στοιβαγμού εξετάζει τις δυο βέλτιστες θέσεις ανά ζεύγος προσανατολισμού ως προς την σχετική θέση τους προς την αρχή των αξόνων με σκοπό να προκριθεί η θέση και το αντίστοιχο ζεύγος προσανατολισμών που βρίσκεται πιο κοντά σε αυτήν. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παρατηρείται το γεγονός καμιά θέση να μην υπερέχει καθαρά ως προς την απόσταση και στους δυο άξονες καθώς και οι δύο μοιράζονται την ίδια οριζόντια γραμμή εισαγωγής. Έτσι η διαδικασία επιλέγει εκείνη τη θέση εισαγωγής (και προφανώς το αντίστοιχο ζεύγος) η οποία στοιβάζεται στο μικρότερο δυνατό ύψος (δηλ. ως προς τον άξονα Y). Έτσι το MBR_{Δ} στοιβάζεται τελικά στην θέση εισαγωγής η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6-21 β ενώ το ζεύγος προσανατολισμών που θα εξεταστεί στην δεύτερη φάση στοιβαγμού είναι το $(90^{\circ}, 270^{\circ})$. Εάν τύχαινε οι δύο βέλτιστες θέσεις ανά ζεύγος προσανατολισμού να στοιβάζονται στο ίδιο ύψος τότε τελικά θα προτεινόταν ο προσανατολισμός ο οποίος θα βρισκόταν πιο κοντά στην αρχή των αξόνων κατά την διεύθυνση του άξονα X , ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση επιλέγεται η θέση εισαγωγής που αντιστοιχεί στο ζεύγος προσανατολισμών $(0^{\circ}, 180^{\circ})$. Η δεύτερη φάση στοιβαγμού για το αντικείμενο Δ επίσης δεν επηρεάζει τη θέση του καθώς βρίσκεται ήδη όσο το δυνατόν πιο κοντά στα ήδη στοιβαχθέντα αντικείμενα.

Η πρώτη φάση του στοιβαγμού έχει ως σκοπό την γρήγορη εύρεση μιας καλής θέσης εισαγωγής για κάποιο αντικείμενο, αξιοποιώντας το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού. Ωστόσο, παρατηρείται ότι μεταξύ των αντικείμενων υπάρχουν κενά στην διάταξη στοιβαγμού, τα

οποία μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, παρόλο που τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα ελαχίστου εμβαδού έχουν ήδη στοιβαχτεί όσο το δυνατόν πιο πυκνά (βλ. για παράδειγμα την περίπτωση του Σχήματος 6-24).



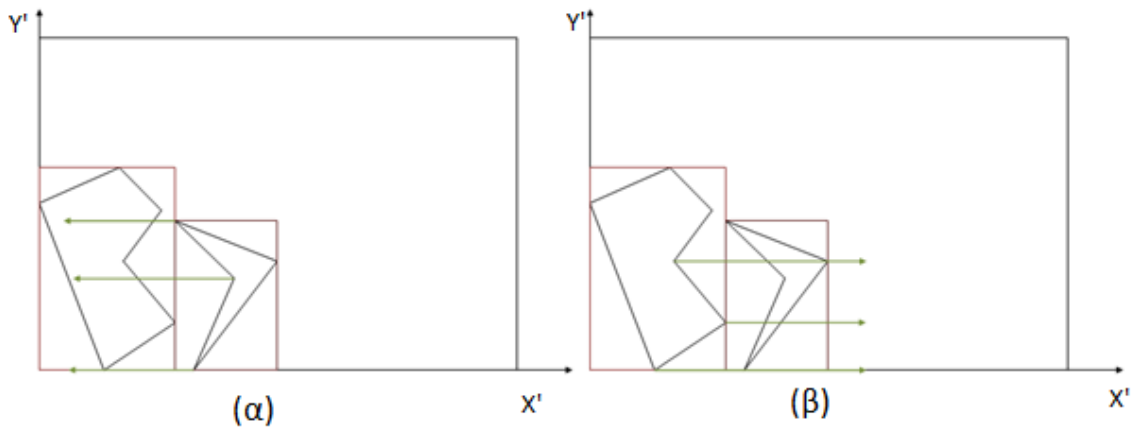
Σχήμα 6-24 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού με χρήση MBR .

Τα κενά αυτά παρατηρούνται κυρίως κατά τη στοιβαξη μη κυρτών αντικειμένων. Συνεπώς, η δεύτερη φάση στοιβαγμού αποσκοπεί στη βελτίωση της θέσης κάθε αντικειμένου μέσω κατάλληλων μετακινήσεων όσο το δυνατόν πιο κοντά προς τα υπόλοιπα ήδη στοιβαχθέντα αντικείμενα. Για να καταστεί δυνατή η σχετική μετακίνηση ενός αντικειμένου μέσα στην διάταξη στοιβαγμού χωρίς να δημιουργηθούν επικαλύψεις, θα πρέπει να μπορεί να υπολογιστεί η κάθετη και οριζόντια απόσταση μεταξύ αυτού και των γειτονικών αντικειμένων. Για τον υπολογισμό αυτών των αποστάσεων απαντώνται στη βιβλιογραφία δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Η πρώτη αφορά την χρήση τεχνικών βολής ακτινών (TBA - Ray Casting) ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί την έννοια του πολυγώνου No-Fit. Και οι δύο αυτές μεθοδολογίες υλοποιήθηκαν προκειμένου να εξεταστεί η επίδρασή τους στην τελική δημιουργηθείσα διάταξη στοιβαγμού.

Φάση συμπύκνωσης μέσω βολής ακτινών

Μετά την τοποθέτηση του αντικειμένου στη θέση που προκύπτει από τον στοιβαγμό του αντίστοιχου MBR ακολουθεί η δεύτερη φάση συμπύκνωσης, η οποία σε αυτήν την προσέγγιση συντελείται σε δύο κινήσεις (δηλαδή μια κατά τον άξονα Y' και μια κατά τον άξονα X'). Καθεμία από τις κινήσεις συντελείται επίσης σε δύο βήματα. Έστω λοιπόν ότι πραγματοποιείται οριζόντια μετακίνηση ενός αντικειμένου κατά τον άξονα X' με αρνητική φορά (από δεξιά προς τα αριστερά). Για την εύρεση της ελάχιστης οριζόντιας απόστασης από τα γειτονικά αντικείμενα χρησιμοποιείται

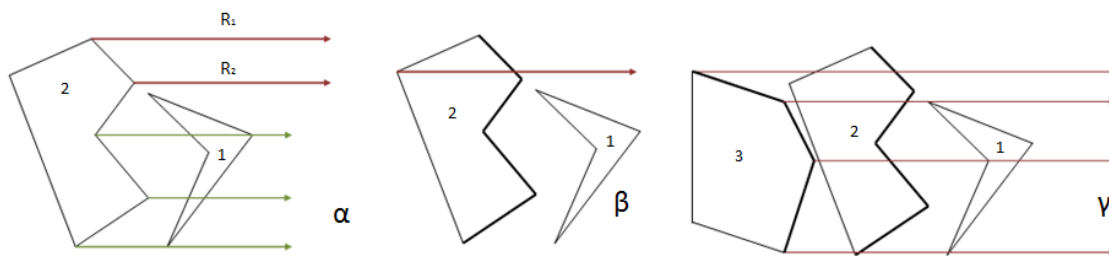
η τεχνική βολής ακτινών δύο φορές. Την πρώτη φορά οι ακτίνες έχουν ως αφετηρία τις κορυφές του πολυγώνου που ορίζουν το σχήμα του αντικειμένου και φορά προς τα αριστερά (βλ. Σχήμα 6.25 α). Τα προκύπτοντα σημεία τομής των ακτινών με τα άλλα αντικείμενα και τα αντίστοιχα σημεία αφετηρίας στοιχειοθετούν τα πιθανά διανύσματα οριζόντιας μετακίνησης. Το δεύτερο βήμα αφορά στην ρίψη ακτινών μόνο από τα ήδη τοποθετημένα γειτονικά αντικείμενα και τις κορυφές τους κατά αντίθετη (θετική) φορά από αριστερά προς τα δεξιά (βλ. Σχήμα 6-25 β).



Σχήμα 6-25 Σχηματική απεικόνιση τεχνικής βολής ακτινών (Ray Casting).

Έτσι προκύπτουν νέα πιθανά διανύσματα μετακίνησης τα οποία προστίθενται στην προηγούμεως δημιουργηθείσα λίστα. Από την τελική λίστα επιλέγεται το μικρότερο σε μήκος διάνυσμα το οποίο αποτελεί την μέγιστη δυνατή οριζόντια μετακίνηση του αντικειμένου προς αριστερά χωρίς να δημιουργηθούν επικαλύψεις. Ο υπολογισμός της μέγιστης δυνατής κάθετης απόστασης την οποία δύναται το αντικείμενο να διανύσει σε σχέση με τα ήδη στοιβαχθέντα αντικείμενα συντελείται με την ίδια ακριβώς διαδικασία.

Για την αποδοτική εφαρμογή αυτής της διαδικασίας πρέπει να μειωθούν στο ελάχιστο δυνατόν οι γεωμετρικοί υπολογισμοί οι οποίοι είναι υπολογιστικά ακριβοί και ειδικότερα οι υπολογισμοί που απαιτούνται για την αναγνώριση των σημείων τομής των ακτινών με τα αντικείμενα. Συνεπώς, ο περιορισμός του υπολογιστικού φόρτου μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση του αριθμού των ακτινών οι οποίες είναι αναγκαίες να βληθούν για την σωστή μετακίνηση κάθε προβολής. Χαρακτηριστικά, στο παράδειγμά του Σχήματος 6-26 α παρατηρείται ότι δεν είναι απαραίτητο να ριφθούν ακτίνες από σημεία τα οποία βρίσκονται έξω από το εύρος που ορίζει το ύψος του προς στοιβαγμό αντικειμένου (ακτίνες R_1 και R_2). Επίσης, δεν κρίνεται αναγκαία η βολή ακτινών από σημεία των ήδη στοιβαχθέντων διατομών τα οποία δεν είναι άμεσα «ορατά» από το αντικείμενο προς στοιβαγμό (βλ. Σχήμα 6.26 (β) και (γ)).



Σχήμα 6-26 Σχηματική απεικόνιση περιττών ακτινών.

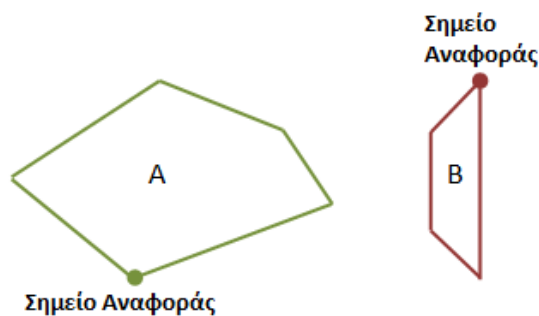
Έτσι στο παράδειγμα του Σχήματος 6-26 β η ρίψη ακτίνας από το συγκριμένο σημείο που φαίνεται στο σχήμα δεν έχει καμιά επίδραση στη δημιουργία πιθανών διανυσμάτων μετακίνησης καθώς ήδη τα σημεία τα οποία παρουσιάζονται με έντονη μαύρη διαγράμμιση δημιουργούν μικρότερα σε μήκος πιθανά διανύσματα μετακίνησης. Η ίδια αρχή μπορεί να γενικευτεί και για αντικείμενα τα οποία επικαλύπτονται πλήρως ή ακόμα και μερικώς από αλλά ήδη στοιβαγμένα αντικείμενα. Έτσι, στο Σχήμα 6-26 γ παρατηρούμε ότι το αντικείμενο 1' δεν είναι άμεσα «ορατό» από το αντικείμενο προς στοιβαγμό 3' καθώς όλα τα δυνατά σημεία του από τα οποία θα μπορούσαν να ριφθούν ακτίνες καλύπτονται από τη γεωμετρία του αντικείμενου 2', με άμεση συνέπεια οποιοδήποτε διάνυσμα μετακίνησης προκύψει να καθίσταται περιττό.

Συνοψίζοντας, μετά την πρώτη φάση της αρχικής στοιβάξης ενός αντικείμενου, κατά την οποία επιλέγεται μια καλή θέση εισαγωγής καθώς και το αντίστοιχο ζεύγος προσανατολισμού, αξιοποιώντας το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού, ακολουθεί η δεύτερη φάση η οποία έχει ως σκοπό τη βελτίωση της διάταξης με συμπύκνωση των αντικείμενων και την επιλογή του τελικού προσανατολισμού του αντικείμενου μεταξύ των δύο επιλογών που προέκυψαν κατά την πρώτη φάση. Για παράδειγμα εάν το αρχικά επιλεχθέν ζεύγος προσανατολισμών ήταν το (0° , 180°) η επιλογή κατά την δεύτερη φάση περιορίζεται μεταξύ της διατήρησης του αρχικού προσανατολισμού ή της περιστροφής του κατά 180° . Για την επιλογή του τελικού προσανατολισμού πραγματοποιείται η διαδικασία της συμπύκνωσης μέσω ρίψης ακτινών και για τους δυο υποψήφιους προσανατολισμούς. Έτσι στο συγκεκριμένο παράδειγμα του Σχήματος 6-26 η διαδικασία της συμπύκνωσης θα γίνει δυο φορές όπου η πρώτη θα αφορά στην προβολή με τον αρχικό προσανατολισμό και η δεύτερη στον προσανατολισμό που προκύπτει με περιστροφή 180° . Η τελική επιλογή πραγματοποιείται με την εξέταση της αντίστοιχης σχετικής θέσης του αντικείμενου μετά τη διαδικασία της συμπύκνωσης και για τους δυο προσανατολισμούς με σκοπό να προκριθεί ο προσανατολισμός κατά τον οποίο η τελική θέση στοιβάξης του αντικείμενου βρίσκεται πιο κοντά στην αρχή των αξόνων. Στην περίπτωση που καμιά θέση δεν υπερέχει καθαρά ως προς την απόσταση επιλέγεται εκείνος ο προσανατολισμός ο οποίος συνεπάγεται το μικρότερο δυνατό ύψος στοιβάξης. Τέλος, εάν τύχει οι θέσεις στοιβάξης να έχουν και τον ίδιο ύψος

επιλέγεται ο προσανατολισμός ο οποίος θα βρισκόταν πιο κοντά στην αρχή των αξόνων κατά την διεύθυνση του άξονα Χ. Εάν και εκεί δεν υπερέχει κανείς προσανατολισμός τότε τελικά επιλέγεται ο πρώτος προσανατολισμός από το εκάστοτε ζεύγος.

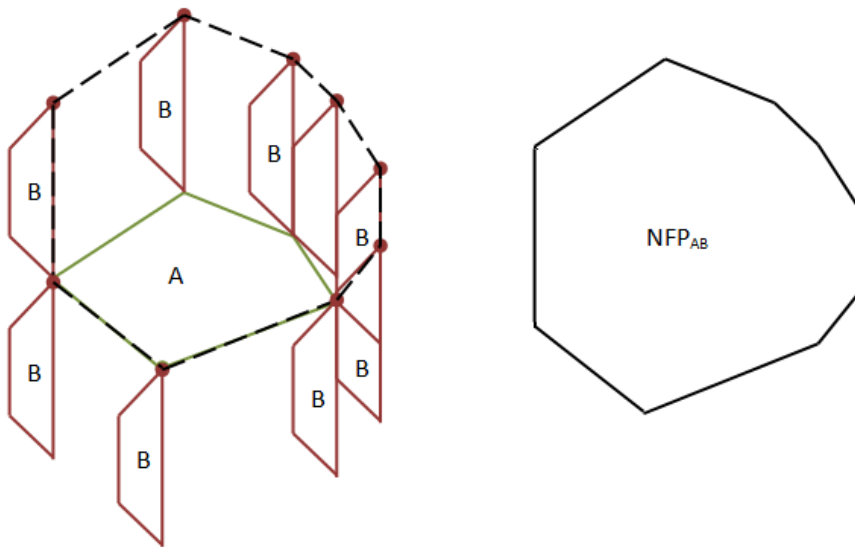
Φάση στοιβαγμού με χρήση No-Fit πολυγώνου: Η πρώτη εφαρμογή της έννοιας του πολυγώνου No-Fit σε πρόβλημα στοιβαγμού προτάθηκε από τον Art [143] το 1966, αν και αρχικά για την περιγραφή του χρησιμοποιήθηκε ο όρος Shape Envelope. Ο όρος πολύγωνο No-Fit εισήχθη, δέκα χρόνια αργότερα, από τους Adamowicz & Albano προκειμένου να επιλύσουν το πρόβλημα στοιβαγμού μη κυρτών αντικείμενων [142]. Η ίδια έννοια απαντάται και υπό τον όρο Configuration Space Obstacle στον χώρο της ρομποτικής [178] ή ως Hodograph στο πεδίο των μαθηματικών [179, 180, 181]. Η κύρια λειτουργία του πολυγώνου No-Fit είναι ο ορισμός ενός συνόλου σχετικών τοποθετήσεων δύο αντικειμένων/κομματιών στις οποίες αυτά εφάπτονται χωρίς να επικαλύπτονται.

Έστω λοιπόν ότι εξετάζονται τα δύο πολύγωνα Α και Β του Σχήματος 6-27. Το No-Fit πολύγωνο των δύο αυτών αντικειμένων, το οποίο συμβολίζεται ως NFP_{AB} είναι το πολύγωνο το οποίο δημιουργείται από την ολίσθηση του Β πολυγώνου πάνω στις πλευρές του Α πολυγώνου. Συγκεκριμένα, το πολύγωνο Α ορίζεται ως το σταθερό πολύγωνο και επιλέγεται ως σημείο αναφοράς ένα από τα σημεία του. Το δεύτερο πολύγωνο (Β), το οποίο και καλείται «κινούμενο» πολύγωνο διαθέτει επίσης ένα σημείο αναφοράς και είναι αυτό που ολισθαίνει περί του σταθερού πολυγώνου Α υπό σταθερό προσανατολισμό .



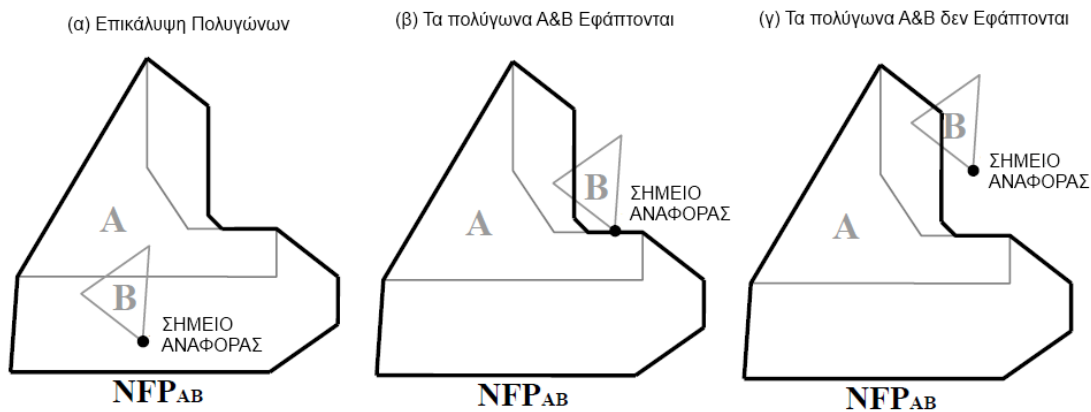
Σχήμα 6-27 Σχηματική απεικόνιση κυρτών αντικειμένων.

Έχοντας ορίσει τα σημεία αναφοράς των δύο αντικειμένων, το NFP_{AB} σχηματίζεται καταγράφοντας την κίνηση του σημείου αναφοράς του Β καθώς το Β ολισθαίνει περί του Α. Κατά την κίνηση ολίσθησης και τα δυο πολύγωνα, διατηρούν σταθερό προσανατολισμό και εφάπτονται σε κάποιο σημείο της περιφέρειας τους χωρίς ωστόσο να επικαλύπτει το ένα το άλλο. Στο Σχήμα 6-28 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία της ολίσθησης του πολυγώνου Β περί του Α καθώς και το αντίστοιχο No-Fit πολύγωνο (NFP_{AB}) το οποίο προκύπτει.



Σχήμα 6-28 Σχηματική απεικόνιση πολυγώνου No-Fit.

Παρατηρείται ότι σε οποίο σημείο του πολυγώνου NFP_{AB} και αν τοποθετηθεί το σημείο αναφοράς του πολυγώνου B τότε τα δύο πολύγωνα θα εφάπτονται χωρίς να επικαλύπτονται. Έτσι το NFP πολύγωνο δυο σχημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να διαπιστωθεί εάν αυτά επικαλύπτονται ή όχι. Συγκεκριμένα, εάν το πολύγωνο B τοποθετηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε το προκαθορισμένο σημείο αναφοράς του να κείται **εντός** του πολυγώνου NFP_{AB} τότε τα δύο πολύγωνα (A και B) θα επικαλύπτονται (βλ. Σχήμα 6-29 α). Αντίθετα, εάν το πολύγωνο B τοποθετηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε το προκαθορισμένο σημείο αναφοράς του να κείται **εκτός** του πολυγώνου NFP_{AB} τότε τα δύο πολύγωνα (A και B) δεν θα επικαλύπτονται αλλά ταυτόχρονα δεν θα εφάπτονται (βλ. Σχήμα 6-29 γ). Τέλος, εάν το πολύγωνο B τοποθετηθεί ώστε το προκαθορισμένο σημείο αναφοράς του να κείται στη περιφέρεια του πολυγώνου NFP_{AB} τότε τα δύο πολύγωνα (A και B) δεν θα επικαλύπτονται αλλά θα εφάπτονται τουλάχιστον σε ένα σημείο του περιγράμματος τους (βλ. Σχήμα 6- 29 β).



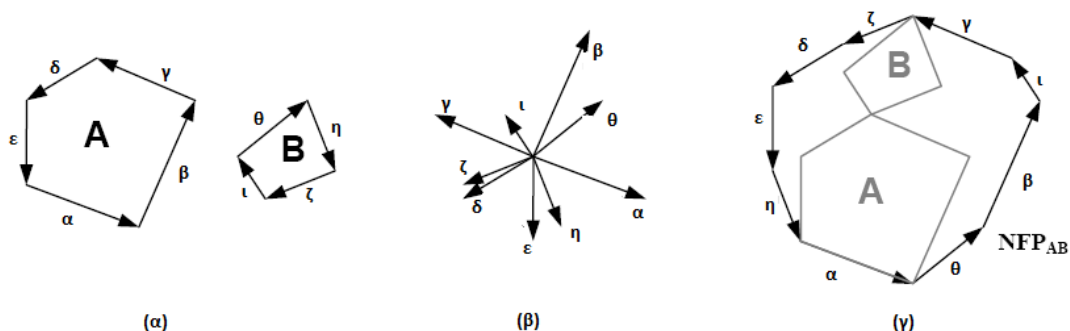
Σχήμα 6-29 Σχηματική απεικόνιση σχετικής θέσης πολυγώνου B σε σχέση με το πολύγωνο No-Fit.

Αν και το No-Fit πολύγωνο αποτελεί εξαιρετικό εργαλείο για την διενέργεια γεωμετρικών υπολογισμών (από την στιγμή που θα δημιουργηθεί), δεν χρησιμοποιείται ευρέως στα διδιάστατα προβλήματα στοιβαγμού εξαιτίας της έλλειψης εύρωστων αλγορίθμων που δύνανται να αντιμετωπίσουν κάθε δυνατή γεωμετρική μορφή των πολυγώνων. Ωστόσο, με τη σωστή αξιοποίησή του μπορεί να επιτευχθεί μείωση του χρόνου που απαιτείται για την εύρεση μιας καλής διάταξης στοιβαγμού [169], ιδιαίτερα σε σύγκριση με την εναλλακτική της εκτέλεσης των τριγωνομετρικών προσεγγίσεων προκειμένου να επιλυθεί το ίδιο πρόβλημα στοιβαγμού σε επαναλαμβανόμενους προσανατολισμούς και θέσεις. Επομένως, με τη χρησιμοποίηση του No-fit πολύγωνου, μπορούμε να περιορίσουμε το υπολογιστικό κόστος του προβλήματος επικάλυψης δυο πολυγώνων (Dowland et al. [165]).

Ενσωμάτωση του πολυγώνου No-Fit στη διαδικασία στοιβαγμού

Η απλούστερη περίπτωση υπολογισμού του πολυγώνου No-Fit προκύπτει όταν και τα δύο πολύγωνα A και B είναι κυρτά. Στην περίπτωση αυτή το No-Fit πολύγωνο δημιουργείται (αλγόριθμος Cunnigham-Green) [178] ως εξής:

1. Στο πολύγωνο A αποδίδεται αριστερόστροφη φορά (Counter Clockwise) ενώ στο πολύγωνο B δεξιόστροφη (βλ. Σχήμα 6-30 α) .
2. Μεταφορά όλων των επιμέρους πλευρών (διανυσμάτων) των πολυγώνων στην αρχή ενός κοινού συστήματος συντεταγμένων και ταξινόμησή τους κατά αύξουσα σειρά βάσει της κλίσης τους ως προς τον άξονα X (βλ. Σχήμα 6-30 β).
3. Τέλος, σύνδεση των διανυσμάτων αυτών με αριστερόστροφη φορά κατά αύξουσα κλίση οπότε και προκύπτει το NFP_{AB} (βλ. Σχήμα 6-30 γ)

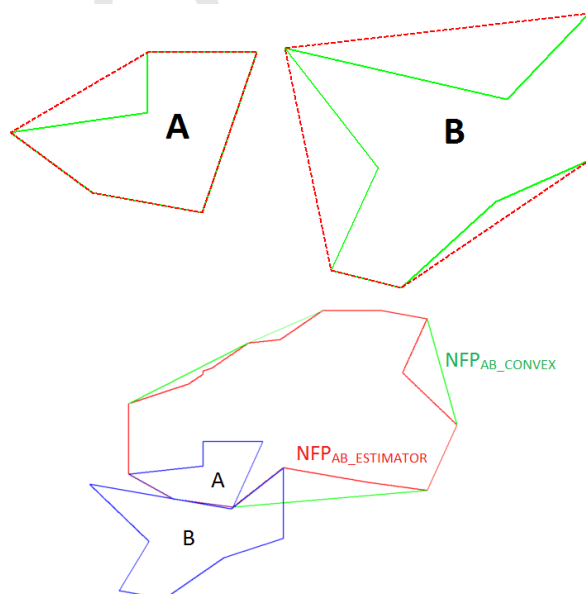


Σχήμα 6-30 Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας No-Fit πολύγωνου για κυρτά αντικείμενα.

Στην περίπτωση δύο μη κυρτών αντικείμεμων οι μέχρι στιγμής αναπτυχθείσες προσεγγίσεις για την εύρεση του No-Fit πολύγωνου είναι υπολογιστικά ακριβοί και εμφανίζουν σοβαρά προβλήματα λόγω του πλήθους εκφυλισμένων περιπτώσεων (Degenerated Cases) για τις οποίες απαιτείται

ειδικός χειρισμός [168, 169]. Για τον λόγο αυτό, η προσέγγιση που επιλέχθηκε να υλοποιηθεί στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, προκειμένου να μπορεί να εκτιμηθεί η καλύτερη σχετική θέση ενός πολυγώνου σε σχέση με ένα άλλο ανεξάρτητα από την γεωμετρία τους, βασίζεται στην απλότητα και αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας δημιουργίας του πολυγώνου NFP για κυρτά πολύγωνα. Ως ενδιάμεσο αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, κατά την διάρκεια στοιβαγμού μη κυρτών αντικειμένων, αποτελεί και η δημιουργία ενός πολυγώνου το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως εκτιμήτρια/προσέγγιση ($NFP_{AB_ESTIMATOR}$) του πραγματικού NFP αυτών των μη κυρτών αντικειμένων.

Η διαδικασία της εύρεσης της βέλτιστης σχετικής τοποθέτησης δυο τυχαίων πολύγωνων με τη χρήση της μεθόδου NFP μπορεί να διαχωριστεί σε δύο βασικές φάσεις. Η πρώτη φάση χρησιμοποιεί τα κυρτά περιβλήματα των πολυγώνων υπό στοιβαγμό από τα οποία υπολογίζεται γρήγορα το πολύγωνο No-Fit (NFP_{AB_CONVEX}) σύμφωνα με την μεθοδολογία εύρεσης του για κυρτά πολύγωνα που περιγράφηκε άνωθεν. Σκοπός αυτού του βήματος είναι η εύκολη και γρήγορη δημιουργία μιας αρχικής προσέγγισης του πραγματικού πολυγώνου No-Fit των δυο πολυγώνων A και B η οποία θα χρησιμοποιηθεί προς περαιτέρω επεξεργασία στην δεύτερη φάση. Για τον υπολογισμό του NFP_{AB_CONVEX} δημιουργούνται αρχικά τα κυρτά περιβλήματα των δυο αντικείμενων μέσω του αλγόριθμου Qhull. Το κυρτό περίβλημα του πρώτου αντικείμενου αποτελεί το σταθερό πολύγωνο A, ενώ το κυρτό περίβλημα του δεύτερου αντικείμενου αποτελεί το κινητό πολύγωνο B. Στη συνέχεια υπολογίζεται το No-Fit πολύγωνο (NFP_{AB_CONVEX}) των δυο κυρτών περιβλημάτων σύμφωνα με τον αλγόριθμο των Cunnigham-Green [178]. Στο Σχήμα 6-31 παρουσιάζεται η περίπτωση της εύρεσης της βέλτιστης σχετικής θέσης δύο μη κυρτών αντικείμενων τα οποία απεικονίζονται με μπλε χρώμα. Τα αντίστοιχα κυρτά περιβλήματα A και B απεικονίζονται σχηματικά με κόκκινο χρώμα, ενώ με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το πολύγωνο NFP_{AB_CONVEX} .



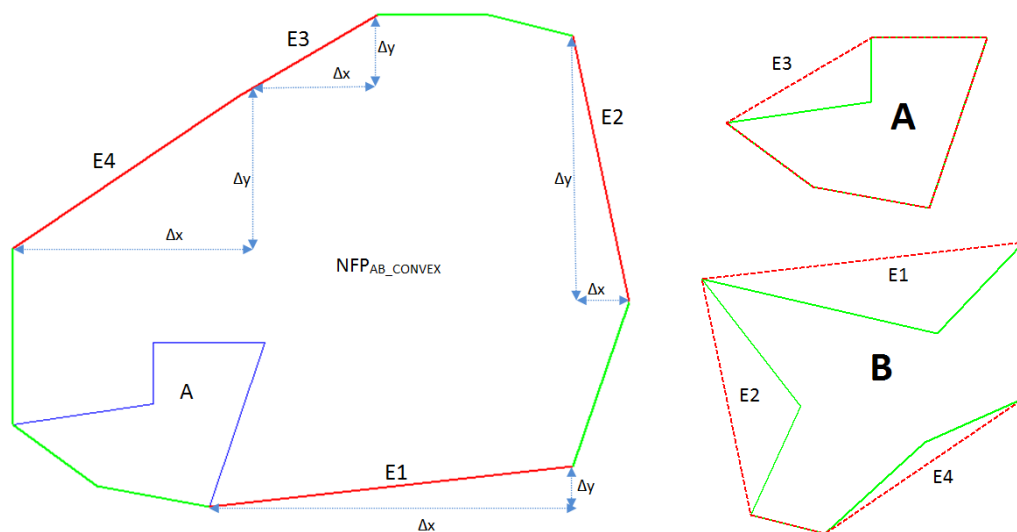
Σχήμα 6-31 Σχηματική απεικόνιση εύρεσης της βέλτιστης σχετικής θέσης δύο μη κυρτών αντικείμενων.

Παρατηρώντας το NFP_{AB_CONVEX} βλέπουμε ότι αποτελείται από ένα σύνολο ακμών από τις οποίες κάποιες αντιστοιχούν σε πραγματικές ακμές των αντικειμένων A και B ενώ οι υπόλοιπες προέρχονται από ακμές των κυρτών περιβλημάτων των αντικειμένων A και B οι οποίες στην ουσία «κλείνουν» τις μη κυρτές περιοχές των αρχικών αντικειμένων. Όταν λοιπόν το αντικείμενο B ολισθαίνει επί μιας ακμής του NFP_{AB_CONVEX} η οποία ταυτίζεται με μία πραγματική πλευρά ενός από τα αντικείμενα τότε τα δύο αντικείμενα εφάπτονται πλήρως και δεν υπάρχει περίπτωση μετακίνησης τους εγγύτερα. Αντίθετα, όταν το αντικείμενο B ολισθαίνει επί μιας πλευράς του NFP_{AB_CONVEX} η οποία δεν αντιστοιχεί σε πλευρά ενός αντικειμένου, τότε πιθανώς το αντικείμενο B να μπορεί να μετακινηθεί εγγύτερα του A και να επιτευχθεί έτσι πιο πυκνή στοίβαξη.

Εάν τα αρχικά πολύγωνα A και B ήταν κυρτά τότε έχοντας υπολογίσει το πολύγωνο NFP_{AB_CONVEX} έχουμε υπολογίσει ταυτόχρονα και το πολύγωνο NFP_{AB} καθώς το κυρτό περίβλημα των πολυγώνων ταυτίζεται με την αρχική τους γεωμετρία. Συνεπώς, δεν υπάρχουν άλλα σημεία, εκτός της περιφέρειας του NFP_{AB_CONVEX} , στα οποία εάν τοποθετήσουμε το σημείο αναφοράς του πολυγώνου B να επιτύχουμε πυκνότερη στοίβαξη χωρίς να δημιουργηθούν επικαλύψεις. Αντίθετα, εάν ο στοιβαγμός αφορά μη κυρτά αντικείμενα όπως στο παράδειγμα του Σχήματος 6-31 τότε εκμεταλλευόμενοι τις μη κυρτές περιοχές των αντικειμένων προς στοιβαγμό μπορούμε να βελτιώσουμε την πυκνότητα της στοίβαξης. Έτσι ξεκινά η δεύτερη φάση της βελτιστοποίησης κατά την οποία εφαρμόζεται η τεχνική της βολής ακτινών (TBA-Ray Casting) προκειμένου να διαπιστωθεί εάν και σε ποιο βαθμό μπορεί να υπάρξει περαιτέρω σχετική μετακίνηση του αντικείμενου B σε σχέση με το A.

Η δεύτερη φάση βελτιστοποίησης ξεκινά αναγνωρίζοντας αρχικά ποιες από τις πλευρές του NFP_{AB_CONVEX} αντιστοιχούν σε πραγματικές ακμές των πολυγώνων A ή B και ποιες ανήκουν σε «εικονικές ακμές» (dummy edges) των αντίστοιχων κυρτών περιβλημάτων οι οποίες αντικαθιστούν μη κυρτές περιοχές των δυο πολυγώνων. Σκοπός αυτού του διαχωρισμού αποτελεί η εφαρμογή της τεχνικής ρίψης βολών μόνο στις πλευρές που ενδέχεται να επιτρέπουν περαιτέρω μετακίνηση του πολυγώνου B προς το A καθώς η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα ακριβής υπολογιστικά. Στο Σχήμα 6-32 παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα οι ακμές του NFP_{AB_CONVEX} οι οποίες προέρχονται από «εικονικές ακμές» των κυρτών περιβλημάτων των πολυγώνων. Έτσι η E1 και E2 και η E4 προέρχονται από «εικονική ακμή» του κυρτού περιβλήματος του πολυγώνου B ενώ η E3 προέρχεται από «εικονική ακμή» του κυρτού περιβλήματος του πολυγώνου A. Αφού δημιουργηθεί μια λίστα με τις ακμές του NFP_{AB_CONVEX} οι οποίες μπορούν να συμμετέχουν στην περαιτέρω διαδικασία τότε το αντικείμενο B ολισθαίνει βηματικά, σύμφωνα με μια προκαθορισμένη τιμή, σε κάθε μία από αυτές τις ακμές. Σε κάθε σημείο που ολισθαίνει το B πολύγωνο, ανάλογα με το βήμα,

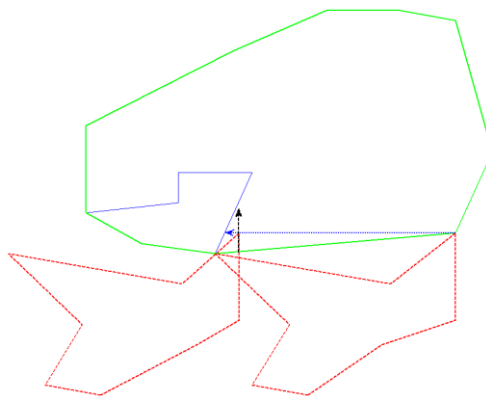
επιχειρείται μέσω της τεχνικής βολής ακτινών η περαιτέρω μετακίνηση του προς το πολύγωνο A. Οι κινήσεις του B μπορούν να αναλυθούν σε οριζόντιες και κάθετες κινήσεις. Η επιλογή μεταξύ του είδους της κίνησης καθώς και της φοράς της μπορεί να γίνει για κάθε ακμή στην οποία ολισθαίνει το πολύγωνο B βάσει της κλίσης της. Έτσι εάν η ακμή στην οποία πραγματοποιείται η ολίσθηση σχηματίζει γωνία με το X άξονα στο διάστημα $[0^{\circ}, 90^{\circ}]$, όπως η ακμή E1 του Σχήματος 6-32, τότε το αντικείμενο B για να έρθει εγγύτερα του πολυγώνου A πρέπει να μετακινηθεί οριζόντια με φορά προς τα αριστερά και κάθετα με φορά προς τα πάνω. Αντίθετα, εάν η ακμή στην οποία πραγματοποιείται η ολίσθηση σχηματίζει γωνία με το X άξονα στο διάστημα $(90^{\circ}, 180^{\circ}]$, όπως η ακμή E2 του Σχήματος 6-32, τότε το αντικείμενο B για να έρθει εγγύτερα του πολυγώνου A πρέπει να μετακινηθεί οριζόντια με φορά προς τα αριστερά και κάθετα με φορά προς τα κάτω. Τέλος, εάν η ακμή στην οποία πραγματοποιείται η ολίσθηση σχηματίζει γωνία με το X άξονα στο διάστημα $(180^{\circ}, 270^{\circ}]$, όπως οι ακμές E3 και E4 του Σχήματος 6-32, τότε το αντικείμενο B μπορεί να μετακινηθεί οριζόντια με φορά προς τα δεξιά και κάθετα με φορά προς τα κάτω, ενώ εάν η ακμή σχηματίζει γωνία με το X άξονα στο διάστημα $(270^{\circ}, 360^{\circ})$ τότε το αντικείμενο B μπορεί να μετακινηθεί οριζόντια με φορά προς τα δεξιά και κάθετα με φορά προς τα πάνω.



Σχήμα 6-32 Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας υπολογισμού $NFP_{AB_ESTIMATOR}$.

Όπως προαναφέρθηκε οι «εικονικές ακμές» οι οποίες χρησιμοποιούνται από τα κυρτά περιβλήματα για τη δημιουργία του NFP_{AB_CONVEX} είναι ακμές οι οποίες στην ουσία αντικαθιστούν μια αλληλουχία ακμών που δημιουργούν μια μη κυρτή περιοχή του πολυγώνου. Και σε αυτές τις περιπτώσεις η κλίση των «εικονικών ακμών» μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το είδος της κίνησης η οποία θα εκμεταλλευτεί καλύτερα το διαθέσιμο χώρο της μη κυρτής περιοχής των πολυγώνων. Εξετάζοντας την ακμή E1 του B αντικειμένου (βλ. Σχήμα 6-32)

παρατηρείται ότι εάν το αντικείμενο εκτελέσει οριζόντιες κινήσεις προς τα αριστερά θα καταφέρει να εκμεταλλευτεί μόνο ένα μικρό μέρος της αντίστοιχης μη κυρτής περιοχής. Αντίθετα, εάν το αντικείμενο εκτελέσει κάθετες κινήσεις συνεπικουρούμενο και από την ολίσθηση του θα καταφέρει να εκμεταλλευτεί το μεγαλύτερο μέρος της μη κυρτής περιοχής που καλύπτει. Εάν εκτελεστούν και οι δύο κινήσεις (οριζόντια και κάθετη) τότε λόγω της ολίσθησης του B παρουσιάζεται το φαινόμενο να μετακινείται το B συνεχώς σε συγκεκριμένες θέσεις χωρίς να δύναται να εκμεταλλευτεί το μεγαλύτερο μέρος της μη κυρτής γεωμετρίας του. Στο Σχήμα 6-33 παρουσιάζεται σχηματικά αυτό το φαινόμενο όπου από δυο σχεδόν ακραίες θέσεις το B καταλήγει να τοποθετηθεί στην ίδια τελική θέση.



Σχήμα 6-33 Σχηματική απεικόνιση μετακίνησης πολυγώνου B στο ίδιο τελικό σημείο.

Έτσι τελικά η επιλογή μεταξύ του είδους των κινήσεων γίνεται συγκρίνοντας τον λόγο:

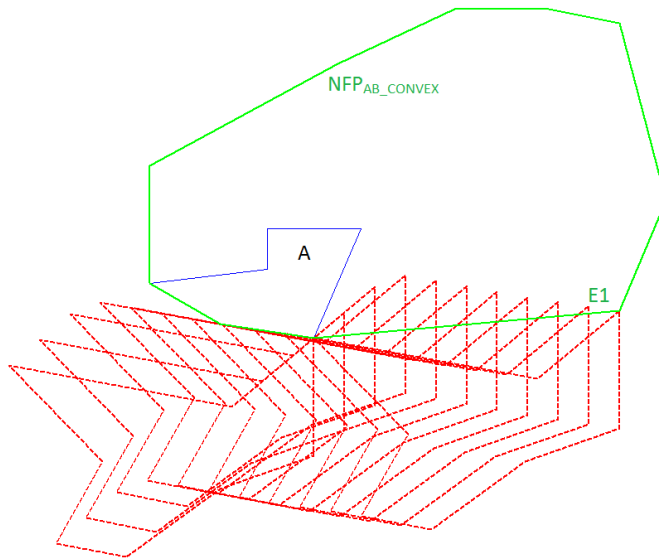
$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} \quad (6.5)$$

όπου $(X_n, Y_n, n = 1, 2)$ είναι οι συντεταγμένες της ακμής του NFP_{AB_CONVEX} που εξετάζεται.

Εάν ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας τότε η κάθετη κίνηση ενδέχεται να εκμεταλλευτεί καλύτερα την μη κυρτή γεωμετρία της περιοχής που αντιπροσωπεύει η ακμή, ενώ εάν ο λόγος είναι μικρότερος της μονάδας τότε προτιμάται η οριζόντια μετακίνηση.

Στο Σχήμα 6.34 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία της ολίσθησης του B πολυγώνου πάνω στην ακμή E1 του πολυγώνου NFP_{AB_CONVEX} και η οποία προέρχεται από «εικονική» ακμή του κυρτού περιβλήματος του πολυγώνου B. Το βήμα ολίσθησης έχει ορισθεί στο 10% του μήκους της ακμής E1 και η κλίση της ακμής E1 υποδεικνύει ότι το πολύγωνο B για να πλησιάσει προς το A θα πρέπει να μετακινηθεί κάθετα με φορά προς τα άνω. Για την εύρεση της μέγιστης δυνατής απόστασης μετακίνησης σε κάθε σημείο που τοποθετείται το σημείο αναφοράς του πολυγώνου B

χρησιμοποιείται η τεχνική της βολής ακτινών έτσι όπως αυτή περιγράφηκε σε παραπάνω παράγραφο προσπαθώντας ταυτόχρονα να ελαχιστοποιείται η άσκοπη χρήση της. Αντικαθιστώντας την «εικονική ακμή» του NFP_{AB_CONVEX} (στο συγκεκριμένο παράδειγμα την E1) από το ίχνος του σημείου αναφοράς του πολυγώνου B μετά την οριζόντια ή κάθετη μετακίνηση του καταφέρνουμε να έχουμε μια άκρως ικανοποιητική προσέγγιση ($NFP_{AB_ESTIMATOR}$) της μορφής του πραγματικού NFP_{AB} .



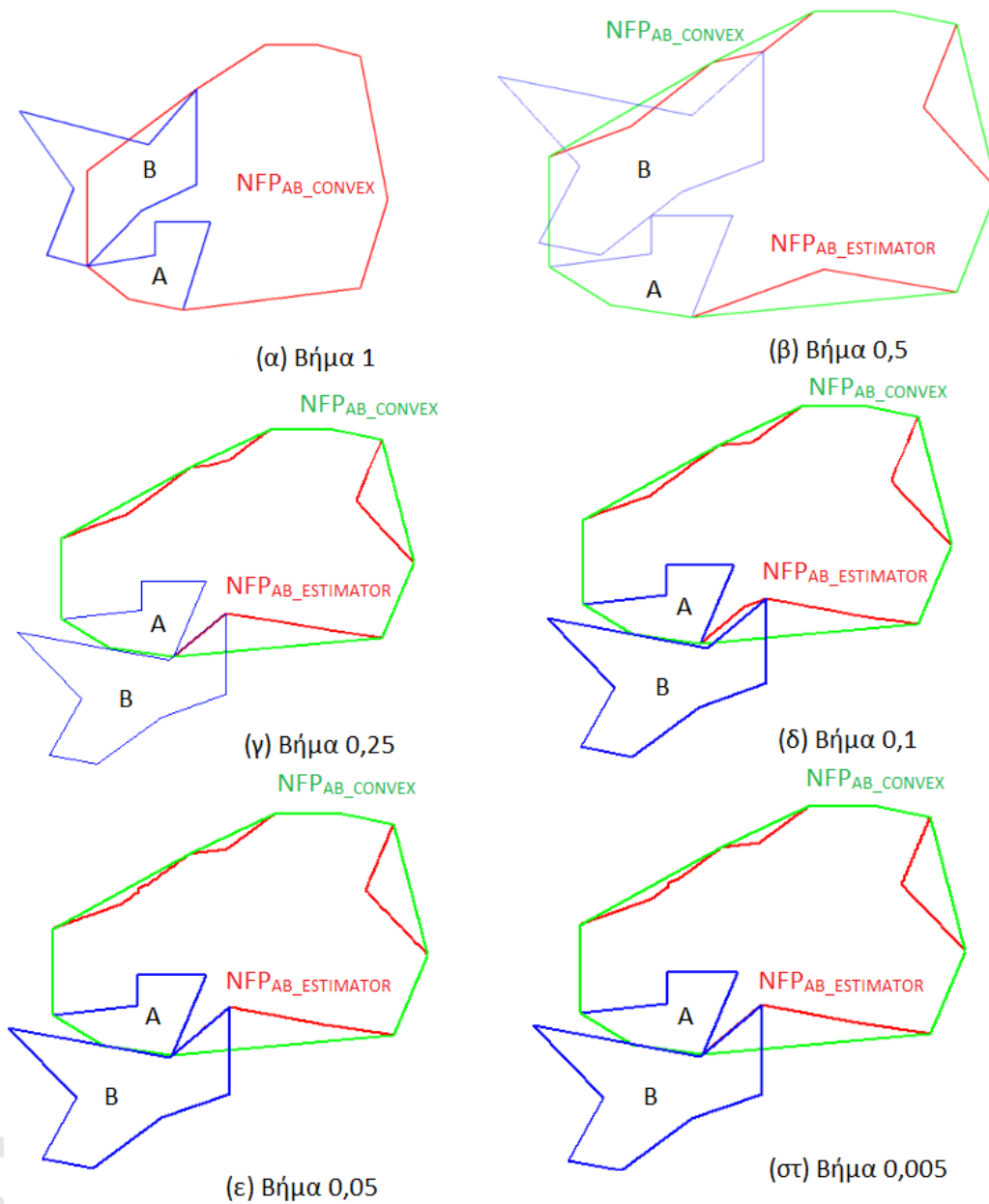
Σχήμα 6-34 Σχηματική απεικόνιση αντικατάστασης εικονικής ακμής.

Γίνεται αντιληπτό ότι το βήμα της ολίσθησης του αντικειμένου B πάνω στην ακμή του NFP_{AB_CONVEX} είναι καίριας σημασίας. Όσο μικρότερο είναι το βήμα ολίσθησης τόσο ακριβέστερο το περίγραμμα που δημιουργείται με αποτέλεσμα το πολύγωνο $NFP_{AB_ESTIMATOR}$ που δημιουργείται να προσεγγίζει περισσότερο το πραγματικό NFP_{AB} . Στο Σχήμα 6-35 παρουσιάζεται σχηματικά τα πολύγωνα $NFP_{AB_ESTIMATOR}$ που δημιουργούνται για εναλλακτικές τιμές του βήματος ολίσθησης καθώς και την βέλτιστη σχετική θέση του B σε σχέση με το A υποθέτοντας μεγιστοποίηση του λόγου:

$$f = \frac{Εμβαδόν_A + Εμβαδόν_B}{Εμβαδόν Κυρτού Περιβλήματος A\&B} \quad (6.6)$$

Στην περίπτωση που το βήμα πάρει την τιμή 1 παρατηρείται ότι το $NFP_{AB_ESTIMATOR}$ που προκύπτει ταυτίζεται με το NFP_{AB_CONVEX} καθώς στη ουσία επιχειρείται μετακίνηση του B μόνο από τις κορυφές του πολυγώνου NFP_{AB_CONVEX} στις οποίες ήδη τα δυο πολύγωνα εφάπτονται. Αντίθετα στις περιπτώσεις (β), (γ), (δ) και (ε) καθώς αλλάζει το βήμα αλλάζει και η μορφή του $NFP_{AB_ESTIMATOR}$ με αποτέλεσμα να αλλάζει και η βέλτιστη τοποθέτηση του B σε σχέση με το A. Στον Πινάκα 6-1 παρουσιάζονται και οι αντίστοιχοι χρόνοι δημιουργίας των πολυγώνων $NFP_{AB_ESTIMATOR}$, μελετώντας

τους οποίους γίνεται εμφανές ότι η χρησιμοποίηση μικρότερων βημάτων αυξάνει τον χρόνο δημιουργίας τους αυξάνοντας ταυτόχρονα και την ακρίβεια απόδοσης του πραγματικού NFP_{AB} από το πολύγωνο $NFP_{AB_ESTIMATOR}$. Ωστόσο, από ένα σημείο και μετά (δηλαδή από το βήμα 0,05 και μετά στο συγκεκριμένο παράδειγμα) η μείωση του βήματος συνεπάγεται πολλαπλασιασμό του απαιτούμενου χρόνου δημιουργίας του $NFP_{AB_ESTIMATOR}$ χωρίς να αλλάζει η μορφή του και κατά επέκταση η βέλτιστη θέση του B, αφού ήδη το πολύγωνο $NFP_{AB_ESTIMATOR}$ αποτελεί πιστή προσέγγιση του NFP_{AB} .



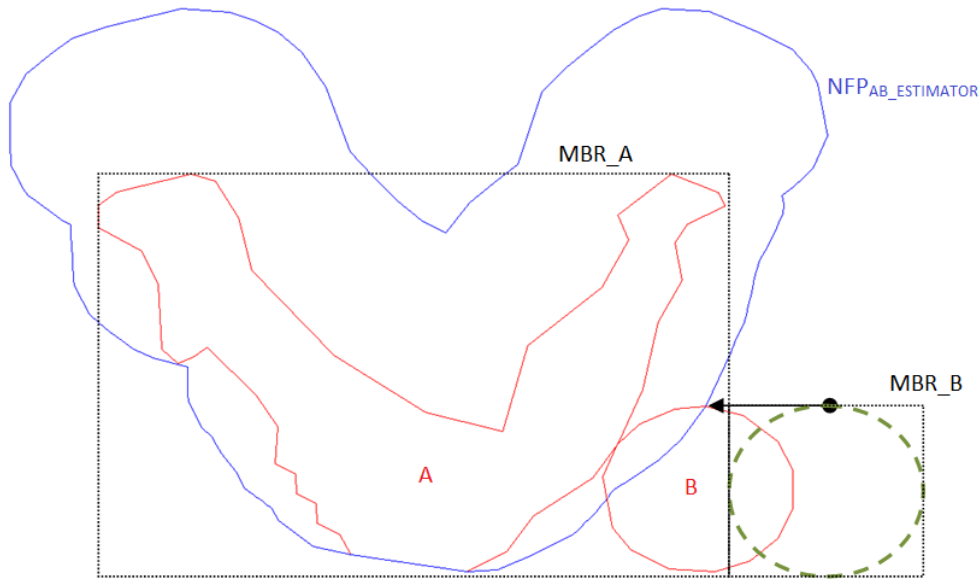
Σχήμα 6-35 Σχηματική απεικόνιση αύξησης της ακριβείας σχηματισμού του NFP.

Βήμα Ολίσθησης	Χρόνος Δημιουργίας $NFP_{AB_ESTIMATOR}$
1	0,04 Sec
0,5	0.06 Sec
0,25	0.078 Sec
0,1	0.15 Sec
0,05	0.28 Sec
0,005	2.45 Sec

Πίνακας 6-1 Χρόνος δημιουργίας $NFP_{AB_ESTIMATOR}$ σε σχέση με βήμα ολίσθησης.

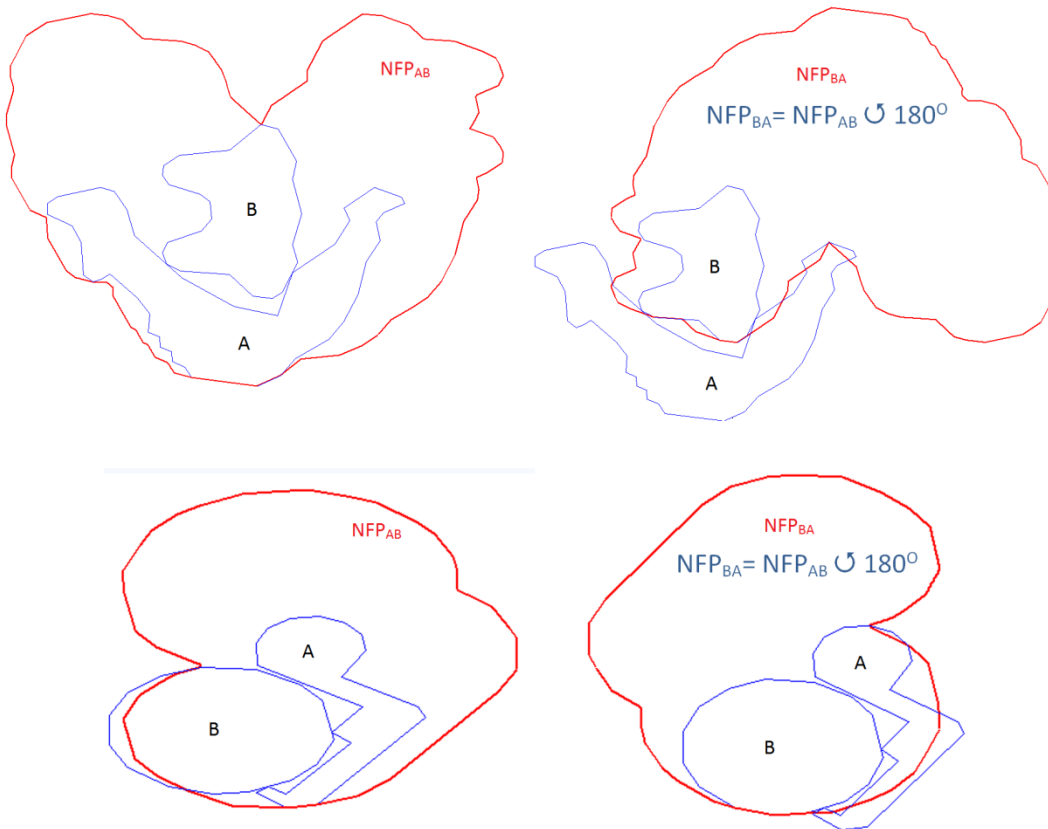
Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να υπολογιστεί σε σχετικά μικρό χρόνο μια άκρως ικανοποιητική προσέγγιση του πραγματικού No-Fit πολύγωνου, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται στην παρατήρηση ότι από την στιγμή που θα υπολογιστεί το No-Fit πολύγωνο ενός ζεύγους πολυγώνων καθίσταται σχετικά απλός ο προσδιορισμός οποιουδήποτε διανύσματος μετακίνησης υπό οποιαδήποτε κατεύθυνση προκειμένου το αντικείμενο B να προσεγγίσει το μέγιστο δυνατό το αντικείμενο A. Το διάνυσμα αυτό προκύπτει εάν από το σημείο αναφοράς του πολυγώνου B, σύμφωνα με το οποίο δημιουργήθηκε το No-Fit πολύγωνο, βληθεί υπό οποιαδήποτε γωνία μια ακτίνα προς το No-Fit πολύγωνο. Έτσι το διάνυσμα μετακίνησης θα έχει πάντα αρχή το σημείο αναφοράς του πολυγώνου B και τέλος το σημείο τομής της βληθείσας ακτίνας με No-Fit πολύγωνο.

Η χρησιμοποίηση λοιπόν του No-Fit πολύγωνου κατά τη διάρκεια της φάσης στοιβαγμού ελαχιστοποιεί την ανάγκη χρησιμοποίησης της τεχνικής των βολών ακτινών, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται ευεργετικό σε όρους υπολογιστικού χρόνου, καθώς για την ολοκλήρωση μιας κάθετης ή οριζόντιας μετακίνησης απαιτείται πλέον η βολή μίας και μόνο ακτίνας. Στο παράδειγμα του Σχήματος 6-36 παρουσιάζονται δυο αντικείμενα τα οποία έχουν ήδη υποστεί την πρώτη φάση στοιβαγμού όπου τα αντίστοιχα MBR (εμφανίζονται στο Σχήμα 6-36 με μαύρη διακεκομμένη γραμμή) που τα περικλείουν έχουν στοιβαχθεί. Επίσης, με μπλε χρώμα παρουσιάζεται το No-Fit πολύγωνο των αντικειμένων A και B. Προκειμένου λοιπόν το πολύγωνο B να μετακινηθεί εγγύτερα του πολυγώνου A το μόνο που χρειάζεται είναι η ρίψη μίας ακτίνας από το σημείο αναφοράς του B, σύμφωνα με το οποίο έχει δημιουργηθεί το $NFP_{AB_ESTIMATOR}$, και η εύρεση του σημείου τομής της με το $NFP_{AB_ESTIMATOR}$. Το διάνυσμα μετακίνησης που δημιουργείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-36 με ένα βέλος, όπου η αρχή του είναι το σημείο αναφοράς του πολυγώνου B (εμφανίζεται στο σχήμα ως μαύρη έντονη τελεία) ενώ το πέρας του κείται πάνω στο $NFP_{AB_ESTIMATOR}$. Έτσι τελικά το πολύγωνο B μπορεί να μετακινηθεί από την αρχική του θέση, στην οποία παρουσιάζεται με διακεκομμένη πράσινη γραμμή, στη τελική του η οποία παρουσιάζεται με κόκκινη συμπαγή γραμμή. Ομοίως μπορεί να πραγματοποιεί οποιαδήποτε κάθετη κίνηση.



Σχήμα 6-36 Σχηματική απεικόνιση υπολογισμού διανύσματος οριζόντιας κίνησης.

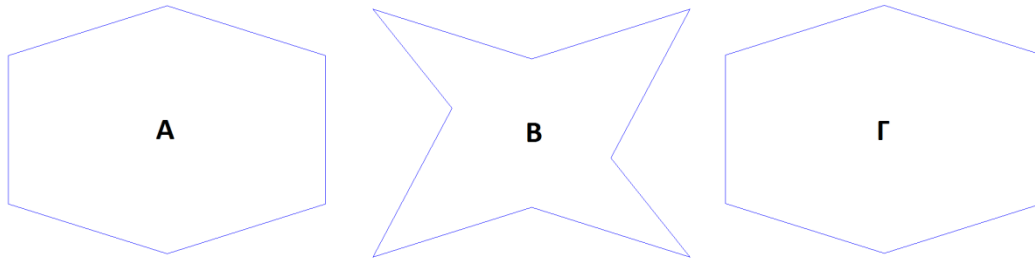
Για την χρησιμοποίηση του No-Fit πολυγώνου κατά την δεύτερη φάση στοιβαγμού, αυτή δηλαδή της συμπύκνωσης, απαιτείται η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων η οποία θα περιέχει τα No-Fit πολύγωνα για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς αντικειμένων και προσανατολισμών. Για την ελαχιστοποίηση του φόρτου των απαραίτητων υπολογισμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυο βασικές ιδιότητες των πολυγώνων No-Fit. Η πρώτη ιδιότητα πηγάζει από την σχετική κίνηση των δυο πολύγωνων (A και B) και ορίζει ότι το No-Fit πολύγωνο που δημιουργείται κατά την ολίσθηση του πολυγώνου B γύρω από το A αντιστοιχεί στο No-Fit πολύγωνο που δημιουργείται κατά την ολίσθηση του πολυγώνου A γύρω από το B περιστραμμένο όμως κατά 180° [180, 182] (βλ. Σχήμα 6-37). Η δεύτερη ιδιότητα ορίζει ότι το No-Fit πολύγωνο δυο πολύγωνων παραμένει το ίδιο αρκεί να διατηρείται ο αρχικός σχετικός προσανατολισμός ανάμεσα τους. Αυτό σημαίνει ότι το No-Fit πολύγωνο δυο πολυγώνων τα οποία περιστράφηκαν κατά 180° και τα δύο είναι το ίδιο με το No-Fit που δημιουργήθηκε για τα αρχικά πολύγωνα (δηλ. στις 0°) περιστραμμένο όμως κατά 180° . Η αξιοποίηση αυτών των δύο ιδιοτήτων μπορεί να μειώσει δραστικά τον αριθμό των No-Fit πολυγώνων τα οποία θα πρέπει πραγματικά να υπολογιστούν προκειμένου να δημιουργηθεί η κατάλληλη βάση η οποία θα περιέχει τα No-Fit πολύγωνα για όλα τα αντικείμενα προς στοιβαγμό υπό οποιοδήποτε προσανατολισμό.



Σχήμα 6-37 Σχηματική απεικόνιση No-Fit πολυγώνων (NFP_{AB} , NFP_{BA}).

6.6.2.1.2 Κανόνες τοποθέτησης NFP

Ο δεύτερος τρόπος αξιοποίησης του No-Fit πολύγωνα αφορά τη χρήση του ως κανόνα επιλογής του σημείου τοποθέτησης ενός αντικείμενου σε σχέση με την ήδη υπάρχουσα διάταξη. Η ανάπτυξη και χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας προσεγγιστικού υπολογισμού του NFP βασίζεται στην παρατήρηση ότι στο υφιστάμενο πρόβλημα στοιβαγμού οι προβολές των αντικειμένων αποτελούνται από μεγάλο αριθμό σημείων εξαιτίας τις προέλευσής τους από το πολυεδρικό αρχείο STL. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυξημένο υπολογιστικό κόστος εάν χρησιμοποιηθούν άμεσα οι πλευρές των προβολών, ακόμα και αφού έχουν υποστεί την διαδικασία της απλοποίησης (βλ. παράγ. 6.6.1), για τη δημιουργία του NFP. Το φαινόμενο αυτό καθίσταται εντονότερο καθώς ενσωματώνονται νέα αντικείμενα στη διάταξη στοιβαγμού και αυξάνονται οι μη κυρτές περιοχές. Αντίθετα η αναπτυχθείσα προσέγγιση επηρεάζεται σημαντικά λιγότερο από τον αριθμό των σημείων από τις οποίες αποτελείται μια μη κυρτή περιοχή της διάταξης στοιβαγμού, καθώς το υπολογιστικό της κόστος της σχετίζεται κυρίως με την επιλογή του βήματος ολίσθησης από τον χρήστη.

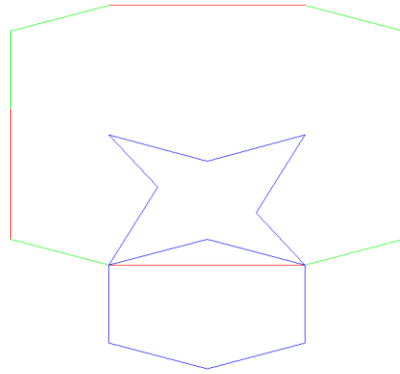


Σχήμα 6-38 Σχηματική απεικόνιση κυρτών (Α, Γ) και μη κυρτών (Β) αντικειμένων προς στοιβαγμό

Η διαδικασία στοιβαγμού με χρήση NFP χρησιμοποιεί πάντα δυο πολύγωνα ήτοι το σταθερό πολύγωνο Α και το κινητό Β. Το σταθερό πολύγωνο Α αποτελείται πάντα από το περίγραμμα της μέχρι τώρα υπάρχουσας διάταξης, ενώ το πολύγωνο Β ταυτίζεται πάντα με το νεοεισερχόμενο αντικείμενο. Έστω λοιπόν ότι επιχειρείται στοιβαγμός των αντικειμένων τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-38. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους κανόνες τοποθέτησης η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν τοποθετεί τα αντικείμενα σε απολυτές θέσεις σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της πλατφόρμας κατασκευής. Αντίθετα, η τελική διάταξη στοιβαγμού αποτελείται από τις σχετικές θέσεις των αντικειμένων μεταξύ τους, φροντίζοντας πάντα το συνολικό μήκος και πλάτος της διάταξης να μην υπερβαίνει τον αντίστοιχο διαθέσιμο χώρο της πλατφόρμας. Συνεπώς, η διαδικασία του στοιβαγμού αρχίζει χρησιμοποιώντας την τεχνική εύρεσης του NFP η οποία προαναφέρθηκε για να ευρεθεί η καλύτερη δυνατή θέση του Β ως προς το Α (βλ. Σχήμα 6-39). Καθώς το Β ολισθαίνει περιμετρικά του Α δημιουργώντας το No-Fit πολύγωνο υπολογίζεται ταυτόχρονα το πόσο ικανή είναι κάθε θέση στο οποίο τοποθετείται να αποτελέσει και την τελική θέση στοιβάξης. Η καταλληλότητα κάθε θέσης κρίνεται δημιουργώντας το κυρτό περίβλημα της ένωσης των δύο αντικειμένων και συγκρίνοντας το με το εμβαδόν των δύο αντικειμένων ως εξής:

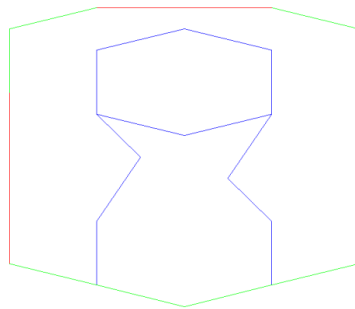
$$\text{Καταλληλότητα} = \frac{\text{Εμβαδόν Πρώτο Αντικείμενο} + \text{Εμβαδόν Δεύτερο Αντικείμενο}}{\text{Εμβαδόν Κυρτού Περιβλήματος 1\&2 Αντικειμένου}} \quad (6.7)$$

Όσο αυτό το πηλίκο πλησιάζει προς την μονάδα σημαίνει τόσο περιορίζονται οι παγιδευμένοι ανάμεσα στα δυο αντικείμενα χώροι, οι οποίοι πιθανόν να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον στοιβαγμό άλλων αντικειμένων στη συνέχεια. Συνεπώς, από όλες τις σχετικές θέσεις μεταξύ δυο αντικειμένων που θα εξεταστούν επιλέγεται τελικά αυτή η οποία μεγιστοποιεί το παραπάνω κριτήριο καταλληλότητας.



Σχήμα 6-39 Σχηματική απεικόνιση στοιβαγμού δυο αντικειμένων.

Αφού επιλεγθεί η βέλτιστη η τοποθέτηση του δεύτερου αντικείμενου, ώστε το σημείο αναφοράς του να συμπίπτει με αυτήν τη θέση, και πραγματοποιηθεί η ένωσή του με τα υπάρχοντα, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μεγαλύτερο πολύγωνο το οποίο θα αποτελέσει το επόμενο πολύγωνο A, η διαδικασία εύρεσης του NFP επαναλαμβάνεται με το επόμενο προς στοιβαγμό αντικείμενο (βλ. Σχήμα 6-40). Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου στοιβαχθούν όλα τα αντικείμενα.



Σχήμα 6-40 Σχηματική απεικόνιση στοιβαγμού τριών αντικειμένων.

6.6.3 Περιγραφή υποσύστηματος μετα-ευρετικών αλγορίθμων έρευνας

Οι διαδικασίες στοιβαγμού που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες απαιτούν τον συνδυασμό τους με κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης προκειμένου η διάταξη στοιβαγμού η οποία θα προταθεί τελικά από το λογισμικό να αξιοποιεί όσο το δυνατόν καλύτερα το διαθέσιμο χώρο της πλατφόρμας κατασκευής μιας μηχανής ΣΚ. Έτσι η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην μελέτη του συνδυασμού των διαδικασιών στοιβαγμού που αναπτυχθήκαν με δυο από τις κυριότερες μετα-ευρετικές μεθοδολογίες βελτιστοποίησης, ήτοι αυτή των Γενετικών Αλγορίθμων και της Προσομοιωμένης Ανόπτησης, με σκοπό την εύρεση του συνδυασμού εκείνου που αποδίδει καλύτερα στο υπό εξέταση πρόβλημα.

Η δομή τόσο του Γενετικού Αλγόριθμου (ΓΑ) όσο και της Προσομοιούμενης Ανόπτησης (ΠΑ) ακολουθεί το γενικό πλαίσιο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η κυριότερη διαφοροποίηση αφορά την κωδικοποίηση του ατόμου/λύσης που χρησιμοποιείται στα προβλήματα στοιβαγμού και η οποία είναι η Απεικόνιση Εναλλαγής (Permutation Encoding). Σύμφωνα με αυτή την κωδικοποίηση ο γενέτυπος κάθε ατόμου ταυτίζεται με την ακολουθία στοιβαγμού η οποία αντιστοιχεί στην ουσία στην σειρά των αντικείμενων με την οποία θα τροφοδοτηθεί η διαδικασία στοιβαγμού. Για παράδειγμα εάν ο γενέτυπος ενός ατόμου είναι $\{2,4,3,1\}$ σημαίνει ότι έχουμε να στοιβάξουμε τέσσερα αντικείμενα και το πρώτο αντικείμενο που θα στοιβαχθεί είναι αυτό με την σήμανση 2, το δεύτερο αντικείμενο που θα στοιβαχθεί είναι αυτό με την σήμανση 4, το τρίτο αντικείμενο που θα στοιβαχθεί είναι αυτό με την σήμανση 3 και τελευταίο θα στοιβαχθεί το αντικείμενο με την σήμανση 1.

Η χρησιμοποίηση της Απεικόνισης Εναλλαγής για την κωδικοποίηση κάθε ατόμου/λύσης επιφέρει αναγκαστικές τροποποιήσεις στους τελεστές της διασταύρωσης και μετάλλαξης του ΓΑ καθώς και στον τελεστή δημιουργίας νέων ατόμων της ΠΑ προκειμένου να την υποστηρίζουν. Οι δυο τελεστές διασταύρωσης που υποστηρίζονται από το λογισμικό είναι οι εξής :

SJX (Stefans Jakobs Crossover) [183]: Δοθέντος του γενέτυπου δυο ατόμων και δυο τυχαίων αριθμών p, q , ο κανόνας SJX αντιγράφει q γονίδια αρχίζοντας από το p γονίδιο του πρώτου γονέα στον γενέτυπο του πρώτου απογόνου και συμπληρώνει τα υπόλοιπα γονίδια του με τα γονίδια του δεύτερου γονέα. Ομοίως ο δεύτερος απόγονος δημιουργείται αντιγράφοντας q γονίδια αρχίζοντας από το p γονίδιο του δεύτερου γονέα στον γενέτυπο του δεύτερου απογόνου και συμπληρώνει τα υπόλοιπα γονίδια του από τα γονίδια του πρώτου γονέα. Παραδείγματος χάρη έστω ότι ο πρώτος γονέας έχει γενέτυπο $\{1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$ και ο δεύτερος $\{6,4,2,5,3,1,8,7,9\}$ και ισχύει ότι $p=2, q=3$. Τότε το $2,3,4$, είναι τα πρώτα γονίδια του πρώτου απογόνου από τον πατέρα και $6,5,1,8,7,9$ τα υπόλοιπα γονίδια από τον δεύτερο γονέα. Άρα ο γενέτυπος του πρώτου απογόνου είναι $\{2,3,4,6,5,1,8,7,9\}$.

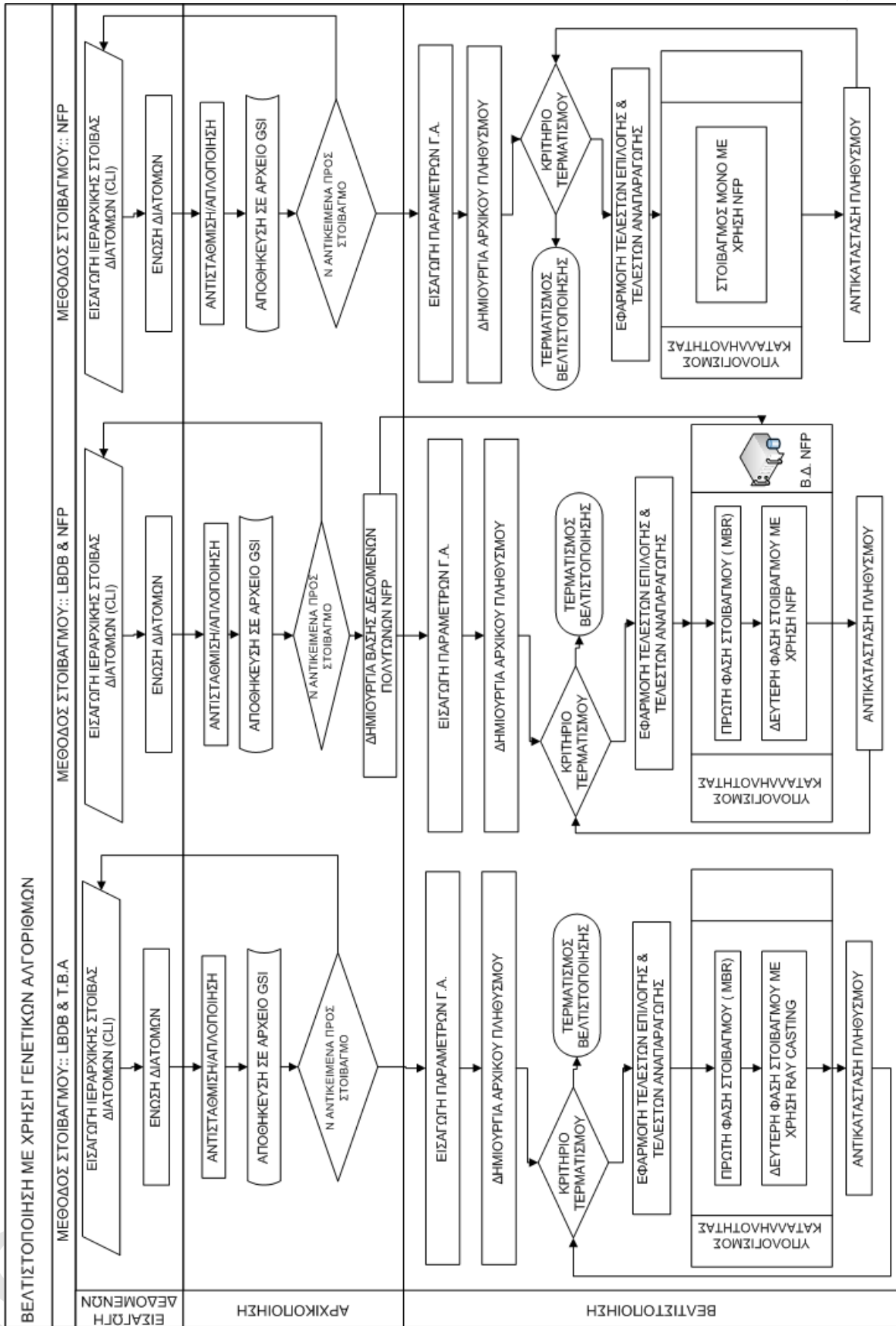
OBX (Order Based Crossover) [183]: Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα επιλέγεται τυχαία ένα σημείο διαχωρισμού (Cut Point). Το αριστερό μέρος του γενέτυπου του πρώτου γονέα από το σημείο κοπής αντιγράφεται στο γενέτυπο του πρώτου απογόνου. Ο υπόλοιπος γενέτυπος συμπληρώνεται από τα γονίδια του δεύτερου γονέα (που δεν υπάρχουν ήδη στον απόγονο) με τη σειρά που αυτά συναντώνται στο γενέτυπο του δεύτερου γονέα. Έστω ότι ο πρώτος γονέας έχει γενέτυπο $\{2,4,5,3,8,9,6,1,7\}$, ο δεύτερος $\{3,9,8,6,5,4,2,7,1\}$ και το σημείο κοπής είναι μετά το τέταρτο γονίδιο. Άρα τα τέσσερα πρώτα γονίδια του πρώτου απογόνου είναι $2,4,5,3$ κληρονομία του πρώτου γονέα

ενώ τα υπόλοιπα από τον δεύτερο είναι 9,8,6,7,1. Συνεπώς, ο απόγονος έχει γενέτυπο {2,4,5,3,9,8,6,7,1}.

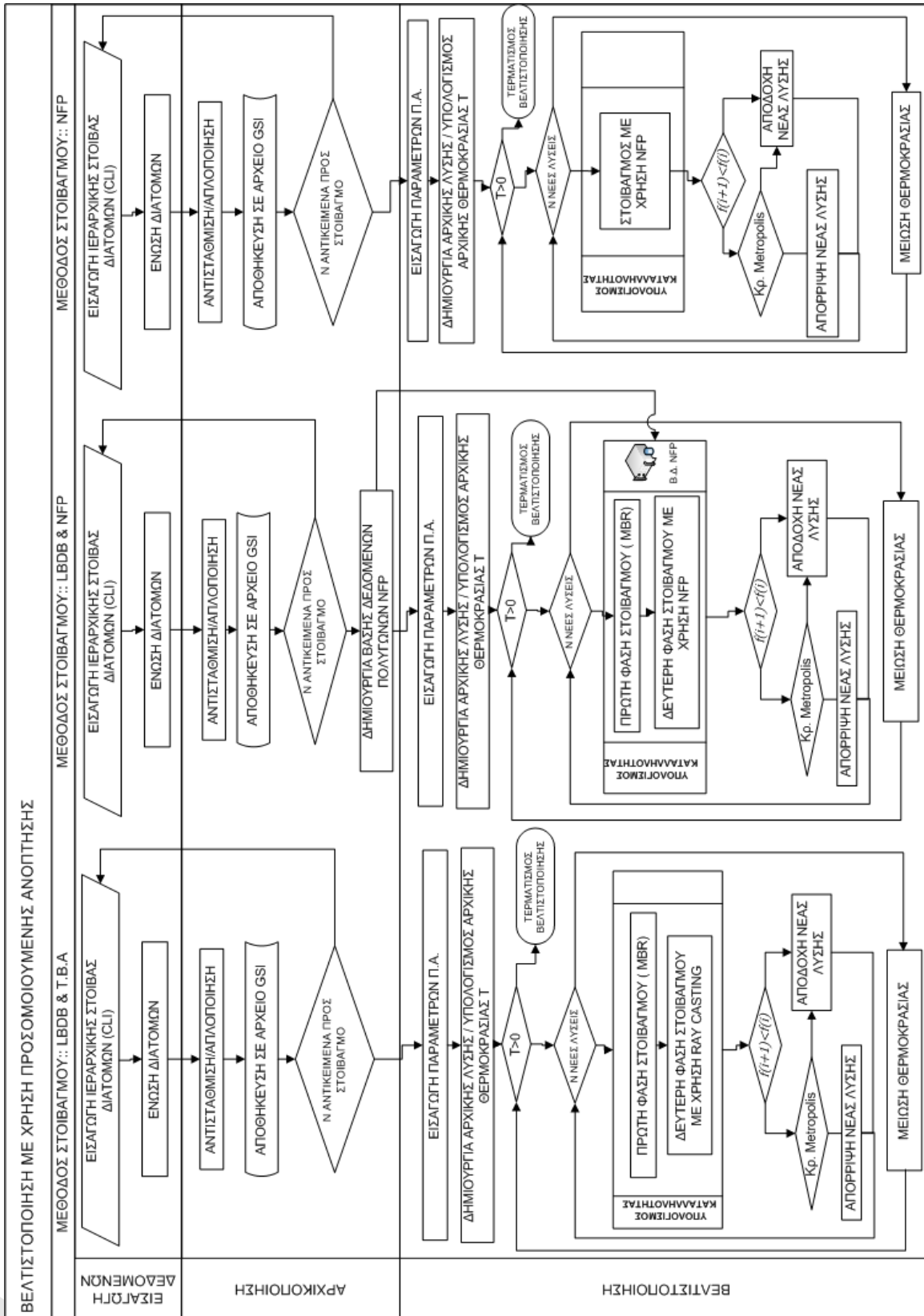
Ακόμα στον ΓΑ υποστηρίζεται η χρήση δυο τελεστών μετάλλαξης. Ο πρώτος τελεστής (Swap Operator) επιλέγει τυχαία δυο γονίδια τα οποία και αλλάζουν αμοιβαία θέση μέσα στον γενέτυπο. Ο δεύτερος (Transfer Operator) επιλέγει επίσης τυχαία ένα γονίδιο και το μεταφέρει σε άλλη θέση μέσα στον γενέτυπο. Τέλος, ως τελεστές δημιουργίας νέων ατόμων της ΠΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ο τελεστής SJX όσο και ο τελεστής μετάλλαξης Swap Operator.

Στον ΓΑ παρέχεται επίσης η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στις διαδικασίες της Αναλογικής Επιλογής (Proportional Selection), όπου η επιλογή ενός ατόμου προς αναπαραγωγή ή αντικατάσταση εξαρτάται αποκλειστικά από την σχέση της τιμής καταλληλότητας του σε σχέση με τις τιμές καταλληλότητας του υπόλοιπου πληθυσμού, και της μεθοδολογίας επιλογής μέσω διεξαγωγής πρωταθλημάτων (Tournament Selection) κατά την οποία μια ομάδα ατόμων επιλέγεται τυχαία από τον πληθυσμό και τα μέλη της συγκρίνονται στην συνέχεια το ένα με το άλλο, έτσι ώστε να επιλεγθεί το καταλληλότερο ως υποψήφιο προς αναπαραγωγή. Τέλος, για τον ΓΑ παρέχεται και η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στη στρατηγική σταθερής αντικατάστασης (Steady State) κατά την οποία παράγεται ένας μικρός αριθμός απογόνων (ένας ή δύο) σε κάθε γενεά και αντικαθιστάται ο πιο αδύνατος (ή οι πιο αδύνατοι) γονεάς(-εις) και στην στρατηγική αντικατάστασης “(μ,λ)-ES” όπου δημιουργείται ένας προσωρινός πληθυσμός $g+1_{temp}$ ο οποίος αποτελείται από μ άτομα της g γενεάς και λ απογόνους και στη συνέχεια επιλέγονται για να αποτελέσουν τον πληθυσμό της $g+1$ γενεάς τα μ καλύτερα άτομα του προσωρινού πληθυσμού.

Στον αλγόριθμο της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ δυναμικού και στατικού προγράμματος ψύξης (Cooling Schedule). Επιλέγοντας στατικό πρόγραμμα ψύξης παρέχεται η δυνατότητα επιπλέον επιλογής ανάμεσα στο λογαριθμικό ή στο εκθετικό πρόγραμμα, ενώ η επιλογή δυναμικού προγράμματος οδηγεί στην χρησιμοποίηση του πολυωνυμικού προγράμματος του Van Laarhofen [82]. Στα Σχήματα 6-41 και 6-42 παρουσιάζονται ως διαγράμματα ροής το σύνολο των εναλλακτικών μεθόδων βελτιστοποίησης ανάμεσα στις οποίες καλείται ο τελικός χρήστης να επιλέξει.



Σχήμα 6-41 Διαγράμματα ροής διαδικασιών βελτιστοποίησης με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων.



Σχήμα 6-42 Διαγράμματα ροής διαδικασιών βελτιστοποίησης με χρήση Προσομοιωμένης Ανόπτξης.

6.7 Μελέτη Περιπτώσεων

Όλοι οι κανόνες τοποθέτησης καθώς και οι μεταερευτικοί αλγόριθμοι αναζήτησης οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το περιβάλλον ανάπτυξης Matlab. Στην συνέχεια δοκιμάστηκαν σε τέσσερα χαρακτηριστικά προβλήματα στοιβαγμού όλες οι προσεγγίσεις προκειμένου να ερευνηθεί η απόδοσή τους, καθώς και να ελεγχθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Τα τρία πρώτα προβλήματα στοιβαγμού είτε προέρχονται από το χώρο της βιομηχανίας ενδυμάτων είτε αφορούν τεχνητά δημιουργημένα σχήματα και θεωρούνται πλέον ως προβλήματα αναφοράς (benchmark problem). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το είδος αυτών των προβλημάτων αναφοράς δεν προσομοιάζει ιδιαίτερα στη φύση του προβλήματος στοιβαγμού αντικείμενων στην πλατφόρμα κατασκευής μιας μηχανής ΣΚ. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι στα προβλήματα στοιβαγμού που αφορούν τεχνολογίες ΣΚ δεν επιτρέπεται ο καθρεπτισμός (mirror) των αντικείμενων προς στοιβαγμό, καθώς και στο ότι οι διαστάσεις της πλατφόρμας είναι καθορισμένες και όχι ανοικτές. Ωστόσο, επειδή δεν υπάρχουν, τουλάχιστον στο βαθμό που γνωρίζει ο γράφων, αντίστοιχα προβλήματα στοιβαγμού τα οποία να προσομοιάζουν την φύση του παρόντος προβλήματος και να είναι διαθέσιμα για σύγκριση, εξετάστηκαν ως μελέτες περίπτωσης τα συγκεκριμένα προβλήματα αναφοράς προκειμένου να ερευνηθεί η συμπεριφορά των κανόνων τοποθέτησης σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Αντίθετα το τέταρτο και πιο χαρακτηριστικό πρόβλημα αφορά στην εύρεση της βέλτιστης δυνατής διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικείμενων τα οποία έχουν κατά καιρούς και στα πλαίσια διάφορων ερευνητικών προγραμμάτων και εργασιών κατασκευαστεί στο σύστημα Στερεολιθογραφίας του Εργαστηρίου Σύγχρονων Τεχνολογιών Παραγωγής και Έλεγχου του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

Τόσο ο ΓΑ όσο και η ΠΑ προσφέρουν μεγάλη ευελιξία ως προς την επιλογή των συστατικών μερών που μπορούν εναλλακτικά να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση των επιμέρους λειτουργιών. Η επιλογή των συστατικών μερών που αποτελούν τόσο τον ΓΑ όσο και την ΠΑ, τα οποία τελικά διερευνήθηκαν με σκοπό να προκριθεί η μέθοδος που αντιστοιχεί καλύτερα στις απαιτήσεις του υφιστάμενου προβλήματος στοιβαγμού, βασίζονται σε γενικούς εμπειρικούς κανόνες οι οποίοι έχουν προκύψει από την εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθοδολογιών σε μια ευρεία ποικιλία προβλημάτων βελτιστοποίησης [47, 57, 64]. Ιδιαίτερα δε για την περίπτωση των ΓΑ η επιλογή των δομικών του συστατικών βασίζεται στα συμπεράσματα της Hopper [168] η οποία υπήρξε από τους πρωτοπόρους που μελέτησαν τη σχέση (μα χρήση δοκιμών Friedman) μεταξύ του τελικού αποτελέσματος και της χρήσης εναλλακτικών δομικών συστατικών (πχ μελέτη επίδρασης εναλλακτικών τελεστών διασταύρωσης στην ποιότητα της τελικής λύσης) για κάθε βασική

λειτουργία του ΓΑ σε προβλήματα στοιβαγμού. Συγκεκριμένα, η πρώτη και πιο κλασική παράμετρος ενός ΓΑ που μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης είναι το μέγεθος του πληθυσμού. Εξετάζοντας λοιπόν διάφορα σενάρια ως προς το μέγεθος του πληθυσμού (με εύρος από 20 έως 200 άτομα) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι στα προβλήματα στοιβαγμού το μέγεθος του πληθυσμού δύναται να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα (ευνοώντας την χρήση μεγάλου πληθυσμού) όχι όμως σε τέτοιο βαθμό που να δικαιολογείται το επιπλέον υπολογιστικό κόστος, συμπέρασμα το οποία συνάδει και με τους εμπειρικούς κανόνες άλλων ερευνητών. Σε σχέση με το ποσοστό διασταύρωσης (Crossover Rate) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζονται όταν χρησιμοποιούνται ποσοστά στο εύρος [60%, 100%] καθώς αναγκάζεται ο αλγόριθμος να εξερευνήσει μεγαλύτερο μέρος του χώρου λύσης. Αντίθετα για το ποσοστό μετάλλαξης (Mutation Rate) προτείνει την χρησιμοποίηση ποσοστών της τάξης του 1% έως 3% σε σχέση με τον αριθμό γονιδίων ενός πληθυσμού. Τέλος, όσον αφορά στις εναλλακτικές στρατηγικές επιλογής και αντικατάστασης καθώς και στους εναλλακτικούς τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ουσιαστικά κανείς/καμιά δεν υπερέχει ξεκάθαρα των άλλων.

Βάσει των συμπερασμάτων αυτών ο ΓΑ που χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τις διαδικασίες στοιβαγμού «LBDB & RAY CASTING» και «LBDB & NFP» αποτελείται από τα εξής δομικά στοιχεία:

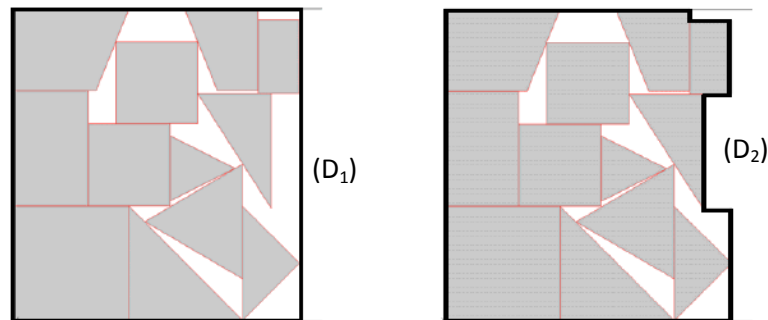
- μέγεθος πληθυσμού 50 χρωμοσωμάτων
- ποσοστό διασταυρώσεων 100%
- ποσοστό μετάλλαξης 1,25%
- τελεστής διασταύρωσης SJX
- τελεστής μετάλλαξης Transfer
- Αναλογική επιλογή ατόμων προς αναπαραγωγή (με πίεση επιλογής της τάξης του 2)
- Στρατηγική αντικατάστασης “(μ,λ)-ES”=(50,50)-50
- τερματισμός της διαδικασίας προσομοίωσης όταν ο πληθυσμός καταστεί πλήρως ομογενής.

Λόγω του αυξημένου υπολογιστικού κόστους που παρουσιάζει ο κανόνας στοιβαγμού κατά την υλοποίηση με αποκλειστική χρήση του NFP προτιμήθηκε ένας ΓΑ σταθερής κατάστασης (Steady State) όπου σε κάθε γενεά αντικαθιστώνται τα δυο λιγότερα ικανά άτομα ενός πληθυσμού επίσης 50 ατόμων. Τέλος, η δομή των συστατικών στοιχείων του αλγόριθμου της ΠΑ είναι η εξής:

- Πολυωνυμικό πρόγραμμα ψύξης (Van Laarhofen [82])
 - Μήκος Μαρκοβιανής αλυσίδας = 200 λύσεις

- Αρχικό ποσοστό αποδοχής = 80%
- Παράμετρος απόστασης = 2
- Αρχικός υπολογισμός θερμοκρασίας Van Laarhofen [82])
- Μήκος Μαρκοβιανής αλυσίδας σε κάθε θερμοκρασία = 200 άτομα
- Τερματισμός προσομοίωσης όταν η θερμοκρασία μηδενιστεί.

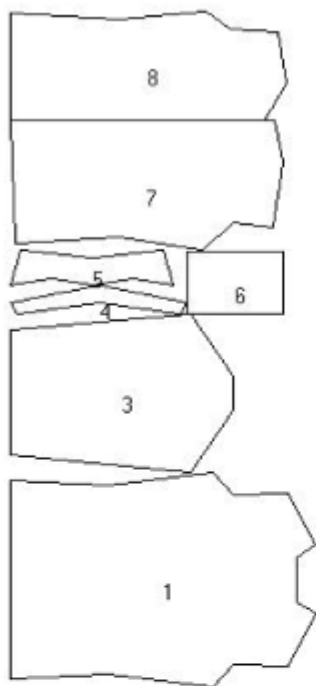
Για αξιολόγηση της ποιότητας μίας διάταξης στοιβαγμού απαντώνται στην βιβλιογραφία δύο διαφορετικά μέτρα. Το πρώτο μέτρο (D_1) αξιολογεί τον χώρο που καταλαμβάνει η διάταξη σε σχέση με το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο που την περικλείει (βλ. Σχήμα 6-43 α). Το δεύτερο μέτρο (D_2) διαφοροποιείται χρησιμοποιώντας το πολυγωνικό περίγραμμά της διάταξης αντί ευθείας γραμμής. Το περίγραμμα αυτό αφορά την πλευρά της διάταξης η οποία δεν θεωρείται σταθερή αλλά καθορίζεται από το ακρότατο σημείο του τελευταίου αντικείμενου που στοιβάζεται (βλ. Σχήμα 6-43 β). Το δεύτερο μέτρο στην ουσία αξιολογεί τον χώρο που καταλαμβάνει η διάταξη σε σχέση με το χώρο που δεν είναι διαθέσιμος προς περαιτέρω αξιοποίηση.



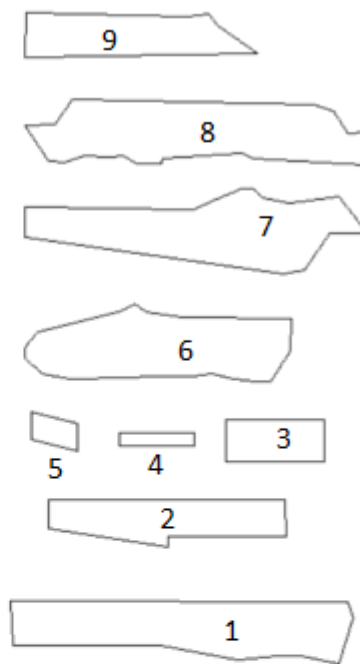
Σχήμα 6-43 Σχηματική αναπαράσταση μέτρων αξιολόγησης διάταξης στοιβαγμού.

Το πρώτο πρόβλημα (πρόβλημα αναφοράς Albano[153]) αφορά μη κυρτά αντικείμενα τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-44 και προέρχονται από τον χώρο της βιομηχανίας ενδυμάτων. Τα αντικείμενα προς στοιβαγμό του προβλήματος ανέρχονται σε 24. Συγκεκριμένα, τα αντικείμενα με αριθμό 1, 2, 7, 8 επαναλαμβάνονται 2 φορές, ενώ τα αντικείμενα με αριθμό 3, 4, 5 και 6 επαναλαμβάνονται 4 φορές (βλ. Σχήμα 6-44). Ομοίως το δεύτερο πρόβλημα (πρόβλημα αναφοράς Mao [149]) αφορά επίσης σε 20 μη κυρτά αντικείμενα τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-44 και προέρχονται από το χώρο της βιομηχανίας ενδυμάτων. Όλα τα αντικείμενα επαναλαμβάνονται δυο φορές εκτός από το αντικείμενο με αριθμό 4 το οποίο επαναλαμβάνεται τέσσερις φορές. Τέλος, το τρίτο πρόβλημα αναφοράς (πρόβλημα αναφοράς Blazewicz [154]) αφορά 4 τεχνητά δημιουργημένα μη-κυρτά αντικείμενα τα οποία επαναλαμβάνονται όλα πέντε φορές. Τα αντικείμενα επιτρέπεται να περιστραφούν μόνο με γωνίες της τάξης των 90° σε σχέση με τον αρχικό τους προσανατολισμό, γεγονός το οποίο καθιστά απαγορευτική την χρησιμοποίηση της

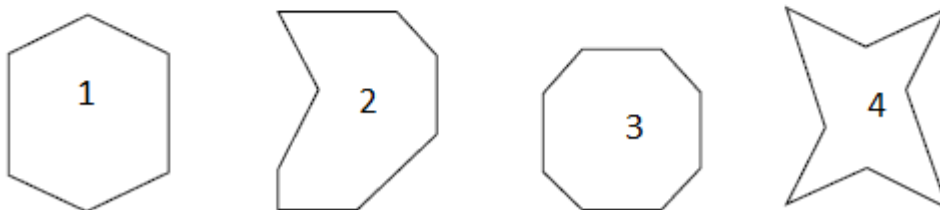
διαδικασίας η οποία προσανατολίζει τα αντικείμενα προς στοιβαγμό κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εμφανίζουν το ελάχιστο ορθογώνιο αποτύπωμα ως προς το χώρο στοιβαγμού. Έτσι δεν υπολογίζεται το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ελάχιστου εμβαδού αφού ο αρχικός προσανατολισμός θεωρείται δεδομένος και επιτρέπονται μόνο περιστροφές σε σχέση με αυτόν. Επίσης, επειδή όλα τα προβλήματα αναφοράς στοιβαγμού θεωρούνται ανοικτά (δηλ. διαθέτουν άπειρο μήκος) ως προς τη μια διάσταση του χώρου στοιβαγμού, το μέγεθος της πλατφόρμας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των δοκιμών αντιστοιχεί στο πλησιέστερο δυνατόν στις διαστάσεις της βέλτιστης διάταξης που απαντάται στην βιβλιογραφία, το οποίο τουλάχιστον για μια μέθοδο στοιβαγμού καταφέρνει να στοιβάξει όλα τα αντικείμενα. Τέλος, κάθε δοκιμή επαναλαμβάνεται δέκα φορές και παρουσιάζονται τα καλύτερα αποτελέσματα.



Πρόβλημα Αναφοράς Albano



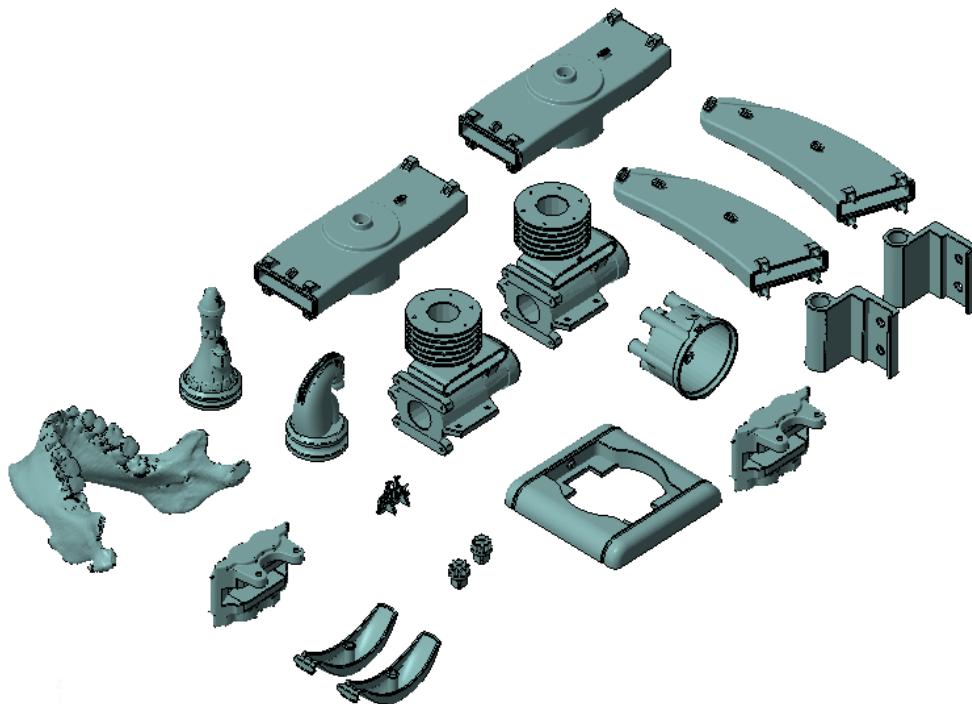
Πρόβλημα Αναφοράς Mao



Πρόβλημα Αναφοράς Blazewicz

Σχήμα 6-44 Σχηματική απεικόνιση αντικειμένων προβλημάτων αναφοράς.

Το δεύτερο πρόβλημα αφορά στη βελτιστοποίηση της διάταξης στοιβαγμού 20 «πραγματικών» αντικειμένων πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής μιας μηχανής Στερεολιθογραφίας διαστάσεων 250x250 mm. Τα αντικείμενα αυτά περιλαμβάνουν το μοντέλο μιας ανθρώπινης κάτω γνάθου, δυο μοντέλα μονοκύλινδρου κινητήρα, τέσσερα εξαρτήματα φτερωτής πλυντηρίου πιάτων, δυο πόνια σκακιού, ένα καπάκι από διανομέα ρεύματος αυτοκινήτου, δυο γρανάζια, μια πρόσοψη από διακόπτη ρεύματος, δυο αρμούς θύρας και τέσσερα μηχανολογικά εξαρτήματα σχετικά πολύπλοκης γεωμετρίας. Όλα τα αντικείμενα έχουν κατασκευαστεί κατά καιρούς με την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας στο Εργαστήριο Σύγχρονων Τεχνολογιών Παραγωγής και Έλεγχου του Πανεπιστημίου Πειραιώς και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-45 .



Σχήμα 6-45 Σχηματική απεικόνιση αντικείμενων προς στοιβαγμό πραγματικού προβλήματος.

Στον Πίνακα 6-2 παρουσιάζεται το ποσοστό εκμετάλλευσης της πλατφόρμας που επετεύχθη από τις εναλλακτικές μεθόδους στοιβαγμού για τα τέσσερα εξεταζόμενα προβλήματα (χρησιμοποιώντας το μέτρο αξιολόγησης D_1), καθώς και ο αριθμός των αντικείμενων που στοιβάχθηκαν σε σχέση με το σύνολο τους. Επιπλέον, για τα προβλήματα αναφοράς παρουσιάζονται και οι δυο καλύτερες λύσεις που απαντώνται στη βιβλιογραφία. Στον Πίνακα 6-3 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος που απαιτείται από κάθε διαφορετική μεθοδολογία στοιβαγμού προκειμένου να δημιουργήσει από την ακολουθία στοιβαγμού την αντίστοιχη φυσική διάταξη (time per nest). Ο συνολικός μέσος χρόνος που απαιτείται προκειμένου να ολοκληρωθεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης ανά μεθοδολογία παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-4. Στα Σχήματα 6-46 έως 6-57 παρουσιάζονται οι προκύπτουσες διατάξεις στοιβαγμού τόσο για τα προβλήματα

αναφοράς όσο και για το πρόβλημα στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων. Στο Παράρτημα Π1 παρουσιάζονται επίσης τα αντίστοιχα διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μέση τιμή καταλληλότητας και την καλύτερη λύση ανά γενεά εξέλιξης για τον ΓΑ καθώς και την τιμή καταλληλότητας της επιλεχθείσας λύσης ανά θερμοκρασία και τη μέση τιμή καταλληλότητας ανά θερμοκρασία για την ΠΑ .

	Γνωστές Βέλτιστες Λύσεις	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	LBDB & TBA	LBDB & NFP	NFP
Μέτρο Αξιολόγησης	D1		D1 Αρ. Στοιβαχθέντων /Σύνολο Αντικειμένων		
Πρόβλημα αναφοράς Albano	87,8% [173]	ΓΑ	82,21% (24/24)	82,21% (24/24)	71,64% (22/24)
	86,4% [173]	ΠΑ	82,21% (24/24)	82,21% (24/24)	71,4% (23/24)
Πρόβλημα αναφοράς Blazewicz	68,06% [168]	ΓΑ	71,4% (20/20)	71,4% (20/20)	71,4% (20/20)
	75,9% [169]	ΠΑ	71,4% (20/20)	71,4% (20/20)	71,4% (20/20)
Πρόβλημα αναφοράς Mao	79,9% [173]	ΓΑ	71% (20/20)	71% (20/20)	71% (20/20)
	71,6% [168]	ΠΑ	71% (20/20)	71% (20/20)	71% (20/20)
Πραγματική περίπτωση	-	ΓΑ	78% (19/20)	78% (19/20)	73% (18/20)
	-	ΠΑ	76% (18/20)	74,685 (18/20)	78% (19/20)

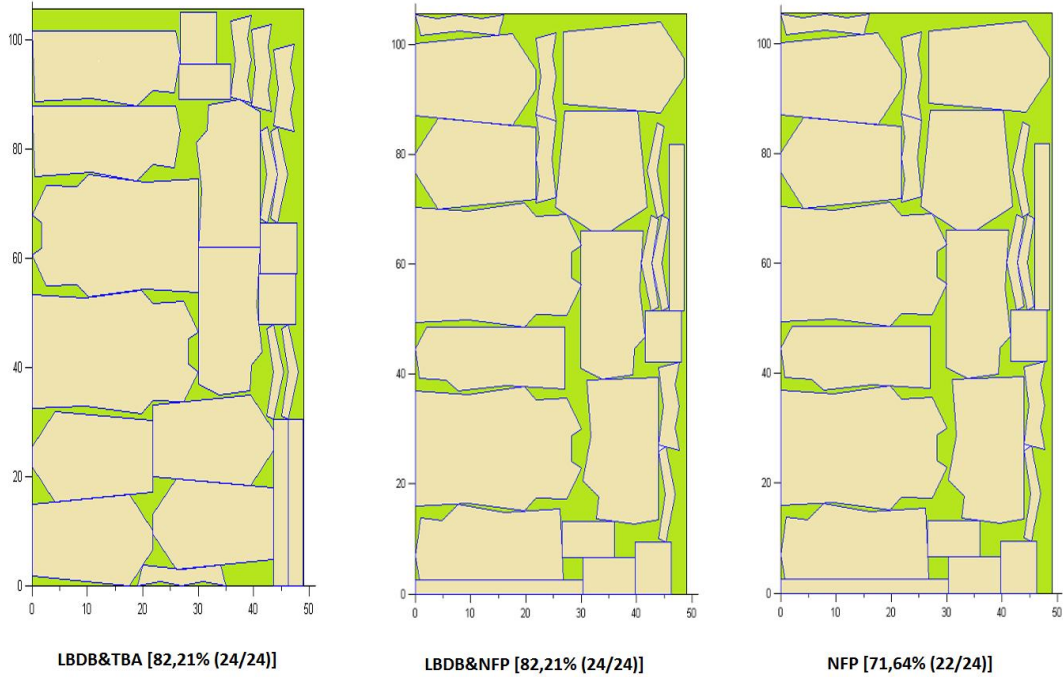
Πίνακας 6-2 Αποτελέσματα δοκιμών.

	LBDB & TBA	LBDB & NFP	NFP
	Μέσος Χρόνος ανά Στοιβαξη		
Πρ. Αναφοράς Albano	1,3 sec	0,6 sec	6 sec
Πρ. Αναφοράς Blazewicz	0,98 sec	0,4 sec	5,23 sec
Πρ. Αναφοράς Mao	1,18 sec	0,39 sec	7,7 sec
Πραγματική περίπτωση	1,95 sec	0,4 sec	16 sec

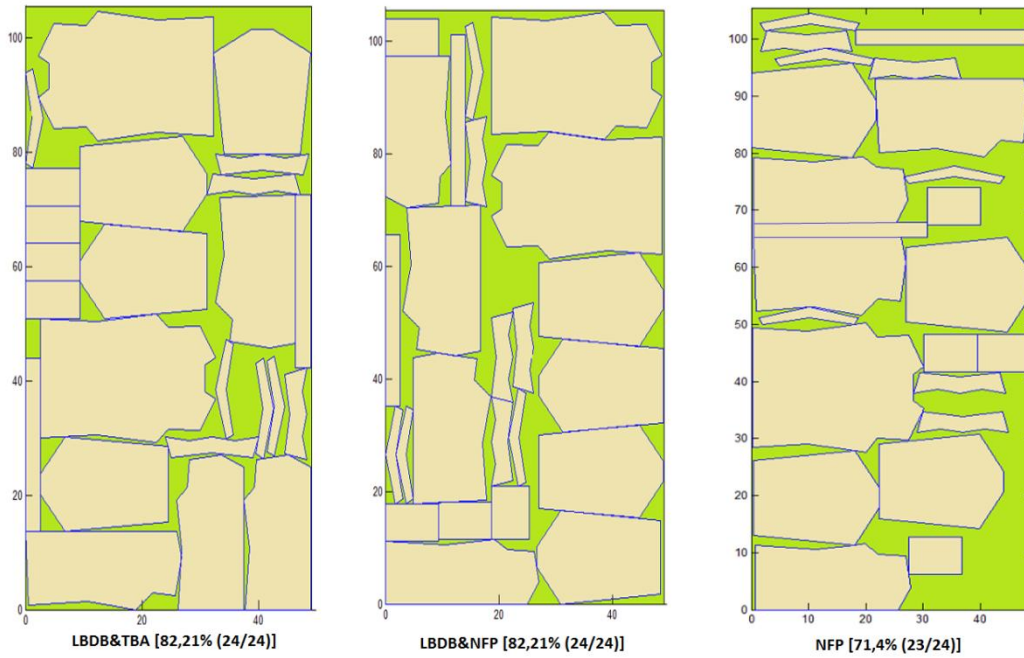
Πίνακας 6-3 Μέσος χρόνος δημιουργίας φυσικής διάταξης στοιβαγμού.

	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	LBDB & TBA	LBDB & NFP	NFP
		Μέσος Χρόνος Ολοκλήρωσης Διαδικασίας Βελτιστοποίησης		
Πρόβλημα αναφοράς Albano	ΓΑ	11.554,4 sec	5.760 sec	19.017 sec
	ΠΑ	8.098,76 sec	1.461,40 sec	16.437,87 sec
Πρόβλημα αναφοράς Blazewicz	ΓΑ	2.652 sec	1.372 sec	5.230 sec
	ΠΑ	5.365.08 sec	1.579 sec	7.346.03 sec
Πρόβλημα αναφοράς Mao	ΓΑ	3.115.2 sec	928 sec	19.455 sec
	ΠΑ	7.667,49 sec	2.667,36 sec	25.310 sec
Πραγματική περίπτωση	ΓΑ	15.492,6 sec	2.600 sec	22.313 sec
	ΠΑ	12.897,6 sec	2.900,44 sec	58.580,76 sec

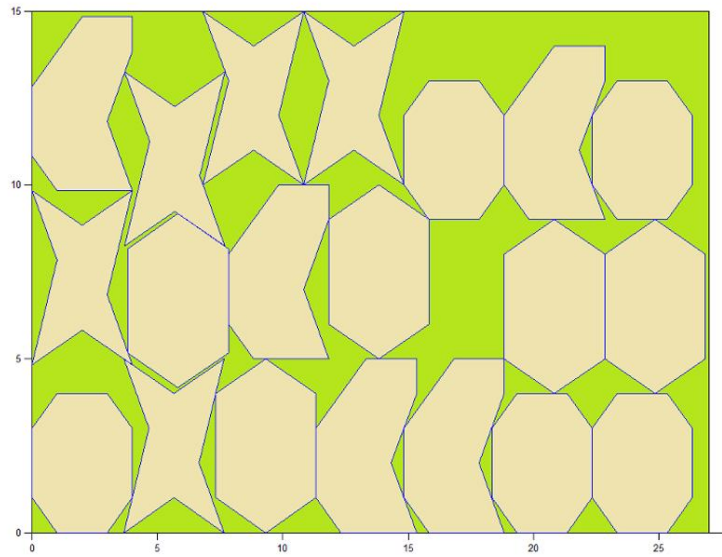
Πίνακας 6-4 Μέσος χρόνος ολοκλήρωσης διαδικασίας βελτιστοποίησης.



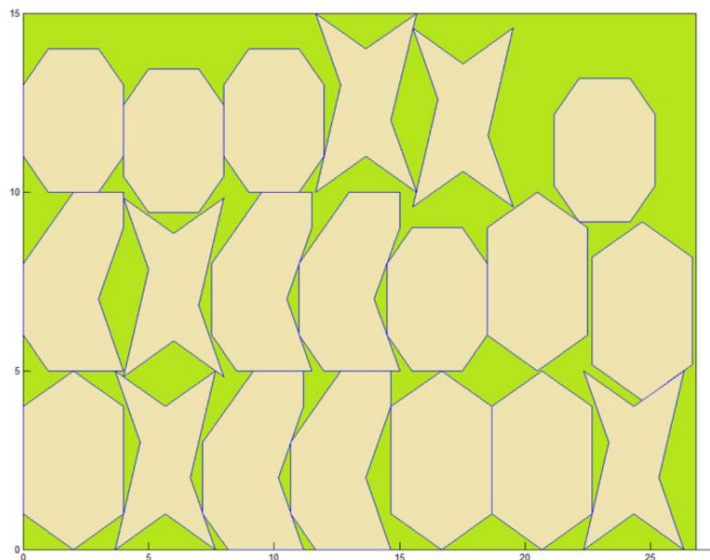
Σχήμα 6-46 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΓΑ για το πρόβλημα αναφοράς Albano.



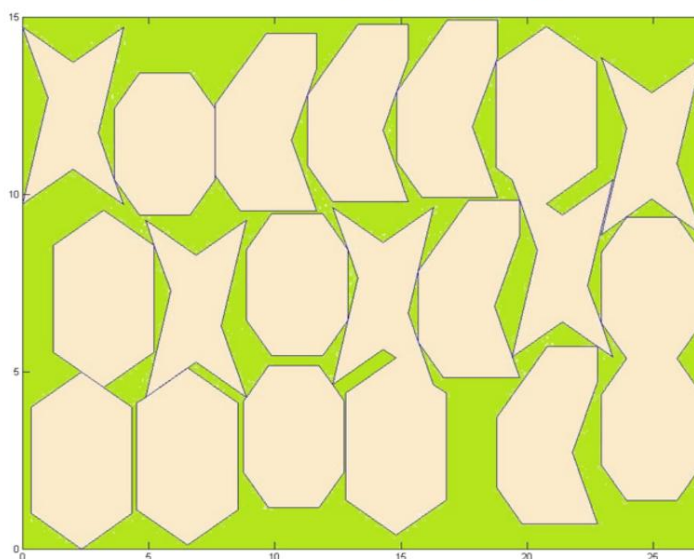
Σχήμα 6-47 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΠΑ για το πρόβλημα αναφοράς Albano.



LBDB&TBA [71,4% (20/20)]

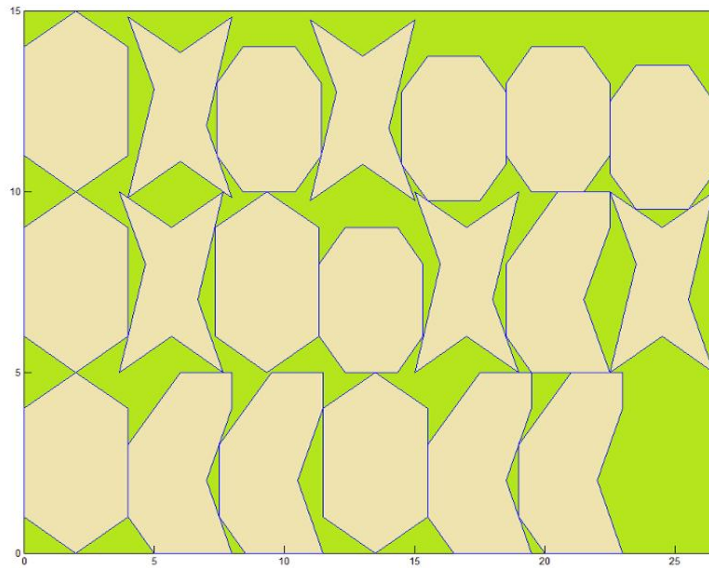


LBDB&NFP [71,4% (20/20)]

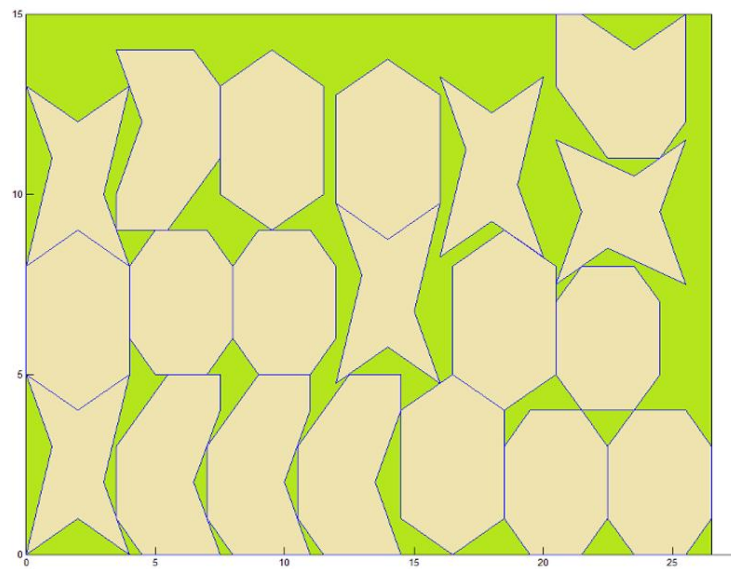


NFP [71,4% (20/20)]

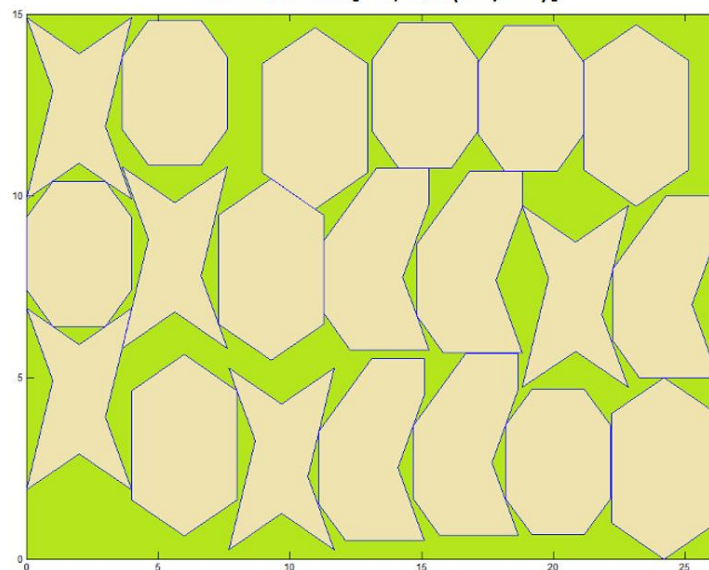
Σχήμα 6-48 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΓΑ για το πρόβλημα αναφοράς Blazewicz.



LBDB&TBA [71,4% (20/20)]

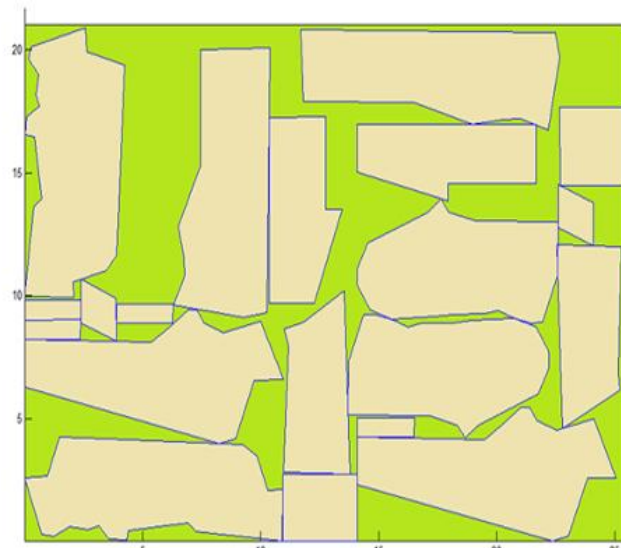


LBDB&NFP [71,4% (20/20)]

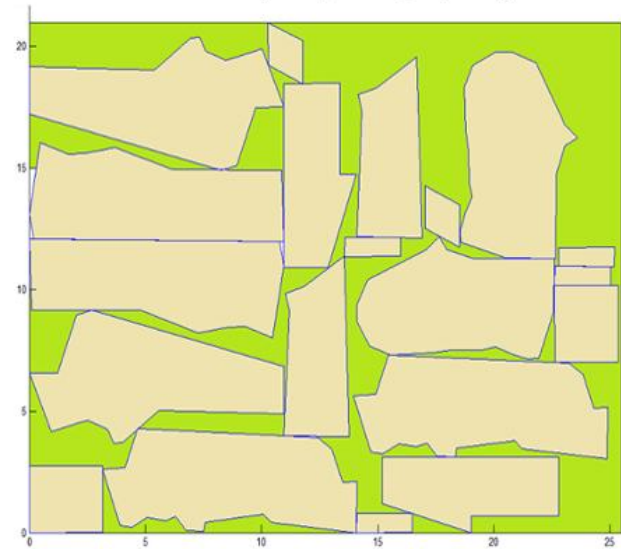


NFP [71,4% (20/20)]

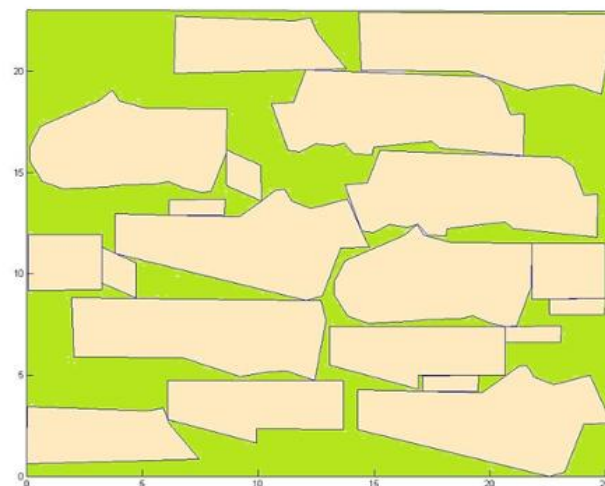
Σχήμα 6-49 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΠΑ για το πρόβλημα αναφοράς Blazewicz.



LBDB&TBA [71% (20/20)]

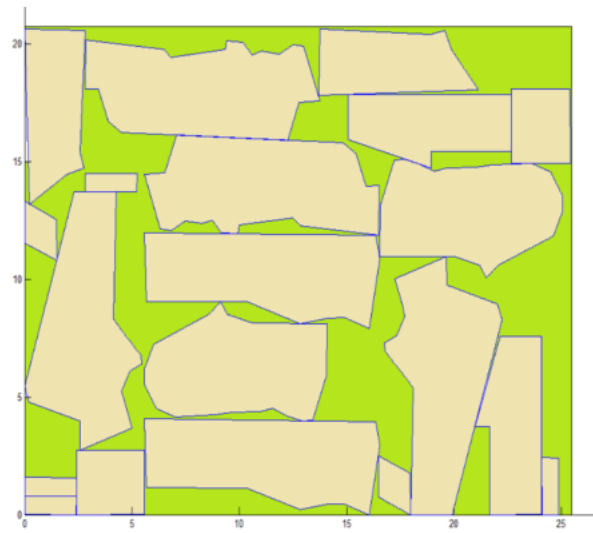


LBDB&NFP [71% (20/20)]

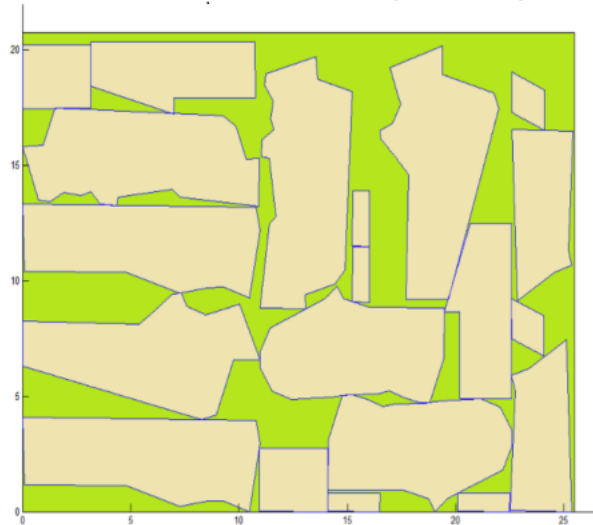


NFP [71% (20/20)]

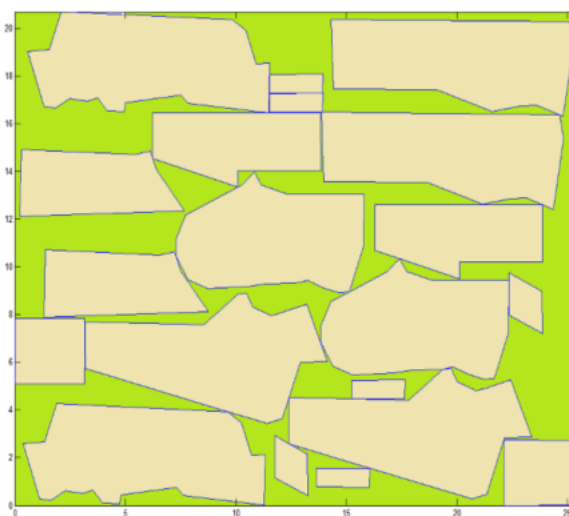
Σχήμα 6-50 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΓΑ για το πρόβλημα αναφοράς Μας.



LBDB&TBA [71% (20/20)]



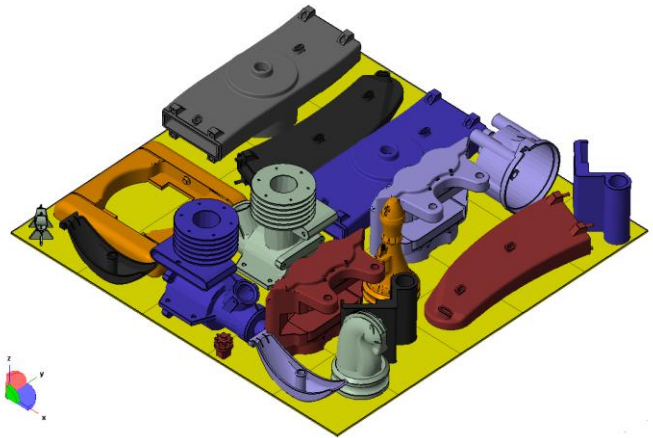
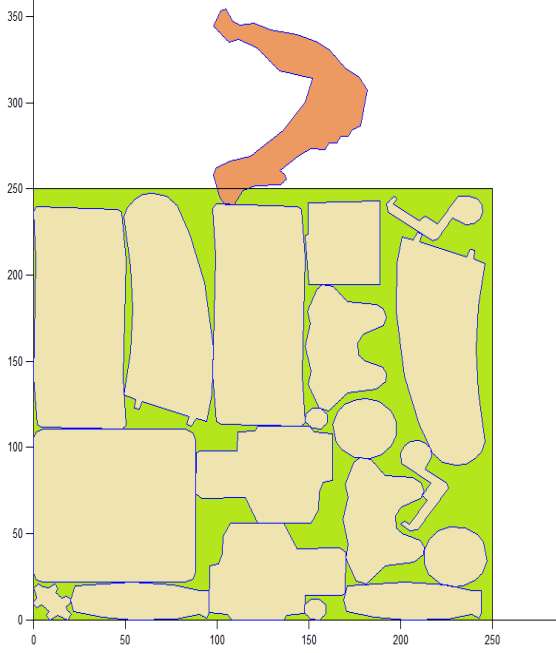
LBDB&NFP [71% (20/20)]



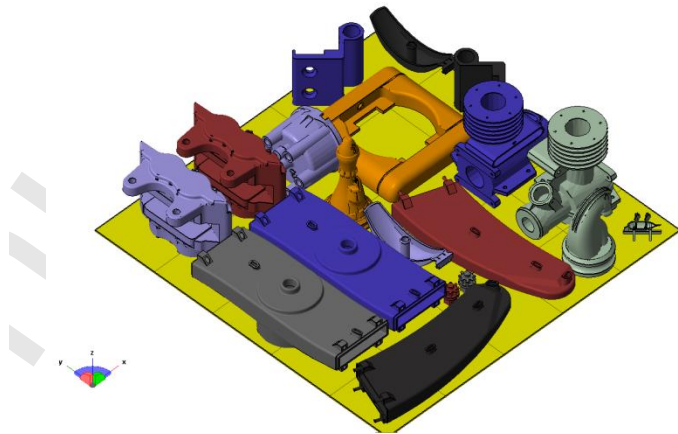
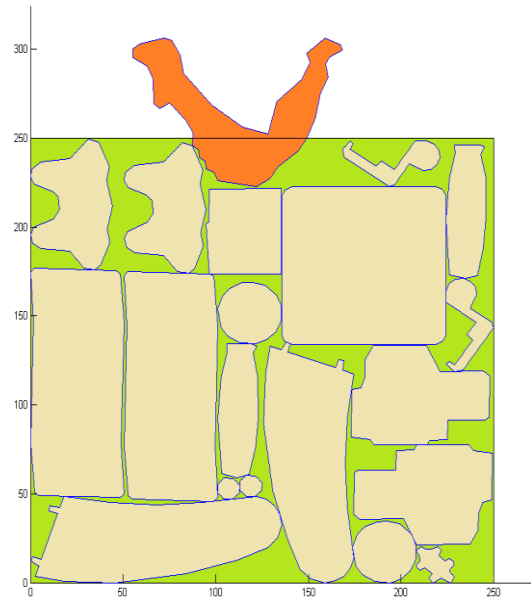
NFP [71% (20/20)]

Σχήμα 6-51 Σχηματική απεικόνιση διατάξεων στοιβαγμού με χρήση ΠΑ για το πρόβλημα αναφοράς Mao.

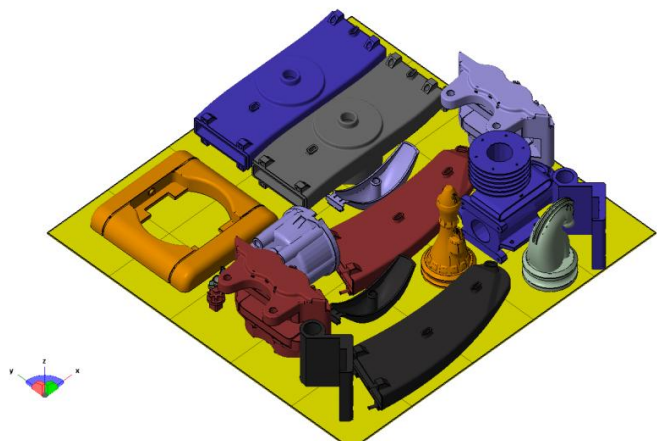
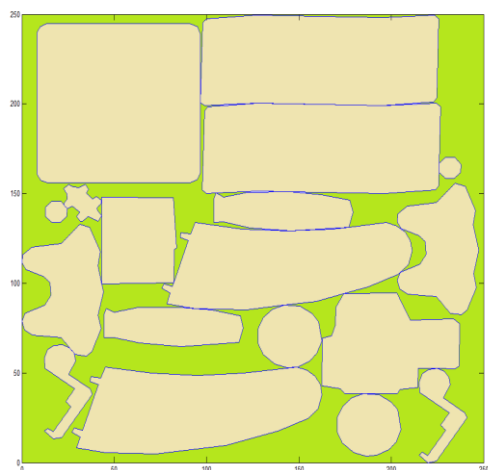
Βελτιστοποίηση Παρτίδας Παραγωγής



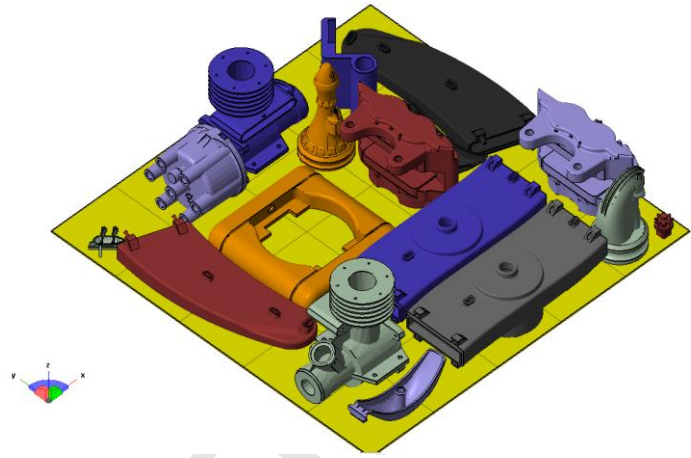
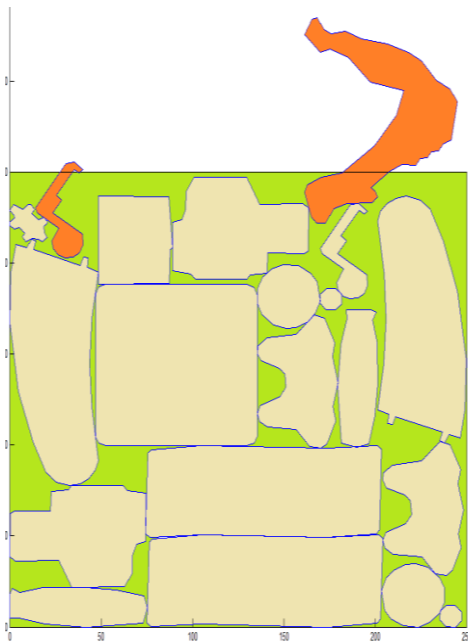
Σχήμα 6-52 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΓΑ και LBDB&TBA.



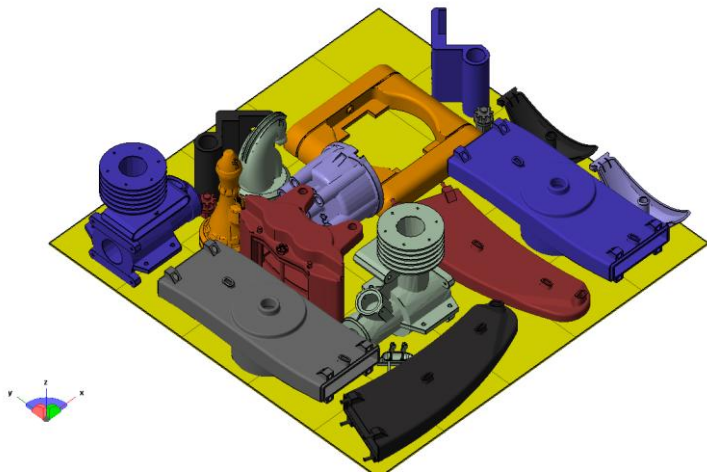
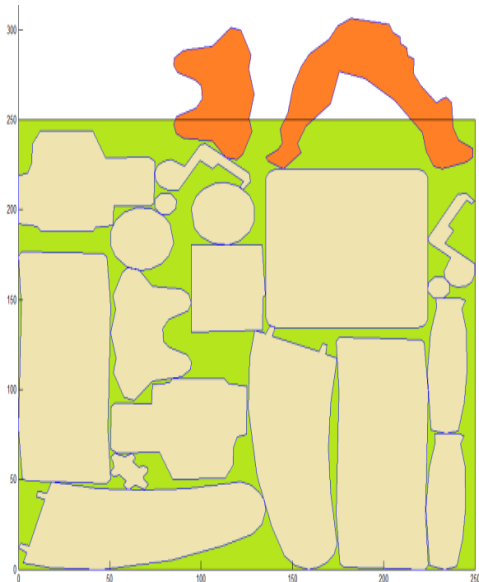
Σχήμα 6-53 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΓΑ και LBDB&NFP.



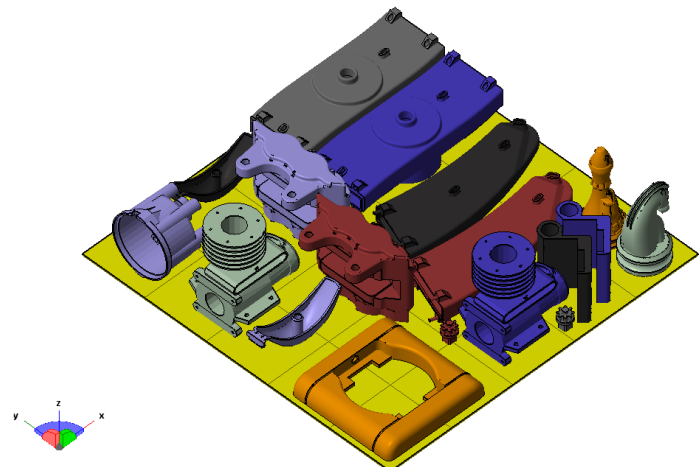
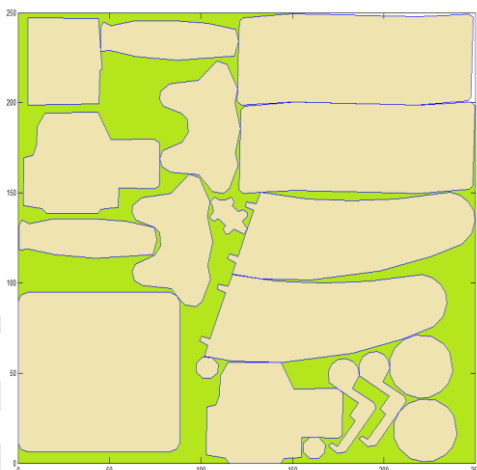
Σχήμα 6-54 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΓΑ και NFP.



Σχήμα 6-55 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοίβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΠΑ και LBDB&TBA.



Σχήμα 6-56 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοίβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΓΑ και LBDB&NFP.



Σχήμα 6-57 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοίβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων με χρήση ΠΑ και NFP.

Παρατηρώντας τις διατάξεις στοιβαγμού που προέκυψαν για τα προβλήματα αναφοράς καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου γίνεται αντιληπτό ότι και οι τρεις μεθοδολογίες στοιβαγμού (LBDB&T.B.A., LBDB&NFP, NFP) οδήγησαν σε διατάξεις οι οποίες βρίσκονται κοντά στα καλύτερα αποτελέσματα τα οποία απαντώνται στην βιβλιογραφία. Παρατηρείται επίσης ότι στα προβλήματα αναφοράς οι μέθοδοι στοιβαγμού κατέληξαν σε αντίστοιχα αποτελέσματα ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με τον οποίο συνδυάστηκαν. Η μοναδική απόκλιση που παρουσιάστηκε αφορά στο πρόβλημα αναφοράς Albano στο οποίο η μέθοδος που αξιοποιεί αποκλειστικά τη μέθοδο NFP όχι μόνο μειονεκτεί περίπου 15% από την έως τώρα βέλτιστη λύση του προβλήματος, αλλά και υπολογιστικά χρειάστηκε τον περισσότερο χρόνο για να συγκλίνει σε μια τελική λύση. Επιπλέον με τη συγκεκριμένη μέθοδο δεν επετεύχθη ο στοιβαγμός όλων των αντικειμένων στο διαθέσιμο χώρο, όπως συνέβη με τις δυο άλλες μεθόδους, καθώς όταν συνδυάστηκε με τον ΓΑ κατάφερε να στοιβάξει 22 αντικείμενα ενώ όταν συνδυάστηκε με την ΠΑ κατάφερε να στοιβάξει 23 αντικείμενα, σε σύνολο 24. Μελετώντας τους μέσους χρόνους ολοκλήρωσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης (βλ. Πίνακα 6-4) παρατηρείται ότι η μέθοδος της ΠΑ για το πρόβλημα αναφοράς Albano οδήγησε στα συγκεκριμένα αποτελέσματα σε συντομότερο κατά μέσο ορό χρόνο. Αντίθετα για τα άλλα δύο προβλήματα αναφοράς η χρήση ΓΑ φαίνεται να οδηγεί σε ταχύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ΠΑ.

Όσον αφορά στην ταχύτητα μετατροπής μιας ακολουθίας στοιβαγμού στην αντίστοιχη φυσική διάταξη για τα προβλήματα αναφοράς, παρατηρείται ότι ο μέσος χρόνος δημιουργίας μιας φυσικής διάταξης στοιβαγμού, όταν ως κανόνας τοποθέτησης χρησιμοποιείται η μέθοδος LBDB σε συνδυασμό με την τεχνική βολής ακτινών (TBA.), κυμαίνεται μεταξύ του 1 με 1,3 sec, ενώ εάν χρησιμοποιηθεί το πολύγωνο No-Fit (NFP) τότε ο μέσος χρόνος μειώνεται πάνω από 50% όντας στα 0,4 με 0,6 sec. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιηθεί ως κανόνας τοποθέτησης αποκλειστικά το πολύγωνο NFP με βήμα ολίσθησης 0,1 ο μέσος χρόνος δημιουργίας μίας διάταξης ανέρχεται στα 5 με 8 sec.

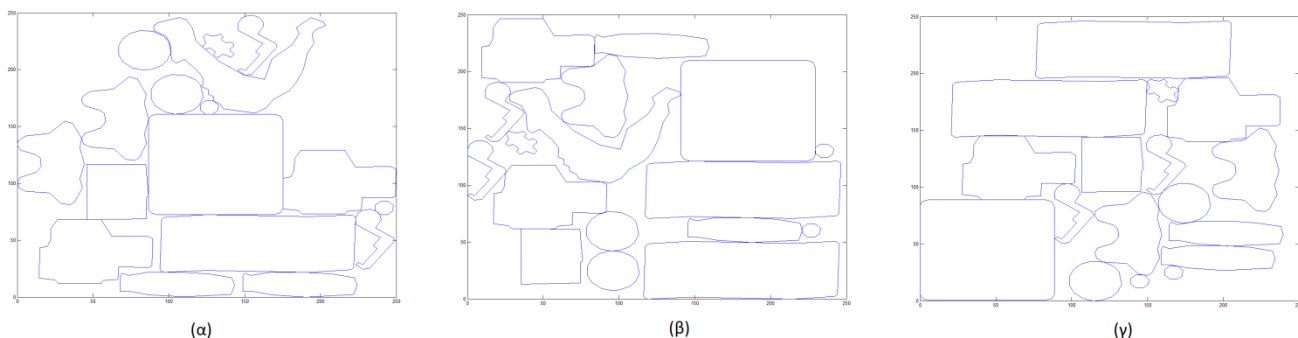
Παρατηρώντας στη συνέχεια τις διατάξεις στοιβαγμού που προέκυψαν για το πρόβλημα στοιβαγμού «πραγματικών» αντικείμενων στην πλατφόρμα μιας μηχανής ΣΚ, καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου γίνεται αντιληπτό ότι οι μεθοδολογίες στοιβαγμού LBDB, σε συνδυασμό είτε με την τεχνική βολής ακτινών είτε με χρήση του πολύγωνου No-Fit, αποδίδουν αποτελεσματικότερα σε σχέση με τη μεθοδολογία στοιβαγμού που χρησιμοποιεί αποκλειστικά το πολύγωνο No-Fit, τόσο σε όρους χρόνου όσο και σε όρους ποιότητας της λύσης. Ειδικότερα παρατηρείται ότι ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας της βελτιστοποίησης για την μεθοδολογία LBDB όταν συνδυάζεται με τη χρήση του No-Fit πολυγώνου είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με οποιαδήποτε άλλο συνδυασμό (Πίνακας 6-4). Χρησιμοποιώντας

τη συγκεκριμένη μεθοδολογίας απαιτούνται κατά μέσο όρο 2.600 sec όταν συνδυάζεται με ΓΑ και 2.900,4 sec όταν συνδυάζεται με ΠΑ, χρόνοι οι οποίοι είναι σημαντικά μικρότεροι από ότι με τις άλλες μεθοδολογίες.

Εξετάζοντας επιπλέον τον Πίνακα 6-3 προκύπτει ότι η μέθοδος που συνδυάζει το No-Fit πολύγωνο και την LBDB είναι ανεξάρτητη από την γεωμετρική πολυπλοκότητα των προς στοιβαγμό αντικείμενων (δηλ. προβολών), σε αντίθεση με ό,τι παρατηρείται για τον συνδυασμό της LBDB με την τεχνική βολής ακτινών. Συγκεκριμένα, ενώ ο μέσος χρόνος δημιουργίας της φυσικής διάταξης στοιβαγμού για το πρόβλημα αναφοράς Albano με χρησιμοποίηση του συνδυασμού LBDB&NFP ανέρχεται στα 0,6 sec, στο γεωμετρικά πολυπλοκότερο πραγματικό πρόβλημα ο αντίστοιχος μέσος χρόνος είναι μόνο 0,4 sec. Επιπλέον τον ίδιο μέσο χρόνο (δηλ. 0,4 sec) παρουσίασαν και τα δυο υπόλοιπα προβλήματα αναφοράς τα οποία είναι επίσης λιγότερο γεωμετρικά πολύπλοκα σε σχέση με το πραγματικό πρόβλημα. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότατα στο ότι το υπολογιστικό κόστος του αλγόριθμου στοιβαγμού που χρησιμοποιεί τον συνδυασμό LBDB&NFP σχετίζεται κατά κύριο λόγο με τον αριθμό των αντικειμένων, καθώς εκτελούνται ακριβώς δυο βολές ακτινών από κάθε αντικείμενο προς τα ήδη στοιβαγμένα προκειμένου να υπολογιστούν τα πιθανά διανύσματα μετακίνησης. Έτσι, παρατηρείται ότι το πρόβλημα στοιβαγμού λιγότερων αριθμητικά «πραγματικών» αντικειμένων (20 αντικείμενα), καθώς και τα δυο προβλήματα αναφοράς τα οποία επίσης αριθμούν 20 αντικείμενα, απαιτούν λιγότερο κατά μέσο όρο χρόνο για τη δημιουργία της κάθε φυσικής διάταξης στοιβαγμού σε σχέση με το πρόβλημα αναφοράς Albano (24 αντικείμενα), παρά το γεγονός ότι τα πραγματικά αντικείμενα είναι γεωμετρικά πολυπλοκότερα. Αντίθετα, στην περίπτωση του συνδυασμού της τεχνικής LBDB με την τεχνική βολής ακτινών ο μέσος χρόνος δημιουργίας της κάθε φυσικής διάταξης στοιβαγμού εμφανίζεται αυξημένος στην περίπτωση του στοιβαγμού πραγματικών αντικειμένων (1,95 sec) σε σχέση με τον παρατηρούμενο μέσο χρόνο για τα προβλήματα αναφοράς. Η διαφορά αυτή εμφανίζεται πιθανότατα γιατί στη συγκεκριμένη περίπτωση η χρήση του υπολογιστικά ακριβούς μέρους του αλγόριθμου, που είναι η βολή ακτινών, εντατικοποιείται με την αύξηση της γεωμετρικής πολυπλοκότητας των προς στοιβαγμό αντικειμένων.

Εξετάζοντας τον Πίνακα 6-2 ως προς την ποιότητα των λύσεων παρατηρείται ότι κατά την εξέταση του προβλήματος στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων αποδίδει καλύτερα ο ΓΑ, σε αντίθεση με τα προβλήματα αναφοράς όπου η ΠΑ απέδωσε εξίσου ικανοποιητικά. Η μέθοδος που απέδωσε λιγότερα ικανοποιητικά, τόσο από άποψη χρόνου όσο και από άποψη ποιότητας της τελικά προτεινόμενης διάταξης, είναι η μέθοδος που χρησιμοποιεί αποκλειστικά την τεχνική του No-Fit πολυγώνου. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα η απόδοσή της από άποψη ποσοστού αξιοποίησης του

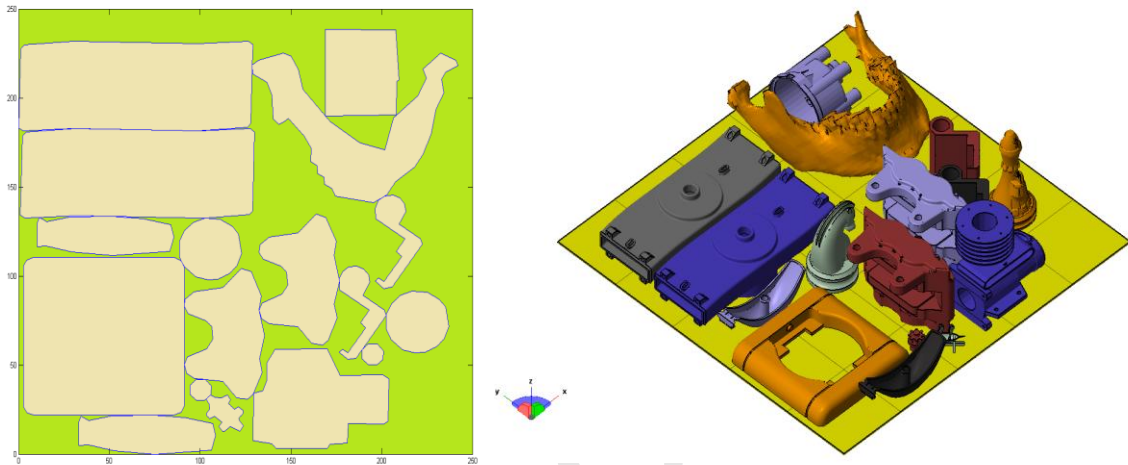
χώρου στην περίπτωση του ΓΑ δεν ήταν εξαιρετικά μακριά από τις υπόλοιπες, καθώς η διαφορά είναι της τάξης του 2%, αλλά αντιστοιχεί στον στοιβαγμό μονό 18 από τα 20 αντικείμενα. Επιπλέον, ο λόγος της ποιότητας προς τον χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι στοιχείο ιδιαίτερα επιβαρυντικό για την συγκεκριμένη μέθοδο. Ένας από τους πιθανούς λόγους για τους οποίους η μέθοδος δεν αποδίδει ικανοποιητικά ως προς τον λόγο ποιότητα των λύσεων προς χρόνο γίνεται αντιληπτός εξετάζοντας στιγμιότυπα των φυσικών διατάξεων στοιβαγμού, τα οποία ελήφθησαν κατά την διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-58. Από τα στιγμιότυπα αυτά καθίσταται εμφανές ότι οι διατάξεις που δημιουργούνται συγκεντρώνουν τα αντικείμενα σχεδόν περιμετρικά του πρώτου προς στοιβαγμό αντικείμενου με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται καλή εκμετάλλευση των γωνιακών περιοχών του διαθέσιμου χώρου. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη, ή καλύτερα χρονοβόρα, την εύρεση μιας ακολουθίας στοιβαγμού η οποία να μπορεί να εκμεταλλευτεί και τους γωνιακούς χώρους. Συγκεκριμένα, η μέθοδος ΠΑ χρειάστηκε 58.580 sec προκειμένου να ανακαλύψει μια τέτοια διάταξη, ενώ ο ΓΑ 22.313 sec. Πιθανώς η συγκεκριμένη μέθοδος να αρμόζει καλύτερα σε μηχανές ΣΚ οι οποίες να διαθέτουν κυκλικές πλατφόρμες κατασκευής.



Σχήμα 6-58 Σχηματική απεικόνιση εναλλακτικών διατάξεων στοιβαγμού.

Εξετάζοντας περαιτέρω τις εκάστοτε βέλτιστες φυσικές διατάξεις στοιβαγμού των αντικειμένων, γίνεται αντιληπτό ότι η προβολή η οποία αντιστοιχεί στο μοντέλο της κάτω γνάθου δεν συμπεριλαμβάνεται ποτέ στις τελικά προτεινόμενες ως βέλτιστες διατάξεις. Η γεωμετρική της πολυπλοκότητα, η σχετικά ευμεγέθης διατομή της καθώς και το δύσκολο αξιοποιήσιμο (μη κυρτό) «άνοιγμα» της, καθιστούν πιθανότατα αναποτελεσματική την γεωμετρική αλληλεπίδρασή της με τα υπόλοιπα αντικείμενα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι διατάξεις που εμπεριέχουν και την κάτω γνάθο να μην παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου με αποτέλεσμα οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, είτε αυτός είναι ο ΓΑ είτε η ΠΑ, να τις απορρίπτουν ή να μην της ανακαλύπτουν εύκολα. Στο Σχήμα 6-59 παρουσιάζεται μια διάταξη η οποία περιέχει την γνάθο όπου και το ποσοστό επικάλυψης ανέρχεται μόνο στο 62,66%, απέχοντας περίπου 12% από

τις προτάσεις των υπόλοιπων μεθοδολογιών. Η ύπαρξη μεγάλων αντικείμενων με σχεδόν ορθογωνική γεωμετρία μαζί με τη γνάθο δημιουργούν παγιδευμένους χώρους οι οποίοι καθιστούν δύσκολη την περαιτέρω εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου. Ωστόσο, όταν συνδυάζεται με πολλά μικρά αντικείμενα, όπως φαίνεται στα στιγμιότυπα τους Σχήματος 6-58, τα οποία διαθέτουν επίσης μη ορθογωνική διατομή, τότε το ποσοστό αξιοποίησης του περιβάλλοντος χώρου αυξάνεται.



Σχήμα 6-59 Σχηματική απεικόνιση διάταξης στοιβαγμού η οποία περιέχει το μοντέλο γνάθου.

Συμπερασματικά, η μέθοδος τοποθέτησης και στοιβαγμού η οποία παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα στον καλύτερο δυνατό χρόνο, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα και σχετική ανεξαρτησία από την γεωμετρική πολυπλοκότητα των υπό στοιβαγμό αντικειμένων, για τα συγκεκριμένα προβλήματα που εξετάστηκαν είναι ο συνδυασμός των τεχνικών LBDB και No-Fit πολυγώνου. Σε ό,τι αφορά τη μέθοδο (αλγόριθμο) βελτιστοποίησης (ΓΑ και ΠΑ), τα αποτελέσματα των μελετών περίπτωσης δεν παρέχουν ξεκάθαρο πλεονέκτημα σε κάποια από τις δύο μεθόδους, καθώς φαίνεται ότι και οι δύο καθοδηγούν με παρόμοια επιτυχία και αποτελεσματικότητα την έρευνα του χώρου λύσης.



Σύνοψη και Μελλοντική Έρευνα

7.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα διατριβής

Τα τελευταία χρόνια μια σχετικά νέα ομάδα κατασκευαστικών τεχνολογιών και μεθόδων παραγωγής έχει έρθει να προστεθεί στις παραδοσιακές μεθόδους κοπής, χύτευσης και διαμόρφωσης. Η Στρωματική Κατασκευή (ΣΚ - Layer Manufacturing) ή εναλλακτικά Προσθετική Κατασκευή/Παραγωγή (Additive Fabrication/Manufacturing) περιγράφει μια οικογένεια εναλλακτικών τεχνολογιών κατασκευής αντικειμένων/κομματιών όπου χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών υλικά όπως φωτοπολυμερή, μέταλλα, θερμοπλαστικά πολυμερή, κεραμικά ή χαρτί σε διάφορες μορφές (υγρή, σε κόκκους, νήματα ή φύλλα), προκειμένου να κατασκευαστεί το αντικείμενο με βάση την αρχή της σταδιακής εναπόθεσης λεπτών στρωμάτων πρώτης ύλης. Η μετάβαση στο στάδιο της ωρίμανσης των τεχνολογιών ΣΚ συνοδεύτηκε και από τη μεταστροφή του πεδίου εφαρμογής των από την κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων για την αξιολόγηση και μελέτη υπό ανάπτυξη προϊόντων (Ταχεία Πρωτοτυποποίηση - Rapid Prototyping) στην παραγωγή προϊόντων. Κατ' αυτόν τον τρόπο το πεδίο εφαρμογής επεκτάθηκε τόσο στην κατασκευή εργαλείων για περιορισμένη παραγωγή, εφαρμογή γνωστή και ως Ταχεία Κατασκευή

Εργαλείων (Rapid Tooling) όσο και στην παραγωγή προϊόντων προοριζόμενων για τον τελικό χρήστη ή καταναλωτή, παρέχοντας την εναλλακτική λύση της αντικατάστασης των συμβατικών μεθόδων παραγωγής στην κατασκευή σχετικά μικρού αριθμού εξειδικευμένων ή εξατομικευμένων προϊόντων, εφαρμογή γνωστή και ως Ταχεία Παραγωγή (Rapid Manufacturing).

Η δυναμική εισαγωγή των τεχνολογιών ΣΚ στην παραγωγική διαδικασία δημιούργησε την ανάγκη μελέτης μιας σειράς θεμάτων που άπτονται του προγραμματισμού της διαδικασίας παραγωγής καθώς και της βελτιστοποίησης των αντίστοιχων διαδικασιών. Στόχο της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η μελέτη και διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων και τεχνικών βελτιστοποίησης για τον προγραμματισμό της τεχνικής της Στερεολιθογραφίας, η οποία αποτελεί σήμερα μία από τις δημοφιλέστερες και πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες ΣΚ, καθώς και η ανάπτυξη κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων για την βελτιστοποίηση των αποφάσεων στα στάδια της επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων και του σχεδιασμού της παρτίδας παραγωγής. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης οι οποίες υιοθετήθηκαν και προσαρμόστηκαν κατάλληλα για την επίλυση των συγκεκριμένων προβλημάτων ανήκουν στην κατηγορία των μετα-ευρετικών (meta-heuristic) τεχνικών βελτιστοποίησης και είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) και η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing).

Η διατριβή χωρίζεται σε τρεις κύριες ενότητες. Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει εκτός από τη λεπτομερή ανάλυση της διαδικασίας παραγωγής ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας και την αναλυτική τεκμηρίωση των κυριότερων κριτηρίων λήψης απόφασης τα αναφορικά με τις κατασκευαστικές παραμέτρους. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία ο κατασκευαστικός προσανατολισμός ενός αντικειμένου καθώς και το πάχος στρώματος με το οποίο θα κατασκευαστεί συνδέονται άμεσα με την ποιότητα των επιφανειών του και το συνολικό κόστος κατασκευής του. Εξετάζοντας τις πηγές κόστους που χρησιμοποιούν οι εταιρείες για την κοστολόγηση της κατασκευής ενός αντικειμένου με Στερεολιθογραφία γίνεται φανερό ότι το κόστος είναι συνάρτηση του χρόνου κατασκευής, του χρόνου προπαρασκευαστικών και μεταπαρασκευαστικών εργασιών καθώς και του κόστους της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης. Για την εκτίμηση του χρόνου κατασκευής ενός αντικειμένου προτείνεται η χρήση των γεωμετρικών δεδομένων τα οποία είναι διαθέσιμα από την πολυεδρική απεικόνισή του (αρχείο STL). Οι κατασκευαστικές παράμετροι που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σχετίζονται επίσης άμεσα με την πιστή αναπαραγωγή των μορφολογικών χαρακτηριστικών του αντικειμένου, την διαστασιολογική ακρίβεια της κατασκευής και την τραχύτητα των επιφανειών του. Για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ κατασκευαστικών παραμέτρων και κατασκευαστικής ποιότητας αναλύονται έξι βασικές πηγές κατασκευαστικών σφαλμάτων και αποκλίσεων στη γεωμετρία και στις διαστάσεις μεταξύ

του τελικά κατασκευαζόμενου αντικείμενου και του αρχικού 3D μοντέλου. Κλείνοντας το πρώτο μέρος επιχειρείται μια αναλυτική τεκμηρίωση των συστατικών μερών δύο εκ των κυριοτέρων μεταερευνητικών τεχνικών βελτιστοποίησης, οι οποίες αποτέλεσαν τον κορμό των υπολογιστικών εργαλείων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Οι δύο αυτές τεχνικές είναι ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm), ο οποίος βασίζεται στις αρχές της βιολογικής εξέλιξης των ειδών, και η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing), η οποία είναι το ψηφιακό/υπολογιστικό ανάλογο της φυσικής διαδικασίας της ανόπτησης στερεών σωμάτων κρυσταλλικής δομής

Η δεύτερη ενότητα της διατριβής εστιάζει στην βελτιστοποίηση των αποφάσεων κατά την επιλογή του προσανατολισμού κατασκευής (building orientation) ενός αντικείμενου. Το πρόβλημα επιλογής βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής είναι πολυκριτηριακής φύσης και μπορεί να διασπαστεί σε δυο ανεξάρτητες συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα αφορά στον εντοπισμό όλων των παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την καταλληλότητα/βελτιστότητα ενός προσανατολισμού κατασκευής, ενώ η δεύτερη συνιστώσα αφορά στην ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων βελτιστοποίησης οι οποίες καταφέρνουν να απεικονίσουν αξιόπιστα τις κατασκευαστικές προτιμήσεις του χρήστη στον/-ους προτεινόμενο/-ους κατασκευαστικό/-ούς προσανατολισμό/-ούς. Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο για την αξιολόγηση της βελτιστότητας ενός κατασκευαστικού προσανατολισμού εκτιμώνται δυο κρίσιμοι παράγοντες κόστους και ένας παράγοντας που αφορά στην κατασκευαστική απόκλιση. Συγκεκριμένα, οι παράγοντες κόστους περιλαμβάνουν τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής ενός αντικείμενου καθώς και τον χρόνο αφαίρεσης της απαιτούμενης δομής υποστήριξης. Ως βασικοί παράγοντες/πηγές κατασκευαστικών αποκλίσεων αναγνωρίστηκαν το φαινόμενο κλίμακας (stairstepping effect) και η δομής υποστήριξης (support structure). Για την εκτίμηση της έντασης των δυο αυτών παραγόντων κατασκευαστικών αποκλίσεων, στο τελικό αντικείμενο χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης εκτιμώμενης επιφανειακής τραχύτητας R_a .

Μετά τον προσδιορισμό της κατάλληλης πολυκριτηριακής συνάρτησης αξιολόγησης ενός προσανατολισμού κατασκευής διερευνήθηκαν και υλοποιήθηκαν κατάλληλες μεθοδολογίες βελτιστοποίησης. Οι μεθοδολογίες που επιλέχθηκαν είναι ικανές να παρέχουν κατασκευαστικούς προσανατολισμούς οι οποίοι είναι βέλτιστοι κατά Παρέτο (Pareto) λόγω της πολυκριτηριακής φύσης του προβλήματος. Σκοπός της διερεύνησης παραπάνω από μίας μεθοδολογίας βελτιστοποίησης αποτέλεσε η ανάπτυξη εργαλείων που θα παρέχουν ευελιξία στον χρήστη κατά την διαδικασία επιλογής κατασκευαστικού προσανατολισμού. Έτσι, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της Σταθμισμένης Αντικειμενικής Συνάρτησης σε συνδυασμό με Γενετικό Αλγόριθμο επιδιώκεται η

συμμετοχή του χρήστη στην αρχή της διαδικασίας λήψης απόφασης (a priori προσέγγιση). Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση ο χρήστης καλείται να εκφράσει εκ των προτέρων τις κατασκευαστικές του προτιμήσεις σχετικά με την βαρύτητα των επιμέρους κριτηρίων που θα καθορίσουν το βέλτιστο προσανατολισμό. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο NSGA II και δημιουργώντας ένα σύνολο από βέλτιστες κατά Παρέτο λύσεις η συμμετοχή του χρήστη μεταφέρεται μετά το περάς της βελτιστοποίησης (a posteriori προσέγγιση) όπου και καλείται να επιλέξει την τελική λύση ανάμεσα στο σύνολο των προτεινόμενων λύσεων. Και οι δυο προσεγγίσεις υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον ανάπτυξης Matlab και χρησιμοποιήθηκαν για την βελτιστοποίηση ποικίλων αντικειμένων διαφορετικής γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι και οι δύο μέθοδοι λειτουργούν σε ικανοποιητικό βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος της Σταθμισμένης Αντικειμενικής Συνάρτησης παρουσιάζει μία συνεπή με τους στόχους τάση επιλογής προσανατολισμών οι οποίοι ανήκουν στο κυρτό μέρος του μετώπου Παρέτο, ανεξάρτητα από το εκάστοτε διάνυσμα συντελεστών που εκφράζει τις επιθυμίες του χρήστη. Ο αλγόριθμος NSGA II αντίστοιχα, δύναται να παρέχει μια ικανοποιητική προσέγγιση του μετώπου κατά Παρέτο σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο.

Η τρίτη ενότητα της διατριβής επικεντρώνεται στο πρόβλημα της αποτελεσματικής αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου της πλατφόρμας κατασκευής μιας μηχανής ΣΚ μέσω βέλτιστης τοποθέτησης πλήθους αντικειμένων για την δημιουργία μιας παρτίδας παραγωγής. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στην κατηγορία των Προβλημάτων Στοιβαγμού (Packing Problem) καθώς αφορά στην βέλτιστη τοποθέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων αντικείμενων (στοιβαγμό) στην πλατφόρμα κατασκευής υπό το πρίσμα συγκεκριμένων γεωμετρικών και κατασκευαστικών περιορισμών. Βάσει των ιδιαίτερων γνωρισμάτων που διέπουν την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας, το υπό εξέταση πρόβλημα αναγνωρίστηκε ως διδιάστατο πρόβλημα στοιβαγμού κατά το οποίο επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του ποσοστού αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου κατασκευής, μέσω της τοποθέτησης όσο το δυνατόν περισσότερων έντονα ετερογενών και μη-κανονικού σχήματος αντικειμένων εντός της σταθερών διαστάσεων και ορθογωνικής γεωμετρίας πλατφόρμας κατασκευής.

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία επίλυσης το πρόβλημα αναλύεται σε τρία στάδια, τα οποία αντιστοιχούν σε τρία βασικά υποσυστήματα του σχετικού αναπτυχθέντος λογισμικού. Το πρώτο στάδιο αφορά στην ανάγνωση και τροποποίηση των γεωμετρικών δεδομένων τα οποία είναι απαραίτητα. Λόγω των απαιτούμενων δομών υποστήριξης στην κατασκευή με Στερεολιθογραφία θεωρήθηκε ότι τα προς κατασκευή αντικείμενα δεν μπορούν να στοιβαχθούν κατά την κατακόρυφη έννοια (Z - άξονα της μηχανής), δεν είναι δυνατόν δηλαδή να γίνει

κατασκευή ενός αντικειμένου πάνω από άλλα. Έτσι το πρόβλημα στοιβαγμού αντικειμένων για την περίπτωση της Στερεολιθογραφίας μετασχηματίστηκε από τριδιάστατο πρόβλημα στοιβαγμού των αντίστοιχων 3D μοντέλων στον χώρο της μηχανής, σε διδιάστατο πρόβλημα στοιβαγμού των προβολών των αντικειμένων αυτών στο επίπεδο της πλατφόρμας κατασκευής. Ο υπολογισμός της προβολής κάθε αντικειμένου επιτυγχάνεται μέσω της ένωσης (Boolean Union) των διαδοχικών διατομών της αντίστοιχης ιεραρχικής στοίβας, η οποία δημιουργείται με τεμαχισμό του αντίστοιχου πολυεδρικού (STL) μοντέλου και παρέχεται κωδικοποιημένη κατά το πρότυπο CLI. Η υπολογιζόμενη τελική προβολή δύναται να αποτελείται από μεγάλο αριθμό ευθύγραμμων τμημάτων, αναλόγως του βαθμού λεπτομέρειας του μοντέλου STL, με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντική επιβάρυνση του υπολογιστικού φόρτου της διαδικασίας του στοιβαγμού. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο επιτρέπεται η απλοποίηση της τελικής διατομής/προβολής ενός αντικειμένου μέσω της μείωσης των σημείων που χρησιμοποιούνται για την γεωμετρική απεικόνισή της. Η διαδικασία της τροποποίησης/απλοποίησης της διατομής ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αποσκοπεί στην δημιουργία μίας όμοιας διατομής με την αρχική, αντισταθμισμένη ωστόσο κατά μια συγκεκριμένη ανοχή. Ακολουθεί η δεύτερη φάση κατά την οποία επιχειρείται μείωση των απαραίτητων ευθυγράμμων τμημάτων που χρειάζονται για να την περιγράψουν χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο των Douglas–Peucker. Για την περιγραφή και αποθήκευση της τελικής γεωμετρίας της προβολής χρησιμοποιείται το πρότυπο GSI - Geometry Solid Interface, το οποίο αναπτύχθηκε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Κατά το δεύτερο και τρίτο στάδιο μελέτης του προβλήματος στοιβαγμού εξετάσθηκαν τόσο το σύνολο των κανόνων τοποθέτησης οι οποίοι χρησιμοποιούνται προκειμένου να δημιουργούν μια φυσική διάταξη του στοιβαγμού από την αντίστοιχη ακολουθία, όσο και οι προτεινόμενες μετα-ευρετικές τεχνικές βελτιστοποίησης (δηλ. Γενετικοί Αλγόριθμοι και Προσομοιωμένη Ανόπτηση). Ανεπτύχθησαν τρεις διαφορετικοί κανόνες τοποθέτησης οι οποίοι διερευνήθηκαν σε συνδυασμό με τις δύο μετα-ευρετικές τεχνικές βελτιστοποίησης έτσι ώστε να εντοπιστεί ο συγκεκριμένος συνδυασμός κανόνα τοποθέτησης-αλγόριθμου που αποδίδει καλύτερα στο υπό εξέταση πρόβλημα. Οι δυο πρώτοι κανόνες τοποθέτησης χρησιμοποιούν μια διαδικασία στοιβαγμού δύο σταδίων προκειμένου να αποφευχθούν επικαλύψεις μεταξύ των αντικειμένων και να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερος από τον διαθέσιμο ελεύθερο χώρο. Κατά το πρώτο στάδιο της διαδικασίας, το οποίο είναι κοινό και για τις δυο μεθόδους, επιλέγεται δυναμικά η αρχική θέση στοιβαγμού του αντικείμενου, η οποία επιδιώκεται να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχή των αξόνων X και Y της πλατφόρμας κατασκευής (κάτω αριστερή γωνία). Το δεύτερο στάδιο αποσκοπεί στην αύξηση της πυκνότητας του στοιβαγμού μέσω περαιτέρω μετακίνησης του προς στοιβαγμό αντικείμενου όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς τα ήδη στοιβαγμένα αντικείμενα. Η

πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί κατά το δεύτερο αυτό στάδιο την τεχνική της βολής ακτινών (Ray Casting) προκειμένου να υπολογιστεί η μέγιστη απόσταση της περαιτέρω μετακίνησης χωρίς να δημιουργηθούν επικαλύψεις. Αντίστοιχα, η δεύτερη μέθοδος αξιοποιεί την έννοια πολυγώνου No-Fit προκειμένου να υπολογιστεί η μέγιστη δυνατή απόσταση μετακίνησης, ελαχιστοποιώντας έτσι τη χρήση της υπολογιστικά ακριβής τεχνικής της βολής ακτινών. Η μέθοδος η οποία αναπτύχθηκε δύναται να δημιουργήσει μια άκρως ικανοποιητική προσέγγιση του No-Fit πολύγωνα δυο αντικειμένων, ανεξαρτήτως της γεωμετρικής πολυπλοκότητάς τους, γεγονός καίριας σημασίας για την φύση του υφιστάμενου προβλήματος. Η τρίτη μέθοδος στοιβαγμού διαφοροποιείται από τις προηγούμενες ως προς τη δομή καθώς η διάταξη στοιβαγμού επιτελείται σε μια και μόνο φάση χρησιμοποιώντας διαδοχικά το No-Fit πολύγωνο του επόμενου προς στοιβαγμό αντικειμένου και της έως τότε δημιουργηθείσας διάταξης.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση όλων των αναπτυχθέντων συνδυασμών κανόνων τοποθέτησης και μετα-ευρετικών αλγόριθμων βελτιστοποίησης, καθώς και για να ελεγχθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους, πραγματοποιήθηκαν σχετικές δοκιμές για την επίλυση ενός τυπικού προβλήματος αναφοράς και ενός προβλήματος στοιβαγμού «πραγματικών» αντικειμένων, τα οποία έχουν κατά καιρούς και στα πλαίσια διάφορων ερευνητικών προγραμμάτων και εργασιών κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Σύγχρονων Τεχνολογιών Παραγωγής και Έλεγχου του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, η μέθοδος η οποία για τη συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων παρουσιάζει την βέλτιστη πυκνότητα στοιβαγμού στον καλύτερο δυνατό χρόνο είναι η διαδικασία στοιβαγμού δύο σταδίων η οποία αξιοποιεί την έννοια του No-Fit πολυγώνου (LBDB&NFP). Σε ό,τι αφορά την μέθοδο (αλγόριθμο) αναζήτησης και βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα των μελετών περίπτωσης δεν παρέχουν ξεκάθαρο πλεονέκτημα σε κάποια από τις δύο μεθόδους, καθώς φαίνεται ότι και οι δυο καθοδηγούν με παρόμοια επιτυχία και αποτελεσματικότητα την έρευνα του χώρου λύσης.

7.2 Μελλοντική Έρευνα

Στο πλαίσιο μελέτης των προβλημάτων στα οποία εστιάζει η παρούσα διατριβή εντοπίστηκαν περαιτέρω ζητήματα τα οποία παρουσιάζουν πρακτικό και ερευνητικό ενδιαφέρον.

Σε ότι αφορά το πρόβλημα επιλογής κατασκευαστικών παραμέτρων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η διεύρυνση της δυνατότητας αξιολόγησης της ποιότητας των επιφανειών ενός αντικειμένου πέρα της ένδειξης που παρέχεται από το μέγεθος της μέσης παρατηρούμενης τραχύτητας. Συγκεκριμένα, σε πολλές περιπτώσεις κατασκευής αντικείμενων για εξειδικευμένους σκοπούς υπάρχει η ανάγκη να ορίζεται συγκεκριμένη ανοχή ποιότητας για κρίσιμες επιφάνειες του

αντικείμενου Στο πλαίσιο αυτό εκτιμάται ότι θα ήταν ιδιαίτερα ωφέλιμο να προστεθεί στην αναπτυχθείσα μεθοδολογία η δυνατότητα αξιολόγησης συγκεκριμένων ποιοτικών περιορισμών ανά επιφάνεια κατά τη βελτιστοποίηση του κατασκευαστικού προσανατολισμού.

Ιδιαίτερα πρακτικό και ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης μια σειρά θεμάτων τα οποία άπτονται της βέλτιστης τοποθέτησης των αντικειμένων προς κατασκευή στον χώρο κατασκευής μιας μηχανής ΣΚ. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει:

- η προσπάθεια ταυτόχρονης επίλυσης των προβλημάτων επιλογής κατασκευαστικού προσανατολισμού και διάταξης στοιβαγμού. Η ταυτόχρονη αυτή προσέγγιση είναι δυνατή μέσω της χρησιμοποίησης των βέλτιστων κατά Παρέτο, εναλλακτικών προσανατολισμών για κάθε αντικείμενο στη διαδικασία στοιβαγμού αντί ενός σταθερού προσανατολισμού.
- η μελέτη του προβλήματος τριδιάστατου στοιβαγμού των προς κατασκευή αντικειμένων με ταυτόχρονη αξιολόγηση της εφικτότητας στοιβαγμού πολλαπλών αντικειμένων κατά την έννοια του άξονα κατασκευής, της εκτιμώμενης κατασκευαστικής ποιότητας, του χρόνου παραγωγής και της αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου.
- η ανάπτυξη εύρωστων και ταχέων μεθόδων υπολογισμού του No-Fit πολυγώνου, οι οποίες θα είναι ανεξάρτητες από τη γεωμετρική πολυπλοκότητα των πολυγώνων.

Βιβλιογραφία

- [1] Detlef Kochan, Chua Chee Kai, Du Zhaohui (1999), Rapid Prototyping Issues in The 21st Century, Computers in Industry, Vol. 39, pp. 3-10.
- [2] Hon K. K. B. (2007), Digital Additive Manufacturing: From Rapid Prototyping to Rapid Manufacturing, Proceedings of the 35th International MATADOR Conference, pp. 337-340.
- [3] Gideon N. Levy, Ralf Schindel, Kruth J. P. (2003), Rapid Manufacturing And Rapid Tooling With Layer Manufacturing (LM) Technologies State Of The Art And Future Perspectives, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 52, No. 2, pp. 589-609.
- [4] Bertch A., Bernhard P., Vogt Ch., Renaud Ph. (2000), Rapid prototyping of small size objects, Rapid Prototyping Journal, Vol. 16, pp. 259 – 266.
- [5] Masuzawa T. (2000), State of the art of Micromachinig, Annals of the CIRP, pp. 473-488.
- [6] Lee Kun Woo (2006), Principles of CAD/CAM/CAE, Prentice Hall.
- [7] LeGault M. (2009), The rise of Rapid Manufacturing, High Performance Composites, July Issue, pp. 32-37.
- [8] LeGault M. (2008), Rapid Manufacturing, Part I: The Technologies, Composites Technology, August Issue, available online at <http://www.compositesworld.com/articles/rapid-manufacturing-part-i-the-technologies.aspx>.
- [9] Karpatis N., Gyax P. E., Glardon R. (1998), Thermal Behaviour of Parts made by Direct Metal Laser Sintering; Proceedings of the 8th Solid Freeform Fabrication Symposium Austin (USA).
- [10] Khaing M. W., Fuh J. Y. H., Lu L. (2001), Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 11, No. 3, pp.269-272.
- [11] Vinesh Raja, Kiran J. Fernandes (2008), Reverse Engineering: An Industrial Perspective, Springer Series in Advanced Manufacturing, pp. 99-117.
- [12] Wohlers T. (2008), Prototyping and Manufacturing by Additive Fabrication, Composites Technology, August, <http://www.compositesworld.com/columns/prototyping-and-manufacturing-by-additive-fabrication.aspx>.
- [13] Wohlers T. (2001), Wohlers Report 2001: Rapid Prototyping State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Assoc. Inc., Oak Ridge - Colorado.
- [14] Lopez S. M., Wright P. K. (2002), The Role of Rapid Prototyping in The Product Development Process: A Case Study on The Ergonomics Factors of Handheld Video Games, Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 116-125.
- [15] Rosochowski A., Matuszak A. (2000), Rapid Tooling: the state of the art, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 106, pp. 191-198.

- [16] Hilton P. D., Jacobs P. F. (2000), *Rapid Tooling: Technologies and Industrial Applications*, Marcel Dekker, New York.
- [17] Green S. (2007), Siemens, *Application of Rapid Manufacturing for the Production of Custom Hearing Instruments*, TCT2007 RM Conference.
- [18] Hopkinson N. (2006), *Rapid Manufacturing: Benefits to Your Business and the Technologies to Consider*, TCT2006 RM Conference.
- [19] Hopkinson, Gao, McAfee (2005), *Potential for Rapid Manufacture by SLS to assist with design for the environment*, Proceedings from the NASUG, SLSUG joint conference, Tucson, Arizona, April 3-8.
- [20] De Grange (2003), *Paradigm shift from Rapid Prototyping to Direct Manufacturing*, Proceedings from the SLS User Group meeting, Orlando, Florida.
- [21] Hopkinson N., Hague R. M. J., Dickens P. M. (2005), *Rapid Manufacturing and Industrial Revolution for the Digital Age*, John Wiley and Sons Ltd.
- [22] Giannatsis J., Dedoussis V., (2009), *Additive Fabrication Technologies Applied to Medicine and Health Care: A review*, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, Vol. 40, pp.116-127.
- [23] Καλαθάς Ε., Γιαννατσής Ι, Δεδούσης Β. (1996), *Εμπειρίες από τη Χρήση Εξελιγμένων Συστημάτων CAD για την Ανάπτυξη (Σχεδίαση) Προϊόντων*, Πρακτικά Συνεδρίου «Τεχνολογία και Αυτοματισμός», ΤΕΙ Πειραιά.
- [24] Dolenc A. (1993), *Software tools for Rapid Prototyping technologies in manufacturing*, PhD Thesis, Institute of Industrial Automation, Helsinki Univ. of Technology, Finland.
- [25] Peiffer R. (1992), *Stereolithography Accuracy: Influence of photosensitive materials*, Proceedings of the 1st European Conference on Rapid Prototyping, Nottingham–UK.
- [26] Colton J., Blair B. (1999), *Experimental study of post-build cure of Stereolithography polymers for injection molds*, Rapid Prototyping Journal, 5 (2), MCB Univ. Press, pp. 72-81.
- [27] Γιαννατσής Ι., Ε. Καλαθάς, Β. Δεδούσης και Λ. Λάιος (1997), *Στερεολιθογραφία: Δυνατότητες και Τεχνικά Χαρακτηριστικά*, Πρακτικά Α΄ Συνεδρίου Βιομηχανικού Σχεδιασμού, ΤΕΙ Κοζάνης, σελ. 127-129.
- [28] Munguia J. (2008), *Pursuing Successful Rapid Manufacturing: a User’s Best Practices Approach*, Rapid Prototyping Journal, Vol. 14, No. 3, pp. 173-179.
- [29] Giannatsis J., Dedoussis V. (2001), *A study of the build-time estimation problem for Stereolithography systems*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 17, No. 4, pp. 295-304.
- [30] Tata K., Flynn D. (1996), *A procedure to estimate build time for Stereolithography Machine*, Technical Report, Prototype Express, U.S.A.
- [31] Jacobs P. (1992), *Fundamentals of Stereolithography*, Proceedings of the 1st European Conf. on Rapid Prototyping, Nottingham–UK.

- [32] Winmill D. L., Hoopes D. M., Jayanthi S. S (1994), 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.
- [33] Nguyen H., Richter J. , Jacobs P. F. (1992), On Windowpane and Christmas tree: Diagnostic techniques for improved part accuracy, Proceedings of the 1st European Conf. on Rapid Prototyping, Nottingham–UK.
- [34] Chea M. C., Nee C. Y. A., Fuh H. Y. J., Lu L., Choo S. Y. , Miyazawa T. (2000), Characteristics of photopolymeric material used in Rapid Prototypes - Part I: Mechanical properties in the green state, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 67, pp. 41-45.
- [35] Jacobs P. (1996), Stereolithography and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan.
- [36] Karalekas D., Rapti D. (2002), Investigation of the processing dependence of SL solidification residual stresses, Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, No. 4, MCB Univ. Press, pp. 243-247.
- [37] Cheng W., Fuh J. Y. H., Nee A. Y. C., Wong Y. S., Loh H. T. , Miyazawa T. (1995), Multi-objective optimization of part building orientation in Stereolithography, Rapid Prototyping Journal, Vol. 1, No.4, pp. 12-23.
- [38] Reeves P. E., Cobb R. C. (1997), Reducing the Surface Deviation of Stereolithography using In-process Techniques, Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, No. 1, MCB Univ. Press, pp. 20-31.
- [39] Chryssolouris G., Kechagias J. D., Kotselis J. L., Mourtzis D. A. , Zannis S. G. (1999), 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.
- [40] Campbell I. R., Martorelli M., Lee H. S. (2002), Surface Roughness Visualisation for Rapid Prototyping Models, Computer-Aided Design, Vol. 34, pp. 717-725.
- [41] Yew B., Kai C. C. , Zhaohui D.(2000), Study of trapped material in rapid prototyping parts, Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 16, Springer Verlag, pp. 120-130.
- [42] Yew B., Kai C. C., Zhaohui D. (2000), Development of an advisory system for trapped material in Rapid Prototyping parts, Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 16, Springer Verlag, pp. 733-738.
- [43] Alba E., Dorronsoro B. (2008), Cellular Genetic Algorithms, Springer, New York.
- [44] Λυκοθανάσης Σ. (2001), Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.
- [45] Pardalos P.M., Romeijn H.E. (2002), Handbook of global optimization, Vol. 2, Kluwer Academic Publishers.
- [46] Papadimitriou C.H., Steiglitz K. (1998), Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity, Dover Publications.
- [47] Glover F.W., Kochenberger G.A. (2003), Handbook of Metaheuristics, International Series in Operations Research Management Science, Kluwer Academic Publishers.

- [48] Alba E. (2005), *Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms*, Wiley.
- [49] Blum C., Roli A. (2003), *Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison*, *ACM Computing Surveys*, Vol.35, No.3, pp.268–308.
- [50] Bäck T., Fogel D.B., Michalewicz Z. (1997), *Handbook of Evolutionary Computation*, Oxford University Press.
- [51] Lourenco H.R., Martin O., Stützle T. (2002), *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, Norwell.
- [52] Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. (1983), *Optimization by simulated annealing*. *Science*, pp. 671–680.
- [53] Glover F., Laguna M. (1997), *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [54] Mladenovic N., Hansen P. (1997), *Variable neighborhood search*, *Computers & Operations Research*, Vol.24, No.11, pp. 1097–1100.
- [55] Dorigo M., Stützle T. (2004), *Ant Colony Optimization*, The MIT Press.
- [56] Canellidis V., Dedoussis V., Sofianopoulou S. (2005), *Application of Simulated Annealing in Improving the Performance of Stereolithography*, *Virtual Modeling and Rapid Manufacturing - Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, P.J. Bártolo et al., published by Taylor & Francis, pp. 501-507.
- [57] Dréo J., Pétrowski A., Siarry P., Taillard E. (2006), *Metaheuristics for Hard Optimization*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [58] Darwin C. (1859), *On The Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life*, Murray, London.
- [59] Rechenberg I. (1965), *Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem*, Royal Aircraft Establishment Library Translation.
- [60] Beyer H.G. (2001), *The Theory of Evolution Strategies*, Natural Computing Series, Springer.
- [61] Fogel L. J., Owens A. J., Walsh M. J. (1966), *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, Wiley.
- [62] Holland J. H. (1992), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 2nd edition, MIT Press.
- [63] Goldberg D. E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine learning*, Addison-Wesley.
- [64] Michalewicz Z. (1996), *Genetic Algorithms + Data Structures= Evolution Programs*, 3rd revision, Springer Verlag.
- [65] Sivanandam S.N., Deepa S.N. (2008), *Introduction to Genetic Algorithms*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [66] Rothlauf F. (2006), *Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- [67] Reeves C. R., Rowe J. E. (2002), *Genetic Algorithms: Principles and Perspectives: A Guide to GA Theory*, Kluwer Academic Publishers.
- [68] Goldberg D.E. (1985), Optimal initial population size for binary-coded genetic algorithms. TCGA Report 85001, University of Alabama, Tuscaloosa.
- [69] Goldberg D.E. (1989), Sizing populations for serial and parallel genetic algorithms. In J.D.Schaffer (Ed.) (1989), *Proceedings of 3rd International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 70-79.
- [70] Grefenstette J.J. (1986), Optimization of control parameters for genetic algorithms, *IEEE-SMC, SMC-16*, pp. 122-128.
- [71] Schaffer J.D., Caruana R.A., Eshelman L.J., Das R. (1989), A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization, *Proceedings of 3rd International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 51-60.
- [72] Goldberg D.E., Deb K., Clark J.H. (1992), Genetic algorithms, noise, and the sizing of populations, *Complex Systems*, Vol.6, pp. 333-362.
- [73] Back T. (1994), Selective Pressure in Evolutionary Algorithms: A Characterization of Selection Mechanisms. 1st IEEE Conference on Evolutionary Computing, No.1, pp. 57-62.
- [74] Kai Song Goh, Andrew Lim, Brian Rodrigues (2003), Sexual Selection for Genetic Algorithms, *Artificial Intelligence Review*, Vol. 19, pp. 123-152.
- [75] Goldberg D. E., Deb K. (1991), A comparison of selection schemes used in genetic algorithms, *Foundations of Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, pp. 69-93.
- [76] Eiben A. E., van Kemenade C. H. M., Kok J. N. (1995), Orgy in the computer: Multi-parent reproduction in genetic algorithms, *Proceedings of the 3rd European Conference on Artificial Life*, Springer-Verlag, No. 929 in LNAI, pp. 934-945.
- [77] Reeves C. R. (1993), *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, Blackwell scientific publications.
- [78] Metropolis, N., Ulam S., (1949), The Monte Carlo Method, *Journal of the American Statistical Association (American Statistical Association)*, Vol. 44, No.247, pp. 335-341.
- [79] Hermanns H. (2002), *Interactive Markov Chains*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [80] Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T. and Flannery B. P. (1992), *Numerical Recipes in C*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, U. K.
- [81] Aarts E. H. L., Korst J.H.M. (1989), *Simulated Annealing and Boltzmann machines*, Wiley, Chichester.
- [82] Aarts E. H. L., Van Laarhoven P. J. M. (1985), Statistical cooling: A general approach to combinatorial optimization problems, *Philips Journal of Research*, Vol. 40, No. 4, pp. 193-226.
- [83] Dougherty D. E., Marrayott R. A. (1991), Optimal groundwater management: 1. Simulated annealing, *Water Resources Research*, Vol. 27, No.10, pp. 2493-2508.

- [84] Giannatsis J., Dedoussis V. (2007), Decision support tool for selecting fabrication parameters in stereolithography, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, pp. 706–718.
- [85] McClurkin J. E., Rosen D. W. (1998) Computer-aided build style decision support for stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No. 1, pp. 4-13.
- [86] Pham D. T., Dimov S. S., Gault RS (1999) Part orientation in stereolithography, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 9, pp. 674-682.
- [87] Frank D., Fadel G. (1995), Expert System-Based Selection of the Preferred Direction of Build for Rapid Prototyping Processes, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 6, No. 5, pp. 339-345.
- [88] Pandey P. M., Reddy N. V., Dhande S. G. (2007), Part deposition orientation studies in layered manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, pp. 125–131.
- [89] Bablani M., Bagchi A. (1995), Quantification of errors in rapid prototyping processes and determination of preferred orientation of parts. In: *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution/ SME*, pp. 319-323.
- [90] Xu F., Wong S.Y., Loh T.H., Fuh H.Y.J., Miyazawa T. (1997), Optimal orientation with variable slicing in stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 3, pp. 76–88.
- [91] Hur J., Lee K. (1998), The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 247–254.
- [92] Pandey P.M., Thrimurthulu K., Reddy N.V. (2004), Optimal part deposition orientation in FDM by using a multicriteria genetic algorithm, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 19, pp. 4069 -4089.
- [93] Kim H.C., Lee S.H. (2005), Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction optimization, *Computer Aided Design*, Vol. 37, No. 7, pp. 711-725.
- [94] Alexander P., Allen S., Dutta D. (1998), Part orientation and build cost determination in layered manufacturing, *Computer Aided Design*, Vol. 30, pp. 343–356.
- [95] Lan P-T, Chou S-Y, Chen L-L, Gemmill D. (1997), Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus, *Computer Aided Design*, Vol. 29, No. 1, pp. 53–62.
- [96] Hur S. M., Choi K. H., Lee S. H., Chang P. K. (2001), Determination of fabricating orientation and packing in SLS process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.112, pp. 236-243.
- [97] Thrimurthulu K., Pandey P. M., Reddy N. V. (2004), Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, pp. 585–594.
- [98] Byun H. S., Lee K. H. (2006), Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, pp. 307–313.

- [99] Byun H. S., Lee K. H. (2006), Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making, *Robot CIM-Int Manufacturing*, Vol. 22, No. 1, pp. 69-80.
- [100] Majhi J., Janardan R., Smid M., Gupta P. (1999), On some geometric optimization problems in layered manufacturing, *Computational Geometry*, Vol. 12, pp. 219–239.
- [101] Ahn D., Kim H., Lee S. (2007), Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 593–606.
- [102] Masood S. H., Rattanawong W., Iovenitti P. (2000), Part build orientations based on volumetric error in fused deposition modeling, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 162-168.
- [103] Masood S. H., Rattanawong W. (2002), A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, No. 3, pp. 209-216.
- [104] Yew A. B., Kai C. C., Zhaohui D. (2000), Development of an Advisory System for Trapped Material in Rapid Prototyping Parts, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, pp. 733–738.
- [105] Canellidis V., Dedoussis V., Mantzouratos N., Sofianopoulou S. (2006), Pre-processing methodology for optimizing stereolithography apparatus build performance, *Computers Industry*, Vol. 57, No. 5, pp. 424-436.
- [106] Thompson D. C., Crawford R. H. (1995), Optimizing part quality with orientation. In: *Proc of the 6th SFF Symposium*, Austin, Texas, pp. 362-368.
- [107] Jürgen Branke, Kalyanmoy Deb, Kaisa Miettinen, Roman Słowiński (2008), *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [108] Matthias Ehrgott, Xavier Gandibleux (2003), *Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Surveys*, Kluwer Academic Publishers.
- [109] Ajith Abraham, Lakhmi Jain, Robert Goldberg (2005), *Evolutionary Multiobjective Optimization Theoretical Advances and Applications*, Springer-Verlag, London Limited.
- [110] Joshua Knowles, David Corne, Kalyanmoy Deb (Eds.) (2008), *Multiobjective Problem Solving from Nature: From Concepts to Applications*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [111] Hwang C. L., Masud A. S. M.: (1979), *Multiple Objective Decision Making – Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey*, Springer, Berlin.
- [112] Miettinen K. (1999), *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Kluwer Academic Publishers.
- [113] Luis Pérez C. J., Calvet J. V., Sebastián Pérez M. A. (2001), Geometric roughness analysis in solid free-form manufacturing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, pp. 52–57.
- [114] Renner G, Ekart A (2003), Genetic algorithms in computer aided design, *Computer Aided Design*, Vol. 35, pp. 709-726.

- [115] Haupt R. L., Haupt S. E. (2004), Practical genetic algorithms, Wiley.
- [116] Chambers L. (1995), Practical Handbook of Genetic Algorithms – vol I. CRC Press.
- [117] Chambers L. (1995), Practical Handbook of Genetic Algorithms - vol II. CRC Press.
- [118] Radcliff N. J. (1991), Forma analysis and random respectful recombination. In Proc. 4th Int. Conf. on Genetic Algorithms, San Mateo, CA: Morgan Kauffman.
- [119] Wright A. (1991), Genetic algorithms for real parameter optimization. In G. J. E. Rawlins (ed.), Foundations of Genetic Algorithms, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, pp. 205–218.
- [120] Eshelman L. J., Shaffer D. J. (1993), Real-coded genetic algorithms and interval- schemata, In D. L. Whitley (ed.), Foundations of Genetic Algorithms 2, San Mateo, CA: Morgan Kaufman, pp. 187–202.
- [121] Fonseca C. M., Fleming P. J. (1993), Genetic algorithms for multiobjec-tive optimization: Formulation, discussion and generalization, in Pro-ceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms,S. Forrest, Ed. San Mateo, CA: Morgan Kauffman, pp. 416–423.
- [122] Srinivas N., Kalyanmoy Deb (1995), Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms, Evolutionary Computation, Vol. 2, No. 3, pp. 221–248.
- [123] Horn J., Nafploitis N., Goldberg E. (1994), A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization, in Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, Z. Michalewicz, Ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, pp. 82–87.
- [124] Zitzler E., Thiele L. (1998), Multiobjective optimization using evolutionary algorithms: a comparative case study, in Parallel Problem Solving From Nature, Eds. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 292–301.
- [125] Knowles J., Corne D. (1999), The Pareto archived evolution strategy: A new baseline algorithm for multiobjective optimization, in Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, NJ: IEEE Press, pp. 98–105.
- [126] Rudolph G. (1999), Evolutionary search under partially ordered sets,” Dept. Comput. Sci./LS11, Univ. Dortmund, Dortmund, Germany, Tech. Rep. CI-67/99.
- [127] Kalyanmoy Deb. (2002), A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm NSGA-II, IEEE Transactions On Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197.
- [128] Dyckhoff H. (1990), A typology of cutting and packing problems, European Journal of Operational Research, Vol. 44, pp.145–159.
- [129] Wäscher G., Haußner H., Schumann H (2007), An improved typology of cutting and packing problems, European Journal of Operational Research, Vol. 183, pp. 1109–1130.
- [130] Lins L., Lins S., Morabito R. (2002), An n-tet graph approach for non-guillotine packings of n-dimensional boxes into an n-container, European Journal of Operational Research, Vol. 141, pp. 421–439.

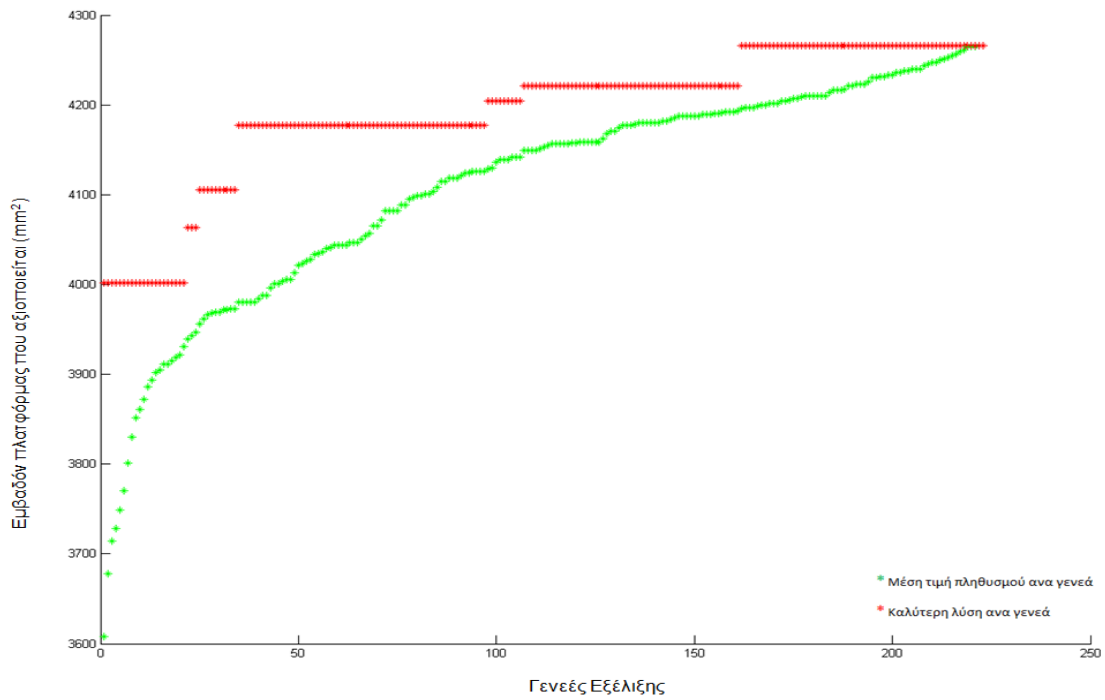
- [131] Birgin E. G., Martinez J. M., Ronconi D.P. (2005), Optimizing the packing of cylinders into a rectangular container: A nonlinear approach, *European Journal of Operational Research*, Vol. 160, pp. 19–33.
- [132] Stoyan Y. G., Patsuk V. N. (2000), A method of optimal lattice packing of congruent oriented polygons in the plane, *European Journal of Operational Research*, Vol. 124, pp. 204–216.
- [133] Fowler R. J., Paterson M. S., Tatimoto S. L. (1981), Optimal packing and covering in the plane are NP-complete, *Information Processing Letters*, Vol. 12, pp. 133-137.
- [134] Haims M. J. (1966), On the Optimum Two-Dimensional Allocation Problem, Ph.D Thesis, Department of Electrical Engineering, New York University.
- [135] Haims M. J., Freeman H. (1970), A multistage solution of the template layout problem, *IEEE Transactions on Systems, Science and Cybernetics*, Vol. 6, pp. 145-151.
- [136] Qu W., Sanders J. L. (1987), A nesting algorithm for irregular parts and factors affecting trim losses, *International Journal of Operations Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 381-397.
- [137] Jakobs S. (1996), On genetic algorithms for the packing of polygons, *European Journal of Operational Research*, Vol. 88, No. 1, pp. 165-181.
- [138] Baker B. S., Coffman E. G., Rivest R. L. (1980), Orthogonal packings in two dimensions, *SIAM Journal of Computing*, Vol. 9, No. 4, pp. 846-855.
- [139] Dori D., Ben-Bassatt M., 1984, Efficient Nesting of Congruent Convex Figures, *Communications of the ACM*, Vol. 27, pp. 228-235.
- [140] Dighe R., Jakiela M.J. (1996), Solving Pattern Nesting Problems with Genetics Algorithms Employing Task Decomposition and Contact Detection, *Evolutionary Computation*, Vol. 3, pp. 239-266.
- [141] Smith D. (1985), Bin Packing with adaptive search, *Proceeding of the First International Conference on Genetic Algorithms and Applications*, Lawrence Erlbaum Associates ,Hillsdale, New Jersey, USA, pp. 202-207.
- [142] Adamowicz M., Albano A. (1976), Nesting two-dimensional shapes in rectangular modules, *Computer Aided Design*, Vol. 8, pp. 27-33.
- [143] Art R.C. (1966), An approach to the two dimensional irregular Cutting Stock Problem, Technical Report, 36-Y08, IBM Cambridge Scientific Centre Report.
- [144] Albano A. (1977), A Method to Improve Two-Dimensional Layout, *Computer Aided Design*, Vol. 9, pp. 48-52.
- [145] Marques V., Bispo C., Sentieiro J. (1991), A system for the compaction of two-dimensional irregular shapes based on simulated annealing, *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Kobe, Japan, pp. 1911-1916.
- [146] Oliveira J.F., Ferreira J.S. (1993), Algorithms for Nesting Problems, in *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Applied Simulated Annealing*, Vidal, X. and Rene, V.V. (eds), Springer-Verlag, pp. 255-273.

- [147] Konopasek, M. (1981), Mathematical Treatments of Some Apparel Marking and Cutting Problems, Technical Report, 99-26-90857-10, U.S. Department of Commerce Report.
- [148] Fujita K., Akagi S., HiroKawa N. (1993), Hybrid approach for optimal nesting using a genetic algorithm and a local minimization algorithm, *Advances in Design Automation*, Vol. 65, No. 1, pp. 477-484 .
- [149] Bounsaythip C., Maouche S. (1997), Irregular shape nesting and placing with evolutionary approach, Orlando, USA, 4, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 3425-3430.
- [150] Ratanapan K., Dagli C. H. (1997), An object based evolutionary algorithm for solving irregular nesting problems, *Proceedings for Artificial Neural Networks in Engineering Conference*, New York, 7, pp.383-388.
- [151] Foley J., van Dam A., Feiner S., Hughes J. (2003), *Computer Graphics: Principals and Practice in C (International Edition)*, Addison Wesley.
- [152] Ramesh Babu A., Ramesh Babu N. (2001), A genetic approach for nesting of 2-D parts in 2-D sheets using genetic and heuristic algorithms, *Computer Aided Design*, Vol. 33, pp. 879-891.
- [153] Albano A., Sapuppo G. (1980), Optimal Allocation of Two-Dimensional Irregular Shapes Using Heuristic Search Methods, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 10, No. 5, pp. 242-248.
- [154] Blazewicz J., Hawryluk P., Walkowiak R. (1993), Using a Tabu Search Approach for Solving the Two-Dimensional Irregular Cutting Problem, *Annals of Operations Research*, Vol. 41, pp.313-325.
- [155] Li Z., Milenkovic V. (1995), Compaction and separation algorithms for non-convex polygons and their applications, *European Journal of Operations Research*, Vol. 84, No. 3, pp. 539-561.
- [156] Milenkovic V. (1997), Rotational Polygon Overlap Minimization, *Proceedings of the 13th annual symposium on Computational Geometry*.
- [157] Milenkovic V. (1998), Rotational polygon overlap minimization and compaction, *Computational Geometry*, Vol. 10, pp. 305-318.
- [158] Dowsland K. A., Dowsland W. B., Bennell J. A. (1998), Jostling for position - local improvement for irregular cutting patterns, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, No. 6, pp. 647-658.
- [159] Grinde R. B., Daniels K. (1999), Solving an apparel trim placement problem using a maximum cover problem approach, *IIE Transactions*, Vol. 31, pp. 763-769.
- [160] Anand S., McCord C., Sharma R. (1999), An Integrated Machine Vision Based System for Solving the Non-Convex Cutting Stock Problem Using Genetic Algorithms, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 18, No. 6, pp. 396-415.
- [161] Oliveira J. F., Gomes A. M., Ferreira J. S. (2000), TOPOS - A new constructive algorithm for nesting problems, *OR Spektrum*, Vol. 22, No. 2, pp. 263-284

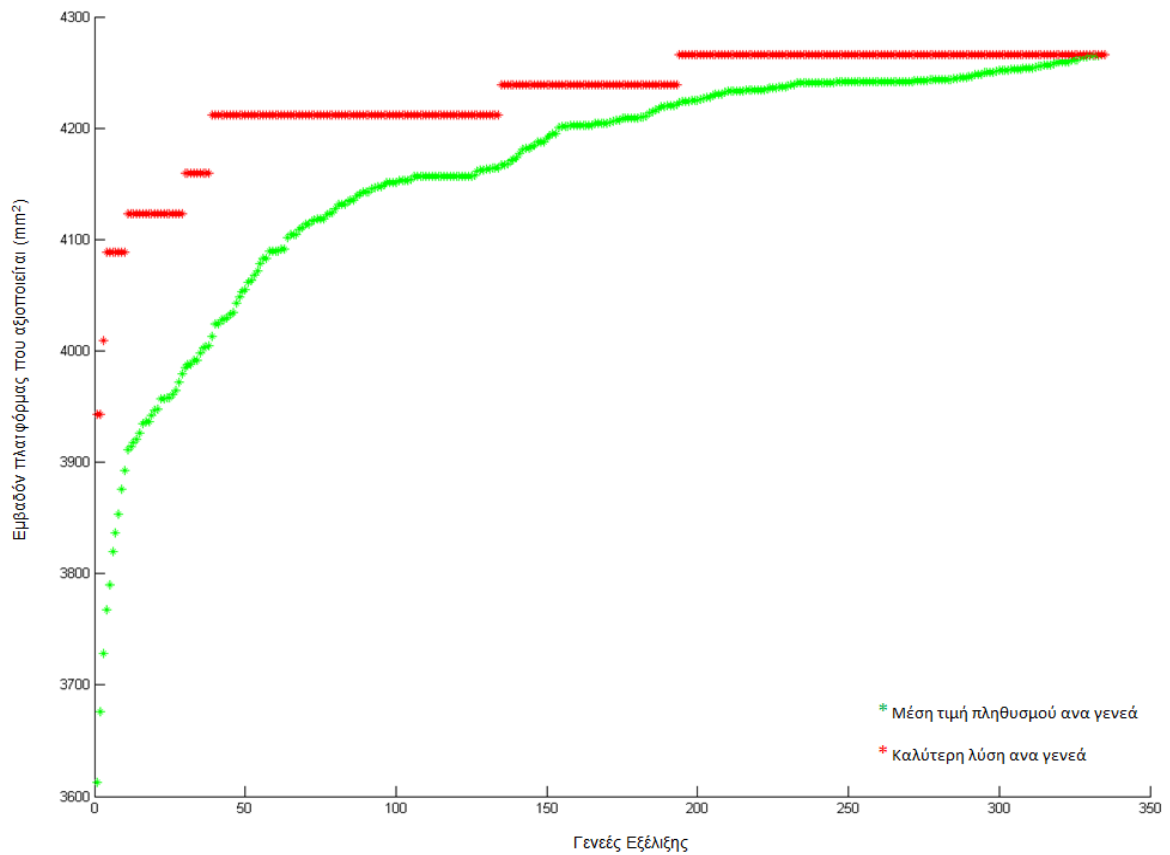
- [162] Gomes A. M., Oliveira J. F. (2002), A 2-exchange heuristic for nesting problems, *European Journal of Operations Research*, Vol. 141, pp. 359-370.
- [163] Gomes A. M., Oliveira J. F. (2001), A GRASP approach to the nesting problem, 4th Metaheuristics International Conference, Porto, Portugal, pp. 47-52.
- [164] Dowsland K. A., Dowsland W. B. (1993), Heuristic approaches to irregular cutting problems, Technical Report, Working Paper (EBMS/1993/13), European Business Management School, UC Swansea, UK .
- [165] Dowsland K. A., Vaid S., Dowsland W. B. (2002), An algorithm for polygon placement using a bottom-left strategy, *European Journal of Operations Research*, Vol. 141, pp.3 71-381.
- [166] Bennell J. A., Dowsland K. A. (1999), A tabu thresholding implementation for the irregular stock cutting. problem, *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 18, pp. 4259-4275.
- [167] Bennell J. A., Dowsland K. A. (2001), Hybridising Tabu Search with Optimisation Techniques for Irregular Stock Cutting, *Management Science*, Vol. 47, No. 8, pp. 1160-1172.
- [168] Hopper E. (2000), Two Dimensional Packing utilising Evolutionary Algorithms and other Meta-heuristic Methods, Ph.D Thesis, School of Engineering, University of Wales, Cardiff.
- [169] Whitwell G. (2004), Novel Heuristic and Metaheuristic Approaches to Cutting and Packing, Ph.D Thesis, School of Computer Science and Information Technology, University of Nottingham.
- [170] Burke E., Hellier R., Kendall G., Whitwell G. (2006), A new bottom-left-fill heuristic algorithm for the two dimensional irregular packing problem, *Operational Research*, Vol. 54, pp. 587–601.
- [171] Chua Chee Kai, Gan G. K. Jacob, Tong Mei (1997), Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems, Part 1: A Study of Existing Interfaces, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, pp. 566-570.
- [172] David Douglas, Thomas Peucker (1973), Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, *The Canadian Cartographer*, Vol. 10, No. 2, pp. 112–122.
- [173] Gomes A. M., Oliveira J. F. (2006), Solving irregular strip packing problems by hybridising simulated annealing and linear programming, *European Journal of Operations Research*, Vol. 171, pp. 811–829.
- [174] Egeblad J., Nielsen B.K., Odgaard A, (2007), Fast neighbourhood search for two- and three-dimensional nesting problems, *European Journal of Operations Research*, Vol. 183, pp. 1249–1266.
- [175] Sedgewick R. (1992), *Algorithms in C++*, Addison-Wesley, Reading.
- [176] Freeman H., Shapira R. (1975), Determining the minimum-area encasing rectangle for and arbitrary closed curve, *Comm ACM* 18 7, pp. 409–413.

- [177] Preparata F. P., Shamos M. I. (1985), Computational Geometry: An Introduction, Spinger-Verlag, New York.
- [178] Cuninghame-Green R. (1989), Geometry, shoemaking and the milk tray problem, New Scientist, Vol. 12, No. 50-53
- [179] Stoyan Y., Ponomarenko L.D. (1977), Minkowski sum and hodograph of the dense placement vector function, Technical Report, SER. A10, Reports of the SSR Academy of Science.
- [180] Bennell J. A., Dowsland K. A., Dowsland W. B. (2001), The irregular cutting-stock problem - A new procedure for deriving the no-fit polygon, Computers and Operations Research, Vol. 28, pp. 271-287.
- [181] Scheithauer G., Terno J. (1993), Modelling of Packing Problems, Optimization, Vol. 28, pp. 63-84
- [182] Dean H. T., Yiliu Tu, Raffensperger J. F. (2006), An improved method for calculating the no-fit polygon, Vol. 33, No. 6, pp. 1521-1539.
- [183] Alev Soke, Zafer Bingul (2005), Comparison of Meta-heuristic Hybrid Approaches for Two Dimensional Non-guillotine Rectangular Cutting Problems, Advances in Natural Computation, Lecture Notes in Computer Science, Vol.3612/2005, pp.1304-1307.

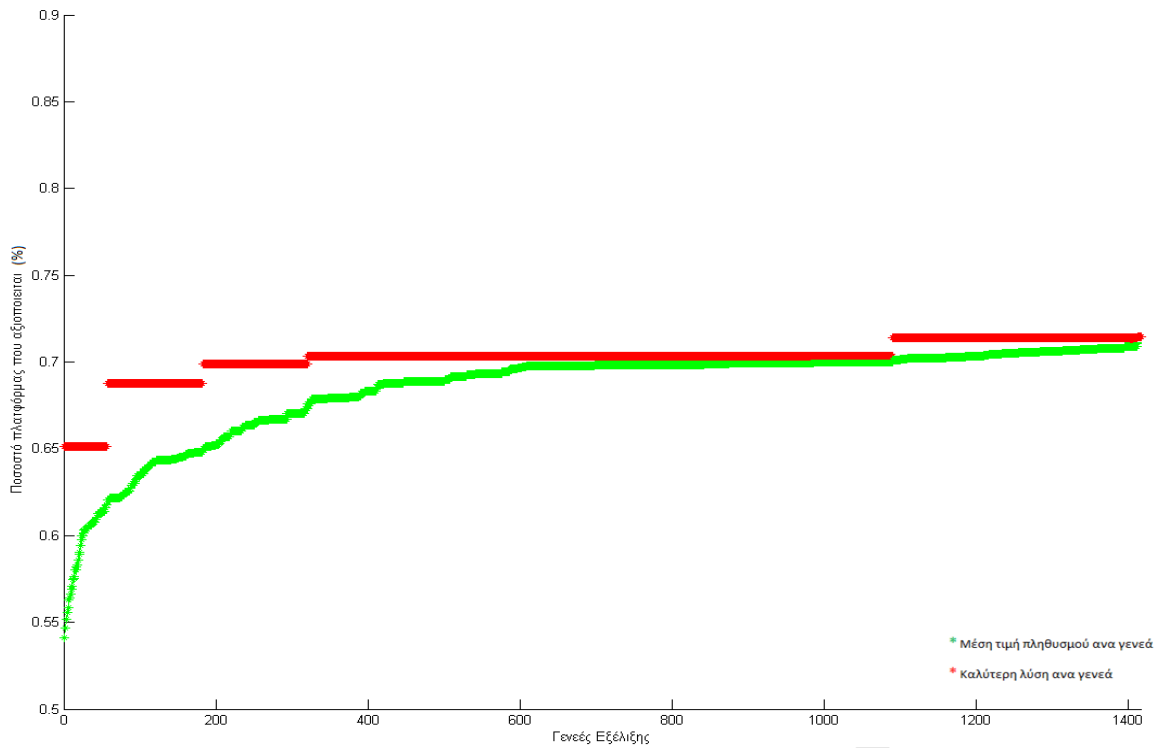
Παράρτημα Π1



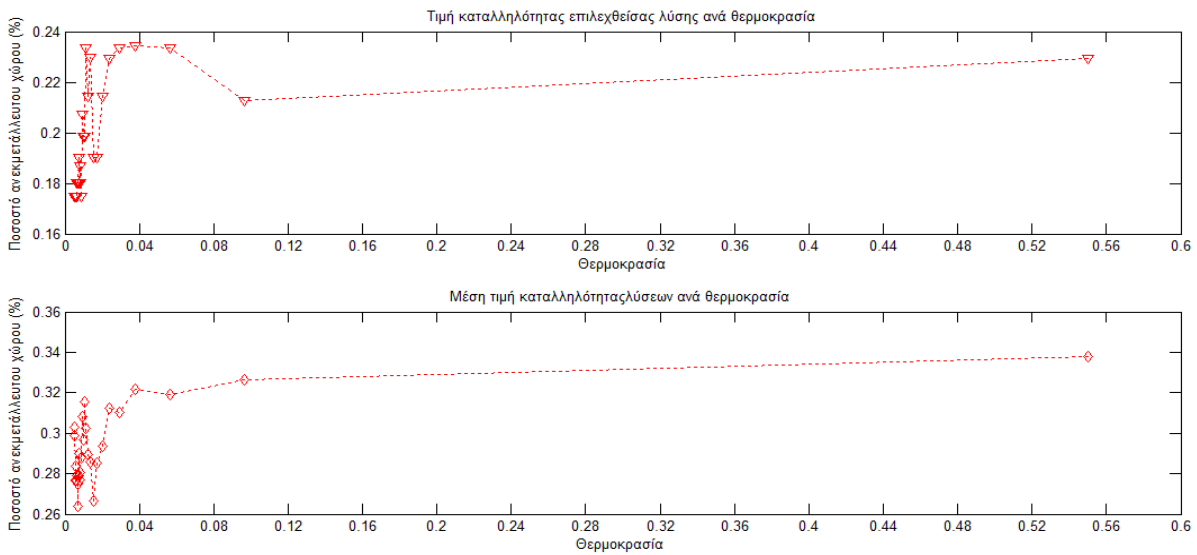
Π1- 1 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Albano με χρήση ΓΑ και LBDB&TBA



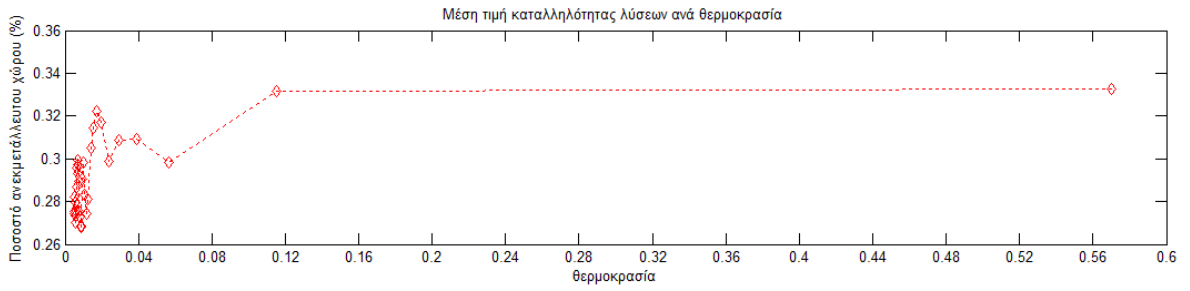
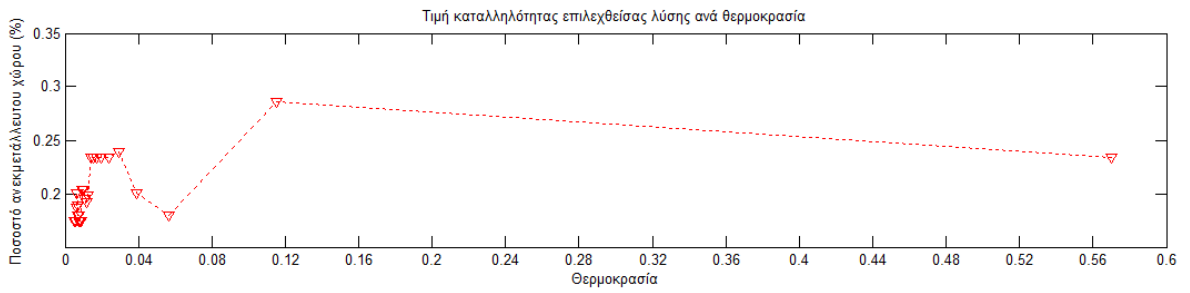
Π1- 2 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Albano με χρήση ΓΑ και LBDB&NFP



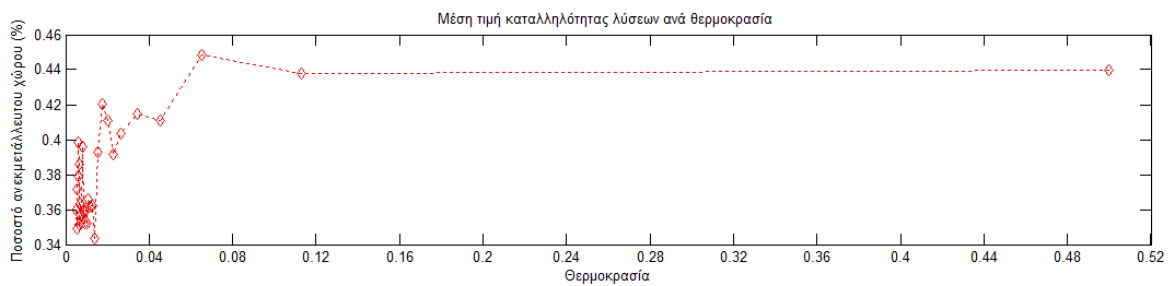
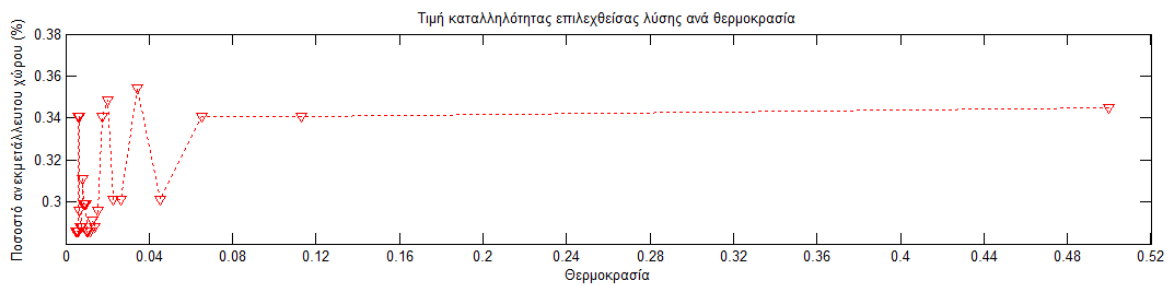
Π1- 3 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Albano με χρήση ΓΑ και NFP



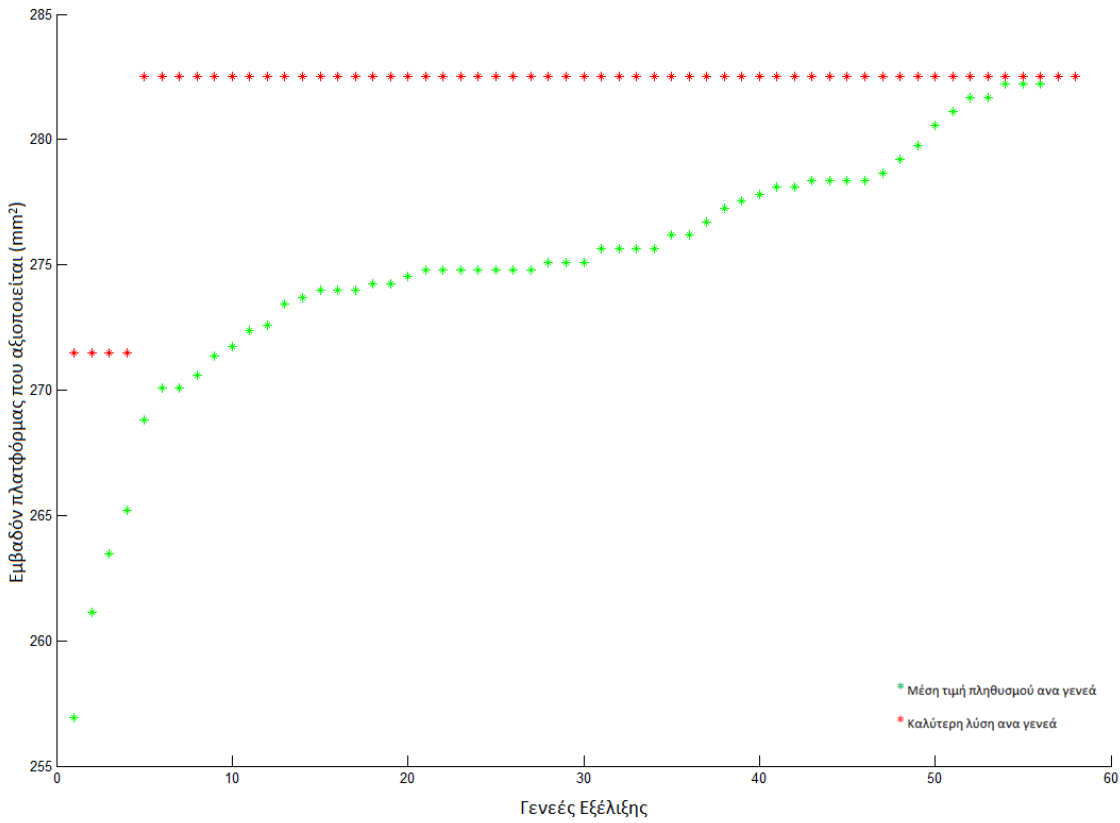
Π1- 4 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεγείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και LBDB&TBA για το πρόβλημα αναφοράς Albano.



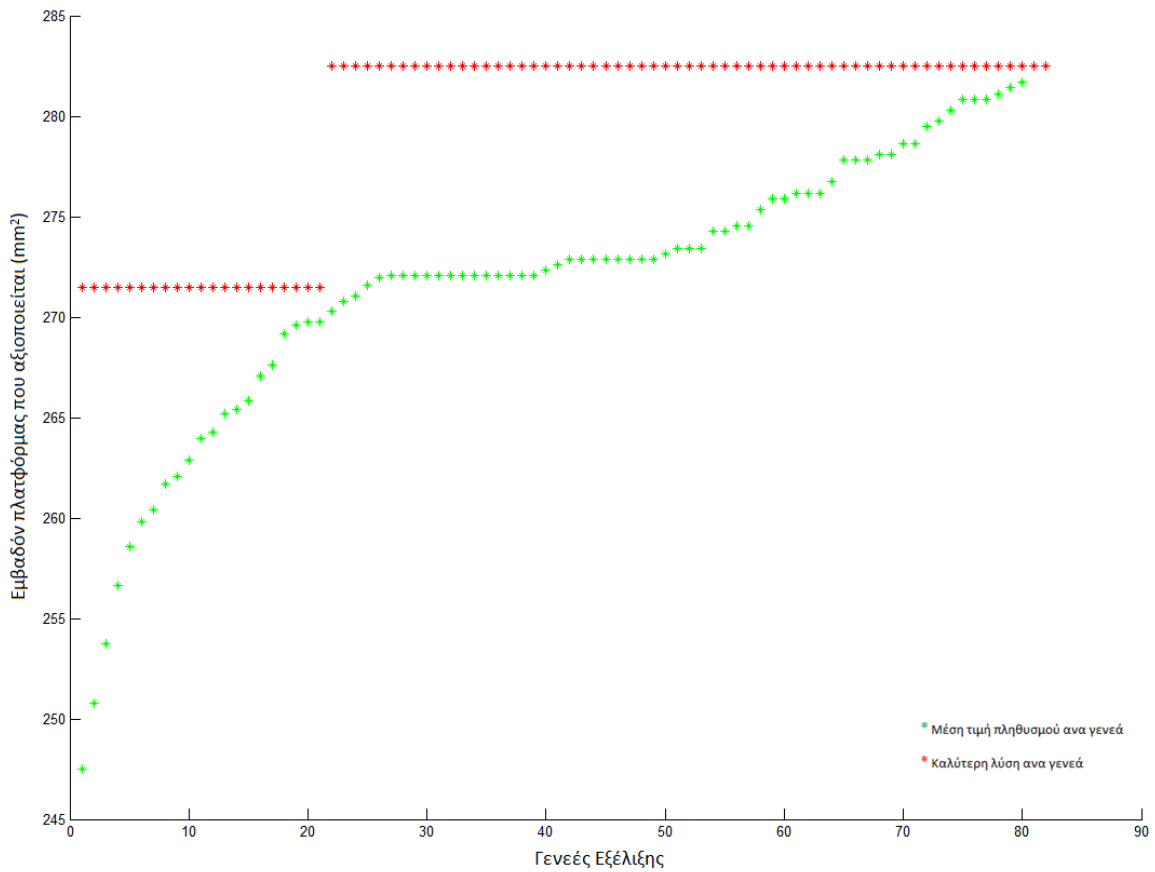
Π1- 5 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεγείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και LBDB&NFP για το πρόβλημα αναφοράς Albano.



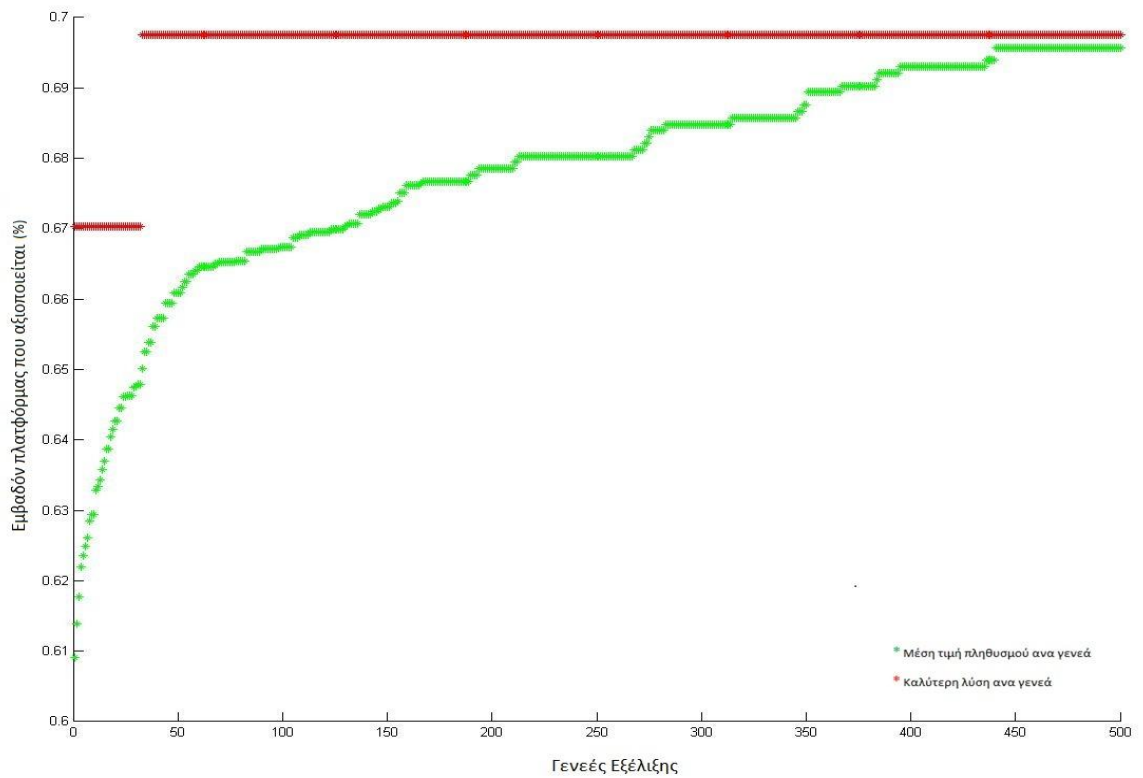
Π1- 6 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεγείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και NFP για το πρόβλημα αναφοράς Albano.



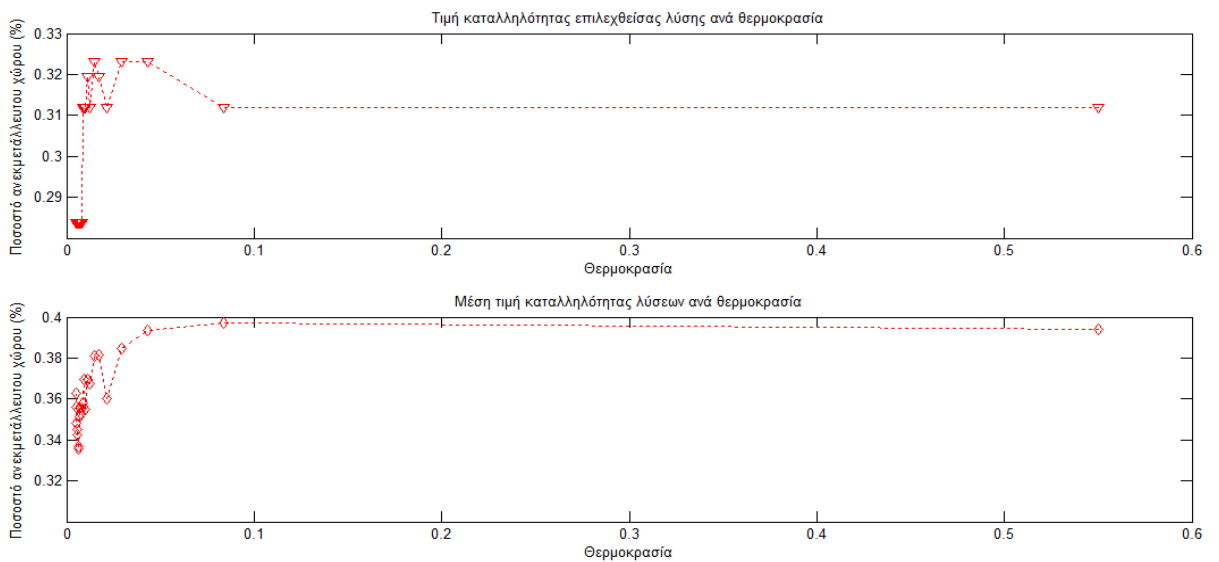
Π1- 7 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Blazewich με χρήση ΓΑ και LBDB&TBA



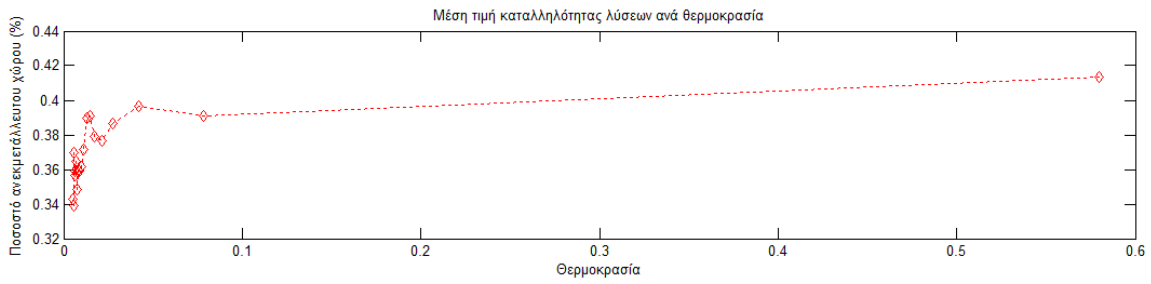
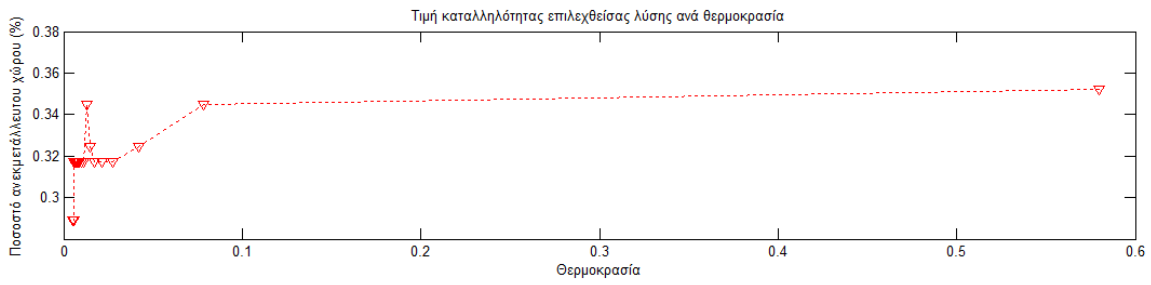
Π1- 8 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Blazewich με χρήση ΓΑ και LBDB&NFP



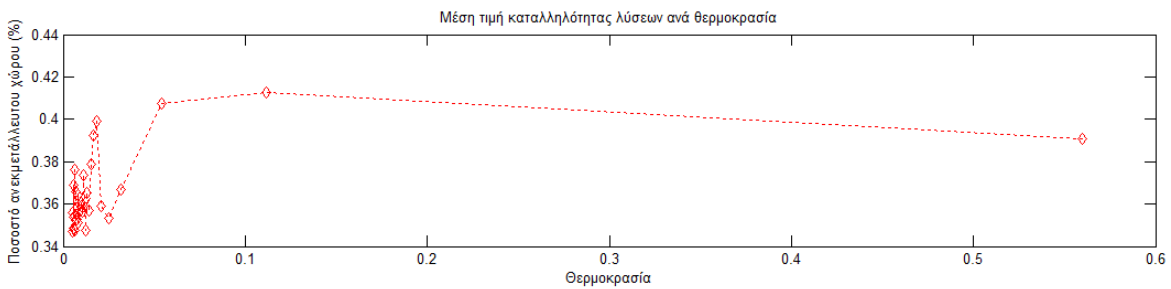
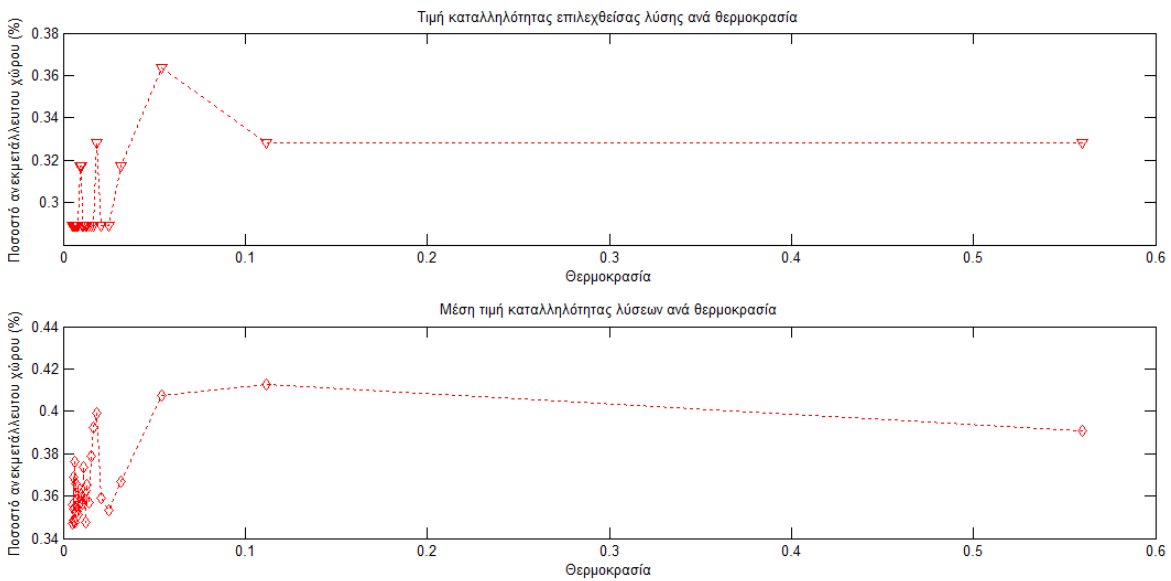
Π1- 9 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Blazewich με χρήση ΓΑ και NFP



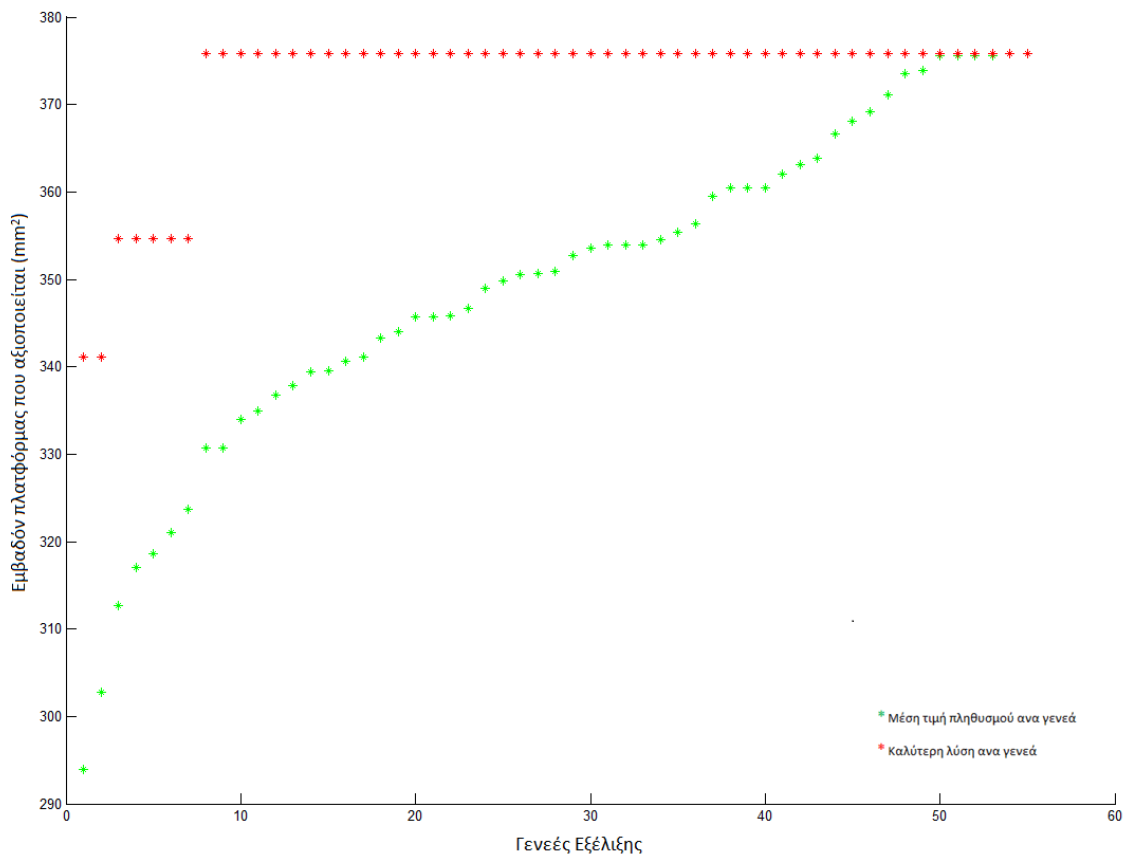
Π1- 10 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεγθείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και LBDB&TBA για το πρόβλημα αναφοράς Blazewich.



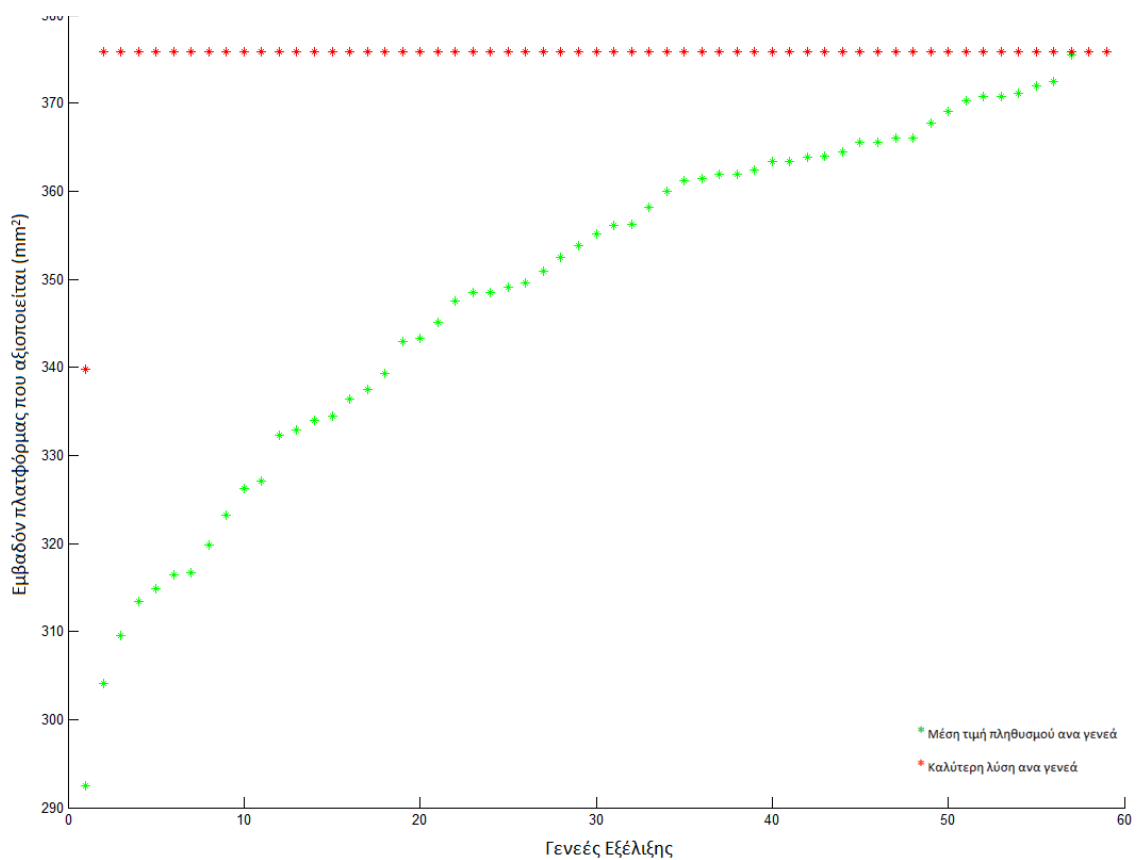
Π1- 11 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεχθείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και LBDB&NFP για το πρόβλημα αναφοράς Blazewich.



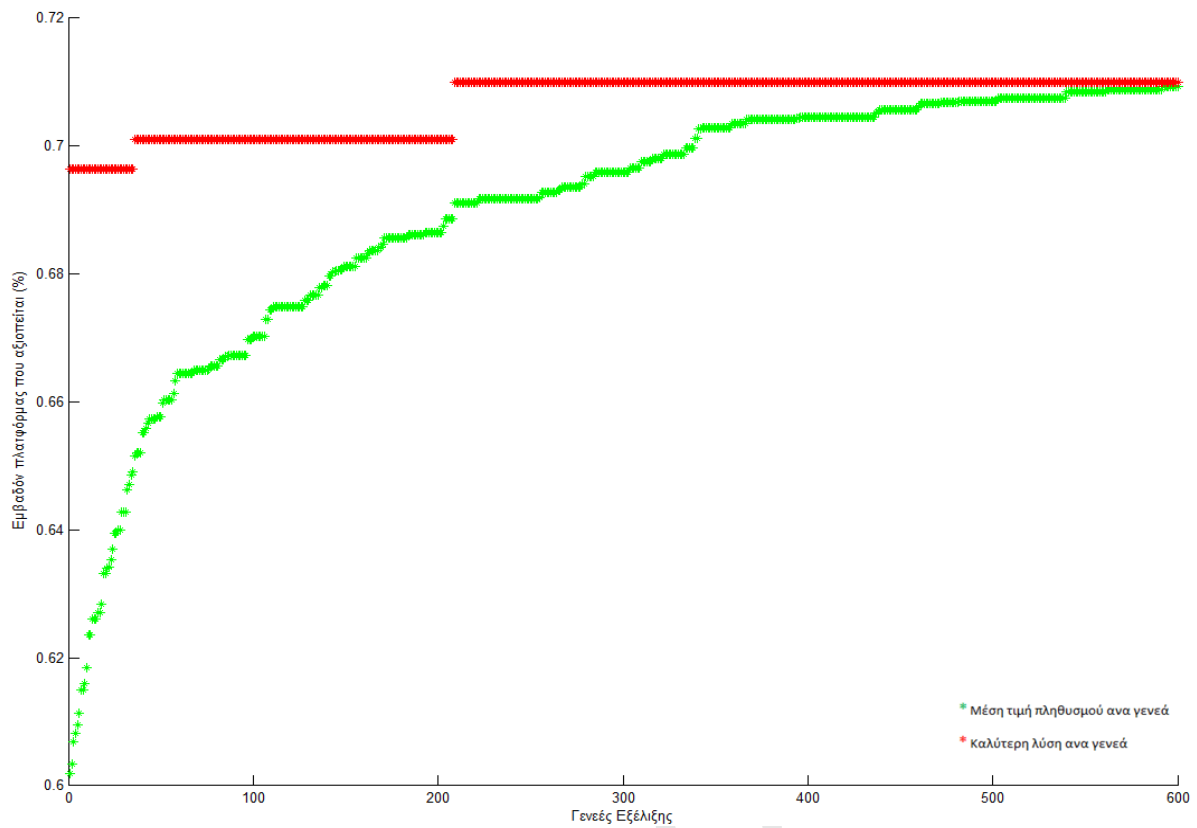
Π1- 12 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεχθείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και NFP για το πρόβλημα αναφοράς Blazewich.



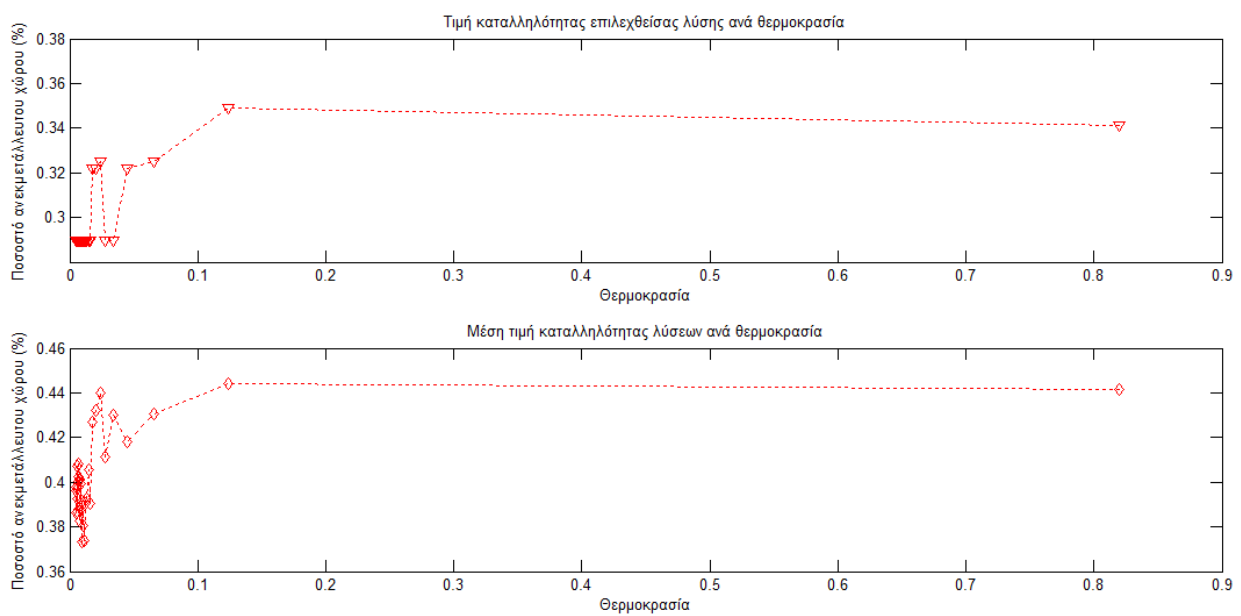
P1- 13 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Mao με χρήση ΓΑ και LBDB&TBA



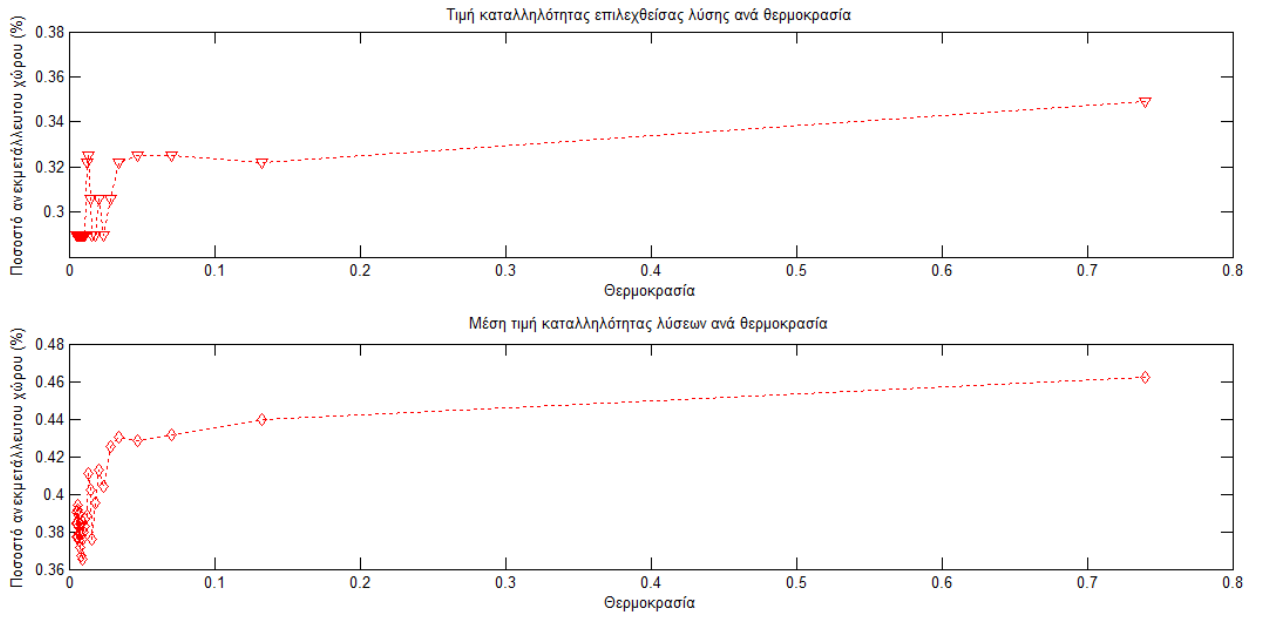
P1- 14 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Mao με χρήση ΓΑ και LBDB&NFP



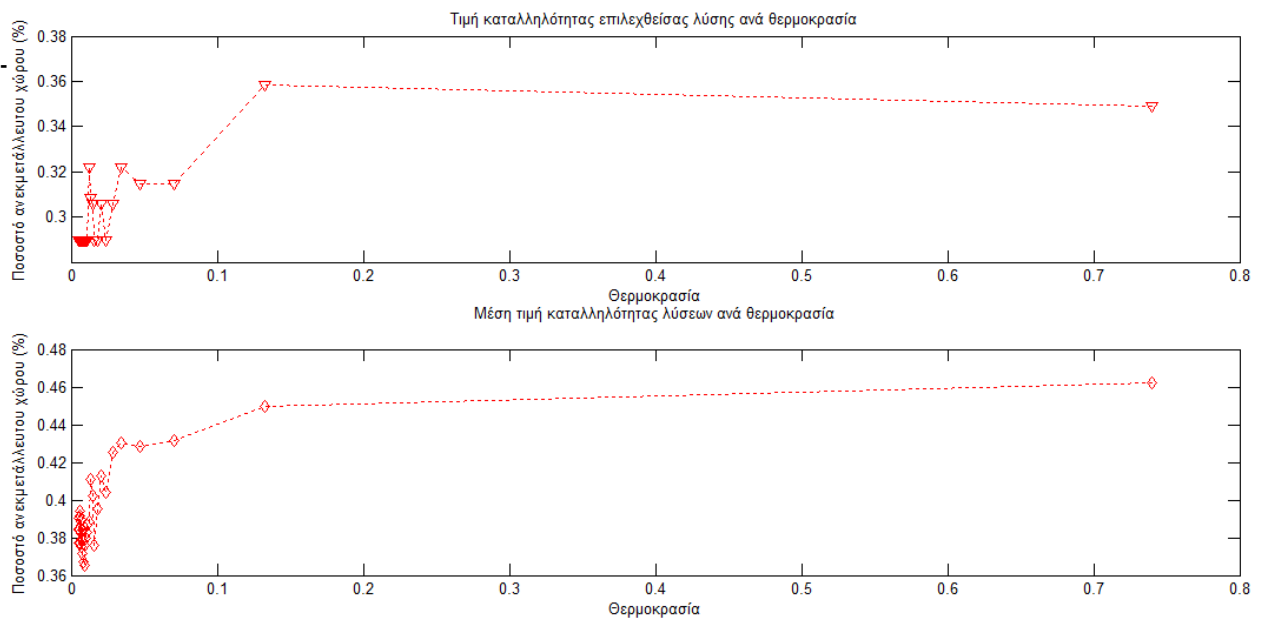
Π1- 15 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα αναφοράς Mao με χρήση ΓΑ και NFP



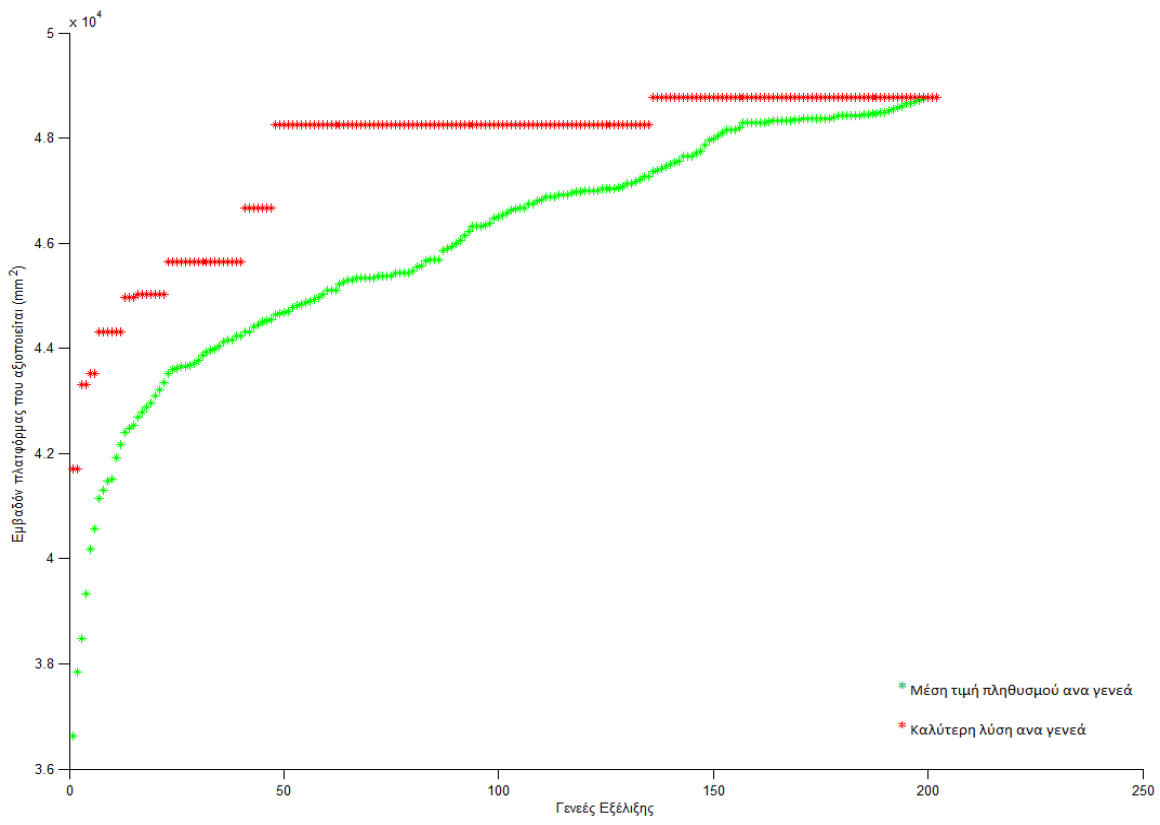
Π1- 16 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεχθείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και LBDB&TBA για το πρόβλημα αναφοράς Mao.



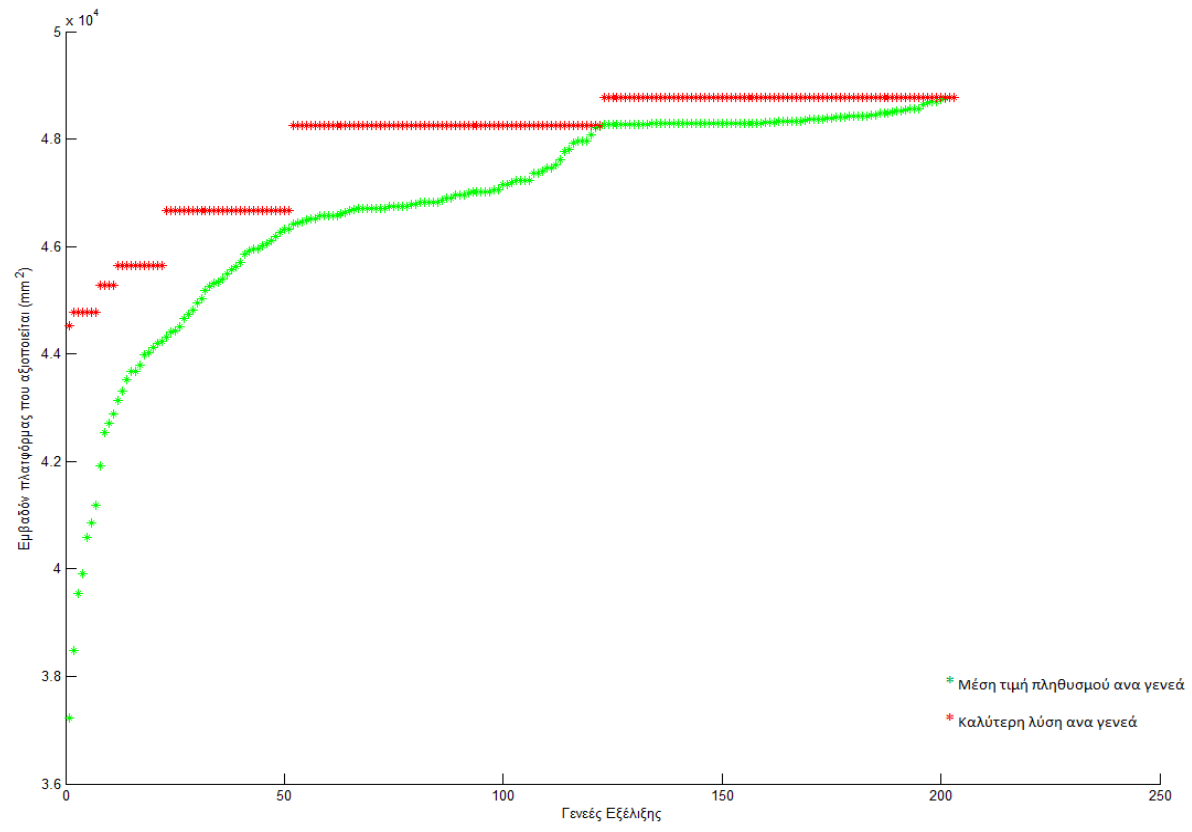
Π1- 17 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεχθείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και LBDB&NFP για το πρόβλημα αναφοράς Mao.



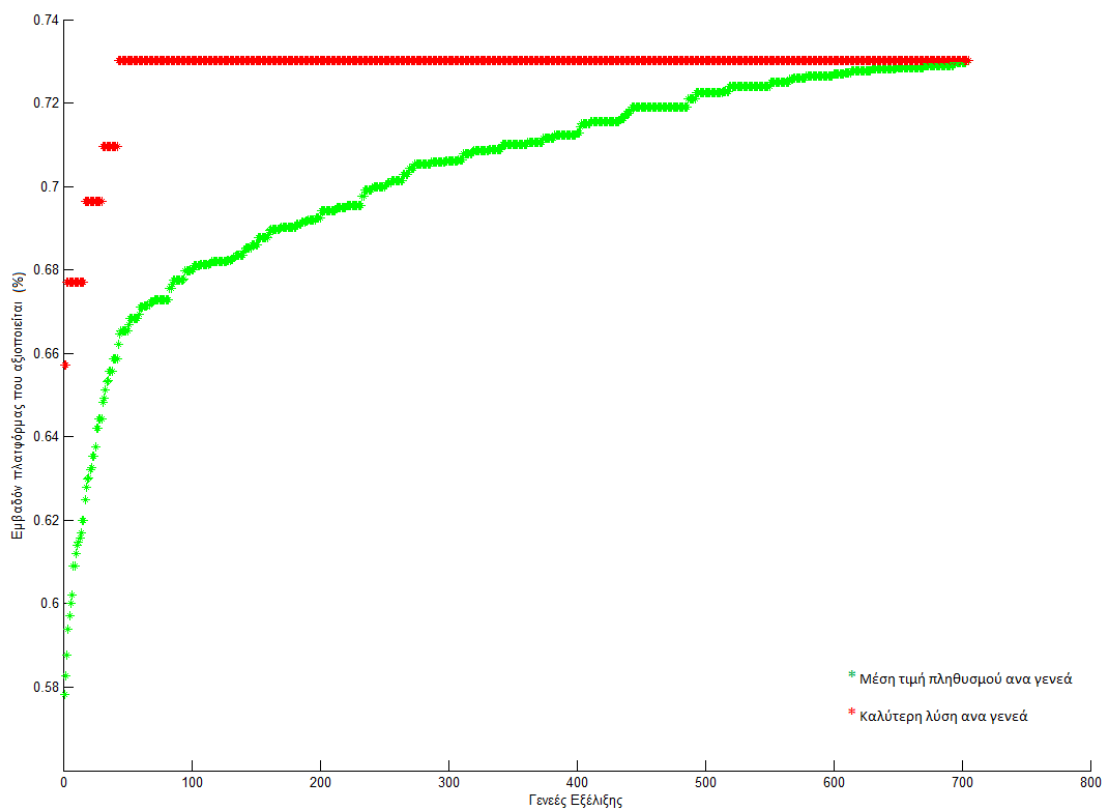
Π1- 18 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεχθείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και NFP για το πρόβλημα αναφοράς Mao.



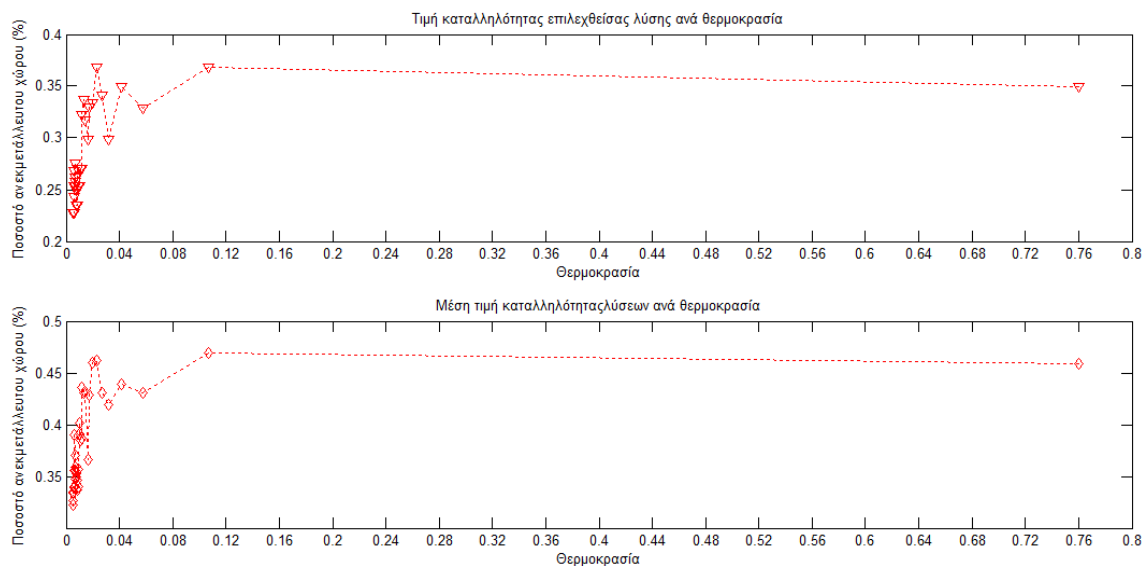
Π1- 19 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα πραγματικών αντικειμένων με χρήση ΓΑ και LBDB&TBA



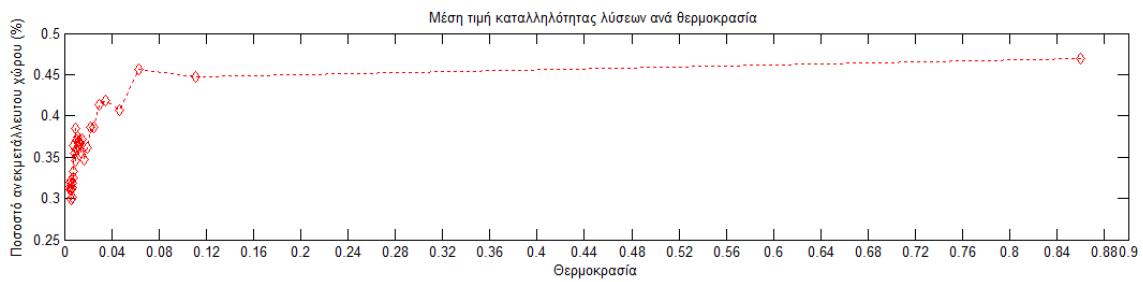
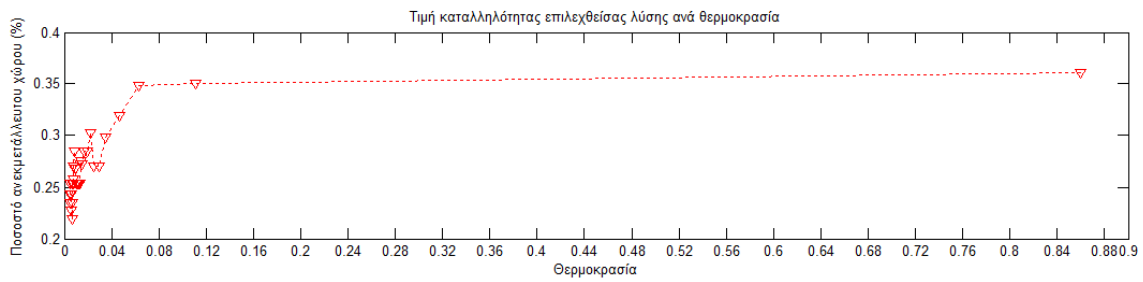
Π1- 20 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα πραγματικών αντικειμένων με χρήση ΓΑ και LBDB&NFP



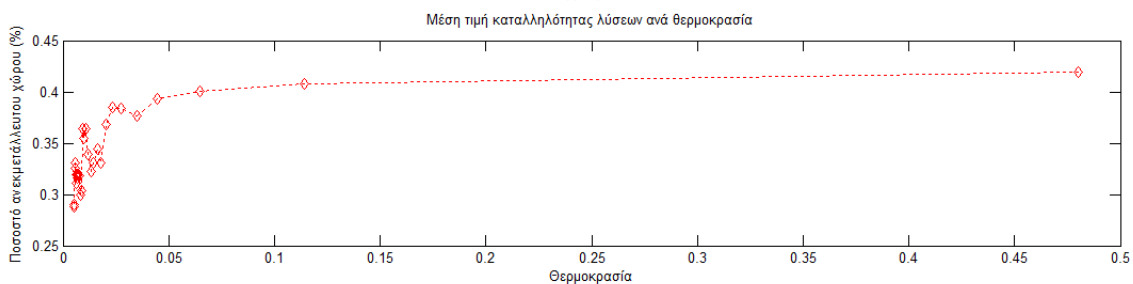
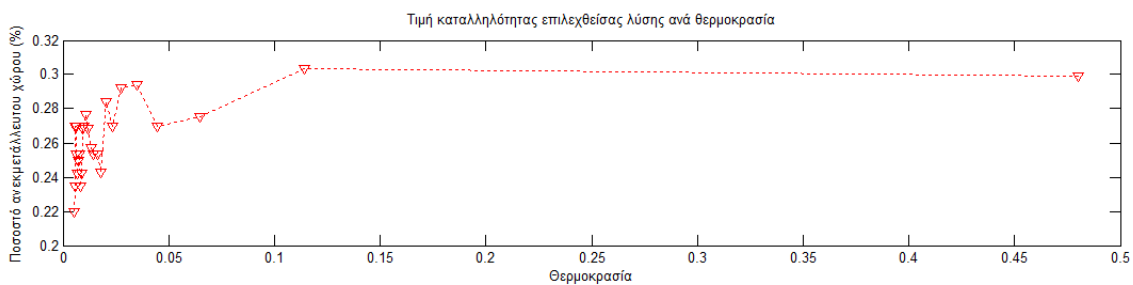
Π1- 21 Διάγραμμα μέσης τιμής καταλληλότητας και καλύτερης λύσης ανά γενεά εξέλιξης για το πρόβλημα πραγματικών αντικειμένων με χρήση ΓΑ και NFP



Π1- 22 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεγείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και LBDB&TBA για το πρόβλημα πραγματικών αντικειμένων.



Π1- 23 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεγθείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και LBDB&NFP για το πρόβλημα πραγματικών αντικειμένων.



Π1- 24 Διάγραμμα τιμής καταλληλότητας επιλεγθείσας λύσης και μέσης τιμής καταλληλότητας ανά θερμοκρασία με χρήση ΠΑ και NFP για το πρόβλημα πραγματικών αντικειμένων.